

07;12

Формирование пучков рентгеновского излучения с помощью конусообразного микрокапилляра

© Ю.И. Дудчик, Ф.Ф. Комаров, Я.А. Константинов

Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко, 220064 Минск, Белоруссия

(Поступило в Редакцию 20 января 1997 г.)

Исследована возможность получения микропучков рентгеновского излучения заданной интенсивности с помощью системы, содержащей рентгеновскую трубку с прострельным анодом и конусообразный стеклянный микрокапилляр.

Рентгеновский волновод, выполненный в виде стеклянного микрокапилляра, имеющего длину 100–500 мм и диаметр канала 10–100 мкм, является новым элементом рентгеновской техники [1]. Рентгеновские лучи могут направленно распространяться в канале капилляра, последовательно отражаясь от стенок канала под малыми скользкими углами. Изгибая капилляр, можно изменить направление распространения рентгеновского излучения, а система, содержащая достаточное количество таких капилляров (обычно больше чем 100 элементов), изогнутых и расположенных таким образом, чтобы один конец капилляра был направлен на источник рентгеновского излучения, а второй в точку сбора энергии — фокус, фактически представляет "рентгеновскую линзу" [2]. С помощью такой линзы можно сфокусировать рентгеновские лучи с энергией фотонов 1–10 keV в пятно размером 5–10 мкм. В то же время для ряда приложений микроэлектроники имеется потребность в получении интенсивных микропучков рентгеновского излучения с размером фокусного пятна 1 мкм и меньше. Эту проблему, возможно, удастся решить с использованием одного микрокапилляра, выполненного в виде конуса или имеющего параболическую форму профиля канала в направлении оси канала. Рентгенооптические характеристики таких систем моделировались и исследовались экспериментально с использованием источников синхротронного излучения [3–6]. С другой стороны, широкое применение указанных конусообразных микрокапилляров может оказаться возможным только тогда, когда в качестве источника рентгеновского излучения будет использован компактный рентгеновский излучатель на базе рентгеновской трубки. О работе в данном направлении сообщается в [7,8].

Целью данной работы является исследование возможности получения микропучков рентгеновского излучения заданной интенсивности от системы, содержащей в качестве рентгенооптического элемента конусообразный стеклянный микрокапилляр и рентгеновскую трубку в качестве источника излучения.

Рассмотрим систему, содержащую точечный источник рентгеновского излучения и конусообразный микрокапилляр. Источник расположен на оси капилляра и на расстоянии d от торцевого входа (рис. 1). Капилляр

имеет длину L_c , радиус канала на выходе R_c и угол раствора конуса α_c . Радиус канала капилляра на входе $R = R_c + L_c \sin(\alpha_c)$. Источник испускает фотоны с энергией $\hbar\omega$. Фотоны распространяются в канале капилляра, многократно отражаясь от стенок канала, как показано на рис. 1.

Зависимость коэффициента отражения R рентгеновского излучения от гладкой поверхности материала с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1 - \delta + i\gamma$ от угла скольжения θ описывается известной формулой [1]

$$R = \frac{[\sqrt{2}x - (A + x^2 + 1)^{1/2}]^2 + A - (x^2 - 1)}{[\sqrt{2}x + (A + x^2 + 1)^{1/2}]^2 + A - (x^2 - 1)}, \quad (1)$$

где $A = (x^2 - 1) + y^2$, $x = \theta/\theta_c$, $y = \gamma/\delta$, $\theta_c = \delta^{1/2}$.

При отсутствии поглощения ($\gamma = 0$) рентгеновские лучи будут полностью отражаться от поверхности при углах скольжения θ , меньших критического угла полного внешнего отражения θ_c .

Цилиндрические микрокапилляры ($\alpha_c = 0$) могут быть использованы как коллиматоры, позволяющие получить расходящиеся микропучки рентгеновского излучения с радиусом фокусного пятна R_c и углом раствора конуса излучения $\theta < \theta_c$, где $\theta = R_c/d$. Длина капилляра L_c может быть оптимизирована исходя из конкретного значения мнимой части диэлектрической проницаемости γ [1].

Если интенсивность точечного источника излучения I_0 (phot/s · ster) известна, то максимальное значение интенсивности пучка фотонов на выходе из капилляра равно (в отсутствие поглощения) $I_0\pi\theta_c^2$ и получается в том случае, когда капилляр расположен на расстоянии $d = R_c/\theta_c$ от источника. Для стеклянного капилляра

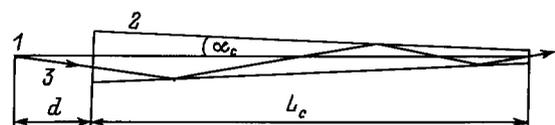


Рис. 1. Параметры системы для получения микропучков рентгеновского излучения. 1 — источник рентгеновского излучения, 2 — микрокапилляр, 3 — рентгеновские лучи.

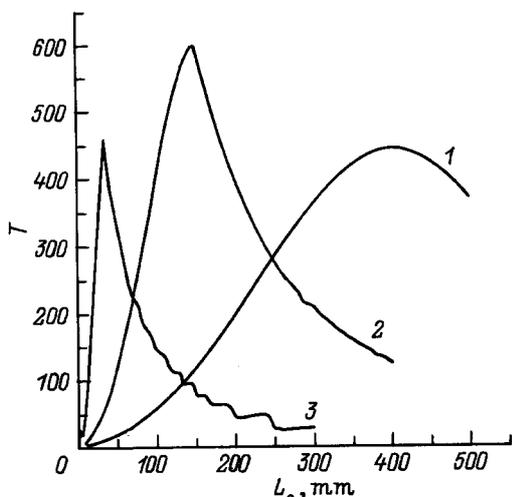


Рис. 2. Зависимость параметра T (выражение (2)) от длины микрокапилляра L_c при различных значениях угла раствора конуса α_c . α_c , rad: 1 — 0.01, 2 — 0.03, 3 — 0.1.

с $R_c = 1 \mu\text{m}$ и фотонов с энергией 8 keV значение параметра $d = 270 \mu\text{m}$.

Если в качестве источника излучения использовать микрофокусную рентгеновскую трубку, то оказывается, что в силу конструктивных особенностей указанных приборов невозможно разместить капилляр на достаточно близком расстоянии от фокуса трубки. Это расстояние (расстояние от фокуса трубки до выходного бериллиевого окна для рентгеновского излучения) для трубок с массивным анодом составляет величину 10–30 mm для трубок с прострельным анодом 0.5–1 mm [9]. Учитывая указанное обстоятельство, для формирования микропучка рентгеновского излучения имеет смысл использовать вместо цилиндрического капилляра капилляр, выполненный в виде конуса, длина которого L_c и угол раствора конуса могут быть оптимизированы при заданных значениях выходного радиуса R_c и расстояния от источника до входа в капилляр d .

На рис. 2 приведена рассчитанная зависимость параметра T , характеризующего эффективность капилляра, от его длины при различных значениях α_c . Параметр T определен таким образом, что он позволяет рассчитать интенсивность пучка рентгеновского излучения на выходе из капилляра I (phot/s) при известной интенсивности точечного источника излучения I_0 при помощи следующего выражения:

$$I = I_0 T \frac{\pi R_c^2}{d^2}. \tag{2}$$

Значения параметра T (рис. 2) получены методом моделирования траекторий рентгеновских лучей в конусообразном стеклянном капилляре с учетом поглощения излучения при отражении согласно формуле (1). Расчеты проведены для фотонов с энергией 8 keV, значения d указаны на рис. 2. Приведенные значения параметра T позволяют оценить величину потока фотонов через вы-

ходное отверстие капилляра от рентгеновской трубки как источника излучения. Если заданы рабочее напряжение на трубке U_a и ток анода i_a , то число характеристических фотонов материала анода трубки, испускаемых трубкой в телесный угол $d\Omega$ и в единицу времени t , рассчитывается по следующей формуле [9]:

$$\frac{d^2N}{d\Omega dt} = C i_a \left(\frac{U_a}{U_q} - 1 \right)^{1.67}, \tag{3}$$

где C — известный для заданного материала анода коэффициент, U_q — потенциал ионизации соответствующей оболочки атома мишени.

Число фотонов $(d^2N)/(d\Omega dt)$, испускаемых рентгеновской трубкой с площадью фокусного пятна S_a , связано с величиной I_0 , входящей в формулу (92), следующим соотношением:

$$I_0 = \frac{d^2N}{d\Omega dt} \frac{\pi R_c^2}{S_a}, \tag{4}$$

которое отражает факт невозможности сфокусировать излучение от источника в пятно, меньшее, чем размер источника.

Анализ развития микрофокусных рентгеновских трубок с прострельным анодом, в частности используемых в аппаратах типа РЕИС [10], позволяет сделать вывод о возможности изготовления трубок, имеющих следующие параметры: $U_a = 40 \text{ kV}$, $i_a = 0.5 \text{ mA}$, $S_a = 10 \times 10 \mu\text{m}$.

В таблице приведены рассчитанные значения числа фотонов I (K_α -серии) на выходе из системы, содержащей конусообразный микрокапилляр с указанными значениями радиуса выходного отверстия R_c и рентгеновскую трубку с прострельным анодом и указанными выше значениями U_a , i_a , S_a . Расстояние от фокусного пятна трубки до входа в капилляр предполагалось равным 5 mm. Длина капилляра и угол раствора конуса выбирались из условия достижения параметром T (рис. 2) максимального значения. При расчетах не учитывалось поглощение излучения в материале анода трубки и в бериллиевом окне. Как показали оценки, учет указанных факторов приводит к уменьшению величины I в 1.5–2 раза.

$R_c, \mu\text{m}$	α_c, mrad	L_c, mm	T	$I, \text{phot/s}$
0.15	0.01	110	50	80
0.5	0.02	120	20	4400
1	0.02	150	10	8800

П р и м е ч а н и е. Расстояние от фокуса трубки до входа в капилляр $d = 5 \text{ mm}$, L_c — длина капилляра, α_c — угол раствора конуса капилляра.

На основании результатов, приведенных в таблице, можно сделать вывод о возможности получения достаточно интенсивных пучков рентгеновского излучения при помощи конусообразных микрокапилляров. Необходимо отметить, что параметры рентгеновской трубки, использованные при расчетах, не являются предельно допустимыми. Так, согласно [7], возможно изготовление микрофокусных рентгеновских трубок с прострельным

анодом, яркость которых только на один порядок величины меньше, чем яркость синхронного источника.

Для проведения экспериментов по исследованию параметров рентгеновских систем была приготовлена серия образцов микрокапилляров с коническим профилем внутреннего канала. Микрокапилляры были получены из промышленных стеклянных трубок методом вытяжки под действием силы тяжести на груз, прикрепленный к образцу, при его (капилляра) нагревании. Внешний и внутренний диаметры исходных образцов составляли 3.7 и 0.8 mm соответственно. Были получены конусообразные микрокапилляры длиной до 300 mm с входным диаметром 30–100 μm и выходным 1–20 μm . Типичные профили внутреннего канала капилляра приведены на рис. 3, *a, b*. Профили измерялись при помощи оптического микроскопа.

Для получения микропучков рентгеновского излучения был использован рентгеновский аппарат РЕИС-100 с трубкой БС11 с медным прострельным анодом. Напряжение на трубке $U_a = 45 \text{ kV}$, ток $i_a = 100 \mu\text{A}$, диаметр фокусного пятна трубки 50 μm . Рентгеновское излучение пропусклось через микрокапилляр с профилем внутреннего канала, показанным на рис. 3, *b*. Измерялась зависимость интенсивности пучка на выходе из капилляра I от расстояния d между фокусом трубки и капилляром. В качестве приемника излучения использовался блок детектирования от аппарата ДРОН-2.0 со сцинтилляционным детектором. Результаты измерений приведены на рис. 4. На рис. 4 приведены также рассчитанные значения числа фотонов K_α серии атомов меди, прошедших через капилляр. Число фотонов $(d^2N)/(d\Omega dt)$ было взято равным $9 \cdot 10^{10} \text{ phot/s} \cdot \text{ster}$, величина параметра T (формула (2)) изменялась от

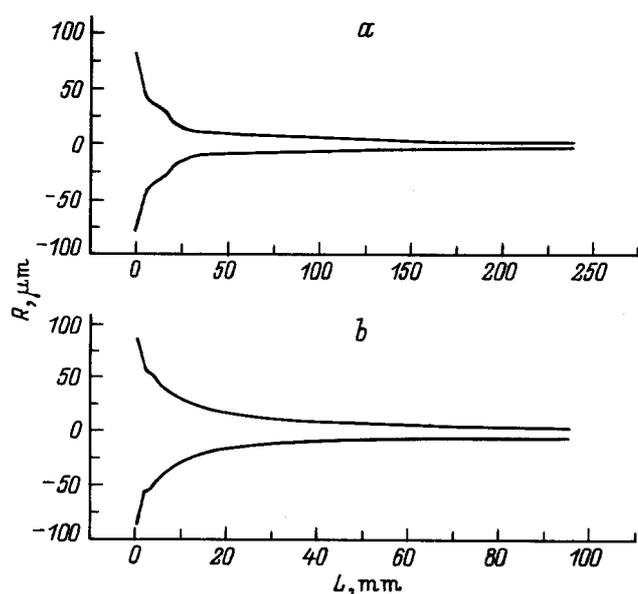


Рис. 3. Измеренные профили микрокапилляров. L — расстояние вдоль оси капилляра, R — в перпендикулярном направлении.

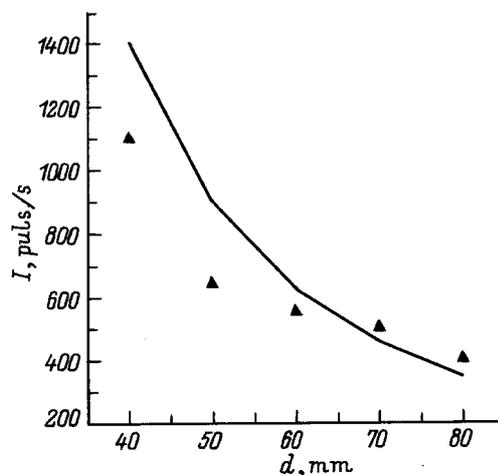


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения I на выходе микрокапилляра от расстояния d между фокусом рентгеновской трубки и капилляром. Кривая — расчет, \blacktriangle — эксперимент.

15 до 16 при изменении расстояния d в указанных на рис. 4 пределах. Несмотря на то что поглощение фотонов в материале анода и бериллиевом окне, как и поток тормозных фотонов, при расчетах не учитывались, совпадение по порядку величины расчетов и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что излучение в канале капилляра распространяется в волновом режиме, как это показано на рис. 1. Необходимо также отметить, что соотношение (4), использованное при расчетах, является приближенным и может быть уточнено только численным моделированием траекторий рентгеновских лучей от источника, смещенного относительно оси рентгенооптической системы. Этот вопрос, а также спектральное распределение фотонов на выходе из капилляра предполагается рассмотреть в отдельной работе.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о возможности получения достаточно интенсивных (для практических применений) микропучков рентгеновского излучения при помощи рентгенооптических систем на основе микрофокусных рентгеновских трубок с прострельным анодом и конусообразных стеклянных микрокапилляров.

Список литературы

- [1] Зеркальная рентгеновская оптика / Под ред. А.В. Виноградова. Л.: Машиностроение, 1989. 463 с.
- [2] Kumakhov M.A. // Nul. Instr. Meth. 1990. Vol. B48. P. 283–286.
- [3] Глебов В.И., Денисов Э.И., Жеваго Н.К. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 11. С. 125–133.
- [4] Thiel D.J., Bilderback D.H., Lewis A. // Rev. Sci. Instr. 1993. Vol. 64. N 10. P. 2872–2878.
- [5] Balaic D.X., Nugent K.A. // Appl. Opt. 1995. Vol. 34. N 31. P. 7263–7272.

- [6] *Bilderback D.H., Thiel D.J.* // Rev. Sci. Instr. 1995. Vol. 66. N 2. P. 2059–2063.
- [7] *Yamamoto N., Hosokawa Y.* // Jap. J. Appl. Phys. 1988. Vol. 27. N 11. P. L2203–L2206.
- [8] *Yamamoto N., Homma Y., Sakata S.* et al. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1994. Vol. 338. P. 209–214.
- [9] *Иванов С.А., Щукин Г.А.* Рентгеновские трубки технического назначения. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 200 с.
- [10] *Боровский А.И., Щукин Г.А.* // Электрон. пром-сть. 1991. № 5. С. 86–94.