

Измерение параметров фокусного пятна рентгеновской трубки с использованием оптики Кумахова

А. Ю. РОМАНОВ

Описана методика определения параметров фокусного пятна рентгеновской трубки на основе получения его изображения с помощью оптики Кумахова. Полученное изображение позволяет определить размеры и форму эффективного фокусного пятна. Приведены результаты исследования различных рентгеновских трубок.

Ключевые слова: рентгеновская трубка, фокусное пятно, оптика Кумахова.

The measurement technique of x-ray tube focal spot parameters on the basis of reception of the spot image with the help of polycapillary structure of Kumakhov optics is described. The obtained image allows to determine effective focal spot sizes and form. Research for various x-ray tubes are resulted.

Key words: x-ray tube, focal spot, Kumakhov optics.

Как известно [1, 2], важнейшими параметрами рентгеновской трубки (РТ) являются размеры фокусного пятна и его форма. Данные геометрические параметры фокусного пятна важны, например, для рентгеновской дефектоскопии, где ими определяется разрешающая способность анализа [1]. Знание этих параметров необходимо также при использовании рентгеновской оптики совместно с рентгеновской трубкой, например, при проведении тестирования рентгенооптических систем оптики Кумахова (ОК): для определения трансмиссии линз Кумахова размер фокусного пятна трубки должен быть не больше соответствующего фокусного пятна линзы [2, 3].

Эти геометрические параметры, а также распределение интенсивности по пятну, очевидно, легко можно определить из распределения интенсивности рентгеновского излучения (РИ) по площади фокусного пятна. Использование ОК позволяет получить данное распределение — рентгеновское изображение фокусного пятна.

Оптика Кумахова представляет собой различные системы из полых стеклянных трубок — капилляров [5—7]. Принципом работы ОК является преобразование излучения посредством многократных отражений от внутренних стенок капилляров под малыми углами, не превышающими критического. При использовании угловой фильтрации поликапиллярной системой посредством малоуглового отражения можно получить изображение фокусного пятна рентгеновской трубки, образованное квазипараллельными лучами. Анализ данного изображения дает ряд необходимых параметров фокусного пятна. Таким образом, на основе поликапиллярных структур ОК можно реализовать удобную, точную и экспрессную методику определения ряда параметров фокусного пятна.

Принцип измерения. Рассмотрим физические основы методики, в которой использована возможность образования и передачи рентгеновского изображения — плоскостного распределения интенсивности излучения — на рассто-

ние с помощью ОК [5—9]. Как уже было сказано, ОК представляет собой совокупность трубок, обычно стеклянных, собранных в пучки различных конфигураций [5—7]. От вида конфигурации и зависят основные характеристики осуществляемого изменения распространения РИ — получение сходящихся, параллельных и расходящихся пучков. В этом случае распространение излучения основано на эффекте полного внешнего отражения (ПВО), который возникает при малых углах скольжения. В результате такого многократного малоуглового отражения на изогнутой поверхности внутренних стенок капилляров излучение распространяется по необходимому направлению. Значение наибольшего угла скольжения падения (в радианах), при котором возникает ПВО (критического угла) для стекла можно оценивать по формуле

$$\theta_{кр} \approx 30 / E,$$

где E — энергия рентгеновского кванта, эВ. Например, для энергии характеристического излучения К-серии меди $\theta_{кр} \approx 4$ мрад. Таким образом, угол захвата отдельным капилляром, равный, очевидно, двум критическим угла, очень мал. На выходе капиллярной системы также получаем малую расходимость пучка РИ, значение которой в рамках геометрооптического рассмотрения равно критическому углу, а в от-

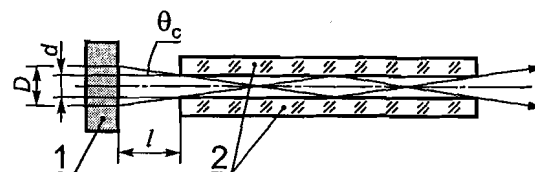


Рис. 1. Геометрическая схема коллимации отдельным капилляром:

1 — фокусное пятно рентгеновской трубки; 2 — стеклянные стенки

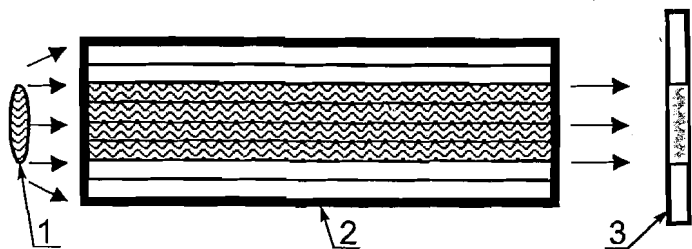


Рис. 2. Схема образования и передачи изображения пятна поликапиллярной структурой:

1 — фокусное пятно; 2 — поликапиллярная структура; 3 — детектор

дельных случаях, описываемых волновой теорией, может быть даже меньше критического угла [10].

Используя угловую фильтрацию поликапиллярной системой посредством малоуглового отражения, получим изображение фокусного пятна рентгеновской трубки, образованное квазипараллельными лучами, исходящими с поверхности анода в месте взаимодействия с электронным пучком, по интересующему направлению. Данная проекция изображения называется эффективным фокусным пятном.

Каждый капилляр захватывает излучение из малого телесного угла порядка $2\theta_{кр}$ и таким образом создает минимальную часть изображения пятна — пиксель. Интенсивность излучения, соответствующая данному пикселю на выходе из капилляра, пропорциональна интенсивности излучения с соответствующей площади пятна. Геометрическая схема капилляра представлена на рис. 1. Линейный размер пятна, излучение с которого пройдет через капилляр (эффективный размер капилляра), определим по формуле $D = 2l \operatorname{tg} \theta_{кр} + d$, где l — расстояние от источника излучения до входа в капилляр; $\theta_{кр} = 4 \cdot 10^{-3}$ — критический угол полного внешнего отражения $\text{SiK}\alpha$ -излучения; d — расстояние между стенками капилляра. Таким образом, при расстоянии $l = 0,5$ мм эффективный размер капилляра составляет $D = 2 \cdot 500 \cdot 4 \cdot 10^{-3} + 5 = 9$ мкм.

Совокупность строго сориентированных и плотно упакованных капилляров поликапиллярной структуры позволяет получить полное изображение пятна, состоящее из пикселей, образуемых отдельными капиллярами (рис. 2). Увеличение размеров из-за наличия зазора как между анодом и входом в капиллярную систему, так и между выходом капиллярной системы и детектором также легко вычислить исходя из критического угла — оно равно угловой добавке $2l \operatorname{tg} \theta_{кр}$.

Распределение интенсивности излучения, полученного таким образом, а, следовательно, искомые размеры и форма при достаточной регулярности структуры, хорошо согласуются с соответствующими характеристиками фокусного пятна рентгеновской трубки. Итак, основываясь на описанных выше возможностях ОК, можно реализовать простую, надежную и экспрессную методику анализа фокусного пят-

на рентгеновской трубки. Поликапиллярная структура в данной методике играет роль коллиматора, что является развитием методик измерения размеров фокусного пятна щелевыми коллиматорами [2, 11] в сторону больших удобства, точности и экспрессности.

Аппаратура. Структурная схема установки, на которой следует проводить измерения, представлена на рис. 3. Данная схема реализована на базе автоматизированного стенда для исследования оптических параметров ОК [3]. Поликапиллярный коллиматор 2 располагали на специальном держателе, который мог перемещаться в трех ортогональных направлениях. Это позволяло осуществить точную юстировку коллиматора относительно фокального пятна рентгеновской трубки 1.

Для реализации методики использовали одну из систем ОК: цилиндрическую поликапиллярную структуру (поликапиллярный столбик). Столбик представляет собой параллельную сборку поликапилляров, состоящих, в свою очередь, из капилляров — полых стеклянных трубок диаметром 5 мкм. Длина столбика 5 см.

Необходим линейный по амплитуде рентгеновский детектор изображения, а также низкая абберация тракта передачи изображения. Был использован рентгеновский визуализатор на основе сцинтилляционного экрана, световода, ЭОП и телекамеры, сигнал с которой передавался на компьютер. Линейное разрешение визуализатора в рабочем диапазоне РИ составляло порядка 20 мкм. Можно либо использовать калиброванный визуализатор, либо калибровать самостоятельно посредством получения изображения тест-объекта с известными размерами.

Проведение измерений. Перед анодом на некотором расстоянии устанавливаем капиллярную структуру, на выходе которой помещаем детектирующую систему. В качестве детектирующей системы для экспрессной оценки целесообразней всего использовать детектор изображения — рентгеновский визуализатор. Сопоставление размеров получаемого изображения фокусного пятна с размерами изображения контрольного предмета либо использование калиброванного визуализатора позволяет определить абсолютные размеры пятна.

Возможно также применение сканирующих методов для анализа распределения интенсивности РИ на выходе из поликапиллярной структуры, что позволит определить линейные размеры пятна вдоль направления сканирования в «методе ножа», либо, при сканировании диафрагмой, получить двумерное распределение интенсивности по пятну с точностью, определяемой размерами диафрагмы [3].

Были исследованы рентгеновские излучатели с различными размерами и формами фокусного пятна. Для дополнительной фокусировки и изменения формы электронного пучка применяли магнитные линзы.

Примеры изображений фокусного пятна микрофокусной рентгеновской трубки при различных значениях установочных параметров, полученных на основе описанной методики, приведены на рис. 4. Варьировались значения следующих параметров: ускоряющее напряжение $U_{уск}$, напряжение смещения $U_{см}$, напряжение накала $U_{нак}$, ток трубки $I_{тр}$.

При использовании видеокамеры можно осуществлять мониторинг изменений изображения пятна во времени в зависимости от изменяемых параметров.

После получения изображений проводили фотометрическую обработку. Кривая распределения интенсивности вдоль оси пятна дает возможность точного количественного определения необходимых размеров.

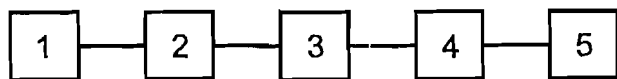


Рис. 3. Структурная схема установки:

1 — рентгеновская трубка; 2 — цилиндрическая поликапиллярная структура (коллиматор); 3 — тест-объект; 4 — детектор изображения; 5 — устройство анализа изображения

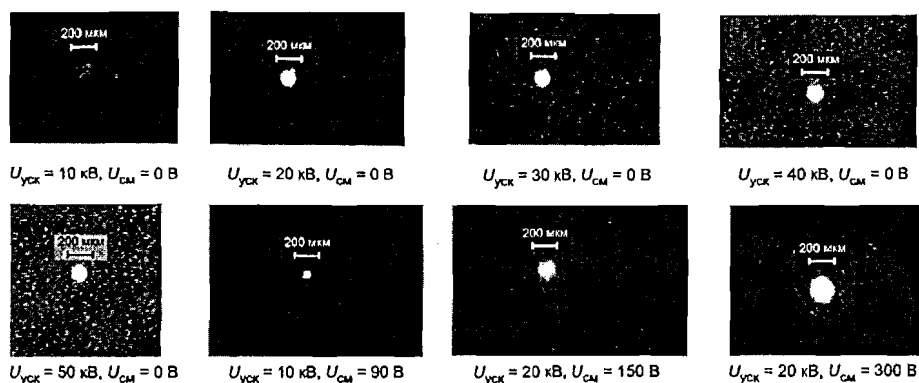


Рис. 4. Пример изменения изображения круглого пятна микрофокусной рентгеновской трубки в зависимости от установочных параметров

Преимущества и точность методики. В результате малоугловой фильтрации интенсивность на выходе капиллярной структуры значительно меньше полного потока, исходящего с поверхности анода. В некоторых случаях это полезно, так как отпадает необходимость в установке дополнительных ослабителей РИ во избежание перегрузки детектирующих систем.

Точность методики и минимальная граница размеров пятен ограничивается размером элемента передаваемого изображения — эффективным размером канала, т. е. разрешающей способностью данной оптики (см. рис. 1).

При микрометровых размерах канала возникают технологические трудности с поддержанием регулярности в структуре. Нарушения регулярности значительно понижают передаточные функции данных структур и, следовательно, уменьшают чувствительность и точность методики. Поэтому необходимо использование проверенных, калиброванных капиллярных структур, удовлетворяющих высоким требованиям к равномерности пропускания по входной площади.

Такое свойство систем оптики Кумахова, как селективность по энергиям [12], также накладывает некоторые ограничения. Вследствие уменьшения значения критического угла с увеличением энергии излучения происходит обрезание высокоэнергетической части спектра капиллярными структурами. Такое обрезание происходит и из-за меньшей эффективности сцинтиллятора на высоких энергиях и, следовательно, данная погрешность, вносимая капиллярной структурой, не очень существенна.

Кроме того, высокоэнергетические рентгеновские кванты будут проходить через стеклянные стенки поликапиллярной структуры, из-за чего изображение фокусного пятна будет «размазываться», что ограничивает применение данной методики при высоких напряжениях трубки [9]. Примерный рабочий диапазон ОК составляет 1—100 кэВ. Для бо-

лее жесткого напряжения требуется применение поликапиллярных структур с повышенным содержанием свинца в стекле [9].

При применении расходящихся поликапиллярных систем возможна реализация увеличения рентгеновского изображения пятна, что дает возможность расширения диапазона исследуемых пятен в сторону меньших размеров [8]. По данным, приведенным в [8], возможно получение изображений с субмикрометровым разрешением.

Таким образом, применение поликапиллярных структур оптики Кумахова позволяет реализовать точную, надежную и экспрессную методику определения параметров фо-

кусного пятна рентгеновской трубки. Метод является развитием метода щелевых коллиматоров в сторону большей точности, информативности и удобства. Данная методика может найти применение, как у изготовителей рентгеновских источников — для тестирования, так и у пользователей — во время настройки.

Литература

1. **Рентгентехника:** Справочник / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1980.
2. **ГОСТ 22091.9—86.** Приборы рентгеновские. Методы определения размеров эффективного фокусного пятна.
3. **Романов А. Ю., Дмитриев И. В., Акулов А. Ю.** // Рентгеновская оптика: Матер. совещания. — Н. Новгород, 2003 — С. 125.
4. **Mikhin O. V. e. a.** // Proc. SPIE. — 2002. — V. 4765. — P. 194.
5. **Kumakhov M. A., Komarov F. F.** // Phys. Reports. — 1990. — V. 191. — P. 290.
6. **Tsipenyuk Yu. M.** // Radiat. Phys. Chem. — 1998. — V. 51. — N 4—6. — P. 429.
7. **Kumakhov M. A.** // Proc. SPIE. — 2000. — V. 4155. — P. 2.
8. **Nikitin A. N.** // Proc. SPIE. — 1997. — V. 3115. — P. 117.
9. **Nikitin A. N.** // Ibid. — P. 143.
10. **Cappuccio G., Dabagov S. B.** // Proc. SPIE. — 2000. — V. 4155. — P. 40.
11. **Ibraimov N. S. e. a.** // Ibid. — P. 25.
12. **Ibraimov N. S. e. a.** // Proc. SPIE. — 2002. — V. 4765. — P. 183.

Дата одобрения 24.02.2004 г.