

09

Исследование структурных и отражательных характеристик многослойных рентгеновских зеркал на основе пары материалов Ru/B

© Р.А. Шапошников, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало, С.А. Гарахин

Институт физики микроструктур РАН, Афонино, Нижегородская обл., Россия
E-mail: shaposhnikov-roma@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 июля 2024 г.

В окончательной редакции 28 августа 2024 г.

Принято к публикации 4 сентября 2024 г.

Приводятся результаты исследования отражательных характеристик на длинах волн 0.154, 0.989 и 1.759 nm и восстановленных по этим данным структурных характеристик многослойных рентгеновских зеркал Ru/B без прослоек и с прослойками углерода. Нанесение прослоек С на границы В на Ru привело к уменьшению ширины переходной области с 0.69 до 0.37 nm. Коэффициент отражения Ru/C/B на длине волны 6.65 nm, рассчитанный с использованием полученных структурных параметров зеркал, составил рекордное значение 68.9%.

Ключевые слова: многослойные рентгеновские зеркала, синхротронные приложения, монохроматоры рентгеновского излучения, рентгеновская литография.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.01.59524.20075

Одним из диапазонов длин волн, представляющих в настоящее время наибольший интерес, является спектральный диапазон 6.65–9 nm. Это связано с тем, что для данного диапазона существует ряд важных прикладных задач, таких как проекционная литография следующего поколения [1], рентгенофлуоресцентный анализ [2], разработка монохроматоров для станций синхротронного излучения [3], рентгеновская спектроскопия [4]. Общее правило выбора материалов многослойного рентгеновского зеркала (МРЗ) заключается в том, что сначала выбирается материал, обладающий наименьшим поглощением в рабочем диапазоне длин волн. В пару к нему выбирается материал, который позволяет обеспечить наибольший скачок диэлектрической проницаемости с первым материалом и в то же время обладает по возможности малым поглощением. В диапазоне длин волн $\lambda > 6.65$ nm лучшими спейсерами являются бор или борсодержащие материалы (K -край поглощения бора $\lambda_K = 6.63$ nm). Наиболее выгодными абсорберами представляются лантан и рутений. На рис. 1 приведены результаты теоретического расчета пиковых значений коэффициента отражения для структур La/B, La/B₄C, Ru/B, Ru/B₄C в спектральном диапазоне 6–9 nm при нормальном падении. Здесь рассматривается случай идеальных структур с нулевыми шероховатостями, табличными плотностями материалов и отсутствием дрейфа или флуктуаций периода. Из представленных зависимостей видно, что использование бора в качестве спейсера позволяет получить более высокие коэффициенты отражения, чем при использовании карбида бора. Также следует отметить, что вблизи λ_K наилучшие коэффициенты отражения позволяют получить структуры La/B, в то время как в длинноволновой области данного спектраль-

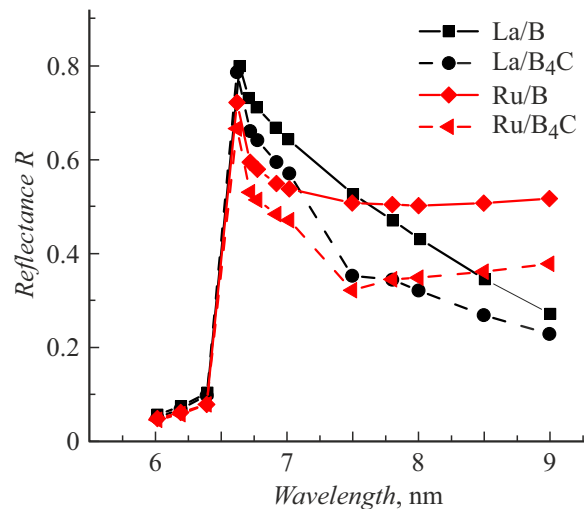


Рис. 1. Зависимости коэффициента отражения для идеальных структур La/B, La/B₄C, Ru/B, Ru/B₄C в диапазоне 6–9 nm при угле скольжения излучения 90°. При расчетах использовались оптические константы базы данных CXRO (https://henke.lbl.gov/optical_constants/).

ного диапазона лучшими коэффициентами обладают структуры Ru/B. Структуры на основе La изучались в ряде работ [5–8]. При этом в данных работах полученные экспериментально коэффициенты отражения значительно отличались от максимальных теоретически возможных вследствие перемешивания материалов на границах разделов слоев. Одним из эффективных методов улучшения границы между материалами является синтез структуры в смеси газов аргон + азот. При этом напуск

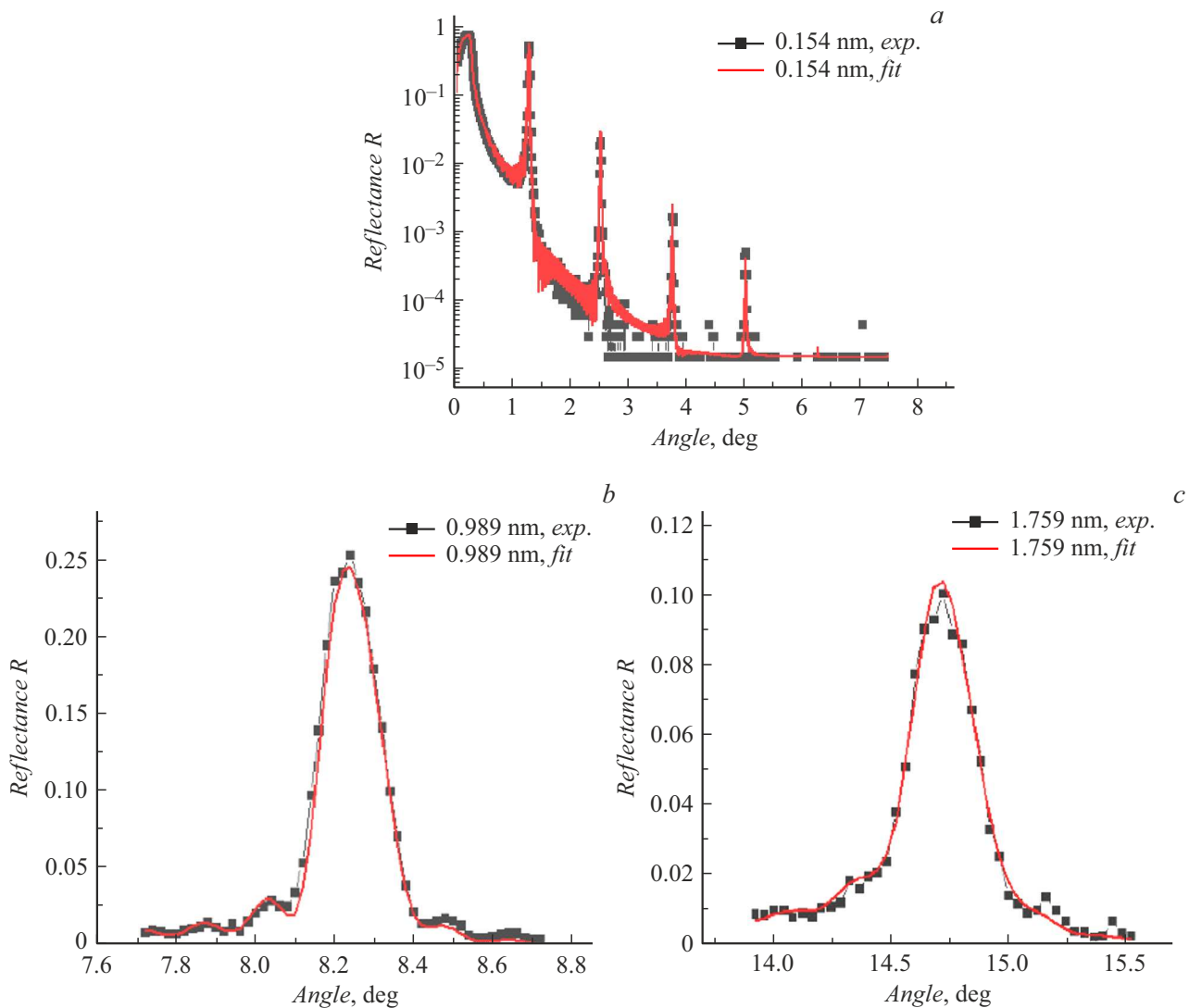


Рис. 2. Зависимости экспериментально измеренного коэффициента отражения от угла скольжения излучения и результаты подгонки для длин волн $\lambda = 0.154$ (a), 0.989 (b) и 1.759 nm (c).

азота в рабочий объем осуществляется только при синтезе слоев лантана, что приводит к формированию структуры LaN/V. Для этой структуры в [8] был получен коэффициент отражения $R = 64.1\%$ при угле падения 1.5° от нормали и длине волны 6.65 nm. На данный момент это значение коэффициента отражения является рекордным для указанной длины волны. В работах [9–12] изучались МРЗ Ru/V₄C с точки зрения их оптических свойств в области жесткого рентгеновского излучения. МРЗ Ru/V ранее не исследовались. Изучению именно этих МРЗ посвящена настоящая работа.

Синтез многослойных структур осуществлялся на установке, описанной в [13]. Распыление рутения осуществлялось магнетронным методом (параметры разряда: $I = 300$ mA, $U = 290$ V), распыление бора — ионно-пучковым (ток пучка $I = 60$ mA, энергия пучка $E = 800$ eV). В качестве рабочего газа был использован аргон, рабочее давление $p = 1.3 \cdot 10^{-3}$ Торр. В качестве

подложек использовались пластины кремния с шероховатостью на уровне 0.2 nm. Синтезированные структуры измерялись как в области жесткого рентгеновского излучения на длине волны $\lambda = 0.154$ nm на четырехкристальном дифрактометре Panalitical X'Pert PRO, так и в области мягкого рентгеновского излучения на длинах волн $\lambda = 0.989$ и 1.759 nm на лабораторном рефлектометре, оснащенный решеточным спектрометром-монокроматором PCM-500 [14]. Определение структурных параметров образцов (период структуры, толщины слоев, плотности материалов, ширина переходных областей) осуществлялось с помощью программного обеспечения Multifitting, разработанного в ИФМ РАН [15]. Для исследования структурных параметров многослойных зеркал Ru/V был синтезирован ряд образцов с разными значениями параметра $\beta = d_{\text{Ru}}/d$, где d_{Ru} — толщина рутения в периоде структуры, d — период многослойного зеркала. Число периодов для всех структур составляло

Структурные параметры изученных образцов (число периодов для всех структур $N = 50$)

Состав структуры	Период, nm	β^*	Ширина переходного слоя, nm		R^{**} , %		R^{***} , %
			на границе В на Ru	на границе Ru на В	$\lambda = 0.989$ nm	$\lambda = 1.759$ nm	$\lambda = 6.65$ nm
Ru/B	3.435	0.48	0.57	0.22	20	7.3	25.7
Ru/B	3.425	0.39	0.69	0.21	19.4	7.2	21.1
Ru/B	3.530	0.34	0.62	0.18	25.3	10.1	22.3
Ru/B	3.635	0.3	0.69	0.24	22.9	10	19.2
Ru/B/C	3.425	0.43	0.7	0.21	21.8	—	27.6
Ru/C/B	3.509	0.38	0.37	0.21	28.7	12.3	36.45

* Доля рутения в периоде.

** Измеренные значения коэффициента отражения на длинах волн 0.989 и 1.759 nm.

*** Теоретическое значение коэффициента отражения МРЗ на длине волны 6.65 nm с учетом восстановленных структурных параметров.

$N = 50$. На рис. 2 приведен пример подгонки экспериментальных кривых в программе Multifitting, на основе которого были определены структурные параметры. Состав образцов МРЗ и значения основных структурных параметров приведены в таблице. Из представленных в таблице данных следует, что присутствует асимметрия в переходных областях на различных границах: переходная область на границе В на Ru является более протяженной, чем на границе Ru на В. Для уменьшения протяженности переходных областей на границе в структуру были добавлены барьерные слои углерода. Добавление углерода на слои бора (структура Ru/B/C) не привело к улучшению границы, в то время как нанесение слоев углерода на рутений (структура Ru/C/B) позволило существенно снизить ширину переходной области со значений 0.69 nm до значений 0.37 nm. Толщина слоев углерода при этом составляла 0.33 nm. На рис. 3 приведены результаты численного расчета зависимости коэффициента отражения от угла скольжения излучения на длине волны $\lambda = 6.65$ nm для многослойного зеркала Ru/B с барьерными слоями углерода с учетом полученных значений ширины переходных областей. Число периодов в расчете было выбрано $N = 250$. Видно, что при использовании структур на основе рутения и бора с применением методики барьерных слоев на длине волны $\lambda = 6.65$ nm может быть получен коэффициент отражения $R = 68.9\%$, что превосходит полученный ранее в [8] коэффициент отражения $R = 64.1\%$ для структур LaN/B. Таким образом, несмотря на то что идеальные структуры Ru/B в силу своих оптических характеристик теоретически обладают меньшим значением коэффициента отражения в окрестности длины волны 6.7 nm, чем структуры La/B, коэффициент отражения, который может быть получен экспериментально для структур на основе рутения, оказывается выше, чем для структур на основе лантана, ввиду малых значений ширины переходных областей. Однако, несмотря на адекватность расчетной модели, данное утверждение о преимуществе многослойных зеркал Ru/B перед La/B требует экспе-

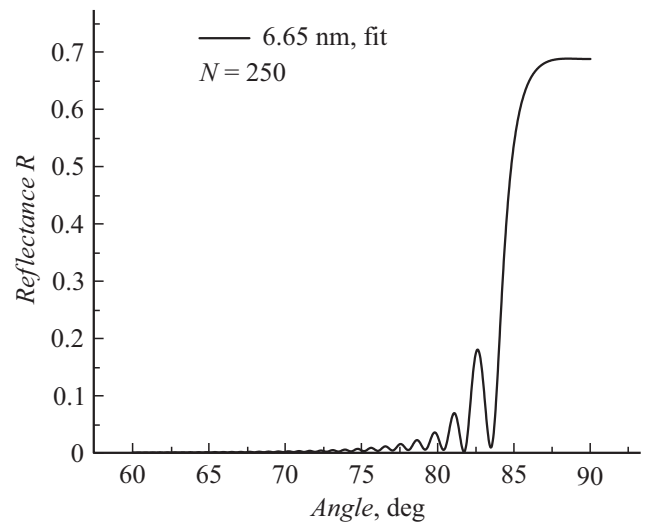


Рис. 3. Теоретическая зависимость коэффициента отражения от угла скольжения излучения на длине волны $\lambda = 6.65$ nm для многослойного зеркала Ru/C/B с учетом полученных структурных параметров.

риментальной проверки. Следовательно, МРЗ Ru/C/B могут являться перспективными для использования их в качестве отражающих элементов в оптических схемах в спектральном диапазоне 6.65–9 nm.

В рамках настоящей работы были получены следующие важнейшие результаты. Показано, что структуры Ru/B имеют асимметричные толщины переходных слоев: граница В на Ru является более протяженной и имеет ширину 0.57–0.70 nm, что существенно препятствует получению высоких значений коэффициента отражения. Применение методики барьерных слоев (нанесение прослоек углерода толщиной 0.3–0.4 nm на наиболее протяженную границу) позволяет практически в 2 раза уменьшить ширину переходной области (до 0.3–0.4 nm), что в свою очередь приводит к росту коэффициента отражения. Теоретический расчет показывает, что много-

слоиные зеркала Ru/C/B с полученными структурными параметрами могут обеспечить коэффициент отражения до 68.9% на длине волны 6.65 nm, что может стать рекордным значением, если подтвердятся измерениями. Таким образом, предложенные в работе структуры имеют широкие перспективы для их использования в качестве отражательных элементов для диапазона длин волн 6.65–9 nm.

Финансирование работы

Синтез образцов и измерение угловых зависимостей коэффициентов отражения в рентгеновском диапазоне выполнены при поддержке гранта РФФИ № 21-72-30029. Восстановление структурных параметров МРЗ по данным рентгеновского отражения проведено при поддержке гранта РФФИ № 21-72-20108.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko, *AIP Adv.*, **3** (8), 082130 (2013). DOI: 10.1063/1.4820354
- [2] С.А. Гарахин, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 3, 10 (2019). DOI: 10.1134/S0207352819030077 [S.A. Garakhin, V.N. Polkovnikov, N.I. Chkhalo, *J. Surf. Investig.*, **13** (2), 173 (2019). DOI: 10.1134/S1027451019020071].
- [3] А.А. Ахсахалян, Ю.А. Вайнер, С.А. Гарахин, К.А. Елина, П.С. Заверткин, С.Ю. Зуев, Д.В. Ивлишкин, А.Н. Нечай, А.Д. Николенко, Д.Е. Парьев, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.В. Свечников, Н.И. Чхало, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 1, 14 (2019). DOI: 10.1134/S0207352819010025 [A.A. Akhsakhalyan, Yu.A. Vainer, S.A. Garakhin, K.A. Elina, P.S. Zavertkin, S.Yu. Zuev, D.V. Ivlyushkin, A.N. Nechay, A.D. Nikolenko, D.E. Pariev, R.S. Pleshkov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, N.I. Chkhalo, *J. Surf. Investig.*, **13** (1), 1 (2019). DOI: 10.1134/S1027451019010026].
- [4] J.K. Lepson, P. Beiersdorfer, J. Clementson, M.F. Gu, M. Bitter, L. Roquemore, R. Kaita, P.G. Cox, A.S. Safronova, *J. Phys. B*, **43** (14), 144018 (2010). DOI: 10.1088/0953-4075/43/14/144018
- [5] С.С. Андреев, М.М. Барышева, Н.И. Чхало, С.А. Гусев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Д.Н. Рогачев, Н.Н. Салащенко, Ю.А. Вайнер, С.Ю. Зуев, *ЖТФ*, **80** (8), 93 (2010). [S.S. Andreev, M.M. Barysheva, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, D.N. Rogachev, N.N. Salashchenko, Yu.A. Vainer, S.Yu. Zuev, *Tech. Phys.*, **55** (8), 168 (2010). DOI: 10.1134/S1063784210080153].
- [6] N.I. Chkhalo, S. Künstner, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, F. Schäfers, S.D. Starikov, *Appl. Phys. Lett.*, **102** (1), 011602 (2013). DOI: 10.1063/1.4774298
- [7] P. Naujok, S. Yulin, N. Kaiser, A. Tünnermann, *Proc. SPIE*, **9422**, 94221K (2015). DOI: 10.1117/12.2085764
- [8] D.S. Kuznetsov, A.E. Yakshin, J.M. Sturm, R.W.E. van de Kruijs, E. Louis, F. Bijkerk, *Opt. Lett.*, **40** (16), 3778 (2015). DOI: 10.1364/OL.40.003778
- [9] T.D. Nguyen, R. Gronsky, J.B. Kortright, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **280**, 161 (1993). DOI: 10.1557/PROC-280-161
- [10] C. Borel, C. Morawe, A. Rommeveaux, C. Huguenot, J.-C. Peffen, *Proc. SPIE*, **6317**, 63170I (2006). DOI: 10.1117/12.678472
- [11] C. Borel, C. Morawe, E. Ziegler, T. Bigault, J.-Y. Massonnat, J.-C. Peffen, E. Debourg, *Proc. SPIE*, **5918**, 59180I (2005). DOI: 10.1117/12.613873
- [12] Q. Huang, Y. Liu, Y. Yang, R. Qi, Y. Feng, I.V. Kozhevnikov, W. Li, Z. Zhang, H. Jiang, L. Zhang, A. Li, J. Wang, Z. Wang, *Opt. Express*, **26** (17), 21803 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.021803
- [13] И.Г. Забродин, Б.А. Закалов, И.А. Каськов, Е.Б. Ключенков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, С.Д. Стариков, Л.А. Суслов, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 7, 37 (2013). DOI: 10.7868/S0207352813070202 [I.G. Zabrodin, B.A. Zakalov, I.A. Kas'kov, E.B. Klyuenkov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, S.D. Starikov, L.A. Suslov, *J. Surf. Investig.*, **7** (4), 637 (2013). DOI: 10.1134/S1027451013040204].
- [14] M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, A.A. Fraerman, A.E. Pestov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, Yu.A. Vainer, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **543** (1), 333 (2005). DOI: 10.1016/j.nima.2005.01.251
- [15] M.J. Svechnikov, *Appl. Cryst.*, **53** (1), 244 (2020). DOI: 10.1107/S160057671901584X