

02;12

## **Рентгенооптические параметры среднефокусной линзы Кумахова для жесткого рентгеновского диапазона**

© А.Ю. Романов

Институт рентгеновской оптики, Москва  
E-mail:androm@iroptic.ru

Поступило в Редакцию 25 августа 2004 г.

В Институте рентгеновской оптики впервые были созданы рентгенооптические системы для жесткого диапазона рентгеновского излучения — среднефокусные линзы Кумахова. Были проведены исследования такой линзы в диапазоне 20–65 keV. Коэффициент усиления линзы находился в диапазоне от 4 до 2 порядков величины; таким образом, верхняя граница энергетического диапазона эффективного использования оптики Кумахова превысила 60 keV.

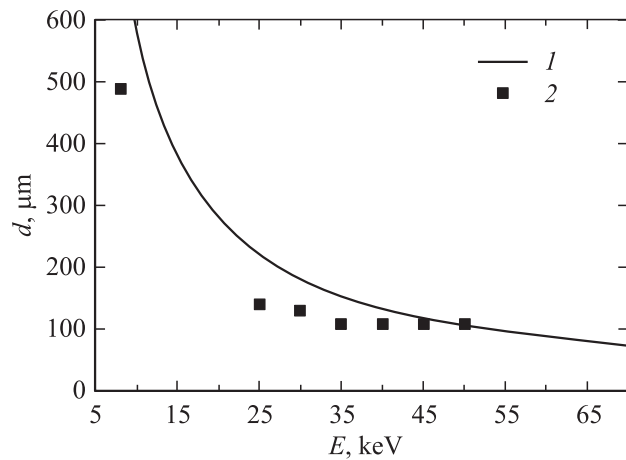
Основной рабочий диапазон современной рентгеновской поликапиллярной оптики Кумахова (ОК) приблизительно 0.5–30 keV, и в этой части диапазона рентгеновского излучения (РИ) было проведено большинство предыдущих исследований рентгенооптических параметров линз Кумахова (ЛК) [1–3]. Данная ситуация определяется тем, что с повышением энергии РИ эффективная трансмиссия ЛК резко уменьшается, но в то же время часть рентгеновского излучения (РИ) проникает через стеклянные стенки капилляров, создавая паразитную трансмиссию [4–8]. Создание линз, эффективно работающих в диапазоне до 60 keV, предоставляет новые возможности использования ОК в медицинской технике, микроэлектронной технологии и др. Недавно в Институте рентгеновской оптики (ИРО) были впервые созданы подобные системы. Данные рентгенооптические системы применяются совместно с рентгеновскими источниками мощностью выше 1 kW и с размером фокусного пятна 0.1–0.3 mm. Расходящийся пучок от источника транспортируется посредством линзы в пятно диаметром до 50  $\mu\text{m}$ , что достаточно для многих приложений. Результаты исследований одной из таких ЛК приведены в данной работе.

Некоторые параметры исследуемой линзы

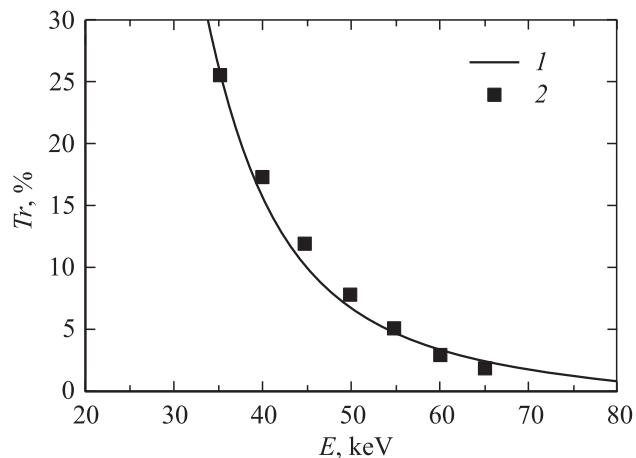
$D_1$ , mm	$L$ , mm	$F_1$ , mm	$F_2$ , mm	$Q_1$ , rad	$E$ , keV	25	30	35	40	45	50	55	60	65
3	265	180	95	0.017	$G$	2130	1205	976	656	425	318	236	171	130
					$R_{eff}$ , mm	11.6	15.5	17.2	20.9	26	30	34	41	47

Некоторые параметры ЛК представлены в таблице, где  $D_1$  — входной диаметр линзы,  $L$  — ее длина,  $F_1$  и  $F_2$  — переднее и заднее фокусные расстояния линзы соответственно,  $Q_1$  — угол захвата линзы,  $Tr$  — трансмиссия. Рентгеновские измерения проводились с использованием тормозного излучения рентгеновской трубки. Использовалась монохроматизация фильтрами посредством ужесточения РИ.

Была определена зависимость размера фокусного пятна от энергии РИ на выходе ЛК (рис. 1). Измерения размера пятна для каждой из энергий проводились посредством сканирования краем ножа сечения пучка на фокусном расстоянии  $F_2$  от выхода линзы. Диаметр фокусного пятна линзы  $d$  определялся как полная ширина на полувысоте



**Рис. 1.** Зависимость размера фокусного пятна линзы от энергии используемого РИ: 1 — теоретическая зависимость  $y = a/x$ ; 2 — эксперимент.



**Рис. 2.** Зависимость трансмиссии линзы Кумахова от энергии используемого РИ: 1 — наилучшее приближение, 2 — эксперимент.

дифференцированной кривой интенсивности. Результат в целом соответствует теоретической оценке:  $d = 2F_2\vartheta_{cr}$ , где  $\vartheta_{cr}$  — критический угол полного внешнего отражения, хотя имеется некоторое занижение значения размера пятна в низкоэнергетической части, что согласуется с результатами, приведенными в работе [1]. Увеличение размера пятна с увеличением энергии, возможно, связано с эффектом проникновения РИ через стеклянные стенки капилляров.

Также определена трансмиссия ЛК, т.е. отношение интенсивности излучения, выходящего из линзы, к интенсивности входящего для ряда энергий РИ (рис. 2).

На основе полученных экспериментальных данных имеется возможность рассчитать коэффициент усиления плотности излучения посредством линзы в ее фокусном пятне для исследуемых энергий  $G(E)$  (см. таблицу). Под коэффициентом усиления  $G$  понимается отношение плотности излучения в фокусном пятне линзы к плотности излучения, которая создается источником без линзы на том же расстоянии от источника, что и фокусное пятно:

$$G = \left(\frac{D_1}{d}\right)^2 \cdot \left(\frac{F_1 + L + F_2}{F_1}\right)^2 \cdot Tr. \quad (1)$$

Определенные значения коэффициента усиления  $G$  находятся в диапазоне от 4 до 2 порядков, т.е. верхняя граница энергетического диапазона эффективного использования ЛК достигает 60 keV.

Более наглядна зависимость эффективного расстояния  $R_{eff}$ :

$$R_{eff} = \frac{F_1 + L + F_2}{\sqrt{G}}, \quad (2)$$

которое представляет собой эквивалентное использованию линзы приближение облучаемого объекта к источнику, от энергии  $E$  (см. таблицу).

Видно, что характеристики усиления, несмотря на значительный спад на высоких энергиях, тем не менее значительны во всем исследуемом диапазоне и позволяют получать на расстоянии  $\sim 50$  см плотность на объекте, эквивалентную приближению к фокусному пятну на расстояние в несколько раз меньшее. Такое приближение зачастую невозможно из-за конструкции трубки или нежелательно в силу требований эксперимента. Таким образом, упрощается решение задачи пространственного размещения оборудования. Подобные характеристики фокусировки РИ позволяют использовать ЛК в экспериментальных физических исследованиях, в области микроэлектронной технологии, в медицине и других областях. В связи с тем что линзы хорошо ослабляют жесткое излучение с энергией выше 80 keV, нет необходимости в применении дополнительных фильтров.

Таким образом, были преодолены серьезные технологические трудности, и область высоких энергий 40–60 keV оптикой Кумахова была освоена.

Выражаю благодарность за ценные замечания проф. Кумахову М.А., технологическому отделу ИРО за предоставленную оптику, Черемисину С.М. и Дмитриеву И.В. за советы и помощь в работе.

## Список литературы

- [1] Kazakov S.S., Nikitina S.V., Trefilov V.I. // Proc. SPIE. 2000. V. 4155. P. 13.
- [2] Nikitina S.V., Gruev D.I., Ibraimov N.S., Likhushina E.V., Gorbunov S.S. // Proc. SPIE. 2002. V. 4765. P. 137.
- [3] Романов А.Ю., Дмитриев И.В., Акулов А.Ю. // Инженерная физика. 2004. № 1. С. 43.
- [4] Wang L., Mac Donald C.A. // Proc. SPIE. 1995. V. 2519. P. 218.

- [5] Wang L., Mac Donald C.A., Gibson W.M. et al. // J. Appl. Phys. 1996. V. 80. N 7. P. 3628.
- [6] Nikitin A.N. // Proc. SPIE. 1997. V. 3115. P. 143.
- [7] Cari, Suparmi, Padiyar S.D., Gibson W.M., Mac Donald C.A. // Proc. SPIE. 2000. V. 4144. P. 183.
- [8] Suparmi, Cari, Wang Lei, Wang Hui, Gibson W.M., Mac Donald C.A. // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. N 10. P. 5363.