

07; 12

© 1993

МИКРОФОКУСНАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА  
С ВСТРОЕННЫМ ВОЛНОВОДНЫМ КОЛЛИМАТОРОМО.Б. Баженов, Т.В. Байдюк,  
Ю.И. Дудчик, Ф.Ф. Комаров,  
Д.Г. Лобочки

Микрофокусные рентгеновские трубки с массивным анодом широко используются в рентгеновской микроскопии, томографии, рентгеноструктурном анализе. Один из возможных путей уменьшения размеров эффективного фокусного пятна трубки состоит в уменьшении угла между рабочим пучком и плоскостью анода до величины 10–6 град [1]. При этом обычно считается, что дальнейшее уменьшение указанного угла приводит к существенному ослаблению рабочего пучка вследствие поглощения и рассеяния излучения на неровностях поверхности анода. В то же время существующие в настоящее время методы обработки поверхности (алмазное точение, шлифовка и полировка) позволяют получать гладкие медные поверхности с размером (высотой) шероховатостей 1–4 нм [2]. Зеркала с такими сверхгладкими поверхностями практически полностью отражают рентгеновские лучи при углах скольжения, меньших критического угла полного внешнего отражения –  $\theta_K$ ,  $\theta_K = \frac{\hbar\omega_p}{\hbar\omega}$ , где  $\omega_p$  – частота плазменных колебаний электронов в среде,  $\hbar\omega$  – энергия рентгеновских фотонов. В свою очередь флуоресцентный выход характеристического излучения атомов, расположенных вблизи гладких границ раздела, имеет свои особенности, которые определяются не процессами рассеяния и поглощения излучения на неровностях поверхности, а ее преломляющими свойствами. Это, в частности, проявляется в том, что в угловой зависимости выхода флуоресцентного излучения наблюдается его ярко выраженное возрастание в интервале скольжения  $\theta > \theta_K$  [3].

Учитывая вышесказанное, можно предположить для уменьшения размеров эффективного микрофокуса использовать в рентгеновских трубках аноды со сверхгладкими поверхностями, а вывод рабочего пучка осуществлять при углах скольжения порядка критического относительно плоскости анода. При этом для формирования микропучков эффективным может оказаться использование коллиматоров типа волноводных [4], форма и расположение которых относительно анода определяется конкретными задачами. Один из возможных вариантов расположения плоского анода и отражателя (волновода) описан в работах [5–6], где применена схема, в которой анод фактически является одновременно и отражателем.

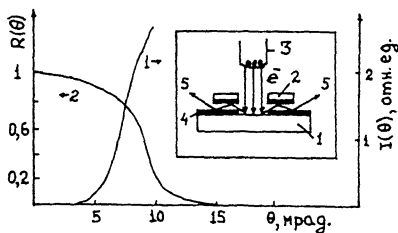


Рис. 1. Угловая зависимость выхода  $I(\theta)$  фотонов характеристического рентгеновского излучения  $K_{\alpha}$ -серии атомов меди из медной мишени (кривая 1) и коэффициента отражения этих фотонов поверхностью вольфрама (кривая 2).

В настоящем сообщении приведены результаты исследования рабочих характеристик макета микрофокусной рентгеновской трубки с гладким анодом и встроенным волноводным коллиматором.

Конструкция трубки схематично показана на вставке к рис. 1. Трубка содержит массивный анод 1, отражатель 2, катод 3. Поверхность анода была обработана до оптической степени гладкости методом шлифовки и полировки и покрыта (за исключением центральной части мишени анода) слоем вольфрама толщиной 0.1 мкм. Этот покрытый вольфрамом участок анода играл роль одной из стенок канала рентгеновода для вывода рабочего пучка. Отражатель 2 (вторая стенка рентгеновода) был выполнен из полированной кремниевой пластины, покрытой слоем вольфрама и расположенной параллельно поверхности анода на расстоянии 80 мкм. Диаметр мишени анода 8 мм. Траектории рентгеновских лучей, формирующих рабочий пучок показаны цифрой 5.

Работу трубки иллюстрирует рис. 1, на котором показаны рассчитанные угловые зависимости выхода  $I(\theta)$  фотонов характеристического рентгеновского излучения  $K_{\alpha}$ -серии атомов меди и коэффициента отражения  $R(\theta)$  этих фотонов поверхностью вольфрама. Величина  $I(\theta)$  пропорциональна произведению  $d(\theta) \cdot T(\theta)$ , где  $d(\theta)$  - глубина проникновения рентгеновских лучей в материал мишени при их падении под углом  $\theta$ ,  $T(\theta)$  - отношение квадратов амплитуд прошедшей и падающей волн [7]. При углах скольжения  $\theta < \theta_{\text{км}}$ , где  $\theta_{\text{км}}$  - критический угол для материала мишени, вклад в выход флуоресценции вносят атомы, расположенные на глубине 1-10 нм - глубине проникновения рентгеновских лучей при полном внешнем отражении. Коэффициент отражения рентгеновских лучей  $R(\theta)$  материалом отражателя  $\approx 1$  при углах скольжения  $\theta < \theta_{\text{кр}}$ , где  $\theta_{\text{кр}}$  - критический угол полного внешнего отражения рентгеновских лучей поверхностью рентгеновода. Материал канала рентгеновода выбран таким, чтобы выполнялось соотношение  $\theta_{\text{кр}} > \theta_{\text{км}}$ . Из рис. 1 следует, что та часть рентгеновского излучения, которая попадает в канал рентгеновода под углом  $\theta < \theta_{\text{кр}}$ , захватывается

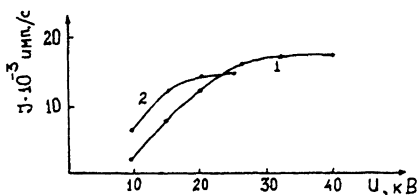


Рис. 2. Зависимость интенсивности  $J$  дифрагированной на монокристалле кремния (100)  $\text{Cu } K_{\alpha}$ -линии от анодного напряжения  $U$  для рентгеновской трубки БСВ-24 (кривая 1) и трубки с встроенным волноводным коллиматором (кривая 2).

им в волноводный режим распространения. Угловая расходимость пучка на выходе из трубки по порядку величины совпадает со значением  $\theta_{\text{кр}} - \theta_{\text{км}}$ .

Описанный выше анодный узел был встроен в корпус серийной трубки БСВ-27, рабочие характеристики которой исследовались при работе дифрактометра ДРОН-2М. Измеренная угловая расходимость пучка составляла  $1.5 \cdot 10^{-2}$  рад. Отличие измеренной величины от значения  $\theta_{\text{кр}} - \theta_{\text{км}} = 3 \cdot 10^{-3}$  рад. связано, по-видимому, с непараллельным расположением отражателя относительно плоскости анода.

На рис. 2 показаны измеренные зависимости интенсивности  $J$  дифрагированной на монокристалле кремния (100)  $\text{Cu } K_{\alpha}$ -линии от анодного напряжения для серийной трубки БСВ-24 и описанного макета. Анодный ток 3 мА, щель перед детектором 0.1 мм, щель после трубки БСВ-24 0.1 мм, угол отбора пучка относительно плоскости анода трубки БСВ-24 составлял 6 град. Из рис. 2 видно, что зависимость  $J(U)$  для исследуемого макета выходит на насыщение при значительно меньших напряжениях, чем для трубки БСВ-24. Это связано с тем, что толщина слоя атомов мишени, излучение от которых формирует рабочий пучок, составляет величину 140 нм. Поскольку пробег электронов с энергией 10–20 кэВ в меди составляет величину 0.5–1.6 мкм, то ясно, что увеличение выхода излучения для рассматриваемого случая происходит в основном за счет роста сечения ионизации, а не за счет увеличения глубины проникновения электронов. При сравнении абсолютных значений интенсивности рабочего пучка исследуемых трубок необходимо учитывать, что площадь действительного фокусного пятна у трубки с волноводным коллиматором в несколько раз больше, а плотность анодного тока меньше, чем в трубке БСВ-24. При этом описанная конструкция трубки позволяет увеличить размер действительного фокусного пятна без увеличения эффективного, в результате чего можно ожидать получения интенсивных пучков рентгеновского излучения при значительно меньших плотностях тока и величинах рабочего напряжения, чем у серийных трубок.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования анодов со сверхгладкими поверхностями в рентгеновской технике.

Исследования профинансированы Фондом фундаментальных исследований Беларуси.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Рентгенотехника. Справочник. В 2-х кн./ Под ред. В.В. Ключева. Т. 1. М.: Машиностроение, 1980. 431 с.
- [2] Мишет А. Оптика мягкого рентгеновского излучения. М.: Мир, 1989. 351 с.
- [3] Vesker R.S., Golovchenko J.A., Patel J.R. // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. N 3. P. 153-156.
- [4] Мингазин Т.А., Зеленков В.И., Лейкин В.Н. // ПТЭ. 1981. № 1. С. 229-232.
- [5] Дудчик Ю.И., Комаров Ф.Ф., Соловьев В.С., Тишков В.С. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 1. С. 57-61.
- [6] Дудчик Ю.И., Комаров Ф.Ф., Кумахов М.А., Лобочкий Д.Г., Соловьев В.С., Тишков В.С. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 15. С. 43-47.
- [7] Vineyard G.H. // Phys. Rev. 1982. V. 26B. N 8. P. 4145-4159.

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

Поступило в Редакцию  
28 декабря 1992 г.