

Спектральные характеристики фокусного пятна многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы

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 рассмотрен расчет спектральных характеристик фокусного пятна многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы с учетом спектрального распределения излучения рентгеновской трубки. Выполнено численное моделирование процесса распространения рентгеновского излучения в многоэлементной преломляющей линзе и расчет спектра фокусного пятна преломляющей рентгеновской линзы радиусом $R = 200$ мкм, состоящей из $N = 10$ отдельных микролинз в диапазоне энергий 1–20 кэВ. Получены зависимости интенсивности излучения и пропускания линзы от энергии фотонов. Показано, что пропускание линзы растет с энергией фотонов от 0,7 % до 91 %. Установлено, что преломляющая линза влияет на спектр источника: снижает общую интенсивность, ослабляет низкоэнергетическую часть и смещает положение максимума, уменьшает ширину спектра, пропускание растёт с энергией фотонов.

Ключевые слова: преломляющая рентгеновская оптика, многоэлементная преломляющая линза, рентгеновское излучение, спектральные характеристики, численное моделирование.

Spectral characteristics of multielement refractive X-ray lens's focal spot

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 calculation of spectral characteristics of the focal spot of a multi-element refractive X-ray lens, based on the spectral distribution of X-ray tube radiation. Performed numerical modeling of the process of X-ray radiation propagation in a multi-element refractive lens and calculation of the focal spot spectrum of a refractive X-ray lens with a radius of $R = 200$ μm , consisting of $N = 10$ separate microlenses in the energy range of 1–20 keV. Obtained dependencies of radiation intensity and lens transmittance on photon energy. It was shown that lens transmittance increases with photon energy from 0.7 % to 91 %. Established that the refractive lens affects the spectrum of the source: it reduces the overall intensity, attenuates the low-energy part and shifts the position of the maximum, reduces the width of the spectrum, and the transmission increases with photon energy.

Keywords: refractive X-ray optics, multielement refractive lens, X-rays, spectral characteristics, numerical modeling.

Введение

Источниками рентгеновских лучей служат рентгеновские трубки и ускорители заряженных частиц, включая синхротроны. Наиболее распространёнными источниками рентгеновских лучей являются рентгеновские трубки из-за их компактности и относительной дешевизны. Рентгенооптические методы исследования являются основой для исследования свойств и структуры без нарушения целостности объектов. Многие сверхчувствительные методы рентгенографических и рентгено-

структурных исследований, которые сегодня применяются на синхронном излучении, разрабатывались и очень долгое время работали исключительно в установках построенных на базе рентгеновских трубок.

Преломляющая рентгеновская оптика – это новое направление, посвященное созданию линз и других оптических элементов, способных эффективно управлять рентгеновским излучением за счет явления преломления. В отличие от отражательной и дифракционной оптики, преломляющие элементы способны работать при больших энергиях фотонов рентгеновского излучения, что важно для развития рентгеновской микроскопии, томографии и спектроскопии.

Целью данной работы является расчет спектральных характеристик фокусного пятна многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы с учетом спектрального распределения излучения рентгеновской трубки.

1. Спектральные характеристики фокусного пятна многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы

Для различных рентгеновских источников, генерируемое число фотонов может различным способом зависеть от их энергии. Рентгеновские трубки и поворотные магнитные системы на синхротронах генерируют излучение с широким гладким спектром.

На рис. 1 показан результат расчета тормозного спектра лабораторного источника с медным анодом при ускоряющем напряжении 20 кВ в приближении отсутствия самопоглощения излучения анодом.

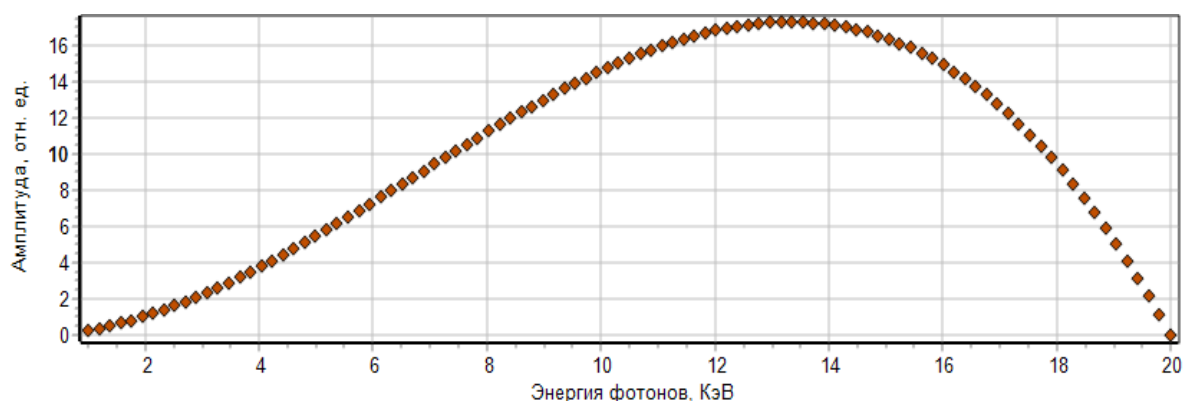


Рис. 1. Спектр рентгеновской трубки с медным анодом и ускоряющим напряжением 20 кВ

Полученная зависимость положена в основу для численного моделирования процесса распространения рентгеновского излучения в многоэлементной преломляющей линзе и расчета спектра фокусного пятна преломляющей рентгеновской линзы радиусом $R = 200$ мкм, состоящей из $N = 10$ отдельных микролинз толщиной $d = 0$ мкм в диапазоне энергий 1–20 кэВ.

Результаты расчетов показаны на рис. 2. На графике изображены три зависимости, показывающие, как изменяются характеристики рентгеновского излучения в зависимости от энергии фотонов. Исходное распределение интенсивности излучения характеризуется максимумом около 18 отн. ед. при энергии 13 кэВ.

Спектр изменяется после прохождения через линзу: интенсивность уменьшается в связи с поглощением в материале линзы, максимум смещён к большей энергии равной 14 кэВ и составляет 18 отн. ед. Уменьшение интенсивности и смещение максимума объясняются значительным поглощением низкоэнергетических рентгеновских фотонов, что показано графиком пропускания линзы масштабированным по правой оси. Как видно из графика, пропускание увеличивается с ростом энергии от 0,7 % при энергии рентгеновских фотонов 2 кэВ до 91 % при энергии рентгеновских фотонов 20 кэВ, что типично для рентгенооптических элементов.

Расчёты показывают, что преломляющая рентгеновская линза влияет на спектр источника: снижает общую интенсивность и ослабляет низкоэнергетическую часть спектра, смещает положение максимума, уменьшает ширину спектра, пропускание растёт с энергией фотонов.

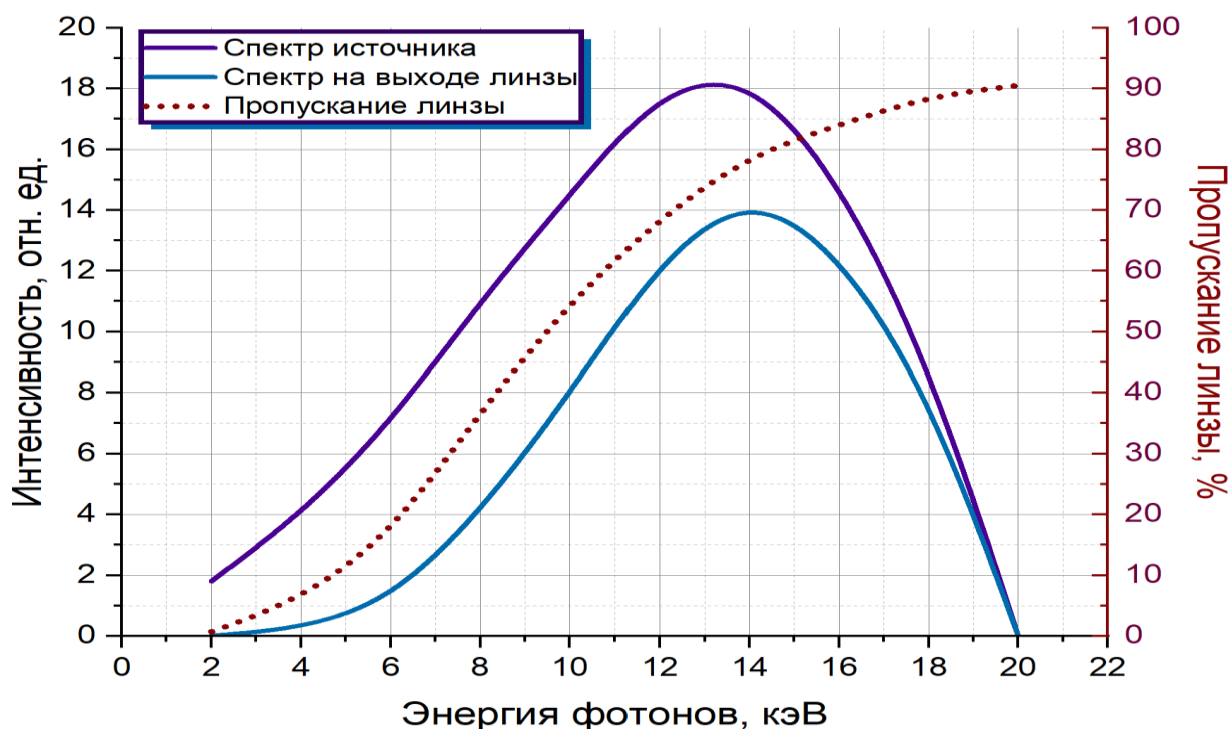


Рис. 2. Спектр рентгеновской трубки с медным анодом и ускоряющим напряжением 20 кВ

Преломляющая рентгеновская оптика является уникальной для фокусировки жесткого рентгеновского излучения и формирования изображений объектов. Использование материалов с низким поглощением позволяет создавать преломляющие рентгеновские линзы малого радиуса для современных лабораторных источников. Преломляющие рентгеновские линзы существенно влияют на спектр излучения источника, что необходимо учитывать при разработке рентгенооптических измерительных систем.

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

Библиографические ссылки

1. Microspot X-ray focusing using a short focallength compound refractive lenses. / Yu. I. Dudchik [et al.] // Rev. Sci. Instr. 2004. Vol. 75, N. 11, P.4651–4655.
2. Using of a microcapillary refractive X-ray lens for focusing and imaging / Dudchik Yu. I. [et al.] // Spectrochimica Acta. 2007. Vol. B 62. P. 598–602.
3. 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.
4. Дудчик, Ю. И. Многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы – новый элемент рентгеновской техники // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 9-й Междунар. конф., Секция 6. Оборудование и технология 20–22 сент. 2011 г. – Минск, 2011. С. 409–411.
5. Дудчик Ю. И. Определение размеров источников рентгеновского излучения с использованием многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы // Приборы и методы измерений. 2011. № 2(3). С. 75–80.
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 Международной научно-технической конференции (19–21 ноября 2014 года, Минск, Республика Беларусь) / ред. колл.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2014. С. 290–291.
7. Dudchik Yu.I., Kolchevsky N.N. A microcapillary lens for X-rays / Nucl.Instr.Meth.A 421(1999)361.
8. Дудчик Ю.И. Рентгенооптические параметры микрокапиллярной линзы / Ю. И. Дудчик, Н. Н. Кольчевский, Ф. Ф. Комаров // Журнал Технической физики. Т. 69, 1999. С. 24.
9. Microscope using an x-ray tube and a bubble compound refractive lens / M. A. Piestrup [et al.] // Applied Physics Letters. 2005. 86 (13), 131104.
10. Балухо И. Н. Комплекс для моделирования элементов рентгеновской оптики / И. Н. Балухо, Ю. И. Дудчик, Н. Н. Кольчевский // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики, аэрокосмических технологий и физики конденсированного состояния : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конференции, 22–23 мая 2025 г. Минск / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та; редкол.: П. В. Кучинский (гл. ред.) [и др.]. – Минск: «СтройМедиаПроект», 2025. С. 147–148.
11. Дудчик Ю.И. Преломляющая оптика для рентгеновских лучей / Ю. И. Дудчик, Н. Н. Кольчевский, Ф. Ф. Комаров // Выбранные науковыя працы Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта / Оптыка і лазерная фізіка. Т.4. – БГУ, 2001 С.73–89.
12. 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.
13. Балухо И. Н. Расчет фокусного расстояния рентгеновского составного линзового волновода / И. Н. Балухо, Ю. И. Дудчик, Н. Н. Кольчевский // Новые направления развития приборостроения: материалы 17-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов / редкол.: О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2024. С. 191.
14. Дудчик Ю. И. Получение изображений объектов в рентгеновских лучах с использованием пинхол-камеры и оптики Кумахова / Ю. И. Дудчик, И. Н. Балухо, Н. Н. Кольчевский // Приборостроение-2024 : Материалы 17-й Международной научно-технической конференции, 26-29 ноября 2024 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: А. И. Свистун (председатель) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2024. С. 48–49.
15. Дудчик, Ю. И. Рентгеновская микротомография с лабораторным источником излучения / Ю. И. Дудчик [и др.] // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики, аэрокосмических технологий и физики конденсированного состояния : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конференции, 22–23 мая 2025 г. Минск / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А. Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та; редкол.: П. В. Кучинский (гл. ред.) [и др.]. – Минск: «СтройМедиаПроект», 2025. С. 206–209.