

Исследование моно- и поликапиллярных рентгеновских микропучков

Романов А.Ю.

Институт рентгеновской оптики, Москва, Россия

e-mail: androm2@yandex.ru; androm@iroptic.ru

В оптике Кумахова (ОК) управление рентгеновским излучением (РИ) осуществляется на основе его прохождения через полые трубки - монокапилляры, собранные в пучки различных конфигураций, благодаря полному внешнему отражению (ПВО) от стенок [1]. В настоящее время на базе ОК в Институте рентгеновской оптики (ИРО) создано новое поколение приборов: флуоресцентные спектрометры, рефлектометры, дифрактометры, и комбинации нескольких приборов в одном [1,2]. Значительное количество приложений объясняется такими отличительными особенностями ОК как широкополосность (0,1-60 кэВ) [3,4] и высокая апертура (~0,1 рад).

Применение рентгенооптических систем ОК позволяет получить микропучки РИ с высокой плотностью потока на основе обычных маломощных рентгеновских трубок. Так, микрофокусные полулинзы с фокусными расстояниями порядка миллиметра позволяют получать пучки РИ с расходимостью на уровне критических углов ПВО, и плотностью порядка 10^{10} фотонов/(с мм^2) монохроматического характеристического излучения [5,6]. Но при этом площадь поперечного сечения таких пучков определяется выходным диаметром полулинзы, составляющим величину порядка миллиметра.

В [7,8] получены интенсивные квазипараллельные рентгеновские микропучки с плотностью потока излучения близкой к синхротронной на выходе системы микрофокусный рентгеновский генератор/цилиндрическая поликапиллярная система. В [9,10] рассматривается приложение данного способа получения микропучков к схеме сканирующей рентгеновской микроскопии на основе растровой рентгеновской системы источник/детектор.

В данной работе проведено исследование и сравнение традиционных монокапиллярных рентгеновских микропучков (МРМ) и относительно новых [7,8] - поликапиллярных рентгеновских микропучков (ПРМ). Рассмотрены свойства МРМ и ПРМ, получаемых в схеме микрофокусный рентгеновский источник – моно- или поликапиллярная структура. Измерения

проводились на автоматизированном стенде для исследования оптики Кумахова [11,12]

Исследование МРМ. Экспериментально исследованы стеклянные монокапилляры, созданные в ИРО, с целью получения интенсивных рентгеновских микропучков и сравнения МРМ и ПРМ. Зависимость коэффициента пропускания монокапилляра от его длины для энергии РИ 8 кэВ приведена на рис.1. Используются следующие значения параметров источника: медный анод; напряжение 40кВ; ток 25мкА; диаметр фокусного пятна - 10 мкм. Внешний диаметр монокапилляра составлял 5 мм, внутренний – 10 мкм. Расстояние между источником и

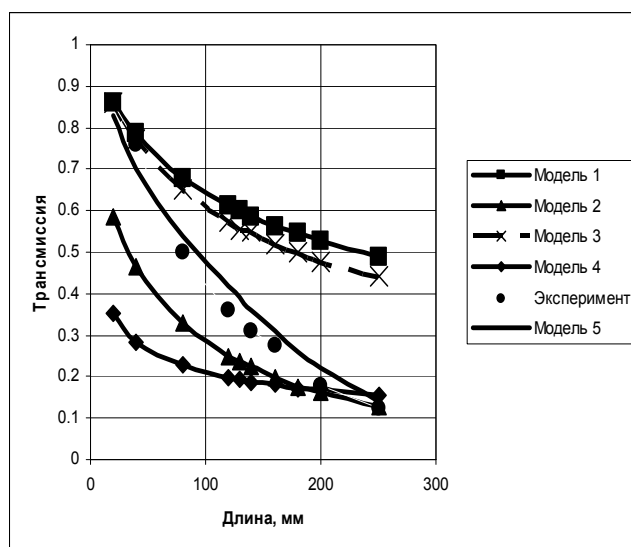


Рис.1 Данные эксперимента и моделирования зависимости трансмиссии монокапилляра от его длины: Модель 1: по Вангу, коэффициент $\Delta\theta_{\max} = 3 \cdot 10^{-4}$; Модель 2: по Вангу, коэффициент $\Delta\theta_{\max} = 2,25 \cdot 10^{-3}$; Модель 3: по Винцу, коэффициент $\sigma = 4,5 \text{ \AA}^0$; Модель 4: по Винцу, коэффициент $\sigma = 40 \text{ \AA}^0$; Модель 5: коэффициент $\sigma = 2 \text{ \AA}^0$; $\Delta\theta_{\max} = 2 \cdot 10^{-5}$; $R_{\text{изг}} = 25 \text{ м}$.

капилляром было минимально возможным (~0,2 мм).

Изменение выходной интенсивности от расстояния между источником и входным торцом исследовалось для капилляра внутренним диаметром 10 мкм и длиной 12 см, при следующих параметрах источника: медный

анод, напряжение 30кВ, ток 10мкА, средний размер фокусного пятна трубки - 10 мкм. Рассчитанная из полученных данных зависимость для трансмиссии представлена на рис.2.

Зависимость выходной интенсивности от размера фокусного пятна рентгеновской трубки исследовалась для монокапилляра длиной 12 см с внутренним диаметром 10 мкм, при минимальном расстоянии монокапилляра /источник (~ 0,2 мм). Параметры источника: напряжение 30 кВ и ток 10 мкА. Рассчитанная из полученных данных зависимость трансмиссии от плотности мощности в пятне представлена на рис.3.

Исследование ПРМ. Исследованы характеристики ряда поликапилляров, созданных в ИРО. Определялась зависимость трансмиссии прямого поликапилляра от его длины, посредством последовательных циклов обрезания капилляра и измерений. Значения трансмиссии поликапилляра в данном диапазоне энергий оказались близки к значениям трансмиссии монокапилляра, полученным в наших исследованиях. Экспериментальные результаты зависимости пропускания от длины хорошо согласуются и с независимыми исследованиями (например, [13, 14]).

Расходимость ПРМ предполагается в рамках геометрооптической модели равной двум критическим углам. Детального

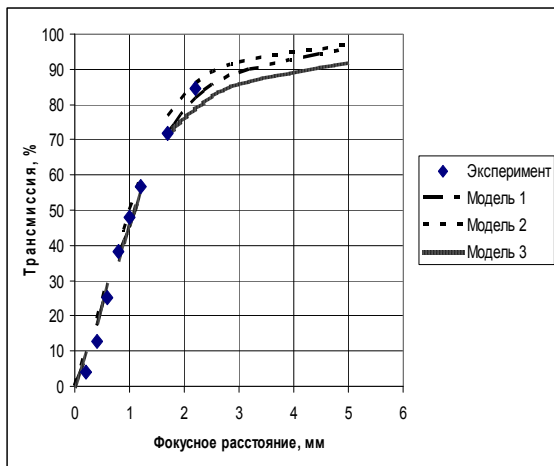


Рис.2 Данные эксперимента и моделирования зависимости трансмиссии монокапилляра от расстояния до источника: Модель 1 - по Винцу и Вангу, коэффициенты $\sigma = 5 \text{ A}^0$, $\Delta\theta_{\max} = 3 \cdot 10^{-4}$; Модель 2 - по Винцу и Вангу, коэффициенты $\sigma = 0,5 \text{ A}^0$, $\Delta\theta_{\max} = 3 \cdot 10^{-4}$; Модель 3 - по Винцу и Вангу, коэффициент $\sigma = 0,5 \text{ A}^0$, $\Delta\theta_{\max} = 6 \cdot 10^{-4}$

экспериментального рассмотрения характеристик расходимости в литературе нет. Нами экспериментально рассмотрены характеристики расходимости интенсивных квазипараллельных микропучков на выходе

системы: микрофокусный рентгеновский генератор/цилиндрическая поликапиллярная система посредством сканирования пучка ножом.

В области, близкой к торцу наблюдается эффект уменьшения эффективной расходимости (рис.4). Это вызвано характерным перераспределением поля излучения источника поликапиллярной структурой. Значения диаметра в области вблизи к торцу отображают размер источника [15]. На максимальную же

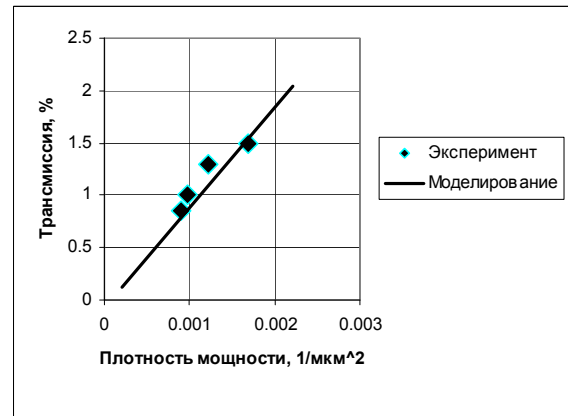


Рис.3 Зависимость трансмиссии монокапилляра от плотности мощности в фокусном пятне

расходимость, определяемую локальной расходимостью – то есть обеспечиваемую углом многократного полного внешнего отражения, микропучок, по-видимому, выходит на расстоянии $F_{m.d.}$, определяемом значением диаметра фокусного пятна трубки $d_{f.s.}$ и максимальной расходимости $Q_{\max} \sim \vartheta_{кр}$, определяемой расходимостью пучка отдельного монокапилляра, пропорциональной критическому углу ПВО $\vartheta_{кр}$:

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

то есть когда все скрытые монокапиллярные микропучки начинают участвовать в формировании расходимости поликапиллярного микропучка. Отсюда диаметр поликапиллярного пучка d на расстоянии от выходного торца f

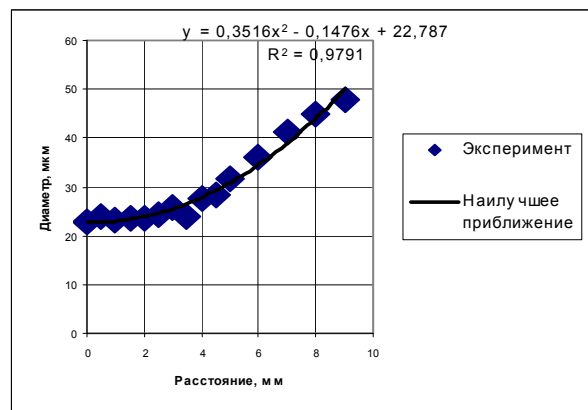


Рис.4 Зависимость диаметра сечения пучка на выходе поликапиллярного столбика от расстояния от выходного торца столбика: длина столбика 30 мм.

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 можно как

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

Исследована зависимость максимальной расходимости ПРМ от длины поликапилляра. Максимальная расходимость определялась из зависимости диаметра сечения

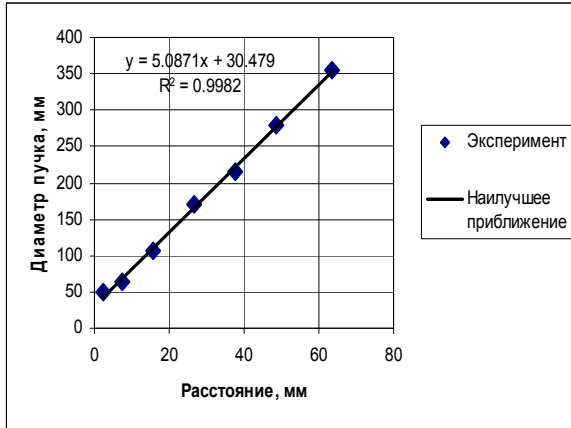


Рис.5 Изменение диаметра ПРМ на участке максимальной расходимости

поликапиллярного микропучка от расстояния между местом сечения ножом и выходным торцом поликапиллярной структуры. Тангенс угла касательной к кривым данных зависимостей, характеризующий расходимость, брался на участке максимальной расходимости. Изменение диаметра пучка на участке максимальной расходимости представлено на рис. 5.

Исследуемые поликапиллярные структуры имели внешний диаметр 2,5 мм, внутренний диаметр капилляра – 2,5 мкм. Полученная зависимость представлена на рис.6. Наблюдали эффект уменьшения максимальной расходимости с увеличением длины поликапиллярной системы.

Статистическое моделирование прохождения РИ через капиллярные структуры. Для расчёта угла отражения применялась трёхмерная модель на основе модели Дабагова и др. [16] разыгрывались 2 угла: α и θ , исходя из которых, затем рассчитывали угол падения на стенку:

$$\alpha_{ref} = \arccos \left\{ \frac{\cos \alpha}{\cos[\arctan(\tan \alpha \cdot \sin \theta)]} \right\} \quad (4)$$

и длину пробега одного отражения:

$$h = 2R \cos \theta \cdot \cot \alpha, \quad (5)$$

где R – радиус капилляра.

Использовалось выражение для диэлектрической проницаемости вида:

$$\varepsilon = 1 - \alpha + i\beta, \quad (6)$$

где $0 < \alpha \ll 1, \beta \ll 1$.

Величина α - определяет угол полного внешнего отражения:

$$\theta_\phi = \sqrt{\alpha}, \quad (7)$$

Коэффициент отражения рентгеновских лучей от вещества рассчитывается согласно [17]:

$$R_s = \frac{(a - \sin \theta)^2 + b^2}{(a + \sin \theta)^2 + b^2}; \quad (8)$$

$$R_p = R_s \frac{(a - \cos \theta \operatorname{ctg} \theta)^2 + b^2}{(a + \cos \theta \operatorname{ctg} \theta)^2 + b^2} \quad (9),$$

где

$$a^2 = 0,5 \cdot [\sqrt{(\sin^2 \theta - \alpha)^2 + \beta^2} + (\sin^2 \theta - \alpha)]$$

$$b^2 = 0,5 \cdot [\sqrt{(\sin^2 \theta - \alpha)^2 + \beta^2} - (\sin^2 \theta - \alpha)]$$

Для неполяризованного излучения:

$$R = (R_s + R_p) / 2. \quad (10)$$

Учитывались все основные типы отклонений отражающей поверхности капилляра от идеальной: шероховатость, волнистость и изгиб. В одной из наиболее известных моделей учёта шероховатостей, основанной на подходе Дебая при рассмотрении влияния тепловых колебаний кристаллической решётки на рассеяние РИ, применяется экспоненциальный коэффициент ослабления для модификации френелевского коэффициента отражения R_F :

$$R = R_F \cdot \exp[-(4\pi\sigma \cdot \sin \theta / \lambda)^2], \quad (11)$$

где R – коэффициент отражения шероховатой поверхности, λ - длина волны и θ - угол падения рентгеновского излучения, σ - варьируемый параметр, характеризующий шероховатость. Использование данной модели для капиллярной оптики представлено в работе Винца и др. [18].

Учёт волнистости поверхности в модели Ванга и др. [19], применяемый нами, по сути, аналогичен модели шероховатости Аркадьева, основанной на случайной добавке к углу отражения в определённом интервале [14]. Дополнительно представлены ограничения на отрицательные углы:

$$-\Delta\theta_{max} \leq \Delta\theta \leq \Delta\theta_{max}, \text{ если } \theta \geq \Delta\theta_{max} \quad (12)$$

и

$$-\theta \leq \Delta\theta \leq \Delta\theta_{max}, \text{ если } \theta < \Delta\theta_{max}, \quad (13)$$

где θ - угол падения, $\Delta\theta_{max}$ - предельная величина отклонения угла отражения от зеркального.

В случае наличия изгиба у капилляра при каждом последующем отражении к углу отражения добавлялось значение $\Delta\alpha_{ref}$, определяемое наклоном касательных

плоскостей к капилляру в точках падения ввиду изгиба капилляра:

$$\Delta\alpha_{ref} = (-1)^n h / R_{изгиб}, \quad (14)$$

где $R_{изгиб}$ – радиус кривизны капилляра, а n – номер отражения. Уменьшение длины пробега одного отражения вследствие изгиба считалось пренебрежимо малой величиной.

Представлены результаты моделирования зависимости трансмиссии монокапилляра от его длины (рис.1), от расстояния до источника (рис.2) и от размера фокусного пятна источника РИ (рис.3). Модельные данные достаточно качественно описывают экспериментальные.

На рис.7 представлены результаты моделирования зависимости расходимости от длины. Установлено, что экспериментальные данные достаточно хорошо описываются моделью Ванга. Значение коэффициента близко к полученному в [14] значению 10^{-4} .

Сравнение МРМ и ПРМ. Полученные на основе микрофокусных рентгеновских трубок максимальные плотности потока излучения как в МРМ, так и ПРМ составляют значения порядка 10^{10} фот/(с мм²), что близко к параметрам синхротронных источников (см., например, [20,21]). Но имеются следующие преимущества использования поликапиллярных структур перед монокапиллярными для целей

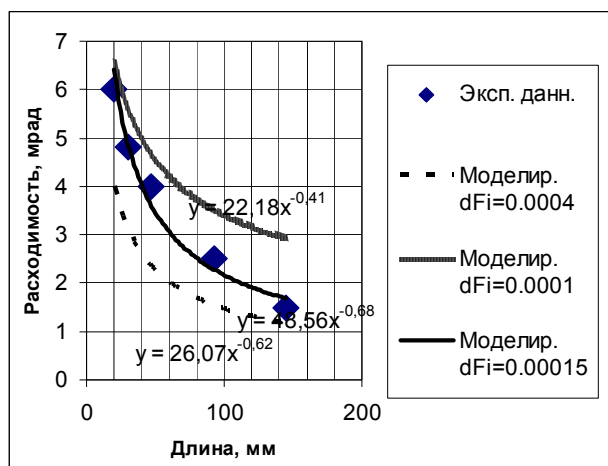


Рис.6 Данные эксперимента и моделирования зависимости максимальной расходимости от длины поликапилляра с учётом шероховатости по Вангу

получения интенсивных микропучков с источником на основе рентгеновской трубки.

1. Резко снижается трудность юстировки оптической системы относительно источника.

2. Появляется возможность получения сканирующего квазипараллельного микропучка посредством электронно-лучевого сканирования рентгеновского пятна трубки [9,10].

3. Выходное поле излучения поликапилляра отличается от такового для монокапилляра за счёт перераспределения излучения поликапиллярной структурой. Имеется эффект уменьшения общей

расходимости поликапиллярного микропучка в области, близкой к торцу поликапилляра.

4. За счёт использования более мелких капилляров, для получения требуемой расходимости требуется меньшая длина структуры, что также может быть преимуществом для приложений.

Выражаю благодарность за интерес к работе и ценные замечания проф. Кумахову М.А., а также технологическому отделу ИРО во главе с Никитиной С.В. за предоставленные для экспериментов рентгенооптические системы.

[1] X-ray and neutron capillary optics. Proc. SPIE. 2005. V.5943. 336 p.

[2] www.iroptic.ru; www.unisantis.com

[3] Романов А.Ю. Письма в ЖТФ. 2005. Т.31. №5 С.47-51.

[4] Романов А.Ю. Поверхность. 2005. №8. С.49-51.

[5] Romanov A.Yu., Dmitriev I.V. Proc. intern. conf. XRMSROMN-2004 Chernogolovka: IPTM RAS. 2004. (CD).

[6] Mikhin O.V., Dabagov S.B., Gelever V.D., Priladyshev A.V. Preprint LNF-03/16 (P): 2003. www.lnf.infn.it

[7] Романов А.Ю., Дмитриев И.В. Письма в ЖТФ. 2004. Т.30. №18. С.65-69.

[8] Романов А.Ю., Дмитриев И.В. Поверхность. 2005. №8. С.32-34.

[9] Гелевер В.Д., Романов А.Ю. Письма в ЖТФ. 2005. Т.31. №5. С.52-57.

[10] Gelever V.D., Romanov A.Yu. Proc. SPIE. 2005. V.5943. P.313-317.

[11] Романов А.Ю., Дмитриев И.В., Акулов А.Ю. Поверхность. 2005. №2. С.17-22.

[12] Романов А.Ю. Известия вузов. Приборостроение. 2005. №1. С.34-39.

[13] Аркадьев В.А., Коломийцев А.И., Кумахов М.А. и др. Поверхность – 1987. – №2. – С.44–47.

[14] Arkadiev V.A., Budkov S.A., Kovantsev V.E. Optics of Beams. M: IROS. – 1993. – P.27-32.

[15] Романов А.Ю. Измерительная техника. 2004. №7. С.20-22.

[16] Hampai D., Dabagov S.B., Cappuccio G. Preprint LNF-04/03(IR). – 2004. – 11 p.

[17] Зеркальная рентгеновская оптика. Под общ. ред. А.В. Виноградова. 1989. 463 с.

[18] Vincze L., Janssens K., Adams F., Rindby A., Engstrom P. Rev. Sci. Instr.. 1998. V.69. P.3494-3503.

[19] Wang H., Wang L., Gibson W.M., MacDonald C.A. Proc. SPIE. 1998. V.3444. P.643 – 651.

[20] Kumakhov M.A. X-ray spectrometry. 2000. V.29. P.343–348.

[21] Dolbnya I.P., Zolotarev K.V. X-ray microscopy IV, Chernogolovka, Russia. 1994. P.127-135.