

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТОБРАЖАЮЩИХ МНОГОСЛОЙНЫХ Mo-Si ЗЕРКАЛ НА $\lambda_0 \approx 135 \text{ \AA}$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕР-ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.Н. Колачевский, В.В. Кондратенко*, М.М. Митропольский, Е.Н. Рагозин,
А.И. Федоренко*, С.А. Юлин*

С помощью лазер-плазменного источника мягкого рентгеновского излучения, инициируемого сфокусированным пучком второй гармоники лазера на алюминате ($\lambda_2 = 0,54 \text{ мкм}$, $E_2 = 0,2 \text{ Дж}$, $\tau_2 = 5 \text{ нс}$), исследованы спектральные характеристики сферических многослойных рентгеновских зеркал на $\lambda_0 = 135 \text{ \AA}$, изготовленных методом магнетронного распыления, и их однородность по апертуре.

На основе многослойных зеркал (МЗ) мягкого рентгеновского диапазона создаются микроскопы, телескопы для астрофизических исследований (см. обзор /1/), дифракционные спектрометры. Одна из тенденций развития спектральных приборов в диапазоне $\lambda < 300 \text{ \AA}$ состоит в разделении функций диспергирования и фокусировки, что позволяет рассчитывать на новую для этого диапазона совокупность свойств: стигматичность (на уровне угловых секунд), очень высокое спектральное разрешение ($\lambda/\delta\lambda > 10^4$) и высокую светосилу /2, 3/.

Во всех указанных случаях спектральные характеристики МЗ и их однородность по апертуре представляют очевидный интерес. Предположим, что резонансные кривые отражения $R(\lambda, r)$ у различных участков МЗ сдвинуты по отношению друг к другу. В случае однократного отражения от МЗ локальный сдвиг резонансной длины волны $\delta\lambda_0(r)$ ведет к эффективному уширению интегральной (по апертуре S) кривой отражения $\langle R(\lambda) \rangle = S^{-1} \int R(\lambda, r) ds$ и уменьшению пикового коэффициента отражения; появляется зависимость формы отраженного спектра от координаты рассматриваемого участка МЗ. Если $\delta\lambda_0$ сравним или превосходит ширину кривой отражения $\Delta\lambda_{1/2}$, дифракционный предел разрешения ухудшается по сравнению с λ_0/D (D — диаметр МЗ).

В приборах, где используется последовательное отражение лучей от двух или более МЗ, требование высокой однородности по апертуре приобретает решающее значение. В этом случае спектральные кривые отражения во взаимно сопряженных точках r_A и r_B обоих МЗ должны быть

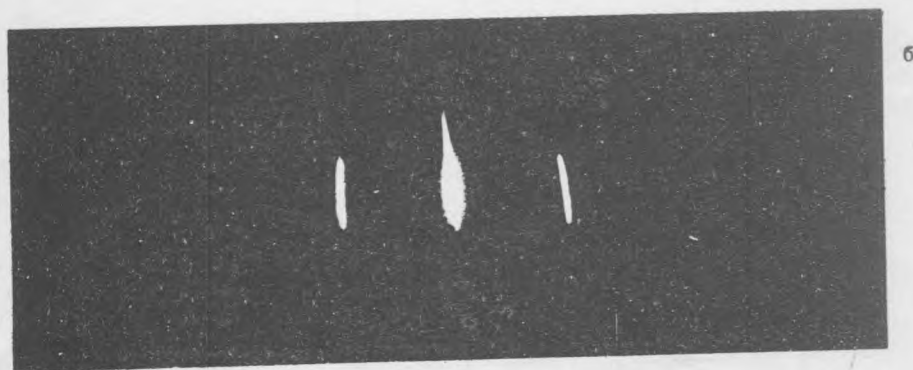
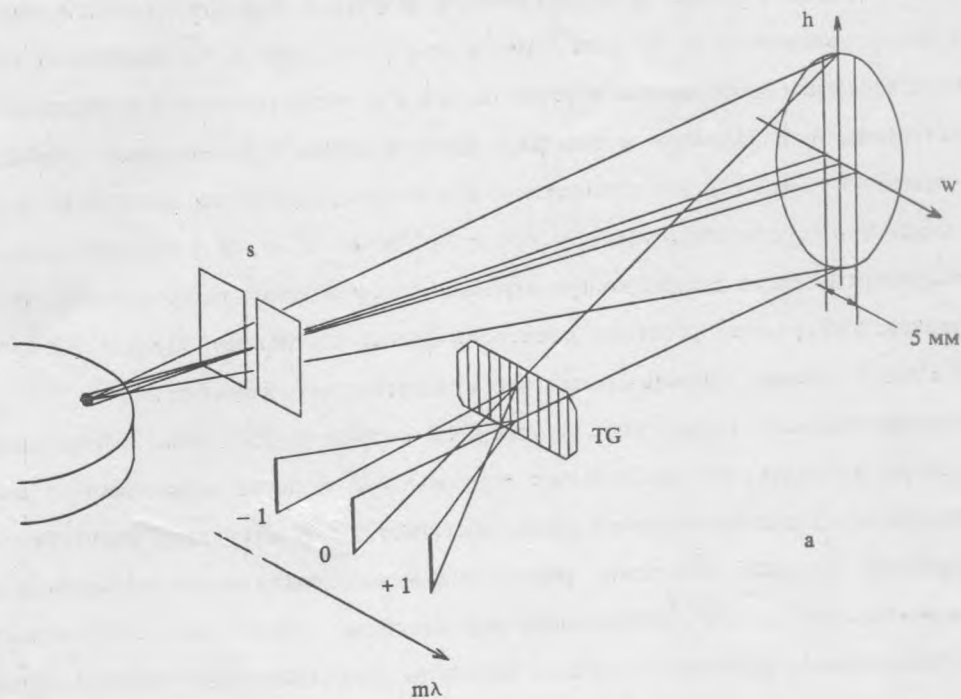
* Харьковский политехнический институт.

максимально идентичны, ибо рассогласованное изменение $\delta\lambda_0(r_A)$ и $\delta\lambda_0(r_B)$ может привести к сильному падению отражения в системе зеркал по сравнению с $\langle R_A(\lambda) \rangle \langle R_B(\lambda) \rangle$. Другими нежелательными эффектами могут быть изменение формы отраженного спектра и снижение теоретической разрешающей способности, в том числе спектральной. Имея в виду создание стигматического спектрографа высокого разрешения /3/, в настоящей работе синтезированы сферические многослойные Mo-Si зеркала с периодом $2d \approx 14$ нм и оценены их локальные спектральные характеристики.

Многослойные Mo-Si зеркала изготавливались методом прямоочного магнетронного распыления в аргоновой среде. Исходный вакуум составлял $\sim 10^{-6}$ торр, рабочее давление аргона стабилизировалось на уровне $3 \cdot 10^{-3}$ торр. Диаметр магнетрона равнялся 100 мм, расстояние мишень-подложка составляло 33 мм. В одном эксперименте синтезировались два МЗ, закрепленные на противоположных плечах вращающегося подложкодержателя. МЗ наносились на вогнутые сферические подложки с $R = 1000$ мм, диаметром 40 мм. Число пар слоев в исследуемых в настоящей работе зеркалах равнялось 50, а доля тяжелого элемента (молибдена) в периоде 0,35. Оптические характеристики многослойных Mo-Si зеркал, приготовленных по указанной технологии как на плоских, так и на сферических подложках, обсуждаются в работах /4, 5/.

Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 1. Источником мягкого рентгеновского излучения служит плазма, образующаяся при фокусировке на плоскую мишень (сплав Cr, Fe и Ni) импульса излучения второй гармоники ($\lambda_2 = 0,54$ мкм) лазера на алюминате Nd:YAlO₃ (на схеме не показан). Лазер включает в себя одномодовый задающий генератор с пассивной модуляцией добротности с активным элементом $\varnothing 6 \times 100$ мм², два усилителя $\varnothing 8 \times 100$ мм² и кристалл DKDP для генерации второй гармоники. Излучение основной гармоники отсекается абсорбционным фильтром СЗС-25, что исключает оптическую обратную связь от мишени. Импульс второй гармоники ($E_2 \approx 0,2$ Дж, $\tau_2 \approx 5$ нс) фокусируется линзой из тяжелого флинта с $f = 75$ мм в пятно с эффективной площадью менее 10^{-5} см² с плотностью потока $0,5 \cdot 10^{13}$ Вт/см². Шаговый двигатель вращает мишень вокруг вертикальной оси.

Сферическое МЗ находится чуть выше плоскости мишени и перехватывает своей апертурой рентгеновское излучение, испускаемое плазмой под углами $1-3^\circ$ к поверхности мишени. Количество квантов, испускаемых плазмой в этом направлении за одну лазерную вспышку в области $\lambda \sim 135$ Å, составляет величину порядка 10^{11} фот/А·стер. На пути лучей на расстоянии 36 мм от плазмы расположена щель шириной 40 мкм, отображаемая МЗ с увеличением 1,09 на выходную плоскость камеры, где находится пленка УФ-4. Внеосевой угол для МЗ составляет 0,035 рад. Вход в камеру (на схеме не показана) длиной 304 мм закрывает дифракционная решетка



$m =$ -3 -2 -1 0 1 2 3

Рис. 1. а). Ход рентгеновских лучей в эксперименте. Входная щель S , исследуемое многослойное зеркало $M3$ и дифракционная решетка на пропускание TG образуют стигматический спектрограф с обратной дисперсией $d\lambda/dl = 67 \text{ \AA}/\text{м.м.}$ В формировании спектра участвует вертикальная полоска на апертуре зеркала шириной 5 мм. б). Фотография изображения щели в различных порядках m дифракции.

на пропускание (492 штрих/мм, \varnothing 18 мм) с вертикально ориентированными штрихами. В полярных координатах с центром в точке пересечения центрального луча с решеткой положение спектрального (горизонтального) и вертикального фокуса в горизонтальной плоскости задается соответственно уравнениями $\rho'_h = \rho \cos^2 \beta / \cos^2 \alpha$ и $\rho'_v = \rho$, где ρ — расстояние от решетки до формируемого зеркалом изображения источника, α и β — углы падения и дифракции центрального луча, отсчитываемые от нормали к решетке. Если решетка ориентирована нормально к пучку ($\alpha = 0$), то при $\beta \ll 1$, что как раз справедливо для интересующих нас длин волн, вертикальный и горизонтальный фокус совпадают между собой ($\rho'_h \approx \rho'_v \approx \rho$). В выходной плоскости камеры образуются стигматические изображения входной щели в излучении различных длин волн в разных порядках дифракции; обратная дисперсия схемы составляет $d\lambda/dl = 67 \text{ \AA}/\text{мм}$ (в первом порядке). На рис. 1 (внизу) показан стигматический спектр отражения от МЗ.

Излучающий объем плазмы имеет поперечный размер ≈ 150 мкм. В указанной геометрии эксперимента на апертуре МЗ зондируется вертикальная полоска шириной ≈ 5 мм. Излучение плазмы, проходя через различные точки щели, достигает соответствующих участков этой полоски и формирует спектр. Проводя измерение расстояния между различными порядками дифракции в зависимости от высоты "линий", отвечающих резонансному отражению от МЗ, можно определить, в частности, значения λ_0 на разных участках апертуры. Для регистрации спектра отражения от МЗ

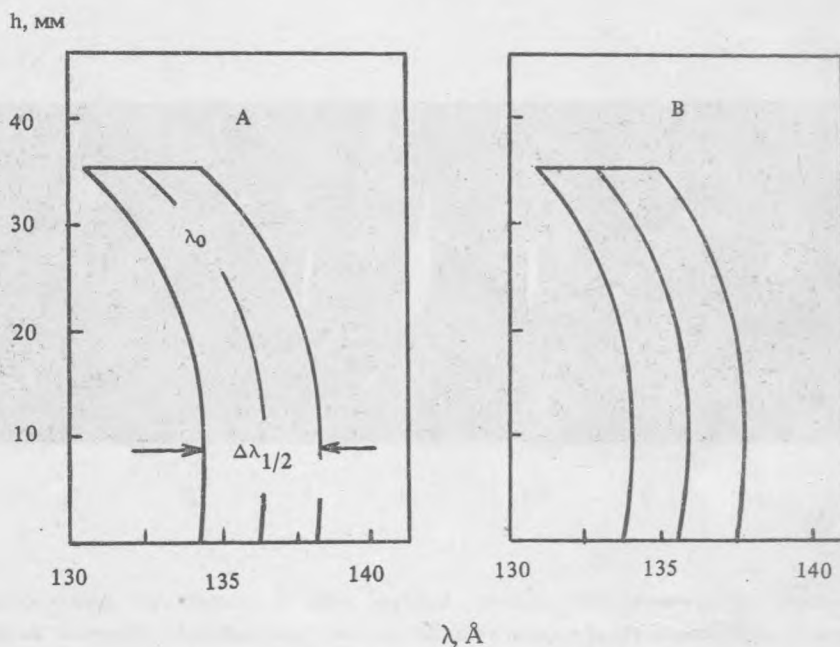


Рис. 2. Сдвиг резонансной полосы отражения у зеркал А и В в зависимости от высоты h .

в первых порядках дифракции требовалась 1 лазерная вспышка. Для регистрации спектра вплоть до 3 порядка включительно было достаточно 10 лазерных вспышек. На рис. 2 показано положение резонансных кривых отражения двух зеркал (А, В). Ширина полос соответствует измеренной ширине кривой отражения $\Delta\lambda_{A,B} = 3,7 \text{ \AA}$, не изменяющейся по апертуре. Примерно на двух третях апертуры обоих зеркал значения λ_0 почти постоянны и составляют $\sim 136 \text{ \AA}$. У обоих зеркал на одном из краев апертуры наблюдается смещение λ_0 в коротковолновую сторону на 4 \AA . По всей видимости, это связано с несовпадением центра подложки с центрами магнетронов в процессе синтеза зеркал.

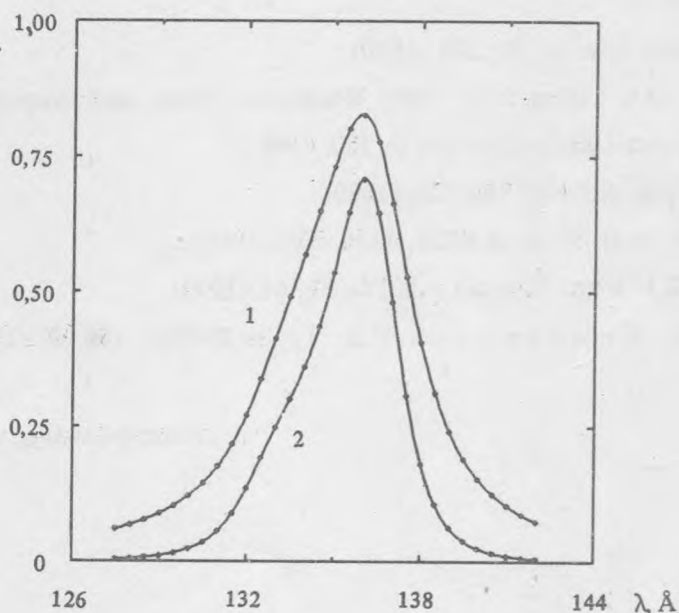


Рис. 3. Вид эффективных нормированных резонансных кривых отражения одного из МЗ (кривая 1) и двух, поставленных последовательно МЗ (кривая 2).

Предполагая, что спектральная кривая отражения малого участка имеет лоренцевскую форму $R_i(\omega) = R_0 / (1 + 4[(\omega - \omega_{0i}) / \delta\omega]^2)^{-1} / 6$, а R_0 постоянно по всей апертуре, легко рассчитать вид интегральной резонансной кривой отражения всего зондируемого участка зеркала. На рис. 3 представлены нормированные интегральные кривые отражения для одного из зеркал $\langle R_B(\lambda) \rangle / R_0$ и для пары последовательно установленных зеркал $\langle R_A(\lambda) R_B(\lambda) \rangle / R_0^2$. Интегральный коэффициент отражения пары зеркал имеет максимум на $\lambda \approx 135,5 \text{ \AA}$, где составляет $\sim 70\%$ от максимально возможного в случае идеальной однородности и идентичности обоих МЗ. Интегральная кривая отражения от зондируемого участка МЗ имеет форму несимметричного колокола с $\Delta\lambda_{1/2} \approx 5,0 \text{ \AA}$.

Это значение близко к интегральному значению $\Delta\lambda_{1/2}$, измеренному для всей апертуры $\varnothing 35$ мм в эксперименте без щели S, когда на фотопленку фокусируется диспергированное изображение лазерной плазмы.

Описанная методика топографического исследования МЗ обеспечивает определение локального значения λ_0 с точностью 0,07 Å.

Авторы признательны А.В. Виноградову и И.И. Собельману за внимание к работе, В.А. Слемзину — за предоставление дифракционной решетки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Satura R.C. *Physica Spectra*, **31**, 208 (1990).
2. Ragozin E.N. IAU Colloq. 115: "High Resolution X-Ray Spectroscopy of Cosmic Plasmas". 22-25 Aug., 1988. Cambridge University press, p. 380, 1990.
3. Рагозин Е.Н. Труды ФИАН, **196**, 123 (1989).
4. Vinogradov A.V. et al. *Proc. of SPIE*, **1140**, 530 (1989).
5. Кондратенко В.В. и др. Письма в ЖТФ, **16**, 64 (1990).
6. Виноградов А.В., Кожевников И.В. Труды ФИАН, **196**, 62 (1989).

Поступила в редакцию 18 июня 1992 г.