

УДК 621.373.8+535.853.3-32

ОБЗОРНЫЙ СПЕКТРОГРАФ НА ОБЛАСТЬ $\lambda > 40 \text{ \AA}$ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ "НА ПРОПУСКАНИЕ"

Н. Н. Колачевский, М. М. Митропольский, С. П. Польгуль, Ф. Бийкерк¹,
Е. Н. Рагозин

Создан светосильный спектрограф мягкого рентгеновского диапазона, предназначенный для регистрации обзорных квазистигматических спектров в области $\lambda > 40 \text{ \AA}$. Фокусировка излучения в спектрографе осуществляется при помощи тороидального зеркала скользящего падения; функция диспергирования возложена на дифракционную решетку "на пропускание" большой апертуры с плотностью штрихов $p = 990$ линий/мм. С помощью лазерно-плазменного источника мягкого рентгеновского излучения получен ряд обзорных линейчатых и квазинепрерывных спектров многозарядных ионов в диапазоне $40 - 350 \text{ \AA}$ при использовании мишеней CF_4 , Mg , сплава $Fe-Ni-Cr$, W . Продемонстрирована спектральная разрешающая способность $\mathcal{R} = \lambda/\delta\lambda$ не менее 500 на $\lambda \approx 145 \text{ \AA}$.

Появление элементов многослойной оптики нормального падения (многослойных зеркал, многослойных дифракционных решеток) привело к созданию нового класса светосильных приборов мягкого рентгеновского диапазона, позволяющих получать стигматические спектральные изображения источников мягкого рентгеновского излучения (МРИ) с разрешением вплоть до 24000 [1 - 4]. Ввиду селективности отражения от многослойных компонент приборы, создаваемые на их основе, имеют сравнительно небольшую спектральную полосу пропускания. Так, стигматический спектрограф сверхвысокого разрешения, оснащенный двумя фокусирующими многослойными зеркалами

¹ФОМ-институт по физике плазмы хийн аузен, Нидерланды.

($\lambda_0 \approx 180 \text{ \AA}$) и плоской дифракционной решеткой скользящего падения, имеет рабочий диапазон приблизительно $165 - 190 \text{ \AA}$ [4]. Наряду с этим часто представляет интерес получение (квази)стигматических спектров обзорного типа, с шириной в несколько октав по длинам волн, с умеренной дисперсией ($\sim 10 - 50 \text{ \AA/мм}$) и со средним спектральным разрешением ($50 < \lambda/\delta\lambda < 500$). Очевидными областями применения для них стали бы диагностика плазмы и сравнительное изучение излучательных характеристик различных источников, в том числе лазерно-плазменного источника излучения (ЛПИ). Обзорный неселективный спектрограф позволяет изучать характеристики ЛПИ в широком спектральном диапазоне, определять кратность ионизации ионов плазмы, коротковолновую границу ЛПИ и т.п. В задачах другого рода, когда требуется определить спектральную форму полосы пропускания какого-либо прибора (или оптического элемента) или чувствительности детектора, обзорный спектрограф эффективен в совокупности с широкополосным источником МРИ с известным, по возможности квазинепрерывным, спектром. При определении спектрального разрешения нетрадиционных диспергирующих элементов, наоборот, требуются источники линейчатого излучения. Таким универсальным лабораторным источником МРИ является ЛПИ, позволяющий получать как широкополосные непрерывные и квазинепрерывные спектры при использовании мишеней с большими Z , так и линейчатые спектры при использовании мишеней с невысокими Z . Сравнительно недавно возникла потребность исследовать отклик многослойной оптики в широком спектральном диапазоне, далеко вне резонансного пика отражения. Например, представляет интерес резонансное отражение не только в первом интерференционном порядке отражения, но и во втором и иногда даже в третьем порядке, проявляющееся у элементов многослойной оптики на основе пары $Mo-Si$ с периодом многослойной структуры $d > 80 \text{ \AA}$ [5]. Подчеркнем, что комбинация обзорного спектрографа и широкополосного ЛПИ весьма эффективна при исследовании плоских элементов многослойной оптики.

В большинстве используемых в настоящее время обзорных спектрографов на область $\lambda > 40 \text{ \AA}$ диспергирование МРИ осуществляется вогнутой отражательной дифракционной решеткой (ДР) скользящего падения. Благодаря достижениям современной микролитографии исследователям-спектроскопистам доступны ДР "на пропускание" с плотностью штрихов $500 - 5000 \text{ линий/мм}$, являющиеся исключительно удобным и продуктивным инструментом МР диапазона. Сочетание ДР "на пропускание" и неселективного тороидального зеркала скользящего падения позволяет получать обзорные спектры со средним разрешением в широком спектральном диапазоне, нижняя

граница которого определяется падением коэффициента отражения покрытия зеркала при данном угле скользящего падения. Такой относительно простой и светосильный спектрограф позволяет регистрировать спектры ЛПИ (в том числе с пространственным разрешением) за несколько лазерных вспышек с энергией $\sim 0,1$ Дж. Комбинацию вольтеровского микроскопа с ДР "на пропускание", реализованную в работе [6], в значительной мере можно рассматривать как предшественницу данной схемы. В [6], однако, упор делался на высокое пространственное разрешение (было продемонстрировано одномерное разрешение ~ 1 мкм), при том что коротковолновая граница регистрируемого спектра составляла всего около 4 Å. В нашей схеме сделан акцент на спектральное разрешение и светосилу: входной приемный угол составляет $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ ср, что примерно в 20 раз выше, чем в [6]. Тороидальное зеркало, разумеется, не дает увеличения, но зато во много раз дешевле.

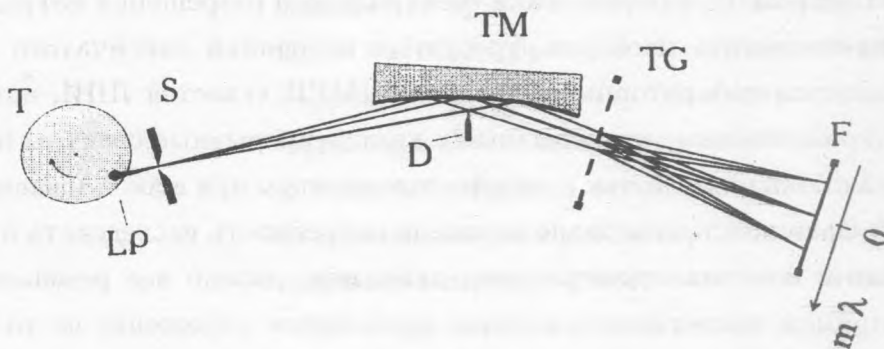


Рис. 1. Схема обзорного спектрографа МР диапазона. Т - вращающаяся мишень, LP - лазерно-плазменный источник, S - спектральная щель, TM - тороидальное зеркало, D - ограничивающая диафрагма, TG - дифракционная решетка "на пропускание", F - фотографическая пленка УФ-4.

Схема обзорного спектрографа МР диапазона представлена на рис. 1. Источником МРИ служит плазма, образующаяся при фокусировке на вращающуюся мишень импульса излучения второй гармоники ($\lambda_{II} = 0,54$ мкм) лазера на алюминате иттрия $Nd : YAlO_3$ (подробное описание лазерной установки представлено в [7]). Импульс второй гармоники ($E_{II} = 0,1$ Дж, $\tau_{II} = 5$ нс) фокусировался линзой ($f = 75$ мм) в пятно с эффективной площадью порядка $2 \cdot 10^{-5}$ см² и максимальной плотностью потока до

10^{12} Вт/см². При использовании плоских мишеней с $Z > 20$ количество квантов, испускаемых ЛПИ под углами $3 - 5^\circ$ к поверхности мишени в области $\lambda = 130 - 180 \text{ \AA}$ за одну лазерную вспышку составляет величину порядка 10^{11} фот/Å · ср. Для увеличения светимости плазмы в данном направлении использовались скошенные мишени с углом скоса $20 - 30^\circ$, при этом светимость ЛПИ увеличивалась в $5 - 7$ раз. В приборе реализован принцип разделения функций диспергирования и фокусировки: излучение источника проходит через спектральную щель и, отражаясь тороидальным зеркалом скользящего падения, диспергируется ДР "на пропускание". Для регистрации спектра использовалась пленка УФ-4. Тороидальное зеркало (главные радиусы $R = 5754 \text{ мм}$ и $\rho = 101,88 \text{ мм}$) с вольфрамовым покрытием устанавливалось под скользящим углом ϑ' , близким к углу ϑ , удовлетворяющему условию роуландовской стигматической установки $\sin^2 \vartheta = \rho/R$. При этом $\vartheta = 7,65^\circ$, а расстояние щель-зеркало $R \sin \vartheta = 766 \text{ мм}$. Апертура тороида была ограничена диафрагмой до оптимальной $W_T^{opt} \times H_T^{opt} = 60 \times 30 \text{ мм}^2$, что соответствует приемному углу схемы $0,01 \times 0,04 \text{ ср}$. В схему был внесен небольшой астигматизм; для малых отклонений $\vartheta - \vartheta'$ расстояние между горизонтальным (спектральным) и вертикальным фокусом равно $\Delta = 4R \cos \vartheta d\vartheta'$, высота астигматического отрезка при фокусировке в спектральный фокус равна $h = |\Delta \Omega|$, где Ω - вертикальный растрвор пучка, падающего на пленку. В нашем случае $h = 1,6 \text{ мм}$, $\Delta = 40 \text{ мм}$.

Описанная схема позволяет получать изображения спектральных линий шириной до 15 мкм , что обусловлено абберациями тороидального зеркала [8] и отклонениями поверхности зеркала от идеальной. Спектральная фокальная кривая прибора описывается в полярных координатах с центром на ДР уравнением $\rho_h^G = \rho_0 \cos^2 \varphi / \cos^2 \varphi_0$, где ρ_0 - расстояние решетка-пленка, φ_0 - угол падения на решетку, φ - угол дифракции. Даже при использовании плоской кассеты с пленкой размытие изображения, связанное с отклонением плоскости пленки от фокальной кривой ρ_h^G при малых углах дифракции ($\varphi < 0,04 \text{ рад}$, $m\lambda < 400 \text{ \AA}$) находится в пределах пяти микрон. В принципе, данная схема позволяет реализовать спектральное разрешение на уровне 1000 и выше в области $m\lambda > 250 \text{ \AA}$.

Рабочий спектральный диапазон прибора имеет коротковолновую границу, определяющуюся падением коэффициента отражения вольфрама при скользящем угле $\vartheta = 7,65^\circ$. Коэффициент отражения вольфрама при указанном ϑ , рассчитанный по данным [9], в интервале от 150 до 50 \AA убывает в три раза; в области $\lambda < 40 \text{ \AA}$ происходит быстрое падение коэффициента отражения. Очевидно, прибор пригоден для получения и анализа спектров с $\lambda > 40 \text{ \AA}$, тогда как пересчет интенсивностей из области $\lambda < 40 \text{ \AA}$

приведет к большим ошибкам. Для расширения спектрального диапазона прибора в коротковолновую область мы планируем использовать тороидальное зеркало с углом скольжения $\vartheta = 4^\circ$.

ДР "на пропускание" имеет густоту линий $p = 990 \pm 1$ линий/мм и отношение интенсивностей во втором и первом порядках дифракции $I_2/I_1 \approx 0,3$. Данная высокоапертурная решетка имеет трапециевидную форму (основания 24 мм и 16 мм; высота – 30 мм) и является чрезвычайно удобным инструментом для изучения спектральных характеристик оптики МР диапазона (см. [10]). Решетка имеет две регулярные поддерживающие структуры: квадратную сетку 1×1 мм и горизонтальную структуру с плотностью линий $p_1 \approx p/20$.

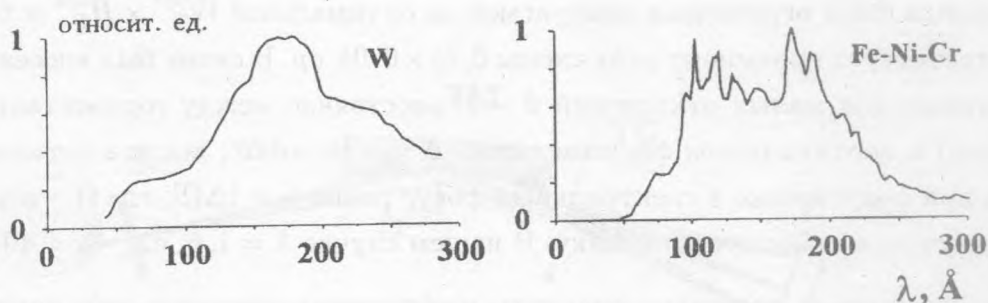


Рис. 2. Обзорные квазинепрерывные спектры ЛПИ. Использовались мишени из вольфрама и сплава *Fe-Ni-Cr* (70% *Fe*, 10% *Ni*, 18% *Cr*).

На рис. 2 представлены нормированные обзорные квазинепрерывные спектры, полученные при использовании мишеней *W* и сплава *Fe-Ni-Cr* (70% *Fe*, 10% *Ni*, 18% *Cr*), зарегистрированные со спектральным разрешением ~ 200 . В спектре вольфрама линейчатое излучение не наблюдается, что связано со специфическим строением уровней вольфрама; таким же свойством обладают некоторые лантаноиды [11]. В спектре *Fe-Ni-Cr* наблюдаются широкие группы линий на сильном непрерывном фоне. При определении формы резонансных кривых многослойной оптики могут быть использованы оба спектра [3, 9]. Также можно отметить, что непрерывное излучение данного ЛПИ простирается по крайней мере до 40 Å, что подтвердилось при исследовании многослойных зеркал с резонансной длиной волны $\lambda_0 \approx 45$ Å [12]. Спектры приведены без учета коэффициента отражения зеркала и спектральной чувствительности пленки;

второй порядок ДР исключен. Необходимо отметить, что максимум излучения приходится на диапазон $100 < \lambda < 250 \text{ \AA}$, спектр W имеет большую протяженность в длинноволновую область.

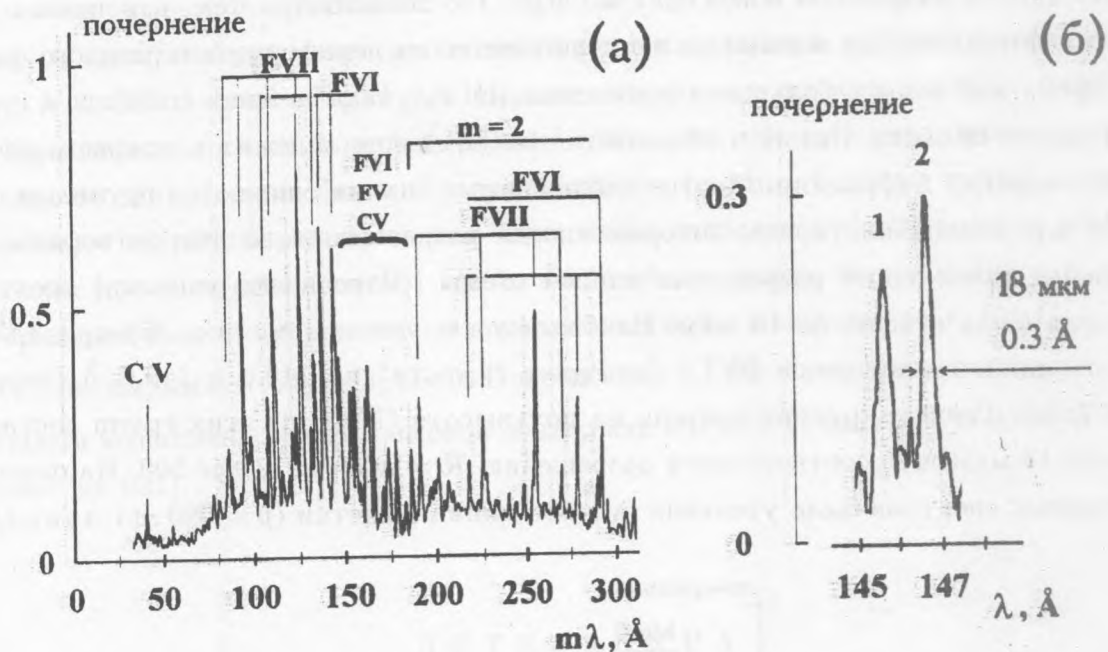


Рис. 3. (а) – обзорный спектр ЛПИ, полученный при использовании мишени CF_4 , ширина спектральной щели – 30 мкм. Наиболее сильные линии спектра принадлежат ионам FVI, FVII, в коротковолновой области наблюдается интенсивная линия иона CV (40,268 Å); наблюдается второй порядок дифракции на ДР. (б) – часть спектра того же ЛПИ, зарегистрированного с щелью 15 мкм. Наименьшая ширина на полувысоте (FWHM) наблюдалась у групп линий "1" (5 линий иона FVI с "центром тяжести" на 145,6 Å) и "2" (4 линии иона FVI с "центром тяжести" на 146,6 Å); демонстрируемое разрешение $R = \lambda/\delta\lambda \approx 500$.

Линейчатый спектр ЛПИ, получаемый при использовании мишени из CF_4 , показан на рис. 3а. Для регистрации спектра требовалось 30 лазерных вспышек, ширина спектральной щели – 30 мкм при обратной линейной дисперсии $d\lambda/dl = 16,9 \text{ \AA}/\text{мм}$. Основное излучение приходится на диапазон $90 < \lambda < 180 \text{ \AA}$ и принадлежит ионам CV ($E_i = 392 \text{ эВ}$), FV ($E_i = 114 \text{ эВ}$), FVI ($E_i = 157 \text{ эВ}$) и FVII ($E_i = 185 \text{ эВ}$). Наиболее коротковолновая линия в спектре – резонансная линия иона CV (40,268 Å). Можно сде-

лать заключение, что имеющийся лазерно-плазменный источник позволяет возбуждать ионы с потенциалами ионизации вплоть до 400 эВ. Наиболее интенсивно излучают *Li*- и *Be*-подобные ионы фтора, излучение иона FV значительно слабее, а излучение иона FIV проявляется в длинноволновой области ($\lambda \approx 200 \text{ \AA}$) и в десятки раз уступает по интенсивности излучению ионов FVI и FVII. Это объясняется тем, что ионы с более низкими потенциалами ионизации излучают лишь на периферии плазменного факела, в то время как ионы с большими потенциалами излучают в более плотной и горячей центральной области. Линии в области $m\lambda > 180 \text{ \AA}$ принадлежит в основном второму ($m = 2$) порядку дифракции. Многие наблюдаемые "линии" являются группами линий одного или нескольких ионов, которые иногда разрешаются во втором порядке. Для выявления предельного разрешения данной схемы (разрешения решетки) спектральная щель была сужена до 15 мкм. Наиболее узкие линии (см. рис. 3б) принадлежат двум группам линий ионов FVI с "центром тяжести" на 145,6 и 146,6 \AA (переходы $2p^2 - 2p3d$). Регистрируемая ширина на полувысоте (FWHM) этих групп составляет не более 18 мкм, что соответствует разрешению $\mathcal{R} = \lambda/\delta\lambda$ не менее 500. На основании полученных спектров была уточнена плотность линий решетки ($p = 990 \pm 1 \text{ линий/мм}$).

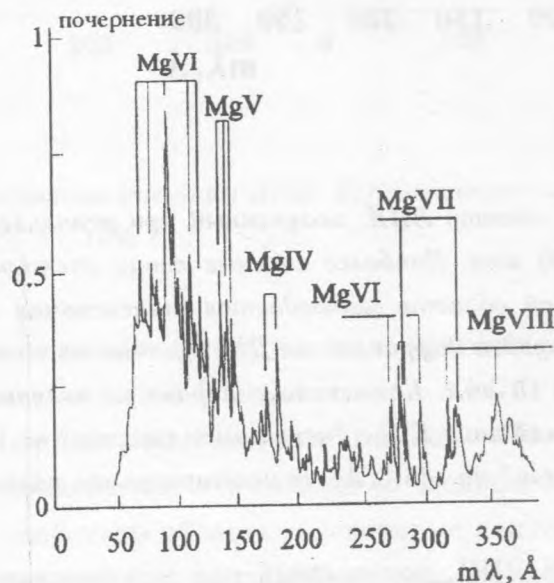


Рис. 4. Обзорный спектр магния. Наблюдается интенсивное излучение ионов MgIV – VIII.

На рис. 4 показан спектр магния, весьма часто используемого в качестве материала

лазерной мишени в спектроскопии для получения контрольных спектров. С увеличением атомного номера Z (ср. со спектром CF_4 на рис. 3а) спектр значительно усложнился, в нем практически отсутствуют одиночные линии; сильно увеличился непрерывный фон рекомбинационного и тормозного излучения. Спектр богаче линейчатым излучением ионов различной кратности – от $MgIV$ до $MgVIII$. В отличие от спектра рис. 3а в спектре присутствует интенсивное линейчатое излучение в длинноволновой области $250 < \lambda < 300 \text{ \AA}$ (ионы $MgVI - VIII$), принадлежащее первому порядку дифракции ДР. Идентификация линий в спектре осложнена тем, что при реализуемом разрешении многие линии сливаются в неразрешающиеся группы. С точки зрения измерения интенсивностей линий реализованная нами схема особенно эффективна для регистрации более простых спектров H -, He - и Li -подобных ионов, получающихся в данном спектральном диапазоне при использовании мишеней с малыми Z : Li, Be, C .

Авторы выражают благодарность Покровскому Ю. Ю. за оказание помощи в работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке ИНТАС (Грант по. 94-4341) и МНТЦ (Проект по. 021).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bixler J. V., Barbee T. W. Jr., and Dietrich D. D. Opt. Engng., **29**(7), 733 (1990).
- [2] Ragozin E. N., Kolachevsky N. N., Mitropolsky M. M. et al. Physica Scripta, **47**, 495 (1993).
- [3] Kowalski M. P., Seely J. F., Hunter W. R. et al. Appl. Opt., **32**, 2422 (1993).
- [4] Ragozin E. N., Kolachevsky N. N., Mitropolsky M. M. et al. Proc. SPIE, **2520**, 297 (1995).
- [5] Ragozin E. N., Kolachevsky N. N., Mitropolsky M. M. et al. Proc. SPIE, **2012**, 209 (1993).
- [6] Ceglie N. M., Hawryluk A. M., and Price R. H. Appl. Opt., **21**, 3953 (1982).
- [7] Кузин С. В., Житник И. А., Митропольский М. М. и др. Квантовая электроника, **19**, 89 (1993).
- [8] Haber H. J. Opt. Soc. Amer., **40**, no. 3, 153 (1950).

- [9] Henke V. L., Gullikson E. M., Davis J. C. LBL-33908, UC-411 (March 1993) (At. Data & Nucl. Data Tables **54**, no. 2 July 1993).
- [10] Колачевский Н. Н., Кондратенко В. В., Митропольский М. М. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 11-12, 70 (1994).
- [11] Costello J. T. et al. Proc. 22nd EGAS Conf., Physica Scripta, **34**, 77 (1991).
- [12] Akhsakalyan A. D., Kolachevsky N. N., Mitropolsky M. M. et al. Physica Scripta, **48**, 516 (1993).

Поступила в редакцию 8 февраля 1996 г.