

УДК 538.975

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ И МИКРОСТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ЗЕРКАЛ Mo/Be

© 2023 г. Г. Д. Антышева^{a, b, *}, Н. Кумар^{a, **}, Р. С. Плешков^a,
П. А. Юнин^{a, b}, В. Н. Полковников^a, Н. И. Чхало^a

^aИнститут физики микроструктур РАН,
Афонино, Нижний Новгород, 603087 Россия

^bНижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: sikretnoo@mail.ru

**e-mail: kumar@ipmras.ru

Поступила в редакцию 20.01.2023 г.

После доработки 27.03.2023 г.

Принята к публикации 27.03.2023 г.

Коэффициент отражения и микроструктура многослойных зеркал Mo/Be были исследованы в зависимости от величины Γ — отношения толщины слоя Mo к периоду d_p . Толщина и период слоев были изучены с помощью рентгеновской дифракции (длина волны 0.154 нм). Четко выраженные пики брэгговского отражения высокой интенсивности указывают на хорошую воспроизводимость толщин слоев по глубине многослойной структуры и высокое качество границ раздела. Отражательная способность зеркала на длине волны 11.4 нм составляла максимум 62% при $\Gamma = 0.42$. Она резко снижалась при более высоком и более низком значении Γ . Оба слоя Mo и Be при $\Gamma = 0.42$ представляли собой поликристаллы, которые были исследованы с помощью рентгеновской дифракции и спектроскопии комбинационного рассеяния света соответственно. Также было установлено, что размеры кристаллитов почти совпадают с толщинами слоев Be и Mo в периоде.

Ключевые слова: микроструктура, многослойная пленка Mo/Be, коэффициент отражения, граница раздела.

DOI: 10.31857/S1028096023120026, EDN: AXEXNB

ВВЕДЕНИЕ

Периодические многослойные структуры, состоящие из слоев тяжелых и легких материалов, широко используются в качестве зеркал для спектроскопии, микроскопии и литографии, работающих в областях экстремального ультрафиолета и мягкого рентгена [1–5]. Многослойные зеркала Mo/Be представляют значительный интерес для литографии следующего поколения на длине волны короче 13.5 нм, исследованиям их отражательных характеристик в области длин волн 11.1–12.4 нм посвящено значительное число работ [6–9].

Коэффициент отражения можно повысить за счет изучения микроструктуры многослойного материала и оптимизации толщины слоев, т.е. отношения Γ толщины слоя тяжелого материала к периоду d_p [9–11]. В работе исследовано влияние доли Mo в периоде Mo/Be многослойного зеркала (параметра Γ) на коэффициент отражения на длине волны 11.4 нм и микроструктуру пленок Mo и Be.

Для изучения микроструктуры многослойного материала важно выбрать актуальную методику. Сочетание методов дифракции и комбинационного рассеяния света позволяют получить информацию о микроструктуре Mo и Be. Комбинационное рассеяние света является перспективным методом для изучения микроструктуры слоев Be, поскольку этот материал прозрачен для рентгеновских лучей, в то время как традиционная рентгеновская дифракция для изучения микроструктуры слоев Be неэффективна. Гексагональная решетка Be имеет шесть колебательных мод $A_{2u} + B_{1g} + E_{1u} + E_{2g}$ с волновым вектором $k = 0$. Активной по отношению к комбинационному рассеянию является одна двойная вырожденная поперечная оптическая мода E_{2g} , которая возбуждается около 457 см⁻¹ [12–14]. В аморфной структуре Be периодичность кристаллической решетки нарушается, поэтому возбуждение может происходить также при волновом векторе $k \neq 0$. Исследование слоя Mo с помощью спектроскопии ком-

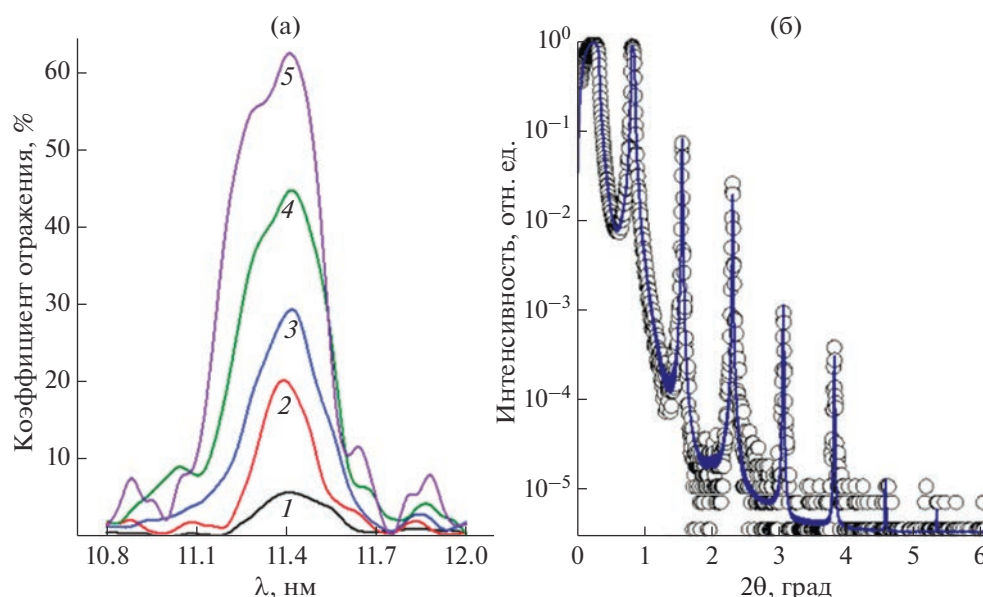


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения периодических многослойных зеркал от длины волны при различных $\Gamma = d_{\text{Mo}}/d_{\text{Be}}$ (а): 1 – 0.91; 2 – 0.83; 3 – 0.58; 4 – 0.74; 5 – 0.42. Отражательная способность периодического многослойного материала Mo/Be ($\text{Be}_{3.39}/\text{Mo}_{2.48}$) (б).

бинационного рассеяния света невозможно из-за отсутствия оптических фононов.

Для исследования микроструктуры слоев Mo применяли метод рентгеновской дифракции, который показал существование Mo в поликристаллической фазе [15] с главной ориентацией кристаллитов [110]. Интенсивность пиков дифракции увеличивается с увеличением толщины слоев Mo в многослойных структурах, также размер кристаллитов с ориентацией [110] растет с увеличением толщины слоев Mo [11].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Периодические многослойные зеркала Mo/Be с общим числом периодов 50 были нанесены методом магнетронного напыления при постоянном токе на подложки из монокристаллического кремния Si(100) толщиной 0.5 мм. После напыления толщину многослойных зеркал измеряли на высокоразрешающем четырехкристальном дифрактометре PANalitycal Expert'Pro (CuK_α -излучение, $\lambda = 0.154$ нм, θ – 2θ -сканирование). Микроструктуру слоев Mo изучали методом рентгеновской дифракции на дифрактометре Bruker D8 Discover (CuK_α -излучение, $\lambda = 0.154$ нм, θ – 2θ -сканирование). Для измерения коэффициента отражения многослойной пленки Mo/Be использовали лабораторный рефлектометр, который работает в диапазоне мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн [16]. Микроструктуру Be изучали методом комбинационного рассеяния света на установке компа-

нии NT-MDT (Зеленоград, Россия), длина волны возбуждения 473 нм, спектральное разрешение 0.8 см^{-1} . Мощность несфокусированного лазерного пучка измеряли с помощью кремниевоего фотоприемника 11PD100-Si (Standa Ltd.). В ходе измерений плотность мощности лазера составляла около $5 \times 10^{-3} \text{ МВт/см}^2$, что позволило избежать нагрева образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость коэффициента отражения мягкого рентгеновского излучения от длины волны при различных параметрах Γ приведена на рис. 1а. Как видно из рисунка, отражательная способность максимальна для $\Gamma = 0.42$ при толщинах слоев Be и Mo, соответственно, 3.39 и 2.48 нм. Для простоты этот образец будет обозначен $\text{Be}_{3.39}/\text{Mo}_{2.48}$. Также видно, что отражательная способность уменьшается при увеличении или уменьшении Γ . Это изменение связано с рядом физических причин: зависимостью плотности, а значит и диэлектрической проницаемости материалов, от толщины пленок [17, 18]; наличием баланса между рассеянной и поглощенной мощностью рентгеновского излучения в многослойной структуре, а также с зависимостью свойств границ разделов от толщин пленок [10, 19].

Структурные особенности периодического многослойного зеркала $\text{Be}_{3.39}/\text{Mo}_{2.48}$ были изучены на основе данных подгонки измеренной угловой зависимости коэффициента отражения на длине волны $\lambda = 0.154$ нм (рис. 1б). Анализ экспе-

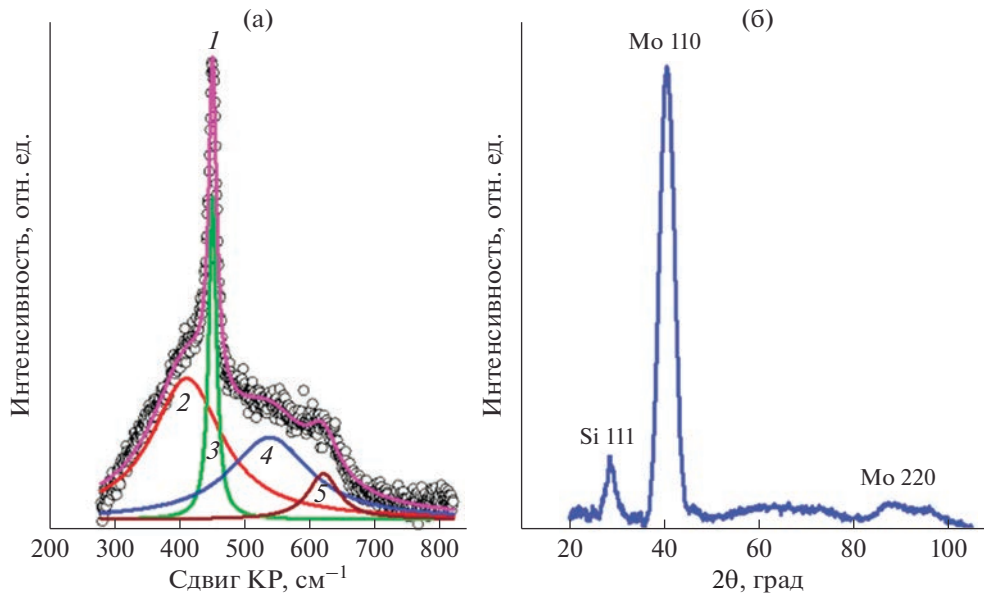


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния света (а) с широким пиком (1), состоящим из нескольких компонентов: 2 – аморфная фаза бериллия; 3 – пик оптической фононной моды поликристаллического Ве; 4 – оксид бериллия BeO_2 ; 5 – оксид бериллия ВеО. Дифрактограмма пленки Ве, интегрированного в периодические многослойные зеркала $\text{Be}_{3.39}/\text{Mo}_{2.48}$ (б).

риментальных кривых был проведен с использованием кода Multifitting [20]. Четко выраженные брэгговские пики вплоть до шестого–седьмого порядка указывают на высокую степень совершенства полученного многослойного зеркала.

Исследования, проведенные с помощью комбинационного рассеяния света и рентгеновской дифракции, показали, что в образцах пленки Ве и Мо находятся в поликристаллической фазе. В спектре комбинационного рассеяния света наблюдался широкий пик, состоящий из нескольких компонент (рис. 2а). Пик, находящийся на частоте 450.4 см^{-1} шириной 14.2 см^{-1} , соответствует оптической фононной моде Ве, которая указывает на поликристаллическую фазу, дополнительные пики связаны с аморфными и окисленными фазами Ве [21].

Качество поликристаллической фазы Мо определяется размером кристаллитов и ориентацией. Результаты рентгенографии пленки Мо в образце $\text{Be}_{3.39}/\text{Mo}_{2.48}$ (рис. 2б) показали пик поликристаллической фазы Мо [15] с ориентацией [110], расположенный под углом 40.47° . Размер кристаллитов (L_{cr}) Мо составлял 2.46 нм , т.е. почти равен толщине слоя Мо в периодах. Он был рассчитан на основе уравнения Шеррера:

$$L_{\text{cr}} = K\lambda/(\beta \cos \theta), \quad (1)$$

где λ , β и θ – длина волны рентгеновского излучения, полуширина дифракционного пика и угол Брэгга соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многослойные зеркала Мо/Ве были нанесены методом магнетронного напыления при постоянном токе на монокристаллические подложки Si. Оптические свойства и микроструктуру многослойных зеркал Мо/Ве исследовали с помощью рентгеновской рефлектометрии и дифрактометрии, а также спектроскопии комбинационного рассеяния света. Исследована зависимость отражательной способности многослойных зеркал от величины Γ (отношения толщины слоя Мо к периоду). Максимальное значение коэффициента отражения на длине волны 11.4 нм 62% было получено при $\Gamma = 0.42$. Было обнаружено, что оба слоя Мо и Ве в периодах существуют в поликристаллических фазах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Алексея Нежданова за помощь в измерении спектров комбинационного рассеяния света. Исследования образцов выполнены в лаборатории диагностики радиационных дефектов в твердых наноструктурах ИФМ РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (г/з № 0030-2021-0030). Использовано оборудование ЦКП ИФМ РАН.

Конфликт интересов: авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Medvedev R.V., Zameshin A.A., Sturm J.M., Yakshin A.E., Bijkerk F. // *AIP Adv.* 2020. V. 10. P. 45305. <https://doi.org/10.1063/1.5143397>
2. Underwood J.H., Barbee T.W., Jr., Frieber C. // *Appl. Opt.* 1986. V. 25. P. 1730. <https://doi.org/10.1364/AO.25.001730>
3. Yu B., Jin C., Yao S., Li C., Liu Y., Zhou F., Guo B., Wang H., Xie Y., Wang L. // *Appl. Opt.* 2017. V. 56. P. 7462. <https://doi.org/10.1364/AO.56.007462>
4. Huang Q., Medvedev V., van de Kruijs R., Yakshin A., Louis E., Bijkerk F. // *Appl. Phys. Rev.* 2017. V. 4. P. 11104. <https://doi.org/10.1063/1.4978290>
5. Akhsakhalyan A.D., Kluekov E.B., Lopatin A.A., Luchin V.I., Nechay A.N., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Svechnikov M.V., Toropov M.N., Tsybin N.N., Chkhalo N.I., Shcherbakov A.V. // *J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2017. V. 11. P. 1. <https://doi.org/10.7868/S0207352817010048>
6. Bajt S. // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2000. V. 18. P. 557.
7. Svechnikov M.V., Chkhalo N.I., Gusev S.A., Nechay A.N., Pariev D.E., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Tatarskiy D.A., Salashchenko N.N., Schafers F., Sertsu M.G., Sokolov A., Vainer Y.A., Zorina M.V. // *Optics Express.* 2018. V. 26. P. 33718. <https://doi.org/10.1364/OE.26.033718>
8. Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Свечников М.В., Чхало Н.И. // *УФН.* 2020. Т. 190. С. 92. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.05.038623>
9. Kumar N., Pleshkov R.S., Garakhin S.A., Nezhdanov A.V., Yunin P.A., Polkovnikov V.N., Chkhalo N.I. // *Surf. Interfaces.* 2022. V. 28. P. 101656. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2021.101656>
10. Kozakov A.T., Kumar N., Garakhin S.A., Polkovnikov V.N., Chkhalo N.I., Nikolskii A.V., Serjabin A.A., Nezhdanov A.V., Yunin P.A. // *Appl. Surf. Sci.* 2021. V. 566. P. 150616. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150616>
11. Kumar N., Pleshkov R.S., Nezhdanov A.V., Polkovnikov V.N., Yunin P.A., Chkhalo N.I., Mashin A.I. // *J. Phys. Chem.* 2021. V. 125. P. 2729. <https://doi.org/10.1021/ACS.JPCC.0C10210>
12. Pardanaud C., Rusu M.I., Giacometti G., Martin C., Addab Y., Roubin P., Lungu C.P., Porosnicu C., Jecu I., Dinca P., Lungu M., Pompilian O.G., Mateus R., Alves E., Rubel M. // *Phys. Scr.* 2016. V. 167. P. 14027. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/T167/1/014027>
13. Feldman D.W., Parker J.H., Jr., Ashkin M. // *Phys. Rev. Lett.* 1968. V. 21. P. 607. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.21.607>
14. Roy A.P., Dasannacharya B.A., Thaper C.L., Iyengar P.K. // *Phys. Rev. Lett.* 1973. V. 30. P. 906. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.30.906>
15. Nedelcu I., van de R.W.E., Yakshin A.E., Bijkerk F. // *Phys. Rev. B.* 2007. V. 76. P. 245404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.245404>
16. Гарахин С.А., Забродин И.Г., Зуев С.Ю., Касков И.А., Лопатин А.Я., Нечай А.Н., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Цыбин Н.Н., Чхало Н.И. // *Квантовая электроника.* 2017. Т. 47. № 4. С. 385.
17. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Electrodynamics of Continuous Media.* Oxford: Pergamon Press, 1984. 475 p.
18. Starkov I.A., Starkov A.S. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 741. P. 12004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/741/1/012004>
19. Chkhalo N.I., Fedorchenko M.V., Kovalenko N.V., Kruglyakov E.P., Volokhov A.I., Chernov V.A., Mytnichenko S.V. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 1995. V. 359. P. 121. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)01633-X](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)01633-X)
20. Svechnikov M. // *J. Appl. Crystallogr.* 2020. V. 53. P. 244. <https://doi.org/10.1107/S160057671901584X>
21. Kumar N., Pleshkov R.S., Nezhdanov A.V., Polkovnikov V.N., Yunin P.A., Chkhalo N.I., Mashin A.I. // *J. Phys. Chem. C.* 2021. V. 125. P. 2729. <https://doi.org/10.1021/ACS.JPCC.0C10210>

Study of Reflectivity and Microstructure of Mo/Be Multilayer Mirrors

G. D. Antysheva^{1,2,*}, N. Kumar^{1,**}, R. S. Pleshkov¹, P. A. Yunin^{1,2}, V. N. Polkovnikov¹, N. I. Chkhalo¹¹Institute for Physics of Microstructures RAS, Afonino, Nizhny Novgorod, 603087 Russia²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

*e-mail: sikretnoo@mail.ru

**e-mail: kumar@ipmras.ru

The reflection coefficient and microstructure of Mo/Be multilayer mirrors were studied as functions of Γ , the ratio of the Mo layer thickness to the period d_p . The thickness and period of the layers were studied using X-ray diffraction (wavelength 0.154 nm). Clearly defined high-intensity Bragg reflection peaks indicate good reproducibility of layer thicknesses over the depth of the multilayer structure and high quality of interfaces. The reflectivity of the mirror at a wavelength of 11.4 nm was maximum 62% at $\Gamma = 0.42$. It sharply decreased at higher and lower values of Γ . Both Mo and Be layers at $\Gamma = 0.42$ were polycrystals, which were studied using X-ray diffraction and Raman spectroscopy, respectively. It was also found that the sizes of crystallites almost coincided with the thicknesses of the Be and Mo layers in the period.

Keywords: microstructure, Mo/Be multilayer film, reflection coefficient, interface.