

Изготовление и исследование волноводных структур на основе Si/Be/SiO₂ для рентгеновского диапазона

Н.В. Загайнов¹, Р.С. Плешков¹, В.Н. Полковников¹, Д.Г. Реунов¹, Р.М. Смертин¹, Н.И. Чхало¹

¹ Институт физики микроструктур РАН, 603087 Нижний Новгород, Россия

Настоящая работа посвящена созданию и последующему экспериментальному тестированию планарных рентгенооптических волноводных систем Si/Be/SiO₂, кором которых выступает слой бериллия толщиной 30 нм. Использование бериллия продиктовано его малой электронной плотностью: это дает возможность существенно нарастить эффективную длину распространения излучения (при энергии 8 кэВ) на фоне классических решений на базе углерода или карбида бора [1–4]. Захват жесткого рентгеновского пучка (на длине волны $\lambda = 0,154$ нм, соответствующей линии Cu K α_1) осуществлялся посредством резонансного возбуждения [5], что гарантирует высокую степень ввода излучения за счет увеличенной входной апертуры.

Формирование многослойных структур методом магнетронного напыления опиралось на отработанные технологические подходы к созданию бериллиевой рентгеновской оптики [6–8]. В качестве базовых поверхностей для осаждения применялись стеклянные подложки со сверхгладким рельефом. В ходе измерений было установлено, что резонансный угол падения равен 0,204°. Данная величина демонстрирует отличное совпадение с расчетным значением в 0,203°, полученным с применением матричного формализма [9,10].

С целью корректной обработки спектра выходящего излучения и сепарации волноводной моды был применен подход, базирующийся на использовании профиля псевдо-Фойгта [11,12]. Оценка эффективности структуры продемонстрировала расхождение между расчетным (2,19%) и практически достигнутым (1,58%) значениями КПД. Данный эффект объясняется дополнительными потерями энергии моды на рассеяние, вызванное неидеальностью межслойных границ. Привлечение статического фактора Дебая–Валлера [13] позволило определить среднеквадратичную шероховатость на границах раздела фаз стекло/Be и Be/Si, составившую приблизительно 1,5 нм. Предложенный в работе подход демонстрирует высокий потенциал как

инструмент для неразрушающего контроля скрытых интерфейсов, а также для дальнейшего совершенствования технологий производства элементов рентгеновской оптики.

1. Miao J. Extending the methodology of X-ray crystallography to non-crystalline specimens // AIP Conference Proceedings. Stanford, California (USA): AIP, 2000. Т. 521. С. 3–6.
2. Wilke R. N. и др. Quantitative X-ray phase contrast waveguide imaging of bacterial endospores // J Appl Crystallogr. 2015. Т. 48, № 2. С. 464–476.
3. Feng Y. P. и др. X-ray Fraunhofer diffraction patterns from a thin-film waveguide // Applied Physics Letters. 1995. Т. 67, № 24. С. 3647–3649.
4. Müller M. и др. Microcrystallography with an X-ray waveguide // J Appl Crystallogr. 2000. Т. 33, № 5. С. 1231–1240.
5. Pelliccia D. и др. Advancements in X-ray waveguides and their applications in coherent diffraction imaging // Radiation Physics and Chemistry. 2009. Т. 78, № 10. С. S42–S45.
6. Polkovnikov V. N. и др. Beryllium-based multilayer X-ray optics // Phys.-Usp. 2020. Т. 63, № 1. С. 83–95.
7. Chkhalo N. I. и др. Be/Al-based multilayer mirrors with improved reflection and spectral selectivity for solar astronomy above 17 nm wavelength // Thin Solid Films. 2017.
8. Svechnikov M. V. и др. Influence of barrier interlayers on the performance of Mo/Be multilayer mirrors for next-generation EUV lithography // Opt. Express. 2018. Т. 26, № 26. С. 33718.
9. Born M., Wolf E., Bhatia A. B. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge University Press, 1999. 1000 с.
10. Parratt L. G. Surface Studies of Solids by Total Reflection of X-Rays // Phys. Rev. 1954. Т. 95, № 2. С. 359–369.
11. Thompson P., Cox D. E., Hastings J. B. Rietveld refinement of Debye–Scherrer synchrotron X-ray data from Al₂O₃ // Journal of Applied Crystallography. 1987.
12. Wertheim G. K. и др. Determination of the Gaussian and Lorentzian content of experimental line shapes // Review of Scientific Instruments. 1974.
13. Als-Nielsen J., McMorrow D. Elements of Modern X-ray Physics. Hoboken : John Wiley & Sons, 2011.