

Многоэлементная преломляющая линза для лабораторных рентгеновских источников

И. Н. Балухо, С. А. Ментуз, Ю. И. Дудчик, Н. Н. Кольчевский

*Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь,,
e-mail: kolchevsky@bsu.by*

В работе рассмотрена многоэлементная преломляющая линза для лабораторных рентгеновских источников. В работе представлены результаты расчета характеристик короткофокусной многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы для рентгеновских пучков с энергией 8 кэВ от лабораторного рентгеновского источника. С использованием разработанного программного обеспечения выполнено 3D-моделирование прохождения лучей рентгеновского излучения через набор преломляющих линз и расчет рентгенооптические характеристики линзы. Выполнен расчет фокусного расстояния линзы в зависимости от радиуса и количества микролинз. Определено предельное количество микролинз (256) и максимальный радиус (200 мкм) для заданной энергии. Показано, что линза, состоящая из 150 микролинз радиусом 100 мкм, обеспечивает фокусное расстояние 7,5 см при пропускании 9 %. Результаты подтверждают эффективность применения таких линз в лабораторных условиях с компактными рентгеновскими источниками.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, многоэлементная преломляющая линза.

Multielement refractive lens for laboratory X-ray sources

I. N. Balukho, S. A. Mentuz, Yu. I. Dudchik, N. N. Kolchevsky

*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus,
e-mail: kolchevsky@bsu.by*

Considered a multi-element refractive lens for laboratory X-ray sources. Presented the results of calculating the characteristics of a short-focus multi-element refractive X-ray lens for X-ray beams with an energy of 8 keV from a laboratory X-ray source. Performed 3D modeling of X-ray beam propagation through a set of refractive lenses and calculated the X-ray optical characteristics of the lens using the developed software. Calculated the focal length of the lens depending on the radius and number of microlenses. Determined the maximum number of microlenses (256) and the maximum radius (200 μm) for a given energy. Showed that a lens consisting of 150 microlenses with a radius of 100 μm provides a focal length of 7.5 cm with 9 % transmission. The results confirm the effectiveness of using such lenses in laboratory conditions with compact X-ray sources.

Keywords: X-rays, multielement refractive lens.

Введение

Многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы были предложены в 1996 г. и в настоящее время являются эффективным рентгенооптическим элементом, который применяется на синхротронах для фокусировки рентгеновских лучей с энергией от 5 кэВ до 30 кэВ в пятна размером 1 микрон и меньше. Фокусное расстояние таких линз, как правило, составляет около одного метра, что для синхротронных источников приемлемо. В лабораторных условиях перспективными являются короткофокусные преломляющие рентгеновские линзы, например с

фокусным расстоянием 50–100 мм для фотонов с энергией 8 кэВ. Преломляющие рентгеновские линзы, как и линзы видимого диапазона спектра, позволяют получать уменьшенные (увеличенные) изображения источника излучения или объекта. Такие короткофокусные многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы разработаны в НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ. Линзы состоят из большого числа (100–300) полимерных двояковогнутых сферических микролинз, сформированных в стеклянном микрокапилляре. Радиус кривизны линзы совпадает с радиусом капилляра. Разработанные в НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ линзы тестировались на синхротронах в России, США, Германии, Кореи, Китае, Японии, где было показано, что они фокусируют рентгеновские лучи в пятно размером около одного микрометра. В 2016 г. совместно с партнером из России (БФУ им. И. Канта, Калининград) впервые многоэлементная преломляющая линза (разработка НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ) была использована для фокусировки рентгеновских лучей от микрофокусной рентгеновской трубки в пятно размером около двух микрометров. Полученные результаты показывают перспективность проведения исследований по разработке многоэлементных преломляющих рентгеновских линз.

Целью данной работы рассчитать характеристики многоэлементных преломляющих рентгеновских линзы для фокусировки рентгеновских пучков с энергией 8 кэВ от лабораторного рентгеновского источника.

1. Многоэлементная преломляющая линза

Многоэлементная преломляющая линза, состоящая из последовательности простых микролинз линз, изготавливается из материала с малым порядковым номером в таблице Менделеева (бор, углерод, алюминий, полимеры). У отдельной линзы фокусное расстояние равно:

$$F = \frac{R}{2\delta}, \quad (1)$$

где R – радиус линзы; δ – единичный декремент показателя преломления материала линзы.

У рентгеновской многоэлементной линзы, состоящей из N линз фокусное расстояние равно:

$$F = \frac{R}{2N\delta}, \quad (2)$$

Единичный декремент показателя преломления материала линзы δ зависит от материала линзы и энергии рентгеновских фотонов E_f . Для эпоксидных смол, которые являются исследованным материалом для преломляющих рентгеновских линз, значение δ равно:

$$\delta = \frac{242 \cdot 10^{-6}}{E_f^2}, \quad (3)$$

где E_f – энергия фотонов в кэВ.

Для эпоксидной смолы с энергией рентгеновских фотонов 8 кэВ, единичный декремент показателя преломления равен $\delta = 3,8 \cdot 10^{-6}$. Следовательно, можно рассчитать фокусное расстояние многоэлементной линзы в зависимости от радиуса и количества линз (рис. 1).

Условие равенства фокусного расстояния и длины линзы позволяет рассчитать предельное количество отдельных микролинз:

$$N = \frac{1}{2\sqrt{\delta}}. \quad (3)$$

Для эпоксидной смолы с энергией рентгеновских фотонов 8 кэВ предельное количество отдельных микролинз равно 256, что позволяет определить радиус линзы. В соответствии с рис. 1 радиус линзы должен быть менее 200 мкм.

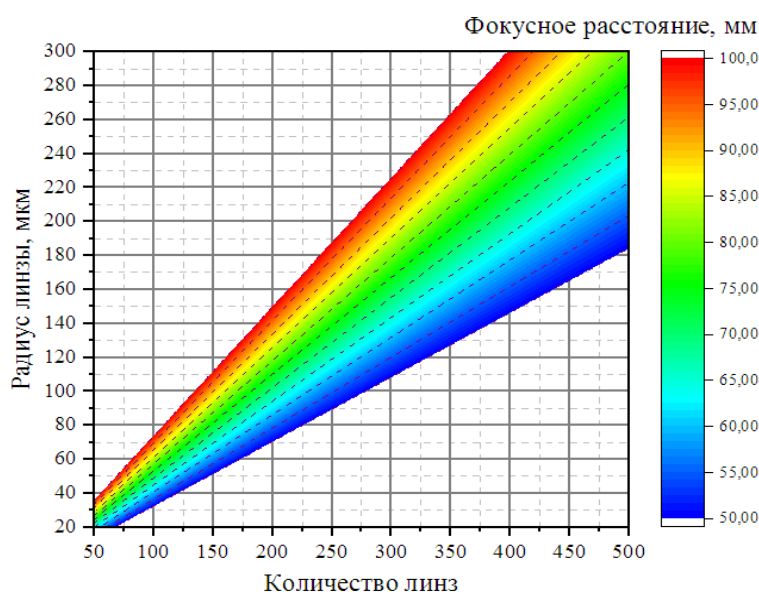


Рис. 1. График зависимости радиуса линзы от количества линз при заданном фокусном расстоянии

С использованием разработанного программного обеспечения “3D-моделирование прохождения лучей рентгеновского излучения через составную микрокапиллярную линзу” рассчитано прохождение лучей рентгеновского излучения через набор преломляющих линз и рентгенооптические характеристики линзы. Для расчета распространения рентгеновского излучения через составную линзу использовалось приближение геометрической оптики, т. к. длина волны рентгеновского излучения много меньше геометрических размеров системы. Программно генерируется большое количество лучей, каждый такой луч распространяется в капилляре в режиме последовательных преломлений на поверхностях отдельных линз.

Пример расчета рентгеновской многоэлементной преломляющей линзы, состоящей из 150 отдельных линз, радиусом 100 мкм, толщиной отдельной линзы 10 мкм, длиной линзы 4 см, коэффициентом поглощения материала $5,9 \text{ см}^{-1}$ для энергии фотонов 8 кэВ показан на рис. 2.

Для исследования фокусирующих свойств рентгеновской многоэлементной преломляющей линзы необходимо расположить источник малого размера как можно дальше от линзы, а детектор на фокусном расстоянии от линзы. Расчет проводился для точечного рентгеновского источника, расположенного на расстоянии 1 метра от линзы и детектора установленного в плоскости изображения линзы на расстоянии 9 см. Пропускание линзы составило 9 %, фокусное расстояние линзы 7,5 см. На рис. 3 показано двумерное распределение интенсивности на экране цифрового детектора, профиль распределения интенсивности пучка, ход лучей за линзой.

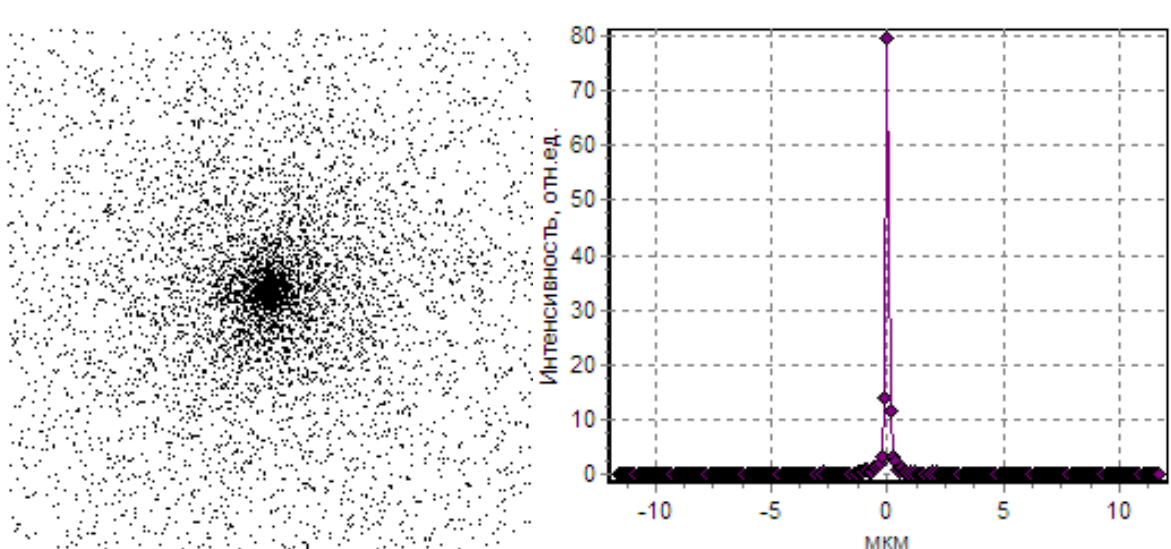


Рис. 2. Пример расчета рентгенооптических характеристик рентгеновской многоэлементной преломляющей линзы

Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.12 ГПНИ "Механика, металлургия, диагностика в машиностроении", подпрограмма "Техническая диагностика".

Библиографические ссылки

1. Dudchik Yu. I., Kolchevsky N. N. A microcapillary lens for X-rays//Nucl.Instr.Meth.A 421(1999)361.
2. Microscope using an x-ray tube and a bubble compound refractive lens / M. A. Piestrup [et al.] // Applied Physics Letters. 2005. 86 (13), 131104.
3. Using of a microcapillary refractive X-ray lens for focusing and imaging / Yu. I. Dudchik [et al.] // Spectrochimica Acta. 2007. V. B 62. P. 598–602.
4. Дудчик, Ю. И. Многоэлементная сферическая преломляющая линза для формирования микро- и наноразмерных пучков рентгеновского излучения // Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2008. № 2. С. 26–30.
5. Дудчик, Ю. И. Многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы – новый элемент рентгеновской техники // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 9-й Международ. конф., Секция 6. Оборудование и технология 20-22 сент. 2011 г. – Минск, 2011. С. 409–411.
6. Дудчик, Ю. И. Многоэлементная преломляющая рентгеновская линза для фотонов с энергией 18 кэВ / Ю. И. Дудчик, Т. Ванг, Б. Му // Приборостроение-2014 : материалы 7-й Международ. науч.-техн. конференции (19–21 ноября 2014 года, Минск, Республика Беларусь) / ред. колл.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. С. 290–291.
7. Кольчевская И.Н., Кольчевский Н. Н. Феникс линза // Труды школы молодых ученых «Современная рентгеновская оптика – 2022» / Нижний Новгород, 19–22 сентября 2022 г. С. 32–33.