

РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА

Изображающий дифракционный VLS-спектрометр для области длин волн $\lambda > 120 \text{ \AA}$

Е.А.Вишняков, А.О.Колесников, А.А.Кузин, Д.В.Негров, Е.Н.Рагозин, П.В.Сасоров, А.Н.Шатохин

Экспериментально реализован широкополосный стигматический (изображающий) спектрометр для мягкого рентгеновского диапазона спектра ($\lambda > 120 \text{ \AA}$). Оптическая схема спектрометра включает плоскую отражательную решетку скользящего падения с шагом, изменяющимся на апертуре по заданному закону (так называемую VLS-решетку), и широкополосное сферическое зеркало нормального падения на основе многослойной аperiodической структуры Mo/Si. Обратная линейная дисперсия составляет в среднем $\sim 5.5 \text{ \AA/мм}$. Излучение регистрировалось при помощи матричного ПЗС-детектора (2048×1024 ячейки размером по 13 мкм). В лазерной плазме зарегистрированы линейчатые спектры многозарядных ионов LiIII и FV–FVII с пространственным разрешением $\sim 26 \text{ мкм}$, экспериментально продемонстрирована спектральная разрешающая способность $R \approx 500$.

Ключевые слова: мягкий рентгеновский диапазон, стигматический (изображающий) спектрометр, VLS-решетка, аperiodическое многослойное зеркало, лазерная плазма.

1. Введение

Задача построения спектральных изображений и, как частный случай, получения линейчатых спектров с пространственным разрешением в мягком рентгеновском (МР) диапазоне возникает при исследовании лабораторной и астрофизической плазмы, а также при характеристике лабораторных источников МР излучения. В последние годы список традиционных объектов исследования (лазерная плазма, плазма быстрых электрических разрядов, быстрый разряд в капилляре и т.п.) пополнился рядом новых. Речь идет, в частности, о кластерной плазме [1], об источнике высоких гармоник в релятивистской лазерной плазме под действием мультитераваттного фемтосекундного лазера [2] и генерации МР излучения при отражении излучения титан-сапфирового лазера от релятивистской плазменной волны, возбуждаемой мультитераваттным лазером в импульсной струе гелия (релятивистское «летающее зеркало») [3], и о так называемом «теплом плотном веществе» (WDM), создаваемом импульсом рентгеновского лазера на свободных электронах (РЛСЭ) [4].

Е.А.Вишняков. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

А.О.Колесников, Е.Н.Рагозин, А.Н.Шатохин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: enragozin@gmail.com

А.А.Кузин. Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9; Институт спектроскопии РАН, Россия, 108840 Москва, Троицк, ул. Физическая, 5

Д.В.Негров. Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9

П.В.Сасоров. Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Россия, 125047 Москва, Миусская пл., 4

Требования к пространственному разрешению спектрометров часто бывают довольно высоки: в ряде экспериментов требуется разрешение на уровне ~ 10 и даже $\sim 1 \text{ мкм}$. Так, в работе [3] было установлено, что размер области «летающего зеркала», излучающей в спектральном диапазоне 12–20 нм, не превышает 16 мкм. В работе [2], где «гребёнка» гармоник простирается в область «водяного окна», методом частиц в ячейке (PIC) было теоретически показано, что в условиях релятивистской самофокусировки генерация гармоник происходит в объеме диаметром $\sim 10\lambda_0$ (λ_0 – длина волны возбуждающего лазера), причем внутри этого объема есть сингулярности (пички) электронной плотности, отвечающие за наиболее интенсивное излучение высоких гармоник. В работе [4] для создания WDM-плазмы импульсы излучения РЛСЭ ($\lambda = 13.5 \text{ нм}$, $\hbar\omega = 91.8 \text{ эВ}$) фокусировались на алюминиевую мишень в пятно диаметром 30 мкм, излучение WDM-плазмы регистрировалось при помощи спектрометра на основе свободновисящей пропускающей дифракционной решетки со спектральным разрешением 0.2 нм. Наконец, в работе [5] было экспериментально показано, что излучение РЛСЭ с энергией $\hbar\omega = 10.1 \text{ кэВ}$ (речь идет о РЛСЭ SACLA, Япония) может быть сфокусировано в пятно диаметром $\sim 1 \text{ мкм}$. Таким образом, объективно существует потребность в инструментах МР диапазона, обладающих высоким разрешением и предоставляющих одновременно спектральную и пространственную информацию об объекте.

Задачу получения спектров с однокоординатным пространственным разрешением и построения спектральных изображений решает изображающий (стигматический) дифракционный спектрометр. Существует несколько вариантов схем такого спектрометра. Во-первых, это комбинация фокусирующего многослойного зеркала (МЗ) нормального падения в сочетании со свободновисящей пропускающей дифракционной решеткой (см., напр., обзоры [6, 7]). К недостаткам этой схемы относится сравнительно невысокая предельная разрешающая способность ($\lambda/\delta\lambda \approx 200\text{--}300$), достижимая с такой решеткой.

Кроме того, спектральное изображение модифицируется поддерживающей структурой решетки, будь то регулярная или квазислучайная структура. В другом варианте схемы применяется сферическая многослойная дифракционная решетка, используемая при почти нормальном падении излучения и обладающая умеренным астигматизмом [8]. С ее помощью можно получить высокое спектральное разрешение, но нельзя – высокое пространственное. Исключение составляет установка сферической решетки в схеме Водсворта, обеспечивающая высокое угловое разрешение на фиксированной длине волны. Эта схема неоднократно использовалась в солнечной астрономии [9].

В настоящее время набирают популярность спектрометры МР диапазона, схемы которых основаны на отражательных дифракционных решетках с переменным по апертуре шагом штриха (VLS-решетки). Направляя гомоцентрический пучок на VLS-решетку под скользящим углом падения, можно получить стигматическое изображение на фиксированной длине волны [10]. Такая схема, в которой сходящийся гомоцентрический пучок создавался рентгеновским телескопом, образованным фигурами вращения, была использована для получения карты внегалактических источников излучения в далекой ВУФ области спектра [11]. Недавно [12] была теоретически показана возможность создания стигматических вариантов VLS-спектрометров на основе вогнутой VLS-решетки и скрещенного фокусирующего многослойного зеркала.

В работе [13] нами была предложена концепция широкополосного изображающего VLS-спектрометра, сочетающего преимущества широкополосного многослойного зеркала нормального падения и плоской VLS-решетки, а также удовлетворяющего условию стигматизма одновременно на двух длинах волн и условию практической стигматичности в широком спектральном интервале (не менее октавы по длинам волн). Настоящее сообщение посвящено реализации этой идеи.

2. Схема спектрометра

Пусть пространственная частота штрихов плоской VLS-решетки описывается полиномиальной зависимостью от координаты w (рис.1):

$$p(w) = p_0 + p_1 w + p_2 w^2 + p_3 w^3 + \dots, \quad (1)$$

причем $p(w) = dn/dw$, где n – номер штриха, а p_0 – частота штрихов в центре апертуры. Коэффициент p_1 , как известно, модифицирует кривую, описывающую положение параксиального горизонтального (спектрального) фокуса, а коэффициенты p_2 и p_3 влияют на aberrацию меридиональной комы и сферическую aberrацию соответственно [12]. Пусть на VLS-решетку падает слабоастигматический сходящийся пучок, L_h обозначает расстояние от центра решетки до его горизонтального фокуса, L_v – расстояние до его вертикального фокуса, φ – скользящий угол падения для центрального луча, а ψ – зависящий от длины волны скользящий угол дифракции. Тогда на длине волны λ направление дифракции центрального луча ψ , расстояния до параксиального горизонтального r'_h и вертикального r'_v фокусов описываются известными уравнениями:

$$\cos \varphi - \cos \psi = m \lambda p_0, \quad (2)$$

$$-\frac{\sin^2 \varphi}{L_h} + \frac{\sin^2 \psi}{r'_h} = m \lambda p_1, \quad (3)$$

$$r'_v = L_v, \quad (4)$$

где m – порядок дифракции. В принятых обозначениях все расстояния и углы считаются положительными. Условие для получения стигматизма ($r'_h = r'_v$) дает

$$\frac{L_h \sin^2 \psi}{\sin^2 \varphi + m p_1 \lambda L_h} = L_v. \quad (5)$$

Уравнение (5) совместно с (2) выражает условие стигматизма на длине волны λ . Находя p_1 из (5), получаем связь между p_0 и φ_0 , которая возникает, когда мы требуем устранения астигматизма на двух (λ_1 и λ_2) длинах волн:

$$p_1 = \frac{1}{m \lambda_1} \left[-\frac{\sin^2 \varphi}{L_h} + \frac{\sin^2 \psi_1}{L_v} \right] = \frac{1}{m \lambda_2} \left[-\frac{\sin^2 \varphi}{L_h} + \frac{\sin^2 \psi_2}{L_v} \right]. \quad (6)$$

Таким образом, астигматизм может быть устранен одновременно на двух длинах волн, если пожертвовать одним из свободных параметров – либо p_0 , либо φ_0 . Исходя из того, что p_0 принимает одно из привычных значений (например, 600 лин./мм), зададимся значением p_0 и определим значение

$$\varphi_0 = \arcsin(m p_0 \sqrt{\lambda_1 \lambda_2} / \sqrt{L_v / L_h - 1}). \quad (7)$$

Параметры p_i ($i = 2, 3, \dots$) плоской VLS-решетки можно получить из следующего выражения при разложении в ряд Тейлора:

$$m p(w) \lambda_{\text{opt}} = \cos \left[\arccot \left(\cot \varphi_0 - \frac{w}{L_h \sin \varphi_0} \right) \right] - \cos \left[\arccot \left(\cot \psi_{\text{opt}} - \frac{w}{L_v \sin \psi_{\text{opt}}} \right) \right]. \quad (8)$$

Здесь λ_{opt} – длина волны, на которой компенсируются aberrации, в нашем случае $\lambda_{\text{opt}} = \lambda_1$.

Оптическая схема широкополосного стигматического (изображающего) спектрометра представлена на рис.1. Показан ход лучей в главной плоскости, проходящей через центр решетки и перпендикулярной ее штрихам.

Источник (лазерная плазма) находится перед входной щелью. Пучок лучей, прошедший через входную щель, отражается от вогнутого сферического МЗ ($R = 1 \text{ м}$), покрытие которого представляет собой аперiodическую структуру с почти равномерным отражением в спектральном диапазоне 125–250 \AA [14]; угол падения центрального луча пучка составляет с нормалью около 8° . Пучок лучей, отраженный от МЗ, направляется на VLS-решетку, установленную под скользящим углом падения. Пространственная частота «штрихов» в центре решетки $p_0 = 600 \text{ лин./мм}$. Исходя из задаваемого зеркалом спектрального интервала, в расчетах были приняты $\lambda_1 = 144 \text{ \AA}$ и $\lambda_2 = 270 \text{ \AA}$, что минимизировало геометрическую расфокусировку в указанном диапазоне; при этом $\varphi_0 = 6.44^\circ$ и $p_1 = 2.37 \text{ мм}^{-2}$.

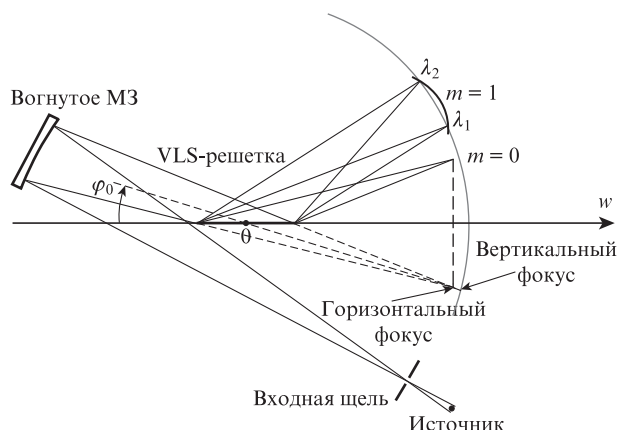


Рис.1. Оптическая схема изображающего спектрометра.

Дуга на рис.1 принадлежит окружности радиуса L_v , проведенной вокруг центра решетки, где L_v – расстояние от центра решетки до вертикального фокуса изображения источника, создаваемого зеркалом. Расстояние от центра решетки до создаваемого зеркалом горизонтального фокуса изображения входной щели равно L_h . В первом порядке дифракции ($m = 1$) кривая горизонтального фокуса пересекает дугу окружности вертикального фокуса в двух точках ($\lambda_1 = 144 \text{ \AA}$, $\lambda_2 = 270 \text{ \AA}$). Таким образом, на участке дуги окружности формируется спектр источника с пространственным разрешением в направлении, параллельном входной щели. Обратная линейная дисперсия спектрометра составляет 5.4 \AA/мм в коротковолновой и 5.8 \AA/мм в длинноволновой части спектра. Излучение регистрировалось при помощи матричного ПЗС-детектора с обратной засветкой (2048×1024 ячейки размером по 13 мкм , длина чувствительной области 27 мм).

VLS-решетка была изготовлена с помощью электронно-лучевой литографии с последующим плазмохимическим травлением. На стеклянную подложку была нанесена пленка вольфрама толщиной 100 нм . Затем центрифугированием на скорости 5000 об./мин был нанесен электронный резист PMMA A4 (Microchem). Резист облучался пучком электронов со следующими параметрами: энергия пучка 50 кэВ , ток 15.5 нА , поле $600 \times 600 \text{ мкм}$, время экспозиции 0.14 мс . Резист проявлялся в растворе метил-изобутилкетона в изопропиловом спирте (MIBK:IPA = 1:3) в течение 120 секунд, а затем помещался в изопропиловый спирт на 60 секунд. В итоге решетка была сформирована в процессе плазмохимического травления SF_6 через маску резиста. Резист после травления был удален в кислородной плазме.

На рис.2 представлена фотография спектрометра, элементы которого размещены на дюралевой плите разме-

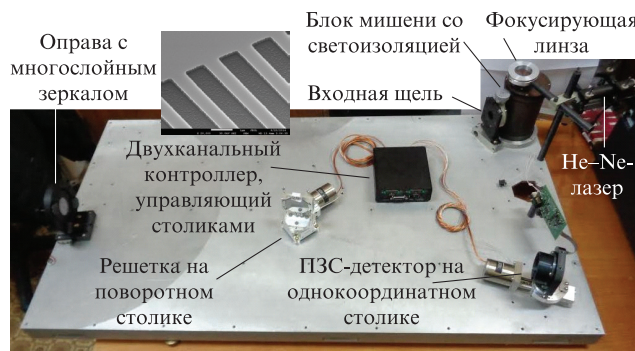
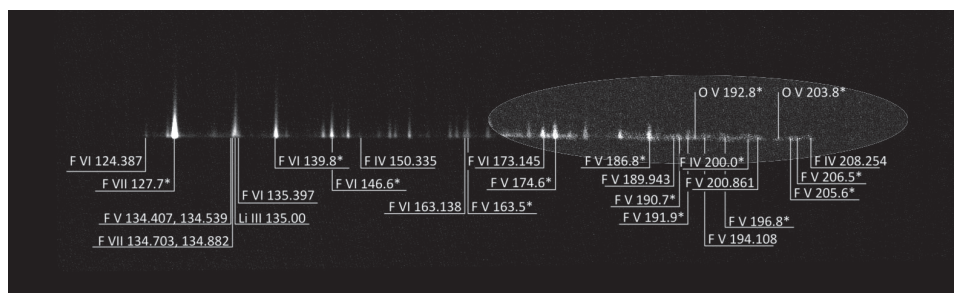


Рис.2. Элементы изображающего спектрометра, размещенные на дюралевой плите. На вставке показан участок вольфрамовой решетки.

ром $1100 \times 600 \text{ мм}$. Коэффициент p_1 , характеризующий градиент частоты штрихов по апертуре, составлял $2.32 \text{ лин.} \cdot \text{мм}^{-2}$, что было достаточно близко к расчетному ($2.37 \text{ лин.} \cdot \text{мм}^{-2}$), чтобы небольшой коррекцией углов и расстояний можно было съюстировать прибор. С этой целью оправа с VLS-решеткой крепилась на моторизованный столик вращения, а ПЗС-детектор был закреплен на моторизованном столике поступательного перемещения. Спектрограф помещался в вакуумную камеру размером $3.8 \times 0.9 \text{ м}$, откачиваемую до давления $5 \times 10^{-5} \text{ Тор}$. Моторизованные столики управлялись с компьютера, на экран которого выводилось также регистрируемое спектральное изображение.

Лазерная плазма создавалась при фокусировке импульса излучения неодимового лазера (энергия на мишени 0.5 Дж , длительность 10 нс) на плоскую вращающуюся мишень, поверхность которой лежала в главной плоскости спектрометра. Оптическая схема была рассчитана таким образом, что плоскость детектора совпадала с горизонтальным (спектральным) фокусом изображения входной щели и с вертикальным фокусом изображения лазерной плазмы. Благодаря этому прибор обладал как спектральным, так и пространственным разрешением, давая зависимость интенсивности спектральных линий от расстояния до мишени (до границы света и тени).

Благодаря стигматичности прибор продемонстрировал высокую световую эффективность: спектр в диапазоне $120\text{--}210 \text{ \AA}$ регистрировался за одну лазерную вспышку (рис.3). Участок спектра на рис.3 содержит линии ионов LiIII и FV – FVII. В спектре мишени LiF наиболее сильная линия (ион FVII, $3d \rightarrow 2p$, дублет 127.65 и 127.80 \AA) насыщает те ячейки детектора, на которые приходится излучение приповерхностной (наиболее яркой) плазмы. Второго порядка спектра гораздо слабее первого, что и следовало ожидать при скважности ламинарной решетки около 0.5 .

Рис.3. Первый порядок стигматического спектра многозарядных ионов лития и фтора, зарегистрированный за одну лазерную вспышку (0.5 Дж , 10 нс). Звездочки обозначают неразрешенные группы линий.

С увеличением длины волны интенсивность спектральных линий и чувствительность ПЗС-детектора убывают.

Ширина входной щели составляла 30 мкм. При этом полуширины линий (FWHM) приходится на четыре ячейки детектора (52 мкм). С учетом обратной линейной дисперсии (5.4 $\text{\AA}/\text{мм}$ в коротковолновой и 5.8 $\text{\AA}/\text{мм}$ в длинноволновой части спектра) это соответствует разрешающей способности ~ 450 и ~ 600 . Ближайшие линии, уверенно разрешаемые в первом порядке дифракции, – это линия 163.138 \AA иона FVI и неразрешенная группа линий {163.456, .501, .558, .596 \AA } иона FV, что дает $\lambda/\delta\lambda \approx 510$. Таким образом, продемонстрирована спектральная разрешающая способность ~ 500 (консервативная оценка). Вторым порядком дублета линии 3d \rightarrow 2p (127.65 и 127.80 \AA) иона FVII уверенно разрешается во втором порядке, указывая на разрешающую способность ~ 900 . Пространственное разрешение (по вертикали), оцененное на границе света и тени, отвечает двум ячейкам детектора, что составляет 26 мкм.

3. Заключение

Впервые экспериментально реализован широкополосный стигматический спектрометр для области длин волн 120–250 \AA , включающий аperiodическое многослойное зеркало нормального падения и плоскую VLS-решетку скользящего падения, изготовленную методом электронно-лучевой литографии. В качестве детектора использован матричный ПЗС-детектор с ячейками размером 13 мкм и протяженностью чувствительной области 27 мм. Продemonстрирована эффективность спектрометра при регистрации спектров лазерной плазмы: спектр ми-

шени LiF регистрировался за одну лазерную вспышку (0.5 Дж, 10 нс). Пространственное разрешение составило 26 мкм, спектральная разрешающая способность около 500. Дальнейшее улучшение параметров прибора возможно при совершенствовании технологии изготовления VLS-решеток.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-12-00506).

1. Фаенов А.Я., Окс Е., Далимиер Э. и др. *Квантовая электроника*, **46** (4), 338 (2016).
2. Pirozhkov A.S., Kando M., Esirkepov T.Zh., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 135004 (2012).
3. Kando M., Pirozhkov A.S., Kawase K., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 235003 (2009).
4. Zastra U., Fortmann C., Fäustlin R.R., et al. *Phys. Rev. E*, **78**, 066406 (2008).
5. Pikuz T., Faenov A., Matsuoka T., et al. *Conf. Program and Book of Abst. 15th Int. Conf. on X-Ray Lasers 2016 (ICXRL2016)* (Nara, Japan, 22–27 May 2016, p. 75).
6. Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *УФН*, **185** (11), 1203 (2015).
7. Вишняков Е.А., Каменец Ф.Ф., Кондратенко В.В. и др. *Квантовая электроника*, **42** (2), 143 (2012).
8. Kowalski M.P., Seely J.F., Cruddace R.G., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1945**, 164 (1993).
9. Tousey R., Bartoe J.-D.F., Brueckner G.E., Purcell J.D. *Appl. Opt.*, **16** (4), 870 (1977).
10. Hettrick M.C., Bowyer S. *Appl. Opt.*, **22** (24), 3921 (1983).
11. Hettrick M.C., Bowyer S., Malina R.F., et al. *Appl. Opt.*, **24** (12), 1737 (1985).
12. Вишняков Е.А., Колесников А.О., Рагозин Е.Н., Шатохин А.Н. *Квантовая электроника*, **46** (10), 953 (2016).
13. Вишняков Е.А., Рагозин Е.Н., Шатохин А.Н. *Квантовая электроника*, **45** (4), 371 (2015).
14. Вишняков Е.А., Медников К.Н., Перцов А.А. и др. *Квантовая электроника*, **39** (5), 474 (2009).