

Новые фокусирующие многослойные структуры для рентгеновской спектроскопии плазмы

М.С.Бибишкин, Е.Д.Казаков, В.И.Лучин, Н.Н.Салашенко,
В.В.Чернов, Н.И.Чхало, А.П.Шевелько

Разработаны новые фокусирующие короткопериодные многослойные структуры, использование которых открывает широкие возможности для рентгеновской и ВУФ спектроскопии. Многослойные структуры наносятся на плоскую поверхность кристалла слюды с последующим изгибом его в виде цилиндра малого радиуса. Продемонстрирована возможность использования данной структуры в спектрометре Гамоша для рентгеноспектральной диагностики лазерной плазмы.

Ключевые слова: лазерная плазма, рентгеновская спектроскопия, многослойная структура.

1. Введение

Для спектральных исследований слабоинтенсивных рентгеновских источников излучения требуются приборы с высокой светосилой. Максимальная эффективность рентгеновских спектрометров достигается в фокусирующих схемах, например схемах Иоганна и Гамоша, в которых используются цилиндрически изогнутые кристаллы [1]. Так, в работе [2] описывается спектрометр, выполненный по схеме Гамоша, с кристаллом слюды и ПЗС-линейкой в качестве детектора. Данный тип спектрометра успешно использовался для регистрации спектров рентгеновского излучения, возникающего при воздействии на мишень наносекундных [2] и фемтосекундных [3] лазерных импульсов. Прибор обладает высоким спектральным разрешением ($\lambda/\delta\lambda \sim 1000$) и высокой светосилой в широком (0.1 – 1.0 нм) диапазоне спектра.

Применение изогнутых кристаллов в рентгеновских спектрометрах ограничено рядом существенных факторов. Во-первых, немногие кристаллы поддаются изгибу, а при изгибе на их поверхности зачастую возникают мозаично ломаные структуры, препятствующие получению необходимого спектрального и пространственного разрешения. Во-вторых, малое межплоскостное расстояние (период) d в кристаллах ограничивает сверху регистрируемый диапазон длин волн величиной $\sim 2d \approx 2.5$ нм, т. к. максимальное значение $2d$ для природных кристаллов $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ (КАР) равно 2.66 нм.

В связи с этим представляется перспективным использование искусственных отражающих многослойных структур (МС) в качестве дисперсионных элементов для спектральных приборов вакуумного УФ (ВУФ) и мягкого рентгеновского диапазонов. Рентгеновские зеркала могут быть изготовлены с заранее заданным межплоскостным расстоянием ($d \geq 0.7$ нм) [4, 5]. МС наносят не только на плоские подложки, но и на поверхности более

сложной формы, например цилиндрической, сферической, тороидальной, параболической и др. [6]. Их можно применять в качестве дисперсионных элементов в схемах, разработанных для изогнутых кристаллов (схемы Гамоша, Иоганна и др.). Возможен выбор наиболее оптимального для исследуемого диапазона спектра межплоскостного расстояния искусственной МС. Кроме того, при использовании более сложных отражающих поверхностей достижимо не только высокое спектральное, но и высокое пространственное разрешение. Многослойные зеркала имеют высокий коэффициент отражения благодаря оптимальному выбору соответствующих пар элементов структуры. Рентгеновские отражатели могут быть выполнены с заданным распределением периода d по поверхности подложки.

В настоящей работе в качестве дисперсионного элемента применяется новый тип многослойного рентгеновского зеркала, нанесенного на поверхность слюды и затем изогнутого. Период МС ($d = 1.2$ нм) был выбран немного большим межплоскостного расстояния в кристалле слюды (0.994 нм), чтобы иметь возможность провести тестовые эксперименты по изучению рентгеновского излучения плазмы с одновременным применением как многослойного зеркала, так и кристалла слюды. В принципе, путем изменения периода и состава МС можно, не меняя геометрии спектрометра Гамоша, существенно расширить регистрируемый диапазон спектра в длинноволновую область, в том числе в так называемое водяное окно – область между К-краями поглощения углерода и кислорода.

2. Многослойная структура

Для оценки спектральных характеристик модернизированного спектрометра Гамоша было изготовлено тестовое многослойное зеркало на основе структуры $\text{W}/\text{V}_4\text{C}$ с периодом $d = 1.2$ нм. Зеркало было нанесено методом магнетронного распыления на полированную плоскую кремниевую пластину со среднеквадратичной шероховатостью поверхности 0.3 нм. Характерные параметры короткопериодных многослойных $\text{W}/\text{V}_4\text{C}$ -зеркал [4, 5] представлены в табл. 1.

Измерения спектральных характеристик тестового зеркала проводились на стенде, в состав которого вхо-

М.С.Бибишкин, В.И.Лучин, Н.Н.Салашенко, В.В.Чернов, Н.И.Чхало. Институт физики микроструктур РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ГСП-105; e-mail: luchin@ipm.sci-nnov.ru
Е.Д.Казаков, А.П.Шевелько. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: shevelko@rambler.ru

Поступила в редакцию 28 мая 2007 г., после доработки – 13 июля 2007 г.

Табл.1. Параметры многослойных короткопериодных W/V₄C-зеркал.

d (нм)	N	$\lambda = 0.154$ нм				$\lambda = 0.834$ нм			
		R_{\max} (%)	θ_{\max} (°)	$\Delta\theta$ (")	$\tan \theta/\Delta\theta$	R_{\max} (%)	θ_{\max} (°)	$\Delta\theta$ (")	$\tan \theta/\Delta\theta$
0.72	800	0.73	6.155	29.52	753	0.12	35.46	241	583
0.80	700	1.6	5.538	28.08	712	0.25	31.48	242	523
1.136	500	17.3	3.895	39.60	350	3.5	21.55	270	300
1.313	500	45	3.374	34.56	352	8.4	18.55	277	250

Примечания: d – период МС; N – число периодов; R_{\max} – пиковый коэффициент отражения; θ_{\max} – угол скольжения, соответствующий максимуму отражения; $\Delta\theta$ – угловая ширина кривой отражения; $\tan \theta/\Delta\theta = \lambda/\delta\lambda$ – спектральное разрешение многослойного зеркала.

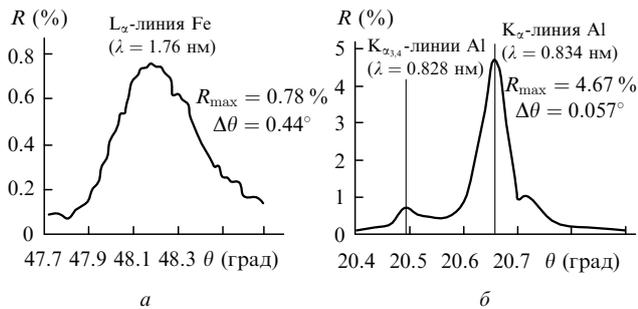


Рис.1. Угловые зависимости коэффициента отражения R для W/V₄C-зеркала: L_γ-линия Fe с $\lambda = 1.76$ нм (а), а также K_γ-линия Al с $\lambda = 0.834$ нм и K_{α,β}-линии Al с $\lambda = 0.828$ нм (б); R_{\max} – максимальный коэффициент отражения, θ – угол скольжения, $\Delta\theta$ – ширина кривой отражения.

дили рентгеновская трубка со сменными анодами, спектрометр-монокроматор РСМ-500, вакуумный рефлектометр и детекторы излучения [7]. В качестве материалов анодов трубки использовались Al, Cu и Fe. По результатам измерений оценено спектральное разрешение $\lambda/\delta\lambda$ зеркала, составившее 380, 160 и 140 для K_γ-линий Al с $\lambda = 0.834$ нм, L_γ-линии Cu с $\lambda = 1.33$ нм и L_γ-линии Fe с $\lambda = 1.76$ нм соответственно. Селективность многослойного зеркала оказалась достаточно высокой, чтобы разрешить тонкую структуру спектра около основного перехода K_γ-линии Al (рис.1,б). Так, слева от основного максимума коэффициента отражения (K_γ-линии Al с $\lambda = 0.834$ нм) наблюдается второй пик, вызванный отражением слабых линий в области $\lambda = 0.828$ нм, которые можно приписать эмиссии двукратно и трехкратно ионизованных атомов Al (K_{α,β}-линии) [8]. После определения основных параметров МС, нанесенной на кремниевую подложку, пленочная структура переносилась на поверхность тонкой (толщиной 15 мкм) пластины слюды. Из-за малой толщины, гибкости и способности к расслаиванию слюдяной подложки последующее тестирование МС проводилось после ее изгиба и фиксации на оправке цилиндрической формы. Спектральные характеристики нового дисперсионного элемента оценивались по результатам измерений параметров лазерно-плазменного источника.

3. Эксперименты с лазерной плазмой

Многослойное интерференционное зеркало на основе структуры W/V₄C с периодом $d = 1.2$ нм, нанесенное на кристалл слюды, использовалось в спектрометре Гамоша [2] для исследования рентгеновских спектров лазерной плазмы магния. Лазерная плазма создавалась при фокусировке излучения второй гармоники лазера на неодимовом стекле (энергия импульса $E_L < 10$ Дж, его длительность 2 нс, размер облученной площадки 20 мкм) на массивную мишень из магния.

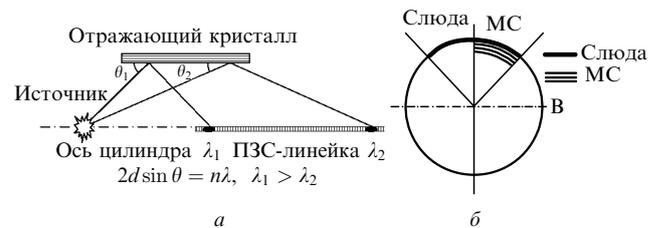


Рис.2. Схема рентгеновского фокусирующего спектрометра Гамоша в плоскости, проходящей через ось спектрометра (а), и геометрия относительных измерений коэффициентов отражения кристалла слюды и МС, нанесенной на внутреннюю поверхность слюды (В – положение фокальной плоскости) (б).

Схема спектрометра Гамоша приведена на рис.2. В этой схеме используется цилиндрически изогнутый кристалл, а источник излучения и плоскость регистрации лежат на оси цилиндра. Излучение источника с различными длинами волн после отражения от изогнутого кристалла фокусируется в соответствующую точку на оси спектрометра. Это приводит к очень высокой светосиле спектрометра в широком диапазоне спектра. Другим достоинством данной схемы является формирование спектра на оси спектрометра, что позволило использовать ПЗС-линейку в качестве детектора излучения. Большая длина детектора (в нашем случае 30 мм) давала возможность регистрировать спектр в широком диапазоне длин волн.

В данной работе в спектрометре использовался цилиндрический кристалл слюды ($2d = 1.988$ нм) с нанесенным на него многослойным зеркалом. Радиус изгиба составлял 20 мм. В качестве детектора излучения применялась ПЗС-линейка Toshiba TCD 1304AP, имеющая 3724 элемента шириной 8 мкм и высотой 200 мкм каждый. Детектор работал при комнатной температуре. Для защиты от видимого света использовался рентгеновский фильтр, состоящий из пленок полиимида толщиной 1.1 мкм и алюминия толщиной 0.2 мкм. Ось спектрометра Гамоша устанавливалась перпендикулярно оси лазерного пучка.

На рис.3 приведен спектр Mg, зарегистрированный с помощью многослойного дисперсионного элемента. Наблюдается полная структура спектра: резонансные линии L_{γ} и w водородоподобного и гелиеподобного ионов Mg, а также их сателлитные линии (s). Спектральное разрешение $\lambda/\delta\lambda \approx 200$, что приблизительно в два раза меньше значения, полученного из результатов измерений угловых зависимостей коэффициента отражения тестового зеркала на кремниевой подложке (см. рис.1,б).

Фокусирующая геометрия спектрометра наряду с высокой эффективностью ПЗС-детектора приводит к высокой чувствительности прибора: эффективность спектрометра может превышать эффективность схемы с плоским кристаллом и фотографической регистрацией спектра в

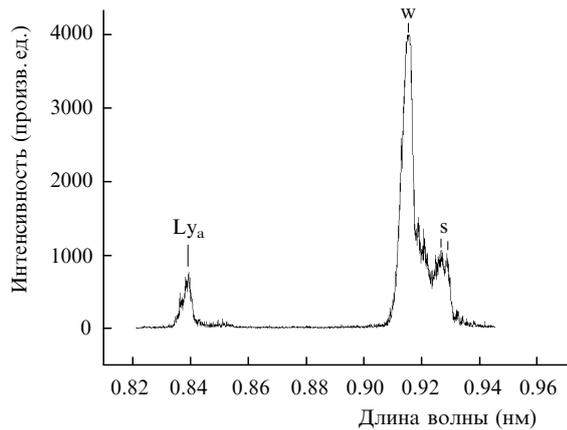


Рис.3. Рентгеновский спектр лазерной плазмы магния ($E_L = 50$ мДж, интенсивность $q = 8 \times 10^{12}$ Вт/см²), зарегистрированный с помощью МС. Отмечены резонансные линии Ly_α и w водородоподобного и гелиеподобного ионов Mg и их спутничные линии (s).

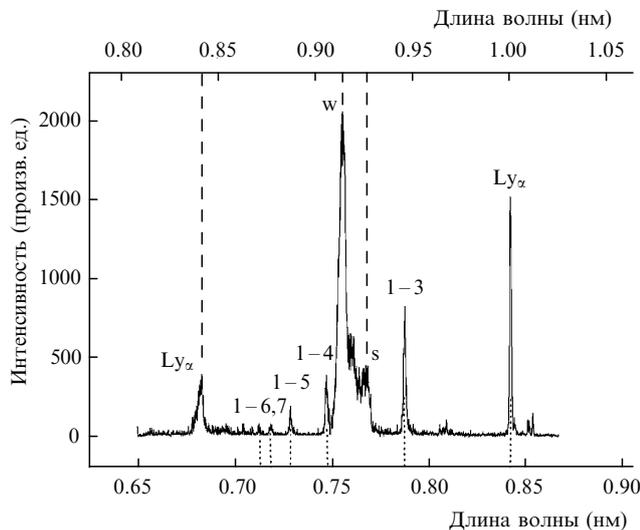


Рис.4. Рентгеновские спектры лазерной плазмы магния, зарегистрированные одновременно с помощью МС (верхняя шкала длин волн) и кристалла слюды (нижняя шкала). Отмечены резонансные линии Ly_α и w водородо- и гелиеподобных ионов Mg, спутничные линии (s) и линии главной серии гелиеподобного иона.

$10^4 - 10^6$ раз [2]. Это позволяло регистрировать рентгеновские спектры за одну лазерную вспышку при малых энергиях лазерного импульса (вплоть до $E_L = 10$ мДж).

Проведено сравнение коэффициентов отражения МС и кристалла слюды. Для этого кристалл слюды с многослойным зеркалом устанавливался в спектрометре таким образом, чтобы многослойное зеркало занимало половину действующей апертуры спектрометра (рис.2,б). Спектры излучения, отраженного от МС и кристалла слюды, формировались одновременно на оси спектрометра и регистрировались одним и тем же ПЗС-детектором. Примеры спектров приведены на рис.4. Так как МС и кристалл слюды имеют разные межплоскостные периоды $2d$ (2.4 и 1.988 нм соответственно), приведены две шкалы длин волн. Используя интегральные интенсивности линий, можно оценить отношение интегральных коэффициентов отражения ($\rho = R\Delta\theta$) многослойной структуры (ρ_{MS}) и слюды (ρ_m): для $\lambda = 0.84$ нм (резонансная

линия Ly_α водородоподобного иона Mg) $\rho_{MS}/\rho_m = 1.3 \pm 0.14$. По угловой зависимости коэффициента отражения тестового зеркала ($R_{max} = 4.67\%$, ширина кривой отражения $\Delta\theta = 0.057^\circ$) оценим интегральный коэффициент отражения МС: $\rho_{MS} = 4.4 \times 10^{-5}$ рад. Тогда для слюды имеем $\rho_m = 3.4 \times 10^{-5}$ рад.

По ширине линий (рис.4) определялась спектральная разрешающая сила $\lambda/\delta\lambda$, которая составила 230 для МС и 800 для кристалла слюды. С учетом интенсивности линий можно оценить пиковый коэффициент отражения для слюды: $R_{max} = 12.6\%$. Найденные значения R_{max} и ρ_m для слюды находятся в хорошем согласии с литературными данными [9, 10].

4. Заключение

Впервые продемонстрирована возможность использования в качестве дисперсионного элемента в фокусирующих рентгеновских спектрометрах короткопериодной МС, нанесенной на кристалл слюды. Многослойная структура на основе W/V₄C с периодом $d = 1.2$ нм нанесена на плоскую поверхность кристалла слюды с последующим изгибом ее в виде цилиндра радиусом 20 мм. С использованием данной структуры в спектрометре Гаммоша зарегистрированы спектры водородо- и гелиеподобных ионов Mg в лазерной плазме со спектральным разрешением $\lambda/\delta\lambda \approx 200$. МС имеет более высокий, чем у кристалла слюды, интегральный коэффициент отражения, что является важным при диагностике слабых источников, в том числе фемтосекундной лазерной плазмы. Использование подобных МС особенно перспективно в фокусирующих спектрометрах длинноволнового диапазона. Дело в том, что не существует естественных кристаллов, которые можно использовать в качестве дисперсионных элементов в спектрометрах данного диапазона, например в водяном окне ($\lambda = 2.3 - 4.4$ нм) или в ВУФ области спектра. При умеренном спектральном разрешении ($\lambda/\delta\lambda \sim 100$) такие спектрометры будут иметь высокую светосилу при очень компактной геометрии, что является важным при проведении диагностики плазменных источников ВУФ излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 07-02-00992 и программы Президиума РАН «Фемтосекундная оптика и физика сверхсильных лазерных полей».

1. Блохин М.А. *Методы рентгеноспектральных исследований* (М.: ГИФМЛ, 1959).
2. Shevelko A.P., Kasyanov Yu.S., Yakushev O.F., Knight L.V. *Rev. Sci. Instr.*, **73**, 3458 (2002).
3. Агранат М.Б., Андреев Н.Е., Ашитков С.И. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **83**, 80 (2006).
4. Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Fraerman A.A., et al. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **543**, 333 (2005).
5. Вайнер Ю.А., Пестов А.Е., Прохоров К.А. и др. *ЖЭТФ*, **130**, 401 (2006).
6. Akhsakhalyan A.A., Akhsakhalyan A.D., Kharitonov A.I., et al. *Cent. Eur. J. Phys.*, **3**, 163 (2005).
7. Бибишкин М.С., Забродин И.Г., Зуев С.Ю. и др. *Поверхность*, № 2, 23 (2005).
8. Nardi E., Zinamon Z. *J. Appl. Phys.*, **52**, 7075 (1981).
9. Gilfrich J.V., Brown D.B., Burkhalter P.G. *Appl. Spectrosc.*, **29**, 322 (1975).
10. Shevelko A.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3406**, 91 (1998).