

УДК 537.531:535.3

СПЕКТРОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

© 1999 г. Э. П. Кругляков, А. Д. Николенко, Е. П. Семенов, Е. Д. Чхало, Н. И. Чхало

ГНЦ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Россия, Новосибирск

Поступила в редакцию 03.04.1998 г.

Описываются разработанные в последнее время в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН спектрометры для экспериментов на термоядерных установках RFX (г. Падуа, Италия) и ГАММА-10 (г. Цукуба, Япония). Приводятся данные по спектральным характеристикам ряда многослойных рентгеновских зеркал.

ВВЕДЕНИЕ

Многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) все шире применяются в современных спектрометрах мягкого рентгеновского излучения для диагностики высокотемпературной плазмы [1–3]. Это объясняется существенно более высокими интегральными и пиковыми коэффициентами отражения МРЗ по сравнению с традиционными диспергирующими элементами. Нормальные рабочие углы зеркал в диапазоне 2–50 нм [4–6] позволяют создавать стигматические изображающие схемы с высоким пространственным разрешением. Благодаря простоте, компактности и относительной дешевизне этого типа приборов, на их основе создаются многоканальные томографические системы [7]. Спектральное разрешение МРЗ $\lambda/\delta\lambda \approx 100$ вполне достаточно для разрешения K -линий легких ионов примесей различной кратности ионизации.

В настоящей работе описываются разработанные в последнее время в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН спектрометры для работы на термоядерных установках RFX (г. Падуа, Италия) и ГАММА-10 (г. Цукуба, Япония). Приводятся данные по спектральным характеристикам ряда многослойных рентгеновских зеркал.

СХЕМА СПЕКТРОМЕТРА И ЕГО ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Для экспериментов на пинче с обращенным полем RFX (г. Падуа, Италия) был разработан и изготовлен двухканальный перестраиваемый спектрометр. Основная задача этого спектрометра – мониторинг примесей кислорода по рентгеновскому излучению K_{α} -линий ионов O^{6+} и O^{7+} , длины волн λ 2.16 и 1.9 нм соответственно. Геометрия этого прибора и зеркала позволяют проводить измерения в диапазоне λ 1.8–4.3 нм.

Спектрометр состоит из корпуса и двух идентичных каналов, собранных на отдельных фланцах. Схема одного канала приведена на рис. 1. Он состоит из антирассеивающего диафрагменного коллиматора (на рисунке не показан), отрезающего фильтра, коллиматора Соллера и θ - 2θ -гониометра. На θ -плече гониометра установлено многослойное зеркало (65 × 30 × 5 мм), на 2θ -плече – детектор. На обратной стороне фланца смонтировано механическое устройство, позволяющее, без вскрытия прибора на “атмосферу”, в режиме θ - 2θ изменять угол падения излучения на зеркало. Угловое положение зеркала индицируется на лимбе в диапазоне 0–45° с ценой деления 3'.

Канал на $\lambda = 2.16$ нм содержит Cr/C-зеркало с числом периодов 35 и периодом 3.2 нм. Коэффициент отражения зеркала на этой длине волны составил 17% при спектральном разрешении 33. В качестве фильтра используется майларовая пленка толщиной 1 мкм с нанесенным на нее слоем 0.12 мкм Cr. Пропускание фильтра составляет 14.1%. Второй канал, предназначенный для регистрации излучения с $\lambda = 1.9$ нм, укомплектован Ni/C-зеркалом с числом периодов 55 и величиной периода 3.4 нм. Коэффициент отражения на $\lambda =$

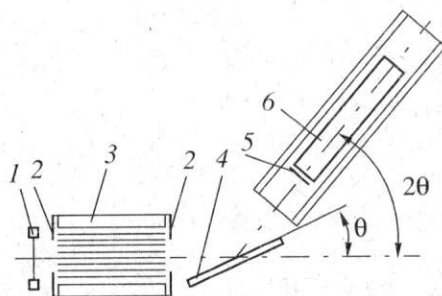


Рис. 1. Рентгенооптическая схема канала: 1 – отрезающий фильтр, 2 – входная диафрагма, 3 – коллиматор Соллера, 4 – многослойное рентгеновское зеркало, 5 – скантillator, 6 – фотоэлектронный умножитель.

= 1.9 нм составил 7% при спектральном разрешении 54. Отрезающий фильтр представляет собой майларовую пленку толщиной 1 мкм с нанесенным на нее слоем Fe толщиной 0.15 мкм. Пропускание фильтра составляет 21.3%. В качестве детекторов используются фотоумножители ФЭУ-130 с NE110-сцинтиллятором, на поверхность которого нанесен светозащитный слой Al толщиной 0.1 мкм. Двухслойный магнитный экран ФЭУ обеспечивает работу спектрометра в полях 300 Гс с любой ориентацией вектора магнитной индукции.

С 1995 года спектрометр работает на установке RFX для наблюдения временной эволюции водородо- и гелийподобных состояний углерода и кислорода. Подробно результаты первых экспериментов, полученных с использованием этого спектрометра, изложены в работах [8, 9].

Двухканальный перестраиваемый спектрометр для экспериментов на GAMMA-10 рассчитан на работу с непрерывным и линейчатым спектром в диапазонах $\lambda = 10\text{--}25$ нм (первый канал) и $\lambda = 3.6\text{--}10$ нм (второй канал). Конструктивно этот спектрометр выполнен аналогично предыдущему. Диапазон рабочих углов $20\text{--}75^\circ$. Для первого канала в качестве зеркала впервые применяется многослойная Y/Si-структура (период 14 нм, число периодов 40), имеющая в 2–3 раза большее спектральное разрешение, чем традиционные Mo/Si-зеркала при сопоставимых коэффициентах отражения. Спектральные характеристики этого зеркала приведены ниже. Фильтр представляет собой пленку Be толщиной 0.15 мкм, защищенную с двух сторон углеродом толщиной по 20 нм и приклеенную на никелевую сетку с размером ячейки 0.5 мм. Пропускание фильтра на $\lambda = 25$ нм составляет 35%. Для защиты ФЭУ от видимого света сцинтиллятор запылен слоем Be толщиной 0.15 мкм.

Таблица 1. Данные калибровки спектрометра для GAMMA-10

Энергия фотонов, эВ	C	Энергия фотонов, эВ	C
50	3.3×10^{-17}	150	7.0×10^{-17}
60	5.2×10^{-17}	180	8.8×10^{-17}
70	7.8×10^{-17}	210	1.4×10^{-16}
80	1.7×10^{-16}	240	1.9×10^{-16}
90	2.5×10^{-16}	270	2.7×10^{-16}
100	1.0×10^{-16}	280	3.7×10^{-16}
110	6.6×10^{-17}	300	8.0×10^{-18}
120	5.9×10^{-17}	320	8.0×10^{-18}
130	7.2×10^{-17}	330	8.3×10^{-18}
		340	8.5×10^{-18}

На втором канале установлено W/C-зеркало с периодом 5.5 нм и числом периодов 60. Канал укомплектован титановыми (толщина 0.15 мкм) и алмазоподобными углеродными пленками (толщина 0.15 мкм), приклеенными на никелевые сетки с размером ячейки 0.5 мм. Для защиты ФЭУ от видимого и вакуумного ультрафиолетового излучения сцинтиллятор запылен Ti с толщиной 0.13 мкм.

КАЛИБРОВКА СПЕКТРОМЕТРА

При регистрации линейчатого излучения ток на выходе детектора I_d может быть представлен в виде:

$$I_d = FS\sigma\epsilon T(\Omega/\Delta\theta) \int_{\theta_m - \Delta\theta/2}^{\theta_m + \Delta\theta/2} R(\theta)K(\theta - \theta_m)d\theta,$$

где I_d измеряется в амперах; F – поток излучения из источника, измеряемый в фотонах/см² · стер · с; S , см² – площадь источника, с которой излучение попадает на диафрагму прибора; σ – чувствительность детектора, Кл/фотон; ϵ – эффективность регистрации детектора; T – пропускание фильтра; Ω – телесный угол диафрагмы спектрометра; $\Delta\theta$ – угловая расходимость падающего излучения; θ – брэгговский угол; $R(\theta)$ – угловая зависимость коэффициента отражения рентгеновского зеркала; $K(\theta - \theta_m)$ – пропускание коллиматора Соллера. Таким образом, для определения спектральной мощности источника необходимы данные: σ , ϵ , T , $R(\theta)$, $K(\theta - \theta_m)$. Выражая телесный угол и угловую расходимость через размер диафрагмы и расстояние от источника до диафрагмы спектрометра L [см], для протяженного источника формулу можно переписать следующим образом:

$$I_d = CFSZ^{-1},$$

где C – функция от энергии фотонов, содержащая калибровочные данные спектрометра.

Отражательные характеристики зеркал и пропускание фильтров в зависимости от длины волны измерялись на стенде, описанном в [10]. Независимо по длинам волн весь прибор калибровался на лазерно-плазменном источнике [11] и с помощью рентгеновской трубки на отдельных спектральных линиях. Пропускание коллиматора Соллера рассчитывалось по методике, описанной в [12]. Чувствительность детекторов определялась с использованием синхротронного излучения на ВЭПП-2М [13]. Кроме того спектрометр для GAMMA-10 был непосредственно установлен на канал СИ и была произведена калибровка чувствительности в рабочем диапазоне длин волн. Данные обоих методов хорошо совпали.

В таблице 1 приведены данные калибровки спектрометра для GAMMA-10 в диапазоне энер-

гий фотонов 50–340 эВ. Из таблицы видно, что при энергии фотонов 90 эВ, расстоянии между спектрометром и плазмой 1 м, площади источника 1 см² минимальный регистрируемый поток излучения из источника, определяемый шумами ФЭУ (0.1 нА), составляет $4 \cdot 10^5$ фотонов/см² стер с.

МНОГОСЛОЙНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ЗЕРКАЛА

Для изготовления многослойных рентгеновских зеркал применялись методы импульсного лазерного испарения и магнетронного распыления. Синтез зеркал лазерным методом производился на установке, описанной в [14]. Зеркала наносились на плоские и сферические суперполированные подложки [15] из плавленного кварца.

Сводные данные по спектральным характеристикам ряда многослойных структур приведены в табл. 2. Как видно из таблицы в области спектра от 0.7 до 2 нм структуры W/Si имеют более высокие коэффициенты отражения и спектральное разрешение по сравнению с углеродсодержащими зеркалами. Исключение составляют области *L*-краев поглощения металлов, входящих в структуру зеркала в качестве сильнопоглощающего материала: Cr, Fe, Co и Ni. На *L*-линиях этих элементов наблюдается аномально высокое отражение.

Зависимость отражательных характеристик W/Si-зеркал в диапазоне $\lambda = 0.154$ –1.76 нм от величины периода многослойной структуры можно проследить на рис. 2. Как и следовало ожидать, с уменьшением периода наблюдается заметное уменьшение коэффициентов отражения. Обращает на себя внимание следующий факт: зеркало с периодом 1.47 нм имеет коэффициент отражения 17% на $\lambda = 0.154$ нм, что составляет 22% от идеального, в то время, как коэффициент отражения на $\lambda = 0.834$ составляет только 9.6% от идеального. Это можно объяснить тем, что в отражении эффективно участвует только 105 периодов. Для достижения более высокого коэффициента отражения необходимо улучшить периодичность структуры. Влияние подложки на коэффициенты отражения можно проследить на примере зеркал с периодами 3.0 и 2.6 нм. Первое зеркало наносилось на подложку типа "боровское стекло" (float glass), второе на кварцевую подложку, полированную по технологии, описанной в [15]. Как видно из рисунка, несмотря на меньший период отражение от зеркала, нанесенного на кварцевую подложку, заметно выше.

Для области ультрамягкого рентгеновского диапазона (10–25 нм) впервые была применена Y/Si-структура, которая, в отличие от традиционно используемых в этом диапазоне пар Mo/Si и Mo/B₄C, теоретически имеет в 2–2.5 раза большее

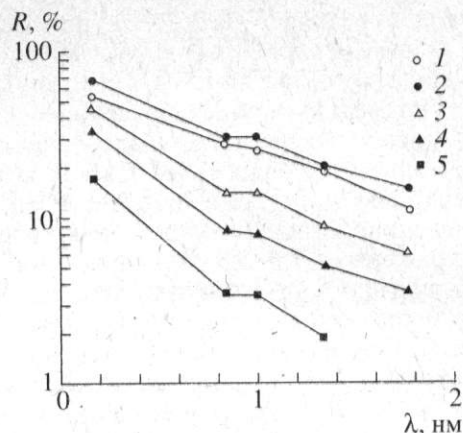


Рис. 2. Зависимость отражательных характеристик W/Si-зеркал в диапазоне 0.154–1.76 нм от величины периода многослойной структуры: 1 – 3.0 нм, 2 – 2.6 нм, 3 – 2.0 нм, 4 – 1.8 нм, 5 – 1.47 нм.

спектральное разрешение при сопоставимых пиковых коэффициентах отражения. Зеркала наносились методом магнетронного напыления при

Таблица 2. Сводные данные по характеристикам изготовленных многослойных рентгеновских зеркал на область 0.8–25.2 нм

λ , нм	Материалы	θ , °	R, %	$\lambda/\Delta\lambda$	Метод напыления
0.834	W/Si	9.0	33.7	71	МР
0.834	Fe/C	6.1	29	35	ИЛИ
0.989	W/Si	10.7	32.6	74.5	МР
1.33	W/Si	14.5	21.0	73.2	МР
1.46	Ni/C	18	11	37	ИЛИ
1.60	Co/C	16	16	34	ИЛИ
1.76	Fe/C	14	27	30	ИЛИ
1.76	W/Si	19.3	15.7	71.2	МР
2.16	Ni/C	7.3	19	51	ИЛИ
2.16	Cr/C	19	17	31	ИЛИ
2.43	V/C	19	13	32	ИЛИ
4.47	Ni/C	19	33	15	ИЛИ
4.47	Fe/C	45	10	65	ИЛИ
6.44	Co/C	55	9	40	ИЛИ
11.4	Ti/Be	18	42	7	ИЛИ
11.4	Y/Si	24	8.3	15	МР
13.5	Ti/Be	23	32	8	ИЛИ
13.5	Y/Si	30.1	33.7	20	МР
17.1	Y/Si	41	14.5	21.5	МР
25.2	Y/Si	75	13	22.0	МР

Обозначения: МР – магнетронное распыление, ИЛИ – импульсное лазерное испарение.

мощности в разряде ~ 100 Вт и при давлении $3 \cdot 10^{-3}$ Торр. Спектральные характеристики изучались на $\lambda = 0.154, 11.4, 13.6, 17.1$ и 25.2 нм. В табл. 2 приведены данные для зеркала, которое применялось в спектрометре. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показало, что спектральное разрешение зеркал несколько превышает расчетное, в то время как коэффициенты отражения в 1.3–1.5 раза ниже теоретических в области ниже L -края Si и практически совпадают с расчетными на длинах волн 0.154 и 11.4 нм. Одним из возможных объяснений этих результатов может быть предположение о наличии значительного окисления иттриевого слоя, которое с одной стороны приводит к дополнительному поглощению в ультрамягком диапазоне, и с другой – уменьшает плотность пленки иттрия, тем самым снижая скачок оптической плотности на границе Y–Si. Кроме того содержание иттрия в мишени не превышало 93% и примеси (тантал, железо, кальций) могли приводить к дополнительному поглощению. В дальнейшем предполагается детальное изучение этих эффектов с использованием EXAFS-спектроскопии по методике, которая была успешно применена для изучения внутреннего строения и процессов при отжиге в многослойных Co/C- и Ni/C-структурах [16, 17].

В заключение авторы выражают глубокую признательность доктору М. Валисе за ценные обсуждения при разработке спектрометра, В.А. Капитонову за помощь при решении ряда технических проблем и М.В. Сомову за сборку большинства механических узлов. Работа выполнена при частичной поддержке Международного научно-технического центра по проекту 438.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blake R.L., Hockaday R.C., Crosso J.S. et al. // Proc. SPIE. 1986. V. 688. P. 146.
2. Ахсахалян А.Д., Белик В.П., Бобаиёв С.В. и др. // Тез. 5 Всесоюз. совещания по диагностике высокотемпературной плазмы. Минск: БГУ, 1990. С. 163.
3. May M.J., Finkenthal M., Regan S.P. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1995. V. 66. P. 561.
4. Salashchenko N.N., Gaponov S.V., Akhsakhalyan A.D. et al. // Proc. SPIE. 1991. V. 1800. P. 195.
5. Christensen F.E., Shou-hua Zhu, Hornstrup A. et al. // J. X-ray Science and Technology. 1991. V. 3. P. 1.
6. Salashchenko N.N., Platonov Yu.Ya., Zuev S.Yu. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A. 1995. V. 359. P. 114.
7. Stutman D., Hwang Y.S., Menard J. et al. // APS Meeting, Monterey, 1996. P. 112.
8. Carraro L., Chkhalo N., Kruglyakov E. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1997. V. 68. P. 2279.
9. Carzotti L., Martini S. et al. // Proc. 23 EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, Kiev, Ukraina, 1996. Kiev: The European Physical Society, 1996. V. 2. P. 637.
10. Chkhalo N.I., Fedorchenko M.V., Kovalenko N.V. et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1995. V. 359. P. 121.
11. Горбовский А.И., Кругляков Э.П., Федорченко М.В., Чхало Н.И. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 1. С. 98.
12. Chkhalo N.I., Kruglyakov E.P., Semenov E.P. // Proc. 9 Meeting on High Temperature Plasma Diagnostics, S. Peterburg, Russia, 1997. J. Plasma Devices and Operation, 1998 (in press).
13. Chkhalo N.I., Evstigneev A.V., Holopov M.A. et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1995. V. 359. P. 440.
14. Анашин В.В., Валька И.Е., Гаврилов Н.Г. и др. // ПТЭ. 1995. Т. 4. С. 177.
15. Chkhalo N.I., Fedorchenko M.V., Kruglyakov E.P. et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1995. V. 359. P. 155.
16. Chernov V.A., Chkhalo N.I., Fedorchenko M.V. et al. // J. X-Ray Science and Technology. 1995. V. 5. P. 65.
17. Chernov V.A., Chkhalo N.O., Fedorchenko M.V. et al. // J. of X-Ray Science and Technology. 1995. V. 5. P. 389.

Multilayer X-ray Mirror Spectrometers for High Temperature Plasma Diagnostics

E. P. Kruhgliakov, A. D. Nikolayenko, E. P. Semyonov, E. D. Chkhalo, N. I. Chkhalo

Spectrometers based on multilayer X-ray mirrors produced at the Budker Institute of Nuclear Physics for experiments on thermonuclear facilities as RFX (Padova, Italy) and GAMMA-10 (Tsukuba, Japan) are described. Experimental data on spectral characteristics of multilayer X-ray mirrors are presented.