

УДК 535.853.311+535.872-32

АПЕРИОДИЧЕСКИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА НА ОБЛАСТЬ 125 – 250 Å

В. В. Кондратенко¹, В. Е. Левашов, Ю. П. Першин¹,
А. С. Пирожков, Е. Н. Рагозин

Рассчитаны, синтезированы и испытаны первые аперидические многослойные зеркала (Mo/Si) с широкой полосой отражения (125 – 250 Å). С их помощью реализован широкополосный стигматический дисперсионный спектрограф и зарегистрированы линейчатые и квазипрерывные спектры лазерной плазмы.

Применение многослойных зеркал (МЗ) в дисперсионной спектроскопии мягкого рентгеновского (МР) диапазона в значительной мере ограничивается узостью спектральной полосы отражения. Так, у периодического МЗ на основе пары Mo/Si, оптимизированного на максимум коэффициента отражения на $\lambda_0 = 160 \text{ Å}$ по параметрам структуры d и γ , расчетная ширина (FWHM) резонансного максимума отражения составляет всего 9.2 Å (d – период МЗ, γ – отношение толщины слоя Mo к периоду). Недавно было теоретически показано [1, 2], что существуют аперидические молибден-кремниевые многослойные структуры (МС), обеспечивающие равномерное отражение в широком диапазоне длин волн (вплоть до октавы и более) над L -краем поглощения кремния ($\lambda > 125 \text{ Å}$). Уступая периодическим МС по коэффициенту отражения в максимуме, такие аперидические МС обладают существенно большим интегральным коэффициентом отражения.

В данной работе ставилась цель разработать МЗ с полосой отражения 125 – 250 Å и создать на его основе широкополосный стигматический спектрограф, используя большеапертурную пропускающую дифракционную решетку в качестве диспергирующего элемента.

¹Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", ул. Фрунзе 21, 61002 Харьков, Украина.

На первом этапе был выполнен расчет аперидической МС (40 пар слоев Mo и Si). Толщины всех 80-ти монослоев $\{t_i\}$ рассматривались как независимые переменные (параметры оптимизации). Учитывалось также существование переходных слоев $MoSi_2$, образующихся при синтезе структуры. Их толщины полагались фиксированными, равными 12 \AA (Mo на Si) и 6 \AA (Si на Mo). Структура этого типа ($Si/MoSi_2/Mo/MoSi_2/Подложка$) оптимизировалась для достижения максимального равномерного отражения на интервале $125 - 250 \text{ \AA}$ при нормальном падении излучения. На рис. 1 показан результат оптимизации: толщины слоев оптимальной аперидической МС (рис. 1а) и ее расчетный коэффициент отражения в области $125 - 300 \text{ \AA}$ (рис. 1б, кривая 1). Интегральный коэффициент отражения этой структуры составляет 19.7 \AA на интервале $125 - 250 \text{ \AA}$ и 23.2 \AA на интервале $125 - 300 \text{ \AA}$.

Указанная аперидическая МС синтезировалась методом магнетронного распыления в вакууме ионами аргона соответствующих мишеней. Были синтезированы четыре зеркала, из которых три были нанесены на вогнутые сферические подложки и одно (контрольный образец) – на плоскую подложку. Во всех четырех случаях на противоположном конце коромысла находился "свидетель" – плоская подложка из полированного кремния. Было проведено измерение коэффициента отражения всех четырех "свидетелей" на длине волны 1.54 \AA при скользющем падении в режиме $\theta - 2\theta$. Оно показало, что в трех случаях из четырех (включая контрольный образец) коэффициенты отражения как функции угла скольжения весьма близки, что свидетельствует в пользу хорошей воспроизводимости процедуры синтеза аперидической МС. Это означает также, что структуры, нанесенные на две из трех сферических подложек и контрольный образец, близки между собой. (В силу специфики процедуры синтеза МС, тождество "свидетелей", полученных в различных циклах синтеза, означает и тождество основных (рабочих) экземпляров. И наоборот, отличие "свидетелей" означает отличие структур рабочих МЗ.)

Кроме того, были выполнены аналогичные измерения на длине волны 1.54 \AA для плоского контрольного образца (рис. 2а, точки). По данной экспериментальной зависимости $R(\theta)$ путем решения обратной задачи многослойной оптики была определена (восстановлена) аперидическая МС, нанесенная на контрольный образец. На рис. 2б приведен расчетный коэффициент отражения этой восстановленной структуры в интересующем нас спектральном диапазоне $125 - 300 \text{ \AA}$. Обращает на себя внимание значительное сходство профиля этого коэффициента отражения с желаемым (рис. 1б, кривая 1). Структура, нанесенная на контрольный образец и определенная (восста-

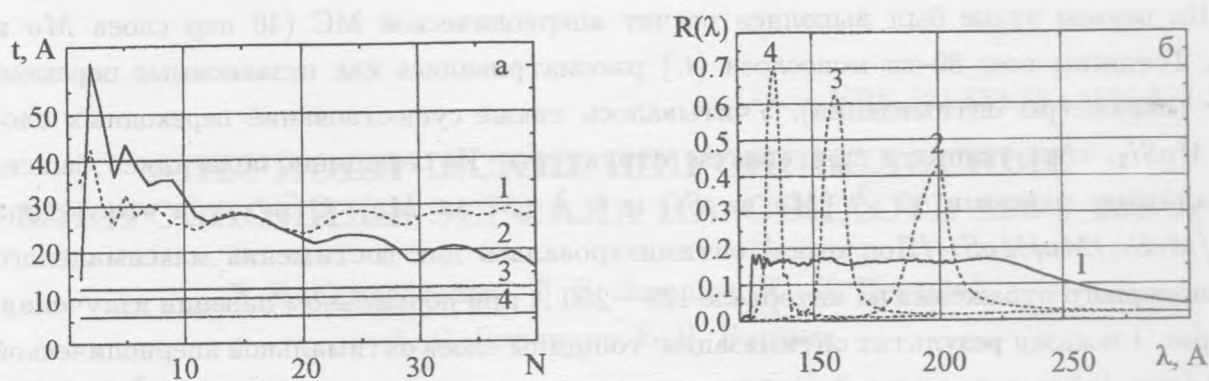


Рис. 1. (а): толщины слоев Mo (1), Si (2) и переходных слоев Mo на Si (3) и Si на Mo (4) аperiodической МС, оптимизированной на максимум равномерного отражения в интервале 125 – 250 Å. Толщины переходных слоев фиксированы. Нумерация слоев идет вглубь, от поверхности к подложке. (б): расчетный коэффициент отражения этой аperiodической МС при нормальном падении в области 120 – 300 Å (1). Для сравнения показаны коэффициенты отражения периодических МЗ, оптимизированных на максимум коэффициента отражения на длине волны 200 (2), 160 (3) и 135 Å (4).

новленная) расчетным путем, представлена на рис. 2в. На рис. 2г показан "период" восстановленной структуры (точки), а именно сумма толщин четырех соседних слоев $Si/MoSi_2/Mo/MoSi_2$, в сравнении с требуемой аperiodической МС (сплошная линия). Видно, во-первых, что алгоритм восстановления аperiodической МС по ее рентгеновскому спектру отражения дает правдоподобные результаты, в особенности, когда идет речь о толщинах не более чем двух десятков верхних монослоев молибдена и кремния. Во-вторых, суммы четырех соседних слоев $Si/MoSi_2/Mo/MoSi_2$, по-видимому, несколько лучше восстанавливаются расчетным путем, нежели индивидуальные толщины монослоев.

Вогнутые сферические МЗ, на которые были нанесены указанные аperiodические МС, использовались в качестве фокусирующих элементов светосильного стигматического спектрографа (рис. 3). В качестве диспергирующего элемента служила большеапертурная свободно висащая пропускающая дифракционная решетка ($p = 1000$ линий/мм, площадь апертуры около 5 см^2). Обратная линейная дисперсия схемы составляла 20 Å/мм (в первом порядке дифракции). Рабочий спектральный диапазон спектрографа определялся коэффициентом отражения используемого зеркала и детектором (фотопленкой); свободно висащая дифракционная решетка не является спектрально-селективной в интересующем нас диапазоне. Спектры в МР диапазоне воз-

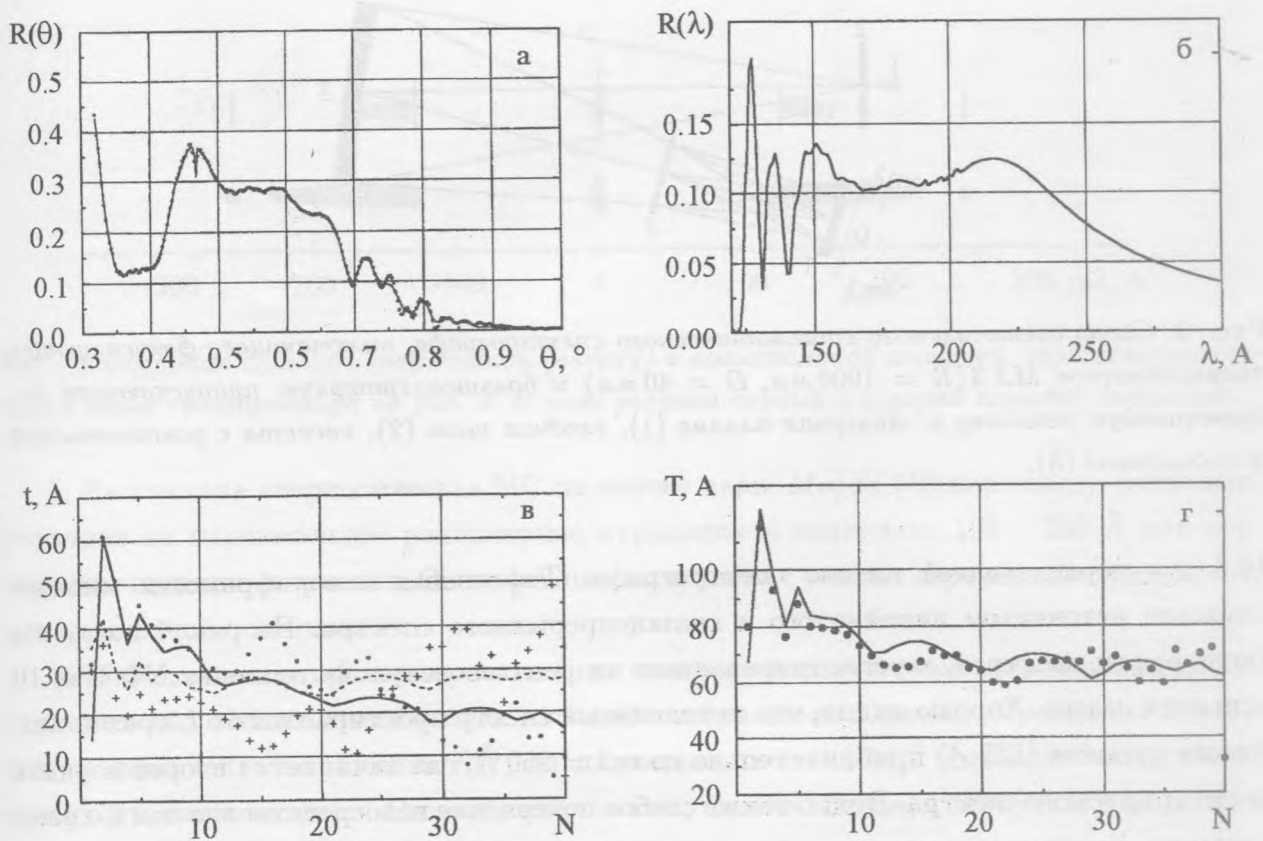


Рис. 2. (а): коэффициент отражения $R(\theta)$ плоского контрольного образца, измеренный на длине волны 1.54 \AA (точки). Коэффициент отражения структуры, восстановленной путем решения обратной задачи многослойной оптики (линия). Среднеквадратичная шероховатость положена равной 6.8 \AA (расчет произведен в приближении полной корреляции шероховатостей слоев). (б): коэффициент отражения нормального падения $R(\lambda)$ в интервале $125 - 300 \text{ \AA}$ у МС, восстановленной по данным измерений на длине волны 1.54 \AA . (в): толщины слоев восстановленной МС: Мо (крестики), Si (точки). Переходные слои не показаны. Для сравнения приведены толщины слоев Мо (пунктир) и Si (сплошная линия) требуемой структуры, показанной на рис. 1а. (г): сумма толщин соседних слоев Si/MoSi₂/Mo/MoSi₂ структур восстановленной (точки) и требуемой (сплошная линия).

буждались при фокусировке на твердую мишень излучения импульсно-периодического лазера на кристаллах ортоалюмината иттрия, активированного неодимом $Nd:YAlO_3$ (5 нс , $\lambda = 1.08 \text{ мкм}$, 0.5 Дж , 0.5 Гц). Лазерная мишень располагалась на расстоянии

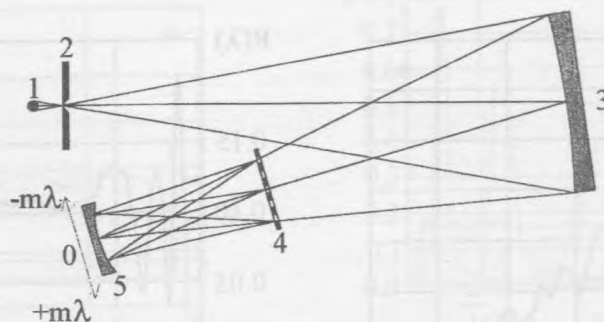


Рис. 3. Схема светосильного стигматического спектрографа, включающего фокусирующее апероидическое МЗ 3 ($R = 1000$ мм, $D = 40$ мм) и большеапертурную пропускающую дифракционную решетку 4. Лазерная плазма (1), входная щель (2), кассета с рентгеновской фотопленкой (5).

16.5 мм перед входной щелью спектрографа. Тефлоновая и вольфрамовая мишени служили источником линейчатого и квазинепрерывного спектра. На рис. 4 показаны фотографии спектров, зарегистрированных на рентгеновскую фотопленку УФ-4 за 10 вспышек лазера. Хорошо видно, что интенсивный спектр простирается от L -края поглощения кремния (125 \AA) приблизительно до $m\lambda = 250 \text{ \AA}$, где начинается второй порядок регистрируемого спектра. Видно также слабое почернение непосредственно под L -краем кремния. Уменьшение почернения на пленке при приближении к длинноволновому пределу рабочего диапазона МЗ связано с уменьшением интенсивности в спектрах W и CF_4 , хорошо известным из литературы [3, 4]. Полученные спектры являются экспериментальным подтверждением успешного синтеза широкополосных МЗ в МР диапазоне спектра.

Заслуживает упоминания исключительно высокая для МР диапазона светосила спектрографа. Приемный телесный угол спектрографа ограничен апертурой используемой пропускающей дифракционной решетки и, при указанной дисперсии составляет $2 \cdot 10^{-3}$ ср или $4 \cdot 10^{-3}$ ср, в зависимости от используемой нами пропускающей решетки. В каждый из первых порядков дифракции решетка направляет 5% энергии пучка, так что светосила спектрографа, определяемая как произведение приемного телесного угла и коэффициентов отражения МЗ и пропускания решетки, составляет $\sim 10^{-5}$ ср. Благодаря этому спектры с почернением в максимуме ~ 1 регистрируются всего за 1 – 2 лазерных вспышки.

В заключение сформулируем основные результаты работы:

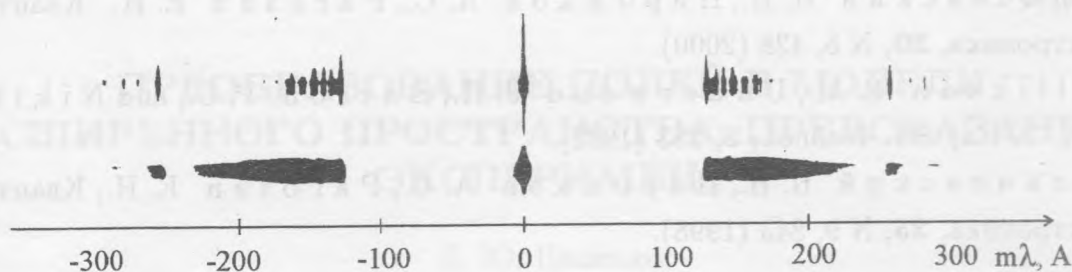


Рис. 4. Обзорные спектры тефлоновой (вверху) и вольфрамовой мишеней, зарегистрированные в схеме спектрографа на рис. 3. В поле рисунка первый и второй порядки дифракции.

1. Рассчитана аperiodическая МС на основе пары Mo/Si (40 пар слоев), оптимизированная на максимальное равномерное отражение в интервале $125 - 250 \text{ \AA}$ при нормальном падении излучения. Оптимизация выполнена с учетом переходных слоев $MoSi_2$ фиксированной толщины.

2. Методом магнетронного распыления синтезированы четыре аperiodических МС (три на вогнутые подложки и один плоский контрольный образец). Проведены измерения коэффициента отражения $R(\theta)$ на длине волны $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ для всех "свидетелей" при скользящем падении. Сделан вывод о том, что МС на двух вогнутых подложках и контрольном образце близки между собой.

3. Проведены измерения коэффициента отражения $R(\theta)$ на длине волны $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ для контрольного образца. По этим данным восстановлена МС контрольного образца и профиль ее коэффициента отражения в интересующей нас МР области спектра. Указанный профиль оказался схожим с желаемым.

4. Аperiodические МС, нанесенные на вогнутые подложки, использовались в качестве фокусирующих элементов стигматического дифракционного спектрографа с умеренной дисперсией. С его помощью зарегистрированы линейчатые и квазинепрерывные спектры лазерной плазмы в области $125 - 250 \text{ \AA}$.

Авторы признательны Н. В. Уваровой, предоставившей превосходную рентгеновскую фотопленку УФ-4, и Ф. Бийкерку за предоставление большеапертурной дифракционной решетки. Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта: 00-02-17717).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Колачевский Н. Н., Пирожков А. С., Рагозин Е. Н. Краткие

сообщения по физике ФИАН, N 12, 55 (1998).

- [2] Колачевский Н. Н., Пирожков А. С., Рагозин Е. Н. Квантовая электроника, **30**, N 5, 428 (2000).
- [3] Gullikson E. M., Underwood J. H., Watson P. C., and Nikitin V. J. X-Ray Sci. Technol., **3**, 283 (1992).
- [4] Колачевский Н. Н., Пирожков А. С., Рагозин Е. Н., Квантовая электроника, **25**, N 9, 843 (1998).

Поступила в редакцию 13 июня 2001 г.