

УДК 621.793.14

АПЕРИОДИЧЕСКИЕ ЗЕРКАЛА НА ОСНОВЕ БЕРИЛЛИЕВЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ СИСТЕМ

© 2019 г. С. А. Гарахин¹, С. Ю. Зуев¹, Р. С. Плешков¹, В. Н. Полковников¹*, Н. Н. Салашенко¹, Н. И. Чхало¹

¹Институт физики микроструктур РАН, 603086 Нижний Новгород, Россия

*E-mail: polkovnikov@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 26.06.2018 г.

После доработки 12.07.2018 г.

Принята к публикации 12.07.2018 г.

С использованием генетического алгоритма рассчитаны аперiodические многослойные зеркала (АМЗ) для проекта “Кортес”, оптимизированные на максимальное равномерное отражение в диапазонах 16.5–21 нм и 28–33 нм. Проводится сравнительная характеристика традиционных АМЗ Mo/Si и бериллийсодержащих систем Mo/Be, Mo/Be/Si, а также Al/Be и Mg/Be. Показано, что в диапазоне длин волн 16.5–21 нм более предпочтительной является АМЗ типа Mo/Be/Si, а в диапазоне 28–33 нм – АМЗ Mg/Be с защитным покрытием из алюминия, которое существенно, в два с половиной раза, превосходит по коэффициенту отражения соответствующее АМЗ Mo/Si.

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

DOI: 10.1134/S0207352819040085

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время периодические многослойные зеркала (ПМЗ) рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов широко применяются в солнечной астрономии. Они позволяют выделять определенные спектральные линии и получать в них квазимонохроматические двумерные изображения с высоким пространственным разрешением [1, 2]. Потребность в таких ПМЗ возникает, например, при создании телескопов.

Аперiodические многослойные зеркала (АМЗ) с уширенной, по сравнению с традиционными периодическими структурами, спектральной (угловой, при фиксированной длине волны) полосой отражения также широко используются в научных исследованиях. В частности, АМЗ применяются для увеличения интегрального коэффициента отражения оптических систем, работающих в рентгеновском и в экстремальном ультрафиолетовом диапазонах [3, 4].

Применяются они и в составе “стигматических” спектрометров с дифракционными решетками для исследований Солнца. Например, для космической аппаратуры “Кортес” [5] АМЗ планируется применять в составе спектрогелиографов на диапазоны длин волн 17–21 и 28–33 нм. Для достижения наилучшей эффективности необходимо оптимизировать структуру АМЗ для получения максимального значения и равномер-

ного в заданном спектральном интервале коэффициента отражения.

Традиционной парой материалов, применяемой в диапазоне 12.5–35 нм является Mo/Si. Низкое поглощение кремния, высокий оптический контраст, гладкость спектральных зависимостей оптических констант и высокая временная стабильность делают эту пару универсальной для эффективных и стабильных зеркал, как периодических [6], так и аперiodических [7].

Изучались АМЗ Mo/Si и применительно к задачам проекта “Кортес” [8]. В этой работе было показано, что для диапазона 17–21 нм возможно достижение равномерного отражения на уровне 17% для структур с межслоевыми шероховатостями 0.6 нм (граница Si-на-Mo) и 1.2 нм (граница Mo-на-Si). В диапазоне 28–33 нм рассчитаны структуры с отражением около 12% (при тех же шероховатостях).

Однако, обладая безусловными преимуществами в интервале 12.5–17 нм, в длинноволновой части спектра ПМЗ на основе Mo/Si заметно уступают в отражательной способности другим составам [9, 10]. При этом наибольший интерес вызывают структуры на основе бериллия, применение которого позволяет повышать отражение Mo/Si-зеркал даже в диапазоне длин волн, меньших 17 нм [11].

Бериллий обладает меньшим в сравнении с кремнием поглощением во всем интервале 12.5–35 нм. А его высокий оптический контраст по отношению к таким материалам как алюминий и магний позволяет создавать высокоэффективные зеркала в диапазоне длин волн, больших 17 нм. При этом бериллий, выступая здесь в качестве рассеивающего элемента, обладает поглощением, близким к поглощению “спейсеров”.

Все это дает основания предположить, что можно найти альтернативные составы АМЗ, основанных на бериллии и превосходящие по отражательной способности зеркала на основе молибдена и кремния.

В настоящей работе в качестве альтернативы рассчитан ряд Ве-содержащий АМЗ, так же удовлетворяющих требованиям проекта “Кортес”, и проведено сравнение их рентгенооптических характеристик с традиционными Mo/Si АМЗ.

МЕТОД РАСЧЕТА

Разработка аperiodической многослойной структуры, удовлетворяющей какому-либо наперед заданному критерию, называется задачей на оптимизацию АМЗ. Последовательность действий при ее решении в нашем случае выглядит следующим образом.

На первом этапе задается целевая функция F_{gf} для коэффициента отражения, зависящего от длины волны при постоянном угле падения излучения $R(\lambda, \theta_{const})$. В нашем случае излучение на зеркало падает под нормалью. Далее вводится норма отличия коэффициента отражения от F_{gf} (оценочный функционал F), подсчитываемая в области определения F_{gf} и рассматриваемая как функция N переменных. В качестве переменных в нашем случае выступают толщины слоев искомой структуры. Затем численным методом находится состав АМЗ. Состав ищется минимизацией функционала F :

$$F = \int [R(\lambda) - F_{gf}]^2 m d\lambda. \quad (1)$$

Функции F_{gf} и F выбираются, исходя из характера решаемой задачи и определяют результат оптимизации. Исходными структурами для первого шага итерационной процедуры оптимизации являлись ПМЗ с максимумом отражения при длине волны, соответствующей середине диапазона целевого “плато”. Процесс оптимизации осуществляется с заданными реальными шероховатостями.

Оптимизация АМЗ производилась при помощи генетического алгоритма (Genetic Algorithm Binda), реализованного в рамках программы IMD [12]. На первом этапе алгоритма для каждого слоя периодической структуры задавалось случайное

изменение толщины, генерируемое в пределах заданных интервалов толщин. Далее создавался массив таких зеркал с измененными толщинами слоев. После этого для каждой вновь полученной структуры проверялось соответствие целевому профилю. И по результатам проверки отбиралась половина наиболее к нему приближенных. Непригодные структуры удалялись. Первоначальное число структур массива достраивалось из оставшейся половины. По мере приближения кривой отражения к целевому профилю, вносимые изменения в толщины слоев меняются от 20% (на первом шаге итерации) до 0.5% (на финальном шаге) для более тонкого приближения.

Обычно в результате расчета удовлетворяющего заданному критерию соответствует несколько реализаций структур – при оптимизации практически невозможно достичь глобального минимума, и одним и тем же условиям будут удовлетворять несколько локальных минимумов.

На следующем этапе к полученным решениям мы применяем так называемую процедуру фильтрации, в результате которой остаются лишь структуры, проявляющие большую стабильность при случайных ошибках в слоях. Необходимость этой процедуры вызвана наличием случайных и детерминированных отличий толщин реальных слоев от расчетных значений в процессе роста АМЗ. Суть процедуры заключается в следующем. Рассматриваются удовлетворяющие заданному критерию реализации АМЗ с различным набором толщин:

$$M_0 \begin{pmatrix} d_1^0 \\ d_2^0 \\ d_3^0 \end{pmatrix} M_1 \begin{pmatrix} d_1^1 \\ d_2^1 \\ d_3^1 \end{pmatrix} M_2 \begin{pmatrix} d_1^2 \\ d_2^2 \\ d_3^2 \end{pmatrix} \dots M \dots \begin{pmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Моделируемая ошибка выбирается исходя из априорных данных о технологическом процессе синтеза:

$$\frac{\Delta_{уст}}{10} \leq \frac{|\delta d_1|}{|\delta d_2|} \leq \Delta_{уст}. \quad (3)$$

На следующем этапе каждой из удовлетворительных реализаций АМЗ с минимальным значением функционала (1) генерируется приращение для каждого слоя и оценивается степень ухудшения равномерности коэффициента отражения:

$$\tilde{M}_0 \begin{pmatrix} d_1^0 + \delta d_1 \\ d_2^0 + \delta d_1 \\ d_3^0 + \delta d_1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \|M_0 - \tilde{M}_0\| \rightarrow 0 \\ \|M_1 - \tilde{M}_1\| \rightarrow 0 \\ \|M_2 - \tilde{M}_2\| \rightarrow 0 \end{matrix}$$

Далее наиболее устойчивые к возмущениям структуры могут быть использованы в качестве начальных для повторения алгоритма или непо-

средственно для синтеза. Ниже приводятся полученные таким методом результаты.

**АМЗ ДЛЯ ДИАПАЗОНА
ДЛИН ВОЛН 17–21 нм**

Левый край диапазона 17–21 нм АМЗ обсерватории “Кортес” определяется наличием в спектре солнечной короны линий излучения ионов FeIX и FeX ($\lambda = 17.1$ нм). В работе [8] рассматривался вопрос влияния возможных флуктуаций толщин материалов на форму кривой отражения АМЗ (на примере структур Mo/Si). Авторами показано, что относительно малые (порядка процентов) отклонения толщин индивидуальных пленок в структуре приводят к заметной (до 0.5 нм) сдвиге краев области эффективного отражения АМЗ. Такие сдвиги могут сказаться фатальным образом на возможности эффективного наблюдения линий ионов FeIX и FeX.

В связи с этим обстоятельством в данной работе мы рассматриваем целевые функции, изначально расширяющие рабочий диапазон АМЗ до 16.5–21 нм. Поскольку *L*-край поглощения алюминия соответствует $\lambda = 17.04$ нм становится невозможным использовать этот материал в составе зеркал.

Таким образом, в качестве возможной альтернативы пары материалов Mo/Si могут выступать сочетания Mo/Be и Mo/Be/Si. Важным для оптимизации вопросом является определение близости к реальным параметрам тонких пленок в многослойной структуре. Имеются в виду межслойные шероховатости и плотности материалов в индивидуальных слоях. Данные о шероховатостях пленок молибдена, бериллия и кремния приведены в [6, 11]. В расчетах, проводившихся в рамках этой работы, приняты величины, указанные в табл. 1.

В работе [13] приводятся данные по зависимости плотности пленок молибдена в многослойных структурах Mo/Si от толщины. В литературе отсутствуют такие же данные для структур типа Mo/Be. Однако, как было показано в [14], даже у относительно тонких пленок Mo в составе Mo/Be ПМЗ, плотность близка к табличной, поэтому в данной статье мы не учитываем эффекта плотностей, считая их табличными для всех материалов и всех толщин.

Кроме толщин материалов проводилась оптимизация по общему количеству слоев АМЗ. С точки зрения технологии лучшим вариантом является структура с меньшим числом пленок. В этом случае уменьшается время синтеза и снижается величина возможного систематического ухода реальных толщин от рассчитанных значений.

Оптимизация проводилась следующим образом. В работе рассматривались АМЗ с различным

Таблица 1. Величины шероховатости слоев молибдена, кремния и бериллия, принятые в расчетах АМЗ для интервала 16.5–21 нм

Структура	σ_{Mo} , нм	σ_{Si} , нм	σ_{Be} , нм
Mo/Si	0.6	1.2	–
Mo/Be	0.7	–	0.35
Mo/Be/Si	0.27	0.6	0.6

количеством слоев. Финальной считалась структура с наименьшим количеством пленок, но таким, при котором еще не снижался коэффициент отражения. Именно эти финальные структуры и приведены ниже.

Результаты оптимизации АМЗ Mo/Si, Mo/Be и Mo/Be/Si для диапазона 16–21 нм показаны на рис. 1.

Нетрудно заметить, что результирующий коэффициент отражения для рассмотренных структур различается незначительно. Для Mo/Si средний коэффициент отражения $R = 18\%$, для Mo/Be $R = 18.5\%$, для Mo/Be/Si $R = 19\%$. АМЗ Mo/Be/Si более предпочтительно, не только из-за более высокого коэффициента отражения, но и потому, что содержит меньшее число слоев (60 против 80 для структур Mo/Be и Mo/Si). Это является ключевым фактором при синтезе структур. Для этой структуры на рис. 2 приводится распределение толщин материалов.

По этим данным можно дать небольшой комментарий относительно учета плотностей. Из рис. 2 следует, что толщины большей части пленок молибдена находятся в диапазоне 3–4 нм. По

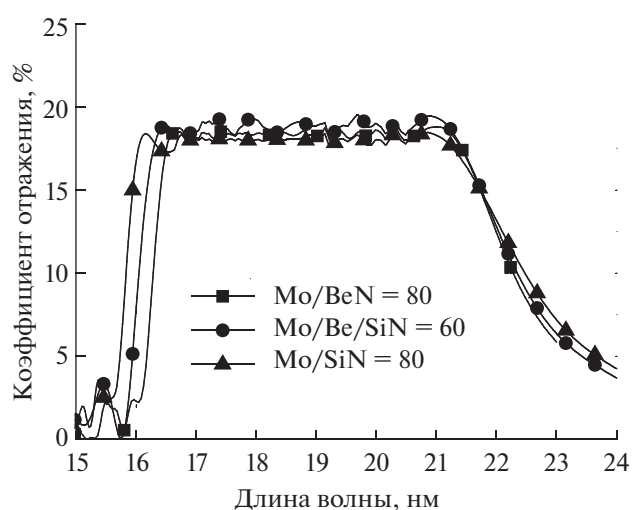


Рис. 1. Коэффициенты отражения АМЗ Mo/Si, Mo/Be и Mo/Be/Si после оптимизации для диапазона 16.5–21 нм. *N* — количество индивидуальных слоев в структуре.

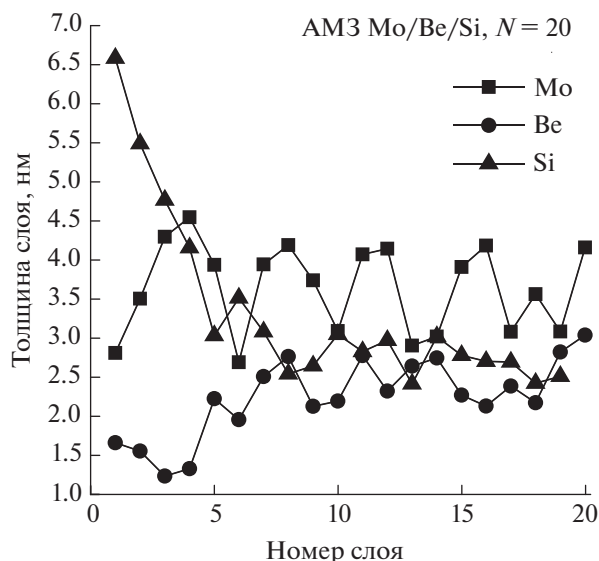


Рис. 2. Значения толщин слоев для оптимальной структуры AM3 Mo/Be/Si (рабочий диапазон 16.5–21 нм). Номер 1 соответствует границе структура–воздух, номер 20 – границе структура–подложка. Первый материал на подложке – молибден.

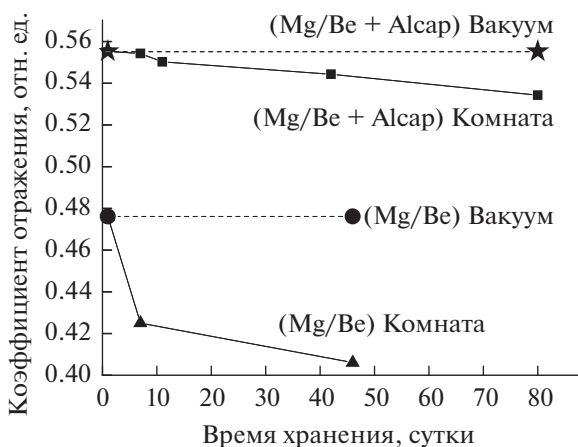


Рис. 3. Сравнение временных зависимостей коэффициентов отражения ПМЗ Mg/Be и Mg/Be + Alcap, хранящихся как в комнатных условиях, так и в форвакууме (при давлении 100 Па).

данным работы [13], плотность таких пленок молибдена колеблется в очень небольших пределах: 0.91–0.93 от табличного значения. Таким образом, можно ожидать, что эта незначительная вариация слабо скажется на форме полученной кривой отражения.

AM3 ДЛЯ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН 28–33 нм

Аналогичные исследования проведены для области 28–33 нм. При оптимизации использова-

лись как Mo и Si, так и другие пары материалов: Al/Be и Mg/Be.

Левый (коротковолновый) край диапазона определяется положением линии излучения иона FeXV ($\lambda = 28.4$ нм). Имеющийся интервал между положениями края целевой функции (28 нм) и линии излучения FeXV (0.4 нм) можно считать достаточным для большинства возможных флуктуаций толщин материалов.

Для пары материалов Mo/Si при расчетах использовались значения шероховатостей из табл. 1. Шероховатости структуры Al/Be изучались в [10]. Они составляют по 1.3 нм на каждой границе. Шероховатости структур типа Mg/Be на данный момент не изучены. В расчетах были приняты значения σ для Al/Be, то есть те же 1.3 нм.

Единственным, при этом существенным недостатком зеркал на основе магния является хорошо известная временная нестабильность их отражательных характеристик [9]. Магний – активный материал, подверженный окислению при хранении в комнатных условиях. И если в массивном образце процессы окисления могут быть остановлены в тонком приповерхностном слое, то в тонкопленочных системах сдержать их чрезвычайно трудно. Поэтому важнейшей проблемой магниевых многослойных структур является разработка защитных покрытий.

В случае зеркал Mg/Be мы предлагаем использовать защитное покрытие из нанесенной на поверхность структуры тонкой алюминиевой пленки. Стабильность такой системы изучалась на примере ПМЗ Mg/Be, оптимизированной на длину волны 30.4 нм (один из рабочих каналов телескопов обсерватории “Кортес” – линия излучения HeII).

Зеркала осаждались методом магнетронного напыления на кремниевые полированные пластины. Синтезировались два типа ПМЗ: двухкомпонентная структура Mg/Be и такая же структура, но с защитным алюминиевым покрытием Mg/Be + Alcap. Затем зеркала помещались на хранение в разных условиях. Половина образцов хранилась в комнатных условиях, другая половина находилась в форвакууме (давление остаточной атмосферы ~ 100 Па). На рис. 3 приведены данные по временной зависимости отражения по этим образцам.

Нетрудно заметить, что зеркала с защитным алюминиевым покрытием не только обладают повышенной временной стабильностью, но и имеют большее значение пикового коэффициента отражения. Образцы, хранившиеся в условиях форвакуума, демонстрируют высокую стабильность отражательных характеристик. Следует заметить, что обеспечить такие значения давления (100 Па) нетрудно даже для транспортировочных боксов. Но и в комнатных условиях зеркала с за-

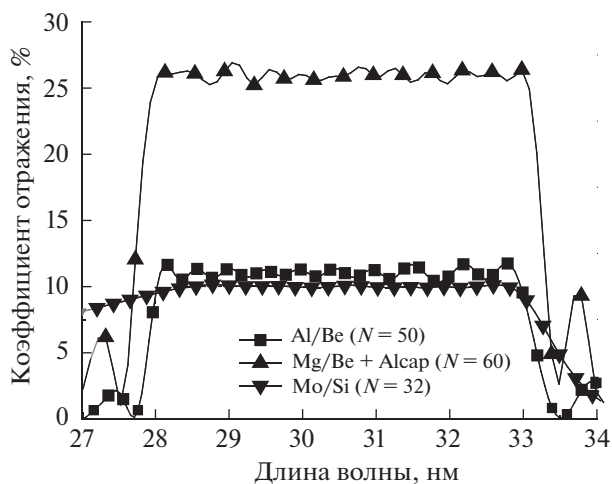


Рис. 4. Коэффициенты отражения АМЗ Mo/Si, Al/Be и Mg/Be + Alcap после оптимизации для диапазона 28–33 нм. N — количество индивидуальных слоев в структуре.

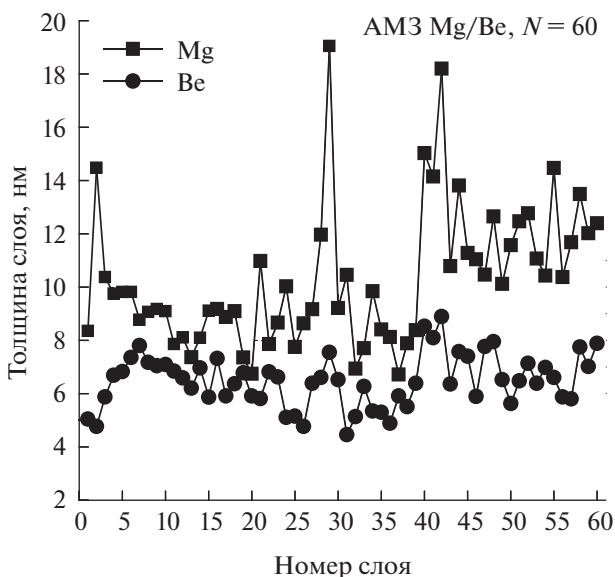


Рис. 5. Значения толщин слоев для оптимальной структуры АМЗ Mg/Be + Alcap (рабочий диапазон 28–33 нм). Номер 1 соответствует границе структура–воздух, номер 60 — границе структура–подложка. Первый материал на подложке — магний.

щитным алюминиевым покрытием показали приемлемую устойчивость к окислению. При длительных (порядка нескольких месяцев) сроках хранения зеркал перед выводом обсерватории на орбиту они, как следует из рис. 3, теряют приблизительно по 0.8% отражения в месяц.

Таким образом, можно считать, что система типа Mg/Be + Alcap обладает временной стабильностью, достаточной для многих применений. На

основе такой системы мы оптимизировали АМЗ для диапазона 28–33 нм.

Результаты оптимизации АМЗ для спектрального интервала 28–33 нм представлены на рис. 4.

В данном случае коэффициенты отражения оптимизированных структур заметно отличаются друг от друга. Для традиционной пары Mo/Si средний коэффициент отражения $R = 10\%$, для Al/Be $R = 11.2\%$, для Mg/Be + Alcap $R = 26\%$ — более чем в два раза превышает отражение двух других структур. Кроме того, следует отметить более резкий коротковолновый край спектральной зависимости $R(\lambda)$ для бериллиевых АМЗ.

Если относительно небольшое приращение отражения АМЗ Al/Be нивелируется увеличением количества слоев до 100, то существенное преимущество Mg/Be + Alcap в отражении делает допустимым $N = 120$ (плюс один слой алюминия). Для этой структуры на рис. 5 приводится распределение толщин материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве основных результатов работы можно выделить следующее.

Рассчитаны и оптимизированы составы бериллийсодержащих аперидических многослойных зеркал, предназначенных для спектрогелиографов обсерватории “Кортес”. Новые многослойные системы должны стать альтернативой традиционным двухкомпонентным АМЗ Mo/Si.

В спектральном интервале 17–21 нм структуры типа Mo/Be/Si при незначительном превосходстве в среднем коэффициенте отражения (19% против 18% у АМЗ Mo/Si) имеют существенное технологическое преимущество, заключающееся в уменьшении общего количества слоев (60 против 80 у АМЗ Mo/Si). Для нивелирования эффекта сдвига рабочего диапазона АМЗ вследствие флуктуаций реальных толщин оптимизация проводилась на расширенный диапазон длин волн 16.5–21 нм.

В спектральном диапазоне 28–33 нм наилучшим отражением обладают структуры на основе Mg/Be. Коэффициент отражения от них потенциально в два с половиной раза превосходит отражение от традиционных Mo/Si АМЗ (26% против 10%).

Использование сочетания магния и бериллия, на наш взгляд, стало возможно благодаря найденному решению проблемы окисления магнийсодержащих тонкопленочных систем. Разработанное и изученное защитное покрытие на основе алюминия позволяет без значительных потерь коэффициента отражения хранить в комнатных условиях структуры типа Mg/Be + Alcap.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Программ Президиума РАН I.1 “Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом” и I.2 “Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий”, РФФИ (гранты № 17-52-150006, № 18-02-00588 и № 18-32-00671), в части нанесения Mg/Be покрытий – РНФ № 17-12-01227.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ragozin E.N., Mednikov K.N., Pertsov A.A. et al. // Proc. SPIE. 2009. V. 7360. P. 73600N.
2. Kuzin S.V., Zhitnik I.A., Shestov S.V. et al. // Solar System Res. 2011. V. 45. № 2. P. 162.
3. Бейгман И.Л., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74. № 3. С. 167.
4. Kuhlmann T., Yulin S. et al. // Proc. SPIE. 2002. V. 4782. P. 285.
5. Shestov S.V., Ulyanov A.S., Vishnyakov E.A. et al. // Proc. SPIE. 2014. V. 9144. P. 91443G.
6. Braun S., Mai H., Moss M. et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 2002. V. 41. P. 4074.
7. Вишняков Е.А., Каменец Ф.Ф., Кондратенко В.В. и др. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 2. С. 143.
8. Гайкович П.К., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н. и др. // Квантовая электроника. 2016. Т. 45. № 5. С. 406.
9. Bogachev S.A., Chkhalo N.I., Kuzin S.V. et al. // Applied Optics. 2016. V. 55. № 9. P. 2126.
10. Chkhalo N.I., Pariev D.E., Polkovnikov V.N. et al. // Thin Solid Films. 2017. V. 631. P. 106.
11. Chkhalo N.I., Gusev S.A., Nechay A.N. et al. // Optics Letters. 2017. V. 42. № 24. P. 5070.
12. Windt D.L. // Computers in Physics. 1998. V. 12. № 4. P. 360.
13. Гарахин С.А., Мельчаков Е.Н., Полковников В.Н. и др. // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 4. С. 378.
14. Chkhalo N.I., Gaman D.A., Nechay A.N. et al. // J. Appl. Crystallogr. 2017. V. 50. № 5. P. 1428. doi 10.1107/S1600576717012286

Aperiodic Mirrors on the Basis of Beryllium Multilayer Systems

S. A. Garakhin, S. Yu. Zuyev, R. S. Pleshkov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, N. I. Chkhalo

With the use of a genetic algorithm, aperiodic multilayer mirrors (AMM) for the Cortez project, optimized for maximum uniform reflection in the 16.5–21 nm and 28–33 nm bands, were calculated. The comparative characteristics of traditional AMM Mo/Si and beryllium-containing systems Mo/Be, Mo/Be/Si, and also Al/Be and Mg/Be are compared. It is shown that in the wavelength range 16.5–21 nm, AMM Mo/Be/Si type is more preferable, and in the range 28–33 nm – AMM Mg/Be with a protective coating of aluminum, which is substantially two and a half times, exceeds by the reflection coefficient the corresponding AMM Mo/Si.

Keywords: X-ray radiation, multilayer mirrors, aperiodic multilayer structures, magnetron sputtering.