

УДК 621.793.14

МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА Mo/Si С БАРЬЕРНЫМИ СЛОЯМИ В₄C И Ве

© 2019 г. С. Ю. Зуев¹, Д. Е. Парьев¹, Р. С. Плешков¹, В. Н. Полковников^{1, *},
Н. Н. Салашенко¹, М. В. Свечников¹, М. Г. Сертсу¹, А. Соколов¹, Н. И. Чхало¹, Ф. Шаферс¹

¹Институт физики микроструктур РАН, 603087 Нижний Новгород, Россия

*E-mail: polkovnikov@ipmras.ru

Поступила в редакцию 21.06.2018 г.

После доработки 21.06.2018 г.

Принята к публикации 21.06.2018 г.

Методом магнетронного распыления для отражения в окрестности длины волны 13.5 нм синтезированы и изучены традиционные многослойные зеркала Mo/Si и зеркала, содержащие в качестве прослоек В₄C и Ве. Измерены угловые и спектральные зависимости коэффициентов отражения. Показано, что на длинах волн 12.4, 12.7, 13.0 и 13.5 нм четырехкомпонентные многослойные зеркала типа Mo/Ве/Si/В₄C превосходят по коэффициенту отражения более чем на 2% зеркала Mo/Si и более чем на 1% зеркала Mo/Si/В₄C.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, многослойные зеркала, магнетронное распыление.

DOI: 10.1134/S0207352819030211

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к многослойным зеркалам нормального падения на основе Mo/Si не ослабевает с момента первой посвященной им публикации [1] благодаря относительно высокому коэффициенту отражения в широком диапазоне длин волн 13–30 нм. Особое значение они приобрели в связи с развитием технологии проекционной литографии с рабочей длиной волны 13.5 нм. В первую очередь здесь выделяется задача, связанная с необходимостью максимизации отражения в рассматриваемой спектральной области. С учетом многократного (10 раз и больше) отражения излучения при прохождении через оптическую систему литографической установки коэффициент отражения становится критически важной величиной. Увеличение его даже на относительно небольшую величину (1–2%) может привести к существенно экономическому эффекту.

Зеркала Mo/Si для диапазона длин волн вблизи 13 нм изучали, например, в [2–7]. Пиковый коэффициент отражения достигает 68% при теоретическом пределе 74%. Основной причиной отличия экспериментальных результатов от теоретического расчета является наличие протяженных переходных областей на границах раздела материалов структур. Отмечена также асимметрия переходных областей. В случае осаждения кремния на молибден (Si-на-Mo) ширина оценивается как 0.5–0.6 нм, в случае осаждения молибдена на кремний (Mo-на-Si) – как 1–1.2 нм.

Основной методикой увеличения коэффициентов отражения многослойных зеркал Mo/Si является методика барьерных слоев, заключающаяся в осаждении на поверхность молибдена и/или кремния третьих материалов. Наиболее распространенные барьерные материалы – углерод и карбид бора В₄C [8–11]. Главная задача – это улучшение границы Mo-на-Si. В результате максимальный коэффициент отражения для структур типа Mo/В₄C/Si/В₄C и Mo/Si/C составил 70.15% на длине волны 13.5 нм и до 71% на длине волны 12.7 нм.

В [12] сообщается об улучшении отражательной способности Mo/Si на 2% при внедрении в систему Ве в качестве промежуточного слоя. Было показано, что осаждение слоя бериллия на поверхность молибдена приводит к сглаживанию границы (Mo-на-Si) – шероховатости порядка 0.6 нм. В то же время шероховатость границы Ве-на-Mo оценивается как 0.4 нм. Были достигнуты коэффициенты отражения более 71% при $\lambda = 13.5$ нм и более 72% при $\lambda = 12.9$ нм. Таким образом, ранее было показано, что сглаживание наиболее проблемной границы Mo-на-Si происходит и при осаждении В₄C на поверхность кремния, и при осаждении Ве на поверхность молибдена. Шероховатость границы Ве-на-Mo остается невысокой.

Следующим шагом на пути повышения отражающей способности многослойных зеркал Mo/Si

Таблица 1. Основные параметры исследуемых образцов ($\langle d \rangle$ – средний период, $\langle d(M) \rangle$ – средняя толщина пленки материала M : молибден, кремний, бериллий, карбид бора)

Образец	$\langle d \rangle$, нм	$\langle d(M) \rangle$, нм
PR61, Mo/Si	6.90	3.10 (Mo) 3.80 (Si)
PR64, Mo/Si/B ₄ C	6.91	2.94 (Mo) 3.64 (Si) 0.33 (B ₄ C)
PR70, Mo/Be/Si/B ₄ C	6.88	2.80 (Mo) 0.30 (Be) 3.45 (Si) 0.33 (B ₄ C)

должен стать синтез структуры типа Mo/Be/Si/B₄C. Исследованию такого зеркала посвящена настоящая работа. В ней рассматривается влияние на коэффициент отражения осаждения барьерных слоев Be и B₄C и сравнивается отражающая способность следующих многослойных систем: Mo/Si, Mo/Si/B₄C и Mo/Be/Si/B₄C (порядок материалов дан в направлении роста структур от подложки к поверхности).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Многослойные зеркала синтезировали методом магнетронного напыления при постоянном токе на установке, оснащенной шестью магне-

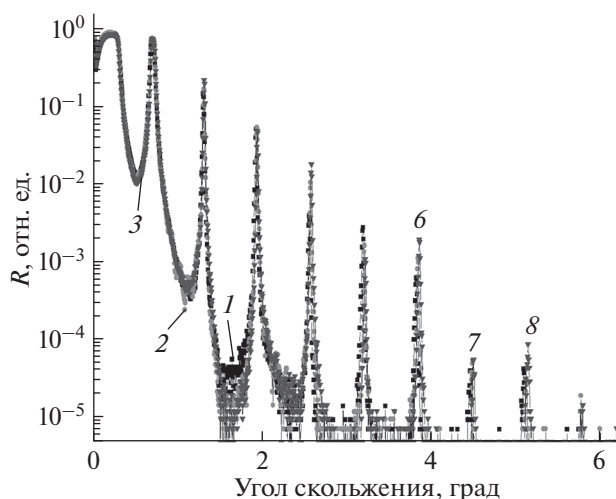


Рис. 1. Измеренные угловые зависимости коэффициента отражения образцов Mo/Si (1), Mo/Si/B₄C (2) и Mo/Be/Si/B₄C (3) на длине волны 0.154 нм. Цифрами 6, 7 и 8 обозначены дифракционные пики соответствующих порядков.

тронами планарного типа. Каждый магнетрон представляет собой источник с кольцевым разрядом. На поверхности расположена мишень распыляемого материала диаметром 150 мм и толщиной от 6 мм. В качестве рабочей среды использовали высокочистый (99.998%) газ аргон. Рабочее давление газа в технологическом процессе составляет $\sim 10^{-1}$ Па. Характерная скорость роста пленок ~ 0.1 – 1 нм/с. Материалы, формирующие многослойные зеркала, осаждались на сверхгладкие (среднеквадратичная величина шероховатости 0.1–0.2 нм) кремниевые подложки. Давление остаточных газов было не выше 10^{-4} Па [13]. В ходе экспериментов были синтезированы многослойные структуры трех типов: Mo/Si, Mo/Si/B₄C и Mo/Be/Si/B₄C.

Основные параметры многослойных зеркал, такие как период, толщины индивидуальных слоев, межслойные шероховатости, изучали методом малоугловой рентгеновской дифракции. Измерения проводили в диапазоне углов падения излучения на образец $\theta = 0^\circ$ – 6° с использованием четырехкристального высокоразрешающего дифрактометра PANalitical X'Pert Pro ($\lambda = 0.154$ нм). По результатам измерений осуществляли подгонку и определяли модельную структуру. Для подгонки кривых отражения использовали программное обеспечение IMD [13] и собственную модель [14].

Измерения в окрестности длины волны 13.5 нм проводили на лабораторном рефлектометре со спектрометром-монокроматором РСМ-500 [15] и на трехосном рефлектометре на оптической линии накопительного кольца BESSY-2 [16]. Изучали угловые (при фиксированной энергии фотонов) и спектральные (при фиксированном угле падения излучения) зависимости коэффициентов отражения многослойных зеркал. В табл. 1 представлены основные параметры многослойных зеркал. Число периодов для всех образцов $N = 50$. Периоды образцов были близки друг другу. Это обеспечивает корректное сравнение отражательных характеристик разных многослойных зеркал, поскольку максимумы коэффициентов отражения зеркал на спектральных зависимостях оказываются рядом, и можно пренебречь разницей коэффициентов преломления в структурах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены результаты измерений методом малоугловой рентгеновской дифракции образцов трех типов. Параметры образцов настолько близки, что на рисунке практически сливаются в одну кривую. Для наглядного представления эффекта применения барьерных слоев на рис. 2 вынесены шестой, седьмой и восьмой дифракционные пики. В таком представлении не-

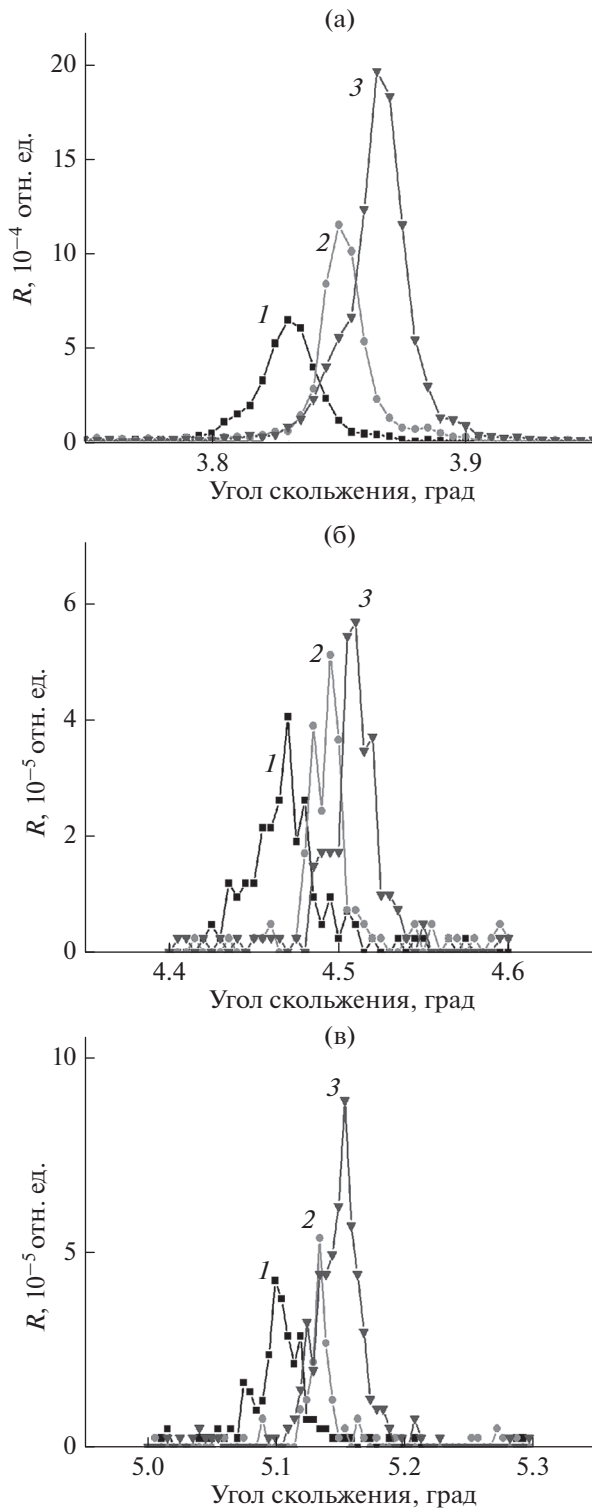


Рис. 2. Шестой (а), седьмой (б) и восьмой (в) порядки отражения образцов Mo/Si (1), Mo/Si/B₄C (2) и Mo/Be/Si/B₄C (3) на длине волны 0.154 нм.

трудно выявить общую закономерность: пики дальних дифракционных порядков в случае многослойных зеркал с барьерными слоями заметно

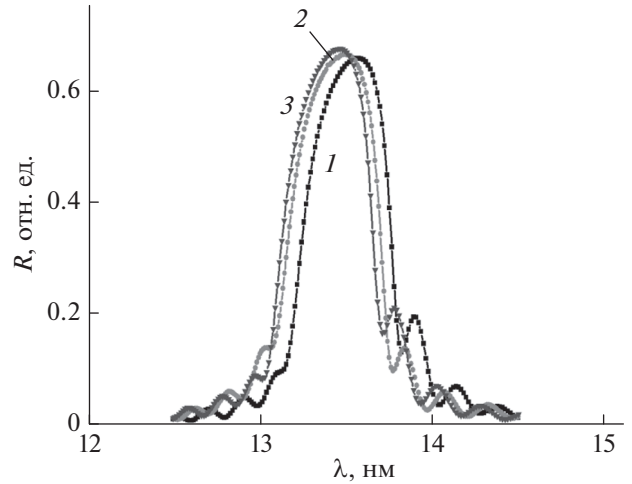


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента отражения образцов Mo/Si (1), Mo/Si/B₄C (2) и Mo/Be/Si/B₄C (3), снятые при угле скольжения излучения 88°.

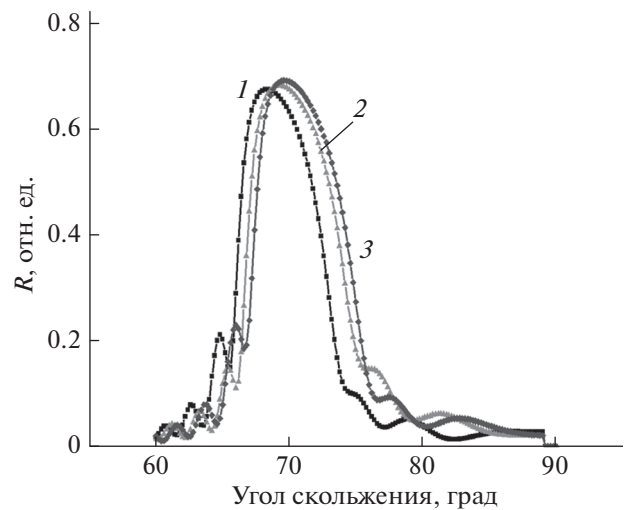


Рис. 4. Угловые зависимости коэффициента отражения образцов Mo/Si (1), Mo/Si/B₄C (2) и Mo/Be/Si/B₄C (3) на длине волны 12.7 нм.

выше, чем в случае двухкомпонентной структуры Mo/Si. Пики отражения для структуры Mo/Be/Si/B₄C выше, чем для структуры Mo/Si/B₄C. Это говорит о большей резкости межслоевых границ многослойных зеркал с барьерными слоями, и у Mo/Be/Si/B₄C эти границы наиболее резкие. В результате реализуется большая отражающая эффективность многослойных зеркал Mo/Be/Si/B₄C в окрестности длины волны 13 нм. В табл. 2 приведены отражательные характеристики исследуемых зеркал.

На рис. 3 и 4 изображены спектральные и угловые зависимости коэффициента отражения, со-

Таблица 2. Отражательные характеристики образцов, измеренные вблизи $\lambda = 13$ нм

Образец	Тип измерения	λ , нм	θ , град	R, %
PR61, Mo/Si	Спектральное ($\Delta\lambda = 0.52$ нм)	13.56	88.00	65.9
	Угловое	12.40	65.50	41.5
	Угловое	12.70	68.20	67.5
	Угловое	13.00	71.67	67.0
	Угловое	13.50	83.67	66.1
PR64, Mo/Si/B ₄ C	Спектральное ($\Delta\lambda = 0.54$ нм)	13.48	88.00	66.5
	Угловое	12.40	66.43	43.7
	Угловое	12.70	69.20	68.2
	Угловое	13.00	72.67	67.6
	Угловое	13.50	88.33	66.5
PR70, Mo/Be/Si/B ₄ C	Спектральное ($\Delta\lambda = 0.53$ нм)	13.46	88.00	67.6
	Угловое	12.40	66.90	46.4
	Угловое	12.70	69.60	69.2
	Угловое	13.00	73.17	68.5
	Угловое	13.50	88.67	67.0

Примечание. Для спектральных измерений указана ширина кривой отражения на половине высоты $\Delta\lambda$.

ответствующие данным табл. 2 и длине волны 12.7 нм. Как видно из рисунков, многослойные зеркала Mo/Be/Si/B₄C демонстрируют большую отражательную эффективность. В среднем по диапазону четырехкомпонентная структура превосходит двухкомпонентную приблизительно на 2%.

Следует оговориться, что абсолютные значения коэффициентов отражения не достигают 70%. Вероятно, это связано с тем, что изначально были выбраны неоптимальные индивидуальные толщины материалов. Тем не менее, это не должно сказываться на соотношении коэффициентов отражения структур всех трех типов. Оптимизируя соотношение толщин материалов в элементарной ячейке многослойного зеркала, можно получить коэффициент отражения более 70% на длине волны 13.5 нм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП “Физика и технология микро- и наноструктур” ИФМ РАН в рамках государственного задания ИФМ РАН (тема № 0035-2014-0204) при поддержке РАН (программы I.1 “Физика конденсированных сред и материалы нового поколения”, “Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом”, I.2 “Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий”), РФФИ и немецкого научно-исследовательского сообщества DFG (грант № 16-42-01034), РФФИ в части исследований на BESSY-2 (гранты № 18-02-00588, № 18-32-00173 мол_а, № 17-52-150006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barbee T.W., Mrowka S., Hettrick M.C. // Appl. Opt. 1985. V. 24. № 6. P. 883.
2. Petford-Long A.K., Stearns M.B., Chang C.H. et al. // J. Appl. Phys. 1987. V. 61. № 4. P. 1422.
3. Rosen R.S., Stearns D.G., Viliardos M.A. et al. // Appl. Opt. 1993. V. 32. № 34. P. 6975.
4. Slaughter J.M., Kearney P.A., Schulze D.W. et al. // Proceed. SPIE. 1990. V. 1343. P. 73.
5. Slaughter J.M., Schulze D.W., Hills C.R. et al. // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. № 4. P. 2144.
6. Stearns D.G., Rosen R.S., Vernon S.P. // Appl. Opt. 1993. V. 32. № 34. P. 6952.
7. Andreev S.S., Gaponova S.V., Gusev S.A. et al. // Thin Solid Films. 2002. V. 415. P. 123.
8. Yulin S., Feigl T., Kuhlmann T. et al. // J. Appl. Phys. 2002. V. 92. № 3. P. 1216.
9. Bajt S., Alameda J., Barbee T. et al. // Opt. Eng. 2002. V. 41. № 8. P. 1797.
10. Braun S., Mai H., Moss M. et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 2002. V. 41. P. 4074.
11. Yakshin A.E., van de Kruijs R.W.E., Nedelcu I. et al. // Proceed. SPIE. 2007. V. 6517. P. 65170I.
12. Chkhalo N.I., Gusev S.A., Nechay A.N. et al. // Optics Lett. 2017. V. 42. № 24. P. 5070.
13. Ахсахалян А.Д., Клюенков Е.Б., Лопатин А.Я. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 1. С. 5.
14. Windt D.L. // Computers in Physics. 1998. V. 12. № 4. P. 360.
15. Svechnikov M., Pariev D., Nechay A. et al. // J. Appl. Cryst. 2017. V. 50. № 5. P. 1428.
16. Andreev S.S., Akhsakhalyan A.D., Bibishkin M.A. et al. // Centr. Europ. J. Phys. 2003. V. 1. P. 191.

Mo/Si Multilayer Mirrors with B₄C and Be Barrier Layers

**S. Yu. Zuyev, D. E. Pariev, R. S. Pleshkov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, M. V. Svechnikov,
M. G. Sertsu, A. Sokolov, N. I. Chkhalo, F. Schäfers**

For reflection near the wavelength of 13.5 nm, traditional Mo/Si multilayer mirrors and those containing B₄C and Be as interlayers have been synthesized by magnetron sputtering and studied. The angular and spectral dependences of the reflection coefficients have been measured. At 12.4, 12.7, 13.0, and 13.5 nm wavelengths, four-component Mo/Be/Si/B₄C multilayer mirrors are shown to exceed by more than 2% the reflection coefficient of Mo/Si mirrors and more than 1% that of Mo/Si/B₄C mirrors.

Keywords: X-rays, multilayer mirrors, magnetron sputtering.