

05.2;07;12

Рентгенооптические параметры микрокапиллярной линзы

© Ю.И. Дудчик, Н.Н. Кольчевский, Ф.Ф. Комаров

Белорусский государственный университет, Минск

Поступило в Редакцию 3 июля 1998 г.

Рассмотрена возможность фокусировки рентгеновского излучения с помощью нового элемента рентгеновской оптики — микрокапиллярной рентгеновской линзы.

Устройства рентгеновской оптики, обеспечивающие формирование микропучков рентгеновского излучения с энергией фотонов 10–30 keV, представляют особый интерес в связи с развитием синхротронной техники и разработкой мощных микрофокусных трубок с прострельными или вращающимися анодами. В работе [1] предложено использовать для фокусировки рентгеновского излучения набор обычных двояковогнутых преломляющих микролинз, изготовленных из материала с малым порядковым номером (углерод, полимер) и расположенных соосно. Исследования, проведенные в [1–3], показали возможность фокусировки пучков рентгеновского излучения с энергией 14 и 30 keV от синхротрона в пятно размером несколько μm . Конструкция указанных рентгеновских линз допускает целый ряд технических решений: в [1–3] эти линзы выполнены путем сверления 30–40 отверстий диаметром 0.5–1 mm в алюминиевой или полимерной пластине. Роль микролинз выполняли ”перешейки” между отверстиями. Однако несмотря на то что теоретически возможный коэффициент усиления для такой линзы равен 100 и более, на практике удалось получить усиление только равное 2–6, что в свою очередь делает перспективным поиск других технических решений для конструкции преломляющей рентгеновской линзы.

В работе рассмотрена одна из возможных конструкций рентгеновской линзы (рис. 1) и рассчитаны ее рентгенооптические параметры.

Известно [4], что капля жидкости, например воды, помещенная в стеклянный микрокапилляр, принимает форму двояковогнутой линзы. Качество поверхности такой линзы достаточно высокое, и она может

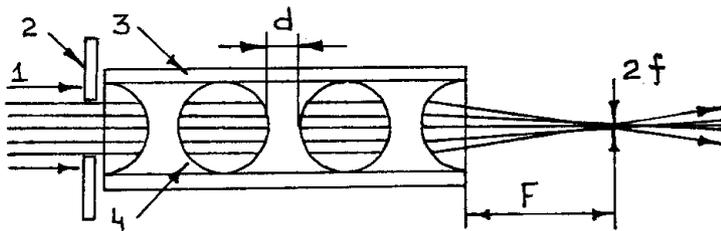


Рис. 1. Схема микрокапиллярной рентгеновской линзы: 1 — пучок рентгеновского излучения; 2 — диафрагма; 3 — стекланный микрокапилляр; 4 — клей; F — фокусное расстояние линзы; $2f$ — размер фокусного пятна.

передавать изображение объектов в видимом диапазоне длин волн. Двоояковогнутая форма капли позволяет использовать ее для фокусировки рентгеновских лучей, а применение большого числа таких капель позволяет уменьшить фокусное расстояние системы до величины, например 1 м. Усиление такой системы G , определяемое как отношение плотности потока фотонов заданной энергии, падающего на линзу, к плотности потока в фокусе, зависит от радиуса капилляра R и толщины линзы (параметр d на рис. 1). Форма поверхности капли в капилляре зависит от сил поверхностного натяжения на границе жидкость–стекло и в качестве первого приближения может быть принята за сферическую.

Нами была изготовлена система для фокусировки рентгеновского излучения, содержащая микролинзы из промышленных сортов клея, которые были сформированы в стеклянном капилляре. Фотография линзы приведена на рис. 2. Использовались два сорта клея: эпоксидный клей и БФ-6 [5].

Технология приготовления линзы включала формирование на внутренней поверхности капилляра тонкого слоя клея. При достижении толщины пленки определенного значения наблюдалось самопроизвольное формирование микрокапель в капилляре. Капли располагались с достаточной степенью периодичности. Указанным способом можно изготовить 50 и более микролинз в одном капилляре.

Было экспериментально установлено, что для микролинз, изготовленных указанным выше способом из эпоксидного клея (рис. 2, а), существует соотношение между параметром d и радиусом капилляра R , которое может быть аппроксимировано следующей линейной

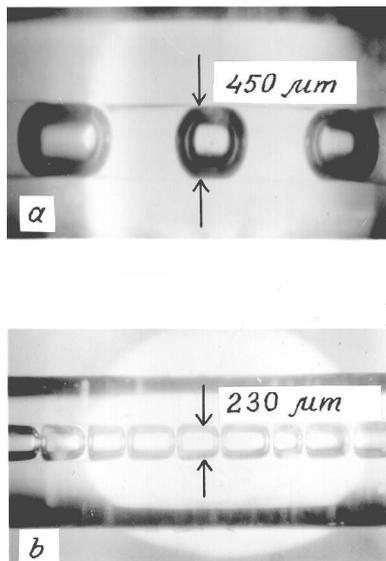


Рис. 2. Фотографии микрокапиллярной рентгеновской линзы, изготовленной из: *a* — эпоксидного клея (эпоксидная смола с отвердителем); *b* — клея БФ-6 (спиртовой раствор поливинилбутираля и смолы).

зависимостью: $d = kR + d_0$, где $k = 3$, $d_0 = -60 \mu\text{m}$. Это соотношение оставалось верным, по крайней мере, при изменении R от 50 до 500 μm .

Найденная зависимость $d(R)$ была положена в основу расчетов рентгенооптических параметров линзы, изготовленной из эпоксидного клея. Рассчитывались: размер фокусного пятна $2f$ (рис. 1), пропускание линзы T , равное отношению потока фотонов на выходе из линзы к потоку на входе и коэффициент усиления $G = (0.6R/f)^2 T$. Расчеты проводились методом численного моделирования траекторий рентгеновских лучей, распространяющихся в системе. Предполагалось, что на линзу падает монохроматический пучок рентгеновского излучения с угловой расходимостью, равной 0.01 mrad, и что перед линзой расположена диафрагма с радиусом отверстия $0.6R$, которая предназначена для уменьшения абберации системы. Число линз N выбиралось для

величины фокусного расстояния $F = 1$ м из следующего соотношения, приведенного в работе [1]: $N = R/(2\delta F)$, где δ — действительная часть показателя преломления рентгеновских лучей в материале линзы. Расчеты проводились для фотонов с энергией, равной 15 keV и при различных значениях радиуса капилляра R . Коэффициент поглощения рентгеновского излучения в материале линзы брался равным 0.82 cm^{-1} , энергия плазменных колебаний электронов — 22 eV.

Результаты расчетов рентгенооптических параметров микрокапиллярной линзы приведены в таблице.

$R, \mu\text{m}$	200	150	100	50
N	91	69	46	23
$d, \mu\text{m}$	540	390	240	90
$T, \%$	1	9	38	83
$2f, \mu\text{m}$	12	9	6	3
G	5	38	150	331

Из таблицы видно, что предложенная линза позволяет сфокусировать рентгеновское излучение в пятно $3\text{--}6 \mu\text{m}$, усиливая плотность потока более чем в 100 раз при радиусе капилляра, равном $500\text{--}100 \mu\text{m}$.

Необходимо отметить что, несмотря на достаточно высокие значения коэффициента усиления, рассчитанные для системы, содержащей микролинзы, изготовленные из эпоксидного клея, в случае применения клея БФ-6 (рис. 2, *b*) или другого, представляющего из себя спиртовой раствор смол и полимера, возможно получение указанных выше коэффициентов усиления и для фотонов с энергией $3\text{--}5 \text{ keV}$. Это связано с тем, что толщина микролинзы d для этого случая становится значительно меньшей, чем R , как это видно из рис. 2, *b*, что, в свою очередь, приводит к увеличению пропускания T . Однако вычисления для указанного случая представляют определенные затруднения, что связано с невозможностью определить форму поверхности микролинз на данном этапе исследований. Результаты экспериментальных исследований для данного случая планируется рассмотреть в отдельной публикации.

Указанная работа осуществлена при частичной поддержке Фонда фундаментальных исследований Беларуси (грант Ф97-036).

Список литературы

- [1] *Snigirev A., Kohn V., Snigireva I. et al.* // Nature. 1996. V. 384. N 7. P. 49–51.
- [2] *Snigirev A., Kohn V., Snigireva I. et al.* // Applied Optics. 1998. V. 37. N 4. P. 1–10.
- [3] *Elleaume P.* // J. Synchrotron Rad. 1998. N 5. P. 1–5.
- [4] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
- [5] *Справочник по клеям* / Под ред. Г.В. Мовсисяна: Химия, 1980. 304 с.