

06;09;13

## Стабильные многослойные отражающие покрытия на длину волны $\lambda(\text{HeI}) = 58.4 \text{ nm}$ для солнечного телескопа проекта КОРТЕС

© В.Н. Полковников<sup>1</sup>, Н.И. Чхало<sup>1</sup>, Е. Meltchakov<sup>2</sup>, F. Delmotte<sup>2</sup>, С.Ю. Зуев<sup>1</sup>, Н.Н. Салащенко<sup>1</sup>, М.В. Свечников<sup>1</sup>, Н.Н. Цыбин<sup>1,¶</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Université Paris-Saclay, Palaiseau Cedex, France  
E-mail: tsybin@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2018 г.

Изучены многослойные структуры на основе алюминия, отражающие на длине волны  $\lambda(\text{HeI}) = 58.4 \text{ nm}$ . Измерения спектральных и угловых зависимостей коэффициента отражения покрытий проведены с использованием лабораторного рефлектометра и на синхротронах ELETTRA и BESSY II. Многослойные зеркала Ru/Al и Mo/Al с защитным слоем  $\text{MoSi}_2$  продемонстрировали высокую временную стабильность оптических характеристик: при нахождении на воздухе в течение 18 месяцев обнаружено лишь незначительное (не более 1.5% в абсолютных значениях) снижение коэффициента отражения. Пиковый коэффициент отражения для зеркал Mo/Al на длине волны 58.4 nm вблизи нормали составлял  $R = 26.1\%$  при спектральной ширине кривой отражения по полувысоте, равной  $\Delta\lambda_{0.5} = 10 \text{ nm}$ .

DOI: 10.21883/PJTF.2019.03.47268.17369

Наблюдения за солнечной атмосферой в экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне ( $\lambda \sim 10 - 100 \text{ nm}$ ) используются для построения моделей физических процессов на Солнце. ЭУФ-диапазон интересен тем, что в нем лежат линии излучения многократно ионизованных атомов. В современных солнечных обсерваториях используется подход, заключающийся в одновременной регистрации с высоким временным и пространственным разрешением изображений полного диска Солнца на нескольких эмиссионных линиях (телескопические наблюдения) и спектроскопических изображений короны Солнца [1,2].

В новой солнечной обсерватории КОРТЕС [3], которую планируется разместить на международной космической станции, предполагается использовать три телескопических канала (на длинах волн 19.5, 30.4 и 58.4 nm), причем канал для регистрации на длине волны возбужденного иона гелия HeI ( $\lambda = 58.4 \text{ nm}$ ) будет применяться впервые в мире. Эта эмиссионная линия более низкотемпературная (температура возбуждения около 80 000 K [1]), чем все ранее использовавшиеся. Излучение на этой линии позволит наблюдать за процессами, происходящими в области солнечной атмосферы вблизи нижней границы (рядом с фотосферой) переходного слоя.

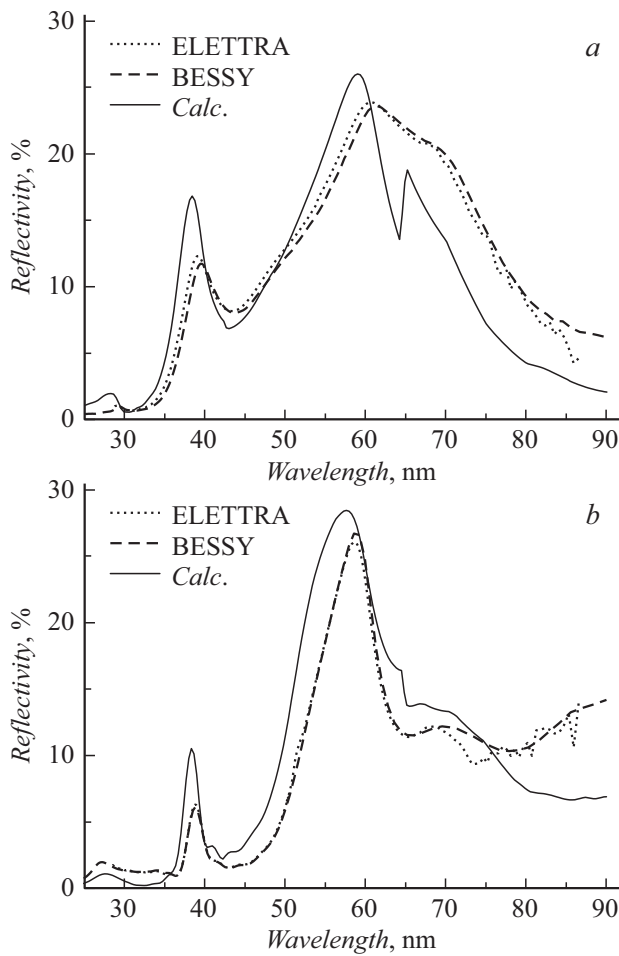
В телескопах обсерватории КОРТЕС будет применяться двухзеркальная оптическая схема Ричи–Кретьюна [3]. На каждое зеркало наносится многослойное покрытие, оптимизированное на отражение рабочей длины волны. К отражающим покрытиям предъявляются требования, касающиеся таких спектральных характеристик, как полуширина кривой отражения (спектральной полосы на уровне 1/2 от пикового значения коэффициента отражения) и пиковое значение коэффициента

отражения. Пик должен быть достаточно узким, чтобы в него не попадали другие интенсивные эмиссионные линии, расположенные вблизи рабочей линии (особенно это касается эмиссионных линий ионов с существенно отличающимися температурами возбуждения), и одновременно иметь достаточно высокий пиковый коэффициент отражения. Применение двухзеркальной схемы снижает требования к ширине кривой отражения (при двукратном отражении пик зауживается) по сравнению с однозеркальной схемой, но возрастают требования к величине коэффициента отражения.

Однако даже в двухзеркальной схеме для зеркальных покрытий, работающих на длине волны  $\lambda = 58.4 \text{ nm}$ , требование к ширине пика кривой отражения оказывается самым критичным. Поскольку в спектральной области 50–60 nm практически отсутствуют достаточно прозрачные материалы, в любых отражающих покрытиях реально работает лишь несколько ( $N = 5 - 10$ ) верхних периодов. Поэтому спектральная ширина пика отражения ( $\Delta\lambda \approx \lambda/N$ ) не может быть узкой, а большое поглощение препятствует получению высоких коэффициентов отражения.

Дополнительные трудности в выборе материалов отражающих покрытий связаны с отсутствием достоверных оптических констант в указанном диапазоне, что осложняет процесс поиска оптимального состава отражающего покрытия [4].

Имеется небольшое число публикаций, посвященных разработке узкополосных высокоотражающих многослойных покрытий для диапазона 50–100 nm [5–8]. На длинах волн в области 60 nm достигнутый коэффициент отражения от многослойных покрытий составляет 20–30% при полуширине пика 6–9 nm. На длине волны 58.4 nm для покрытия Iг/V<sub>4</sub>C получен пик коэффициента



**Рис. 1.** Спектральные зависимости коэффициента отражения покрытий (Ru-10.2/Al-34.2)×5, Ru-10.2 (a) (Mo-10/Al-33.8)×5, Mo-6.7, MoSi<sub>2</sub>-3.3 (b), измеренные в диапазоне 25–90 нм при угле скольжения 85° (на синхротроне ELETTRA) и при угле скольжения 87° (на синхротроне BESSY II). Сплошной линией показаны кривые, рассчитанные в программе IMD [13] при величине межслоевой шероховатости, равной 20 (a) и 30 нм (b).

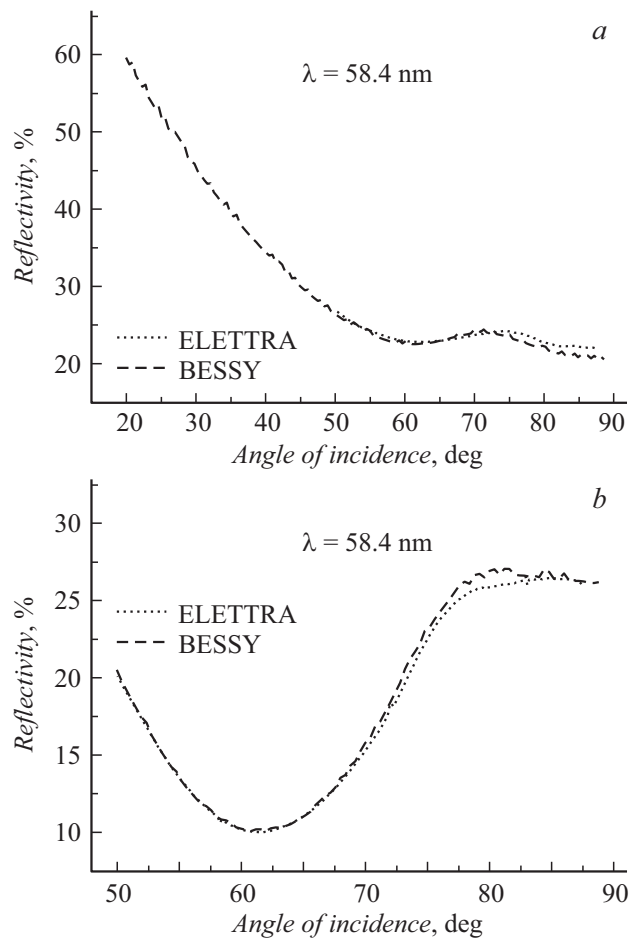
отражения около 34.3% (33% после 54 дней хранения) [5], однако в этой работе отсутствуют данные по полуширине пика. В работе [8] для зеркала Mg/SiC получен рекордный результат  $R = 38.8\%$  при  $\Delta\lambda_{0.5} = 5.6$  нм на длине волны 55.7 нм, однако в ней отсутствуют данные по временной стабильности коэффициента отражения, которая для Mg-содержащих покрытий является существенной проблемой. Изученные нами зеркальные покрытия Mo/Mg на длину волны 58.4 нм показали невысокую временную стабильность. За два месяца хранения на воздухе в лабораторных условиях коэффициент отражения уменьшился с исходных 38% до 15.5% [2], а еще после десяти месяцев — до 10.3%.

Таким образом, имеется необходимость разработки стабильных узкополосных отражающих покрытий с высоким коэффициентом отражения. В настоящей работе

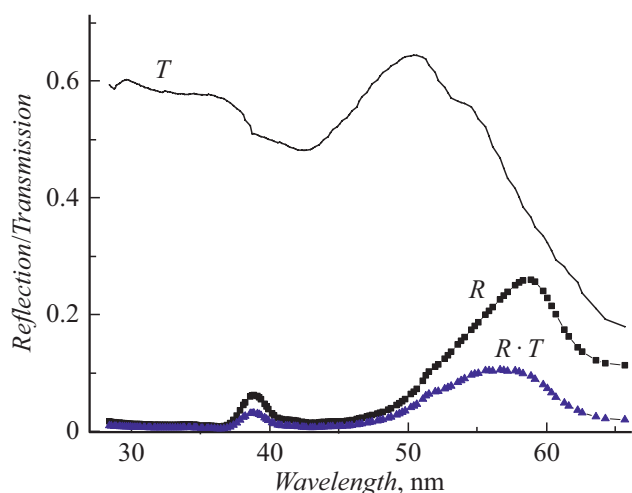
изучены многослойные покрытия на основе алюминия. Выбор алюминия обусловлен тем, что он по сравнению с магнием химически менее активен и при этом по данным [9] коэффициент поглощения алюминия на длине волны 58.4 нм даже меньше, чем у магния.

Многослойные покрытия наносились на стандартные кремниевые полированные пластины методом магнетронного распыления в среде аргона. Параметры многослойных структур (период, толщина слоев) определялись на основе дифрактометрических измерений на длине волны 0.154 нм. Измерение угловой зависимости коэффициента отражения на длине волны 58.4 нм для тестовых структур проводилось на лабораторном рефлектометре, построенном на базе монохроматора ЛНТ-30 и газоразрядного источника излучения. Подробнее о рефлектометре можно узнать в [10]. Лучшие по стабильности и коэффициенту отражения зеркала были промерены на ЭУФ-канале синхротрона ELETTRA (Триест, Италия) и примерно через полгода на канале синхротрона BESSY II (Берлин, Германия).

К зеркальным покрытиям для канала регистрации на длине 58.4 нм обсерватории КОРТЕС предъявляются



**Рис. 2.** Угловые зависимости коэффициента отражения зеркальных покрытий (Ru-10.2/Al-34.2)×5, Ru-10.2 (a) и (Mo-10/Al-33.8)×5, Mo-6.7, MoSi<sub>2</sub>-3.3 (b) на длине волны  $\lambda = 58.4$  нм, измеренные на синхротронных источниках.



**Рис. 3.** Спектральная зависимость коэффициента отражения от покрытия  $(\text{Mo-10/Al-33.8}) \times 5$ ,  $\text{Mo-6.7}$ ,  $\text{MoSi}_2\text{-3.3}$ , измеренная в диапазоне 25–65 нм.  $T$  — измеренная спектральная зависимость коэффициента пропускания абсорбционного фильтра  $\text{MoSi}_2\text{-2.5}$ ,  $\text{Al-72}$ ,  $\text{MoSi}_2\text{-2.5}$  (толщины слоев указаны в нанометрах),  $R \cdot T$  — спектральная зависимость пропускания системы „зеркальное покрытие + абсорбционный фильтр“, полученная путем перемножения спектров.

следующие требования: для однократного отражения ширина пика на уровне 1/2 должна быть не более 9 нм, пиковый коэффициент отражения — не менее 20%. Выбор полуширины обусловлен тем, что в окрестности длины волны 58.4 нм имеется ряд относительно интенсивных эмиссионных линий: OIV (55.4 нм), NeVI (56.28 нм), OIII (59.96 нм), OIV (60.84 нм), MgX (60.98 нм), OV (62.97 нм) [11,12].

Для получения узкого пика спектральной кривой отражения необходимо использовать наиболее прозрачные материалы, чтобы увеличить количество работающих границ. В качестве таких материалов мы использовали Al и Mg. В качестве контрастных материалов были выбраны тяжелые металлы: Mo, Ru, W. Изучение временной стабильности показало, что все Mg-содержащие структуры быстро деградируют при нахождении на воздухе (по-видимому, вследствие окисления). Существенное снижение (хотя и более медленное, чем для структур с Mg) коэффициента отражения происходит и в случае структур Mo/Al и W/Al. Высокую стабильность продемонстрировали две структуры: Ru/Al и Mo/Al с защитным слоем  $\text{MoSi}_2$ .

Структуры  $(\text{Ru-10.2/Al-34.2}) \times 5$ , Ru-10.2 и  $(\text{Mo-10/Al-33.8}) \times 5$ , Mo-6.7,  $\text{MoSi}_2\text{-3.3}$  (порядок следования слоев от кремниевой подложки, толщины слоев здесь и далее указаны в нанометрах) были изготовлены в середине 2016 г. Количество периодов было выбрано равным пяти в каждом случае исходя из того, что, согласно расчету, дальнейшее увеличение числа периодов уже не приводит к возрастанию коэффициента отражения, а увеличение числа слоев ведет к постепенному развитию ше-

роховатости межслоевых границ (что негативно сказывается на величине пикового коэффициента отражения).

Значения коэффициентов отражения образцов, измеренные на лабораторном рефлектометре непосредственно после изготовления, составили 26.5–27.5% при углах скольжения 70–75° для Ru/Al и 23.5–24% при углах скольжения 80–85° для Mo/Al с защитным слоем  $\text{MoSi}_2$ . Результаты более точных измерений, проведенных спустя 12 месяцев с использованием излучения синхротронного источника ELETTRA, а затем еще раз через полгода на синхротронном источнике BESSY II, представлены на рис. 1 и 2. На рис. 1 приведены также спектральные зависимости коэффициента отражения, рассчитанные в программе IMD [13]. Из рисунков видно, что коэффициент отражения за полгода между синхротронными измерениями почти не изменился. Коэффициент отражения зеркального покрытия Ru/Al при углах скольжения 72–74° в максимуме составил 24.3%, полуширина пика отражения около 28 нм, коэффициент отражения зеркального покрытия Mo/Al с защитным слоем  $\text{MoSi}_2$  составил 25.9–26.9% при углах скольжения 80–85°, полуширина пика около 10 нм. При расчетах использовались параметры, найденные из подгонки расчетных и измеренных угловых зависимостей коэффициентов отражения на длине волны 0.154 нм. Несовпадение расчетных форм спектров и положений резонансных максимумов с измеренными в ЭУФ-диапазоне связано, вероятно, с использованием при расчетах недостоверных значений показателей преломления материалов в этом диапазоне и влиянием на спектр отражения поверхностных окисных слоев.

Из двух рассмотренных структур наилучшими оптическими характеристиками обладает многослойное покрытие Mo/Al с защитным слоем  $\text{MoSi}_2$ . Высокий коэффициент отражения на длинах волн более 65 нм (рис. 1, b) не критичен, так как в канале телескопа используются тонкопленочные абсорбционные Al-фильтры, защищающие детектор от засветки солнечным светом видимого и инфракрасного диапазонов длин волн. Как показано на рис. 3, совместное действие абсорбционного Al-фильтра и зеркала решает эту проблему.

Таким образом, предложена, изготовлена и изучена многослойная структура Mo/Al с защитным покрытием  $\text{MoSi}_2$ , которая обладает достаточно высоким коэффициентом отражения на длине волны 58.4 нм, представляющей интерес для изучения короны Солнца. Эта структура обладает рекордной стабильностью рентгенооптических характеристик, что позволяет применять ее в реальных экспериментах.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“ ИФМ РАН в рамках выполнения государственного задания ИФМ РАН (тема № 0035-2014-0204) при поддержке программ РАН I.1 „Физика конденсированных сред и материалы нового поколения“, I.1 „Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом“, I.2

„Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий“ и грантов РФФИ № 17-12-01227 (в части проведения измерений на BESSY-2), РФФИ № 17-52-150006 (в части изготовления образцов) и совместного российско-французского гранта CNRS/РФФИ (PRC2016, № 1567) (в части исследований на синхротроне ELETTRA).

## Список литературы

- [1] Wilhelm K., Curdt W., Marsch E., Schuhle U., Lemaire P., Gabriel A., Vial J.-C., Grewing M., Huber M.C.E., Jordan S.D., Poland A.I., Thomas R.J., Kuhne M., Timothy J.G., Hassler D.M., Siegmund O.H.W. // *Solar Phys.* 1995. V. 162. N 1-2. P. 189–231.
- [2] Bogachev S.A., Chkhalo N.I., Kuzin S.V., Pariev D.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Shestov S.V., Zuev S.Y. // *Appl. Opt.* 2016. V. 55. N 9. P. 2126–2135.
- [3] Shestov S.V., Ulyanov A.S., Vishnyakov E.A., Pertsov A.A., Kuzin S.V. // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9144. P. 91443G (1–8).
- [4] Seely J.F., Uspenskii Y.A., Kjornrattanawanich B., Windt D.L. // *Proc. SPIE.* 2006. V. 6317. P. 63170T (1–9).
- [5] Larruquert J.I., Keski-Kuha R.A.M. // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. N 25. P. 5398–5404.
- [6] Schafers F., Yulin S., Feigl T., Kaiser N. // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5188. P. 138–145.
- [7] Vidal-Dasilva M., Fernandez-Perea M., Mendez J.A., Aznarez J.A., Larruquert J.I. // *Opt. Express.* 2009. V. 17. N 25. P. 22773–22784.
- [8] Fernandez-Perea M., Soufli R., Robinson J.C., De Marcos L.R., Mendez J.A., Larruquert J.I., Gullikson E.M. // *Opt. Express.* 2012. V. 20. N 21. P. C24018–24029.
- [9] [http://henke.lbl.gov/optical\\_constants/](http://henke.lbl.gov/optical_constants/)
- [10] Bibishkin M.S., Chekhonadskih D.P., Chkhalo N.I., Klyuenkov E.B., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Shmaenok L.A., Zabrodin I.G., Zuev S.Yu. // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5401. P. 8–15.
- [11] Dudok de Wit T., Kretschmar M., Abouadarham J., Amblard P.-O., Auchère F., Liliensten J. // *Adv. Space Res.* 2008. V. 42. P. 903–911.
- [12] Del Zanna G., Andretta V., Chamberlin P.C., Woods T.N., Thompson W.T. // *Astronomy & Astrophysics.* 2010. V. 518. P. A49 (1–11).
- [13] Windt D.L. // *Comput. Phys.* 1998. V. 12. N 4. P. 360–370.