

УДК 621.793.164

## МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА НА ОСНОВЕ Y ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 8–12 НМ

В. Н. Полковников<sup>1</sup>, Р. А. Шапошников<sup>1</sup>, Н. И. Чхало<sup>1</sup>, Н. Н. Салащенко<sup>1</sup>,  
Н. А. Дюжев<sup>2</sup>, Ф. А. Пудонин<sup>2,3</sup>, Г. Д. Демин<sup>2</sup>

*В работе исследуются Ru/Y многослойные зеркала для диапазона длин волн 8–12 нм. Демонстрируется положительный эффект применения барьерных слоев  $B_4C$  на коэффициент отражения. Сообщается о рекордном значении коэффициента отражения 56% на длине волны 11.4 нм, полученном в данной работе на зеркале Y/ $B_4C$ /Ru.*

**Ключевые слова:** рентген, рентгеновские зеркала, многослойные структуры, металлы, диэлектрическая проницаемость.

*Введение.* Прогресс в ряде областей физики тесно связан с развитием технологии синтеза многослойных зеркал (МЗ). Этот класс оптических элементов выступает универсальным инструментом для построения оптических схем, предназначенных для работы в рентгеновском и вакуумном ультрафиолетовом диапазонах длин волн (0.01–60 нм).

Для проекционной литографии коротковолнового диапазона интерес представляет спектральный диапазон 6.7–13.5 нм [1]. Многослойные структуры Mo/Si, которые сейчас применяются для литографии на 13.5 нм, хорошо работают от 12.4 нм ( $L$ -край поглощения Si) до приблизительно 30 нм [2].

В спектральной области 11.2–12.4 нм в качестве “спэйсера” в МЗ применяется Be ( $K$ -край поглощения  $\lambda_K = 11.1$  нм) [3]. Здесь продемонстрированы коэффициенты отражения, превышающие 70%. Однако важно отметить, что по причине токсичности бериллия работы с ним ограничены.

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, 603950 Россия, ГСП-105, Нижний Новгород; e-mail: polkovnikov@ipmras.ru.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет “МИЭТ”, 124498 Россия, г. Зеленоград, Москва, пл. Шокина, 1.

<sup>3</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

В более коротковолновом диапазоне 6.7–8 нм высокие, до 64%, коэффициенты отражения имеют МЗ на основе бора, например, La/B [4]. Однако их эффективность быстро падает по мере удаления от  $K$ -края поглощения бора  $\lambda_K = 6.6$  нм и уже в окрестности 8 нм коэффициенты отражения не превышают 25%.

Все вышеперечисленные структуры неэффективно работают в диапазоне 8–11 нм. А если исключить токсичный бериллий, то проблемная спектральная область расширяется до  $L$ -края поглощения кремния 12.4 нм. Этот диапазон представляет интерес для рентгеновской литографии следующего поколения. Переход к более коротким длинам волн литографии должен учитывать сочетание эффективных источников излучения и отражающей оптики. Например, в диапазоне 9–11 нм находятся максимумы излучения криптоновой и ксеноновой плазмы [5, 6]. Однако чаще всего максимумы излучения плазмы и отражающей способности зеркал не совпадают по длине волны. Эта проблема может быть снята при переходе к непрерывному спектру излучения. Например, на основе синхротрона. В этом случае можно, не ограничивая себя длиной волны, разработать МЗ с наиболее высоким отражением. В данной работе исследуются отражательные характеристики Ru/Y МЗ, перспективные для спектрального диапазона 8–12 нм.

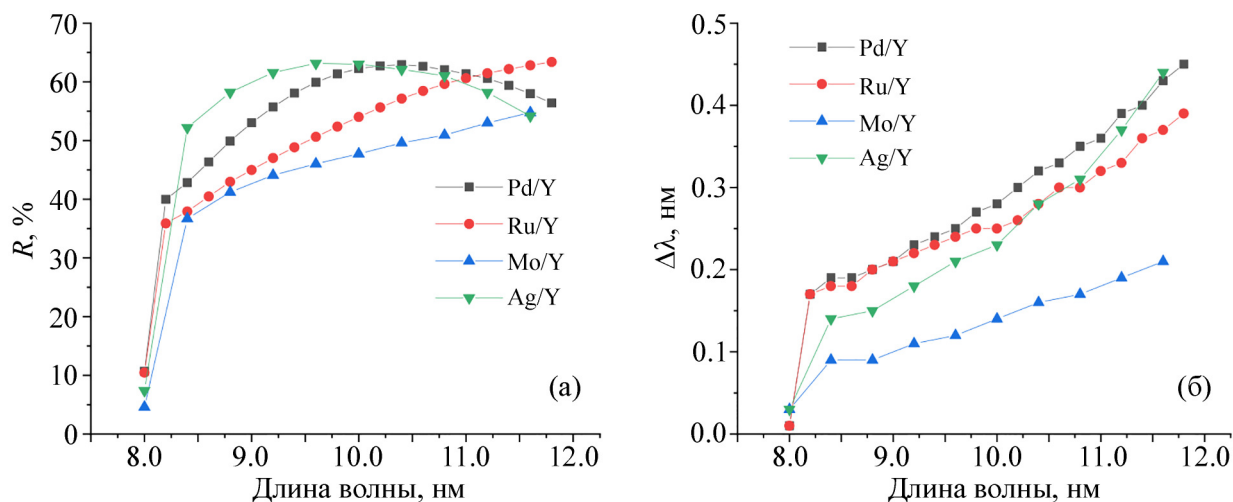


Рис. 1: Теоретические спектральные зависимости коэффициента отражения (а) и спектральной полуширины (б) для идеальных многослойных структур МЗ Pd/Y, Ru/Y, Mo/Y и Ag/Y. При расчетах использовались следующие параметры: число пар слоев  $N = 90$ , соотношение материалов в периоде  $\beta = 0.45$ , плотности материалов табличные, шероховатость нулевая.

МЗ на основе Y. Современное состояние. Иттрий является одним из наиболее прозрачных материалов в диапазоне 8–12 нм. На рис. 1 приведены теоретические зависимости пиковых значений коэффициентов отражения  $R$  и спектральных ширин пиков отражения на половине высоты  $\Delta\lambda$  для идеальных зеркал (для материалов взяты табличные плотности, отсутствует межслоевая шероховатость) Mo/Y, Pd/Y, Ru/Y и Ag/Y. Для расчетов взяты данные из базы CXRO [7]. Из рис. 1 видно, что Pd/Y и Ag/Y почти во всем диапазоне имеют высокий, более 60%, коэффициент отражения и большую ширину спектрального пика отражения.

МЗ Mo/Y имеют коэффициент отражения в среднем около 45% и обладают более узкой спектральной шириной. Это является преимуществом в спектроскопии, где основной задачей МЗ является выделение желаемой линии.

МЗ Ru/Y занимают промежуточное положение. Имея спектральную полуширину, близкую к Pd/Y, Ag/Y, они в большей части диапазона проигрывают им по отражению. Однако в длинноволновой области, приблизительно от 10.5 нм и выше, теоретически коэффициент отражения Ru/Y оказывается самым высоким из рассматриваемых пар материалов.

Наиболее изученной является структура Mo/Y [8–10]. В [9] показана асимметрия границ раздела (граница Y-на-Mo имеет протяженность около 0.33 нм, а граница Mo-на-Y 0.7 нм). Барьерные слои  $V_4C$  уменьшили протяженность перехода Mo-на-Y и повысили коэффициент отражения. На данный момент наибольшее значение отражения для Mo/Y-зеркал на длине волны 9.34 нм приведено в [10] и составляет 34%.

Также в работе [9] изучались отражательные характеристики МЗ Mo/Y в длинноволновой части рассматриваемого диапазона. При  $\lambda = 10.5$  нм  $R = 35\%$ , при  $\lambda = 10.8$  нм  $R = 37\%$ , при  $\lambda = 11.2$  нм  $R = 38\%$ . Эти значения заметно ниже теоретических, что объясняется влиянием межслоевых переходных областей.

Также было установлено, что экспериментально полученные значения  $\Delta\lambda$  хорошо соответствуют рассчитанным теоретически. Это значит, что МЗ Mo/Y хорошо подходят для решения спектроскопических задач, где требуется высокая спектральная селективность. В то же время для литографических приложений предпочтительнее более высокие значения  $\Delta\lambda$ . Это обстоятельство, вкуче с относительно низким  $R$ , не позволяет рассматривать МЗ Mo/Y для литографических приложений.

Структуры на основе Ag/Y изучались в работах [11, 12]. Определены параметры МЗ, в частности, ширины переходных областей: Ag-на-Y составила 0.7 нм, а Y-на-Ag 1.34 нм. Показана эффективность применения барьерных слоев. Наивысший коэффи-

коэффициент отражения на длине волны 9.34 нм был получен для МЗ Ag/Si/Y (толщина Si 0.3 нм) и составил 18%, что также исключает их применение для литографии.

Наиболее перспективными являются МЗ Pd/Y. Лучший экспериментальный результат был достигнут в [13]. Коэффициент отражения на длине волны 9.4 нм составил 43%. Однако авторы отмечают, что коэффициент отражения за 16 месяцев наблюдений снизился до 34%, что так же ограничивает их практическое применение.

Ru/Y-зеркала ранее изучались в работах [14, 15]. Полученный лучший коэффициент отражения на длине волны 9.34 нм составлял лишь 34% (теоретический предел 49%). В приведенных работах не применялась методика барьерных слоев. Также отсутствует детальная информация о ширинах переходных областей и данные по отражательным характеристикам структур в длинноволновой части диапазона 8–12 нм.

*МЗ Ru/Y. Экспериментальные результаты.* В данной работе МЗ Ru/Y синтезировались методом магнетронного распыления на установке, оснащенной четырьмя магнетронами планарного типа, что позволяет работать как с двухкомпонентными структурами, так и с барьерными слоями, наносимыми между слоями базовых материалов. Давление остаточных газов в камере перед началом синтеза находилось на уровне  $5 \cdot 10^{-5}$  Па. Многослойные зеркала осаждались на кремниевые суперполированные подложки с размерами  $25 \times 25$  мм<sup>2</sup> и толщиной 0.5 мм. Распыление мишеней осуществлялось на постоянном токе в среде высокочистого (99.998%) аргона. Давление аргона в технологическом процессе составляло  $\sim 0.1$  Па. Подробнее об условиях синтеза можно посмотреть в [3].

Число периодов экспериментальных образцов  $N = 90$ . При таком значении толщина структур заведомо превышает глубину экстинкции излучения. Верхним слоем во всех случаях оставался Ru, сам по себе являющийся хорошим защитным слоем (предотвращающим окисление). Величины периодов МЗ имели значения, определяющие положение пика отражения  $6\text{--}8^\circ$  от нормали.

Параметры структур (период, индивидуальные толщины слоев, плотность материалов, межслоевая шероховатость) определялись по результатам измерений на дифрактометре Philips XPert Pro на длине волны  $\lambda = 0.154$  нм. Измерения в мягком рентгеновском диапазоне проводились на рефлектометре со спектрометром-монокроматором РСМ-500 со спектральным разрешением лучше 0.03 нм [3]. Снимались угловые зависимости коэффициентов отражения.

Первая часть исследований была посвящена синтезу Ru/Y многослойных зеркал, оптимизированных на рабочую длину волны 9.4 нм. Было показано, что коэффициент

отражения таких структур растет с увеличением параметра  $\beta$  (отношение толщины тяжелого материала к периоду МЗ,  $\beta = d_{\text{Ru}}/d$ ) и достигает максимума при  $\beta = 0.54$ , после чего наблюдается спад (см. табл. 1).

Т а б л и ц а 1

*Зависимость коэффициента отражения  $R$  МЗ Ru/Y от  $\beta$*

$\beta$	0.35	0.39	0.43	0.45	0.5	0.54	0.57	0.6
$R$	0.18	0.19	0.23	0.27	0.285	0.3	0.28	0.25

Стоит отметить, что максимальный достигнутый коэффициент отражения Ru/Y структур составил 30%, что существенно ниже теоретического предела 49% (длина волны 9.4 нм). Исследование показало, что МЗ Ru/Y имеет значительную протяженность межслоевых областей: граница Y-на-Ru 0.2 нм, граница Ru-на-Y 1.3 нм, которая, в наибольшей степени, и ограничивает коэффициент отражения.

Для уменьшения перемешивания материалов на границах была применена методика барьерных слоев. В качестве барьерного материала использовался хорошо зарекомендовавший себя в предыдущих исследованиях карбид бора  $B_4C$ . В проведенных экспериментах карбид бора осаждался или на поверхность слоев иттрия, или на поверхность слоев рутения, а также на обе границы одновременно.

Наибольший эффект достигается при осаждении барьера на “проблематичную” границу Ru-на-Y, то есть на поверхность пленок иттрия. Для структуры Y/ $B_4C$ /Ru (порядок материалов в направлении от подложки к поверхности) протяженность границы Ru-на-Y снизилась до 0.6 нм при 0.25 нм барьерного слоя  $B_4C$ .

Для определения оптимальной толщины слоев  $B_4C$  была проведена серия экспериментов, в рамках которой толщина слоя карбида бора варьировалась от 1 до 5 ангстрем. Толщина рутения и полный период структуры при этом оставались неизменными. Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

*Зависимость коэффициента отражения для МЗ Y/ $B_4C$ /Ru от толщины слоя карбида бора*

$d_{B_4C}$ , нм	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$R$	0.3	0.35	0.37	0.39	0.40	0.35

Из представленной зависимости видно, что при толщине слоя карбида бора 4 ангстрема коэффициент отражения структуры достигает максимума и составляет

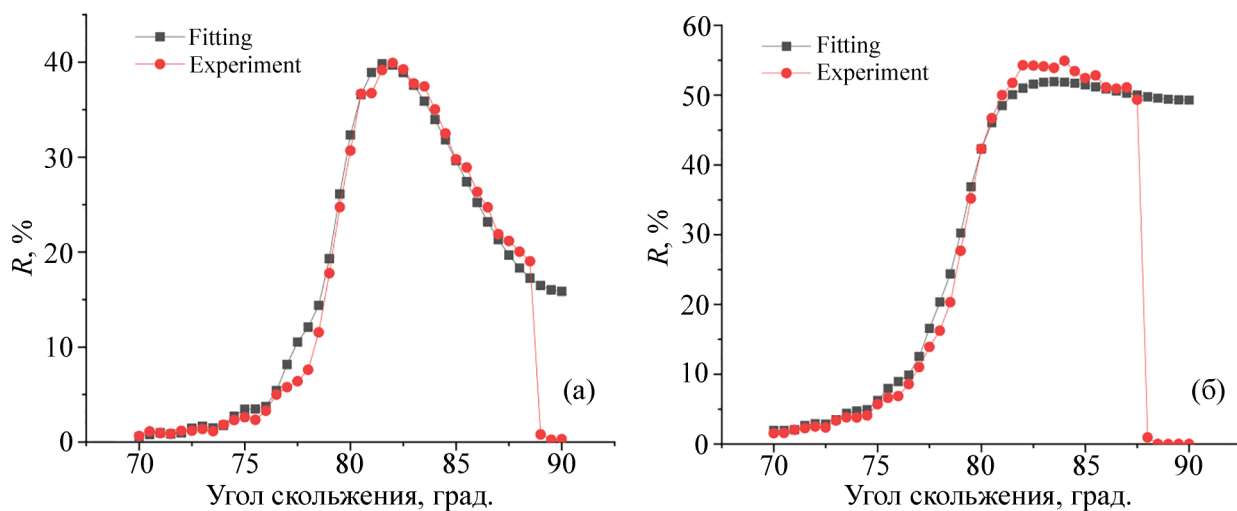


Рис. 2: Экспериментальные данные и результаты фитинга для структур  $Y/B_4C/Ru$ , оптимизированных на 9.34 нм (а) и 11.4 нм (б).

40%. Дальнейшее увеличение толщины карбида бора ведет к снижению коэффициента отражения. Стоит отметить, что полученный коэффициент отражения 40% (рис. 2(а)) существенно превосходит соответствующее значение для  $Mo/Y$  зеркал и вплотную приближается к лучшим коэффициентам отражения для структур на основе  $Pd/Y$ . При этом полуширина пика отражения МЗ  $Ru/Y$  составила 0.16 нм (для  $Pd/Y$  это значение 0.2 нм).

При осаждении барьерного слоя на поверхность пленок  $Ru$  (последовательность материалов  $B_4C/Y/Ru$ ) коэффициент отражения на длине волны 9.34 нм составил 34%. В случае осаждения двух барьеров (на  $Y$  и на  $Ru$ )  $R = 39\%$ , то есть даже немного меньше, чем для случая структуры  $Y/B_4C/Ru$ . Это объясняется излишним вытеснением или заменой иттрия более поглощающим карбидом бора.

В данной серии экспериментов также были изучены коэффициенты отражения МЗ  $Y/B_4C/Ru$  с периодом, оптимизированным для  $\lambda = 11.4$  нм. Теоретический предел коэффициента отражения в этой области достигает 62%. Изученная структура продемонстрировала коэффициент отражения  $R = 56\%$  на длине волны 11.4 нм (положение брэгговского пика  $6^\circ$  от нормали), что близко к теоретическому пределу (рис. 2(б)).

*Заключение.*  $Ru/Y$  МЗ с барьерными слоями  $B_4C$  ( $Y/B_4C/Ru$ ) является наиболее высокоотражающей структурой, за исключением  $Pd/Y$  МЗ на длине волны 9.34 нм. Однако, как следует из [13], у  $Pd/Y$  МЗ наблюдается сильная деградация коэффициента отражения со временем. Долговременная стабильность исследованной в данной работе

структуры  $Y/V_4C/Ru$  не изучалась, однако из опыта наблюдения за отражательными характеристиками ранее изученных  $Ru/Y$  МЗ можно ожидать высокой временной стабильности. Эта работа в настоящее время начата.

Полученный в данной работе коэффициент отражения 56% на длине волны 11.4 нм является рекордным для иттрий-содержащих многослойных зеркал. Таким образом, предложенная и изученная в данной работе  $Y/V_4C/Ru$  структура является наиболее перспективной для создания многослойных зеркал литографов следующего поколения с длинами волн в диапазоне 8–12 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение № 075-15-2021-1350 от 5 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0004).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Andrew M. Hawryluk, Natale M. Ceglio, Appl. Opt. **32**(34), 7062 (1993). DOI: 10.1364/AO.32.007062.
- [2] Norbert Kaiser, Sergiy Yulin, Marco Perske, Torsten Feigl, Proc. SPIE, **7101**, 71010Z-1 (2008). DOI: 10.1117/12.796150.
- [3] В. Н. Полковников, Н. Н. Салашенко, М. В. Свечников, Н. И. Чхало, УФН **190**, 92 (2020). DOI: 10.3367/UFNr.2019.05.038623.
- [4] D. S. Kuznetsov, A. E. Yakshin, J. M. Sturm, et al., Opt. Lett. **40**(16), 3778 (2015). DOI: 10.1364/OL.40.003778.
- [5] A. N. Nechay, S. A. Garakhin, A. Ya. Lopatin, et al., Quantum Electronics **50**(4), 408 (2020). DOI: 10.1070/QEL17269.
- [6] N. I. Chkhalo, S. A. Garakhin, A. Ya. Lopatin, et al., AIP Advances **8**(10), 105003 (2018). DOI: 10.1063/1.5048288.
- [7] [https://henke.lbl.gov/optical\\_constants/](https://henke.lbl.gov/optical_constants/)
- [8] Zhanshan Wang, Hongchang Wang, Jingtao Zhu, et al., Appl. Phys. Lett. **89**(24), 241120–241120-3 (2006). DOI: 10.1063/1.2405874.
- [9] Д. С. Кващенко, Ю. А. Вайнер, С. Ю. Зуев, В. Н. Полковников, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 3, 14 (2019). DOI: 10.1134/S0207352819030119.

- [10] Alain J. Corso<sup>1</sup>, Maria G. Pelizzo, J. Nanosci. Nanotechnol. **19**(1), 532 (2019). DOI: 10.1166/jnn.2019.16477.
- [11] Claude Montcalm, Patrick A. Kearney, J. M. Slaughter, et al., Appl. Opt. **35**(25), 5134 (1996). DOI: 10.1364/AO.35.005134.
- [12] Д. С. Квашенников, С. Ю. Зуев, В. Н. Полковников и др., ЖТФ **89**(11), 1774 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219110161.
- [13] David L. Windt, Eric M. Gullikson, Appl. Opt. **54**(18), 5850 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.005850.
- [14] D. L. Windt, S. Donguy, J. Seely, et al., Proceedings of SPIE **5168**, 1 (2004). DOI: 10.1117/12.506175.
- [15] N. I. Chkhalo, I. V. Malyshev, A. E. Pestov, et al., Physics-Uspekhi **63**(1), 67 (2020). DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.05.038601>.

Поступила в редакцию 10 ноября 2021 г.

После доработки 11 ноября 2021 г.

Принята к публикации 12 ноября 2021 г.