

## РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР

# Сканирующий спектрометр/монокроматор на область длин волн 50–330 Å

А.Н.Шатохин, Е.А.Вишняков, А.О.Колесников, Е.Н.Рагозин

*Рассчитан и реализован сканирующий спектрометр/монокроматор с плоским полем по схеме Хеттрика–Андервуда на область длин волн  $\lambda \approx 50\text{--}330$  Å. Оптическая схема спектрометра включает в себя фокусирующее сферическое ( $R = 6000$  мм) зеркало, установленное под углом скольжения  $8.34^\circ$ , и плоскую VLS-решетку (Varied Line-Space Grating) скользящего падения, работающую с постоянным углом отклонения  $16.68^\circ$ . Входная и выходная щели прибора неподвижны, фокусное расстояние в рабочем спектральном диапазоне изменяется незначительно. Коротковолновая граница рабочего диапазона определяется спектральной яркостью источника и коэффициентами отражения решетки и зеркала, но не расфокусировкой. Зарегистрированы спектры лазерной плазмы, возбуждаемой сфокусированным пучком лазера (0.5 Дж, 8 нс, 1.06 мкм). Продемонстрирована спектральная разрешающая способность  $\lambda/\delta\lambda = 1300$  на длине волны 182 Å. Схема прибора данного типа подходит для рефлектометрии и метрологии в мягком рентгеновском диапазоне спектра с использованием лазерно-плазменного и синхротронного источников излучения, а также идеально совместима с современными ПЗС-детекторами.*

**Ключевые слова:** мягкое рентгеновское излучение, сканирующий спектрометр, фокусирующее зеркало, VLS-решетка, лазерная плазма.

## 1. Введение

Излучение с длинами волн, лежащими в вакуумной ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областях спектра, широко используется при изучении лабораторной и астрофизической плазмы [1–6], при исследовании новых структур, соединений и композитов методами ARPES [7] и спектроскопии поглощения (NEXAFS, EXAFS, XANES) [8], при спектроскопии молекул, материалов и биологических объектов методом резонансного неупругого рентгеновского рассеяния (RIXS) [9, 10] и т. п. Источники такого излучения могут быть как традиционные (астрофизическая и лабораторная плазма, в том числе лазерная микроплазма), так и новейшие современные, в которых мягкое рентгеновское излучение возникает в существенно более сложных условиях – например, в лазере на свободных электронах [11] или при отражении ИК фемтосекундного импульса от релятивистского «летающего зеркала», возбуждаемого импульсом мультитераваттного лазера в струе гелия [12]. В последнем случае возникновение мягкого рентгеновского излучения обусловлено повышением частоты при двойном релятивистском доплер-эффекте.

Развитие спектроскопии мягкого рентгеновского диапазона, наблюдаемое в последние годы, во многом определяется интенсивной разработкой новых компонентов рентгеновской оптики. В частности, за несколько последних десятилетий были созданы периодические и аперии-

дические многослойные зеркала (см., например, обзоры [13, 14]), свободновисящие многослойные поляризаторы, абсорбционные фильтры, фазосдвигающие элементы и др. Как чисто научные исследовательские задачи, так и физико-технические задачи по характеристике (метрологии) рентгенооптических элементов и калибровке детекторов требуют создания удобных спектрометров/монокроматоров, специально ориентированных для решения подобных задач и учитывающих специфику источника излучения (положение источника и расстояние источник–спектрометр, расходимость излучения, воспроизводимость в пространстве, интенсивность). В задачах рефлектометрии/метрологии используется, как правило, излучение лазерной плазмы (ЛП) [15] и синхротронное излучение (СИ) [16]. Как известно из литературы, источник ЛП способен обеспечить абсолютную погрешность измерений коэффициента отражения/пропускания на уровне  $\sim 1\%$ , тогда как источник СИ – на уровне  $\sim 0.1\%$ , что связано с высокой стабильностью СИ.

Хеттрик и Андервуд [17] предложили удобную схему сканирующего монокроматора высокого разрешения, в котором входная и выходная щели неподвижны, угол отклонения постоянен, а сканирование осуществляется поворотом плоской VLS-решетки (Varied Line-Space Grating). Решетка установлена в сходящемся пучке, созданном фокусирующим зеркалом скользящего падения. При этом спектральное меридиональное изображение входной щели находится строго на выходной щели для двух длин волн (при двух углах поворота VLS-решетки), а отступление спектрального фокуса от неподвижной щели и расфокусировка незначительны в широком диапазоне длин волн. Таким образом, монокроматор Хеттрика–Андервуда идеально подходит для решения метрологических задач в широком диапазоне длин волн.

Цель настоящей работы – разработка компактного лабораторного спектрометра высокого разрешения и испытание его при регистрации линейчатых спектров, воз-

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

Поступила в редакцию 19 марта 2019 г., после доработки – 15 мая 2019 г.

буждаемых в ЛП. В спектрометре использовалась плоская VLS-решетка, которая изначально была рассчитана для схемы изображающего спектрографа с участием аperiodического многослойного зеркала нормального падения для компенсации aberrаций в широком спектральном диапазоне [18, 19]. Реализация такого изображающего спектрографа позволила обеспечить спектральную разрешающую способность ~ 1000 в диапазоне 125–250 Å при одновременном пространственном разрешении 26 мкм [20–22].

## 2. Оптическая схема сканирующего спектрометра/монохроматора

На рис.1 представлена оптическая схема спектрометра. Фокусирующее зеркало создает горизонтальное фокальное изображение входной щели позади VLS-решетки на расстоянии  $r$  от ее центра. При работе прибора в режиме монохроматора на место детектора устанавливается выходная щель. Под углом отклонения понимается сумма скольльзящих углов падения и дифракции:  $\varphi + \psi$  (см. рис.1). Используется внешний порядок дифракции. Частота штрихов на апертуре решетки описывается полиномом  $p(w) = p_0 + p_1w + p_2w^2 + \dots$ , где  $p_0$  – частота линий решетки в ее центре, коэффициент  $p_1$  модифицирует спектральную фокальную кривую, а коэффициенты  $p_2$  и  $p_3$  подавляют меридиональную кому и сферическую aberrацию соответственно.

Направление дифракции центрального луча задается уравнением решетки

$$\cos \varphi - \cos \psi = m p_0 \lambda, \tag{1}$$

а уравнение, в паракиальном приближении описывающее расстояние решетка – горизонтальное фокусное расстояние дифрагированного пучка, имеет вид [23, 24]

$$-\frac{\sin^2 \varphi}{r} + \frac{\sin^2 \psi}{r'_h} = m \lambda p_1. \tag{2}$$

Условие постоянства фокусного расстояния дифрагированного пучка  $r'_h$  можно строго выполнить для двух длин волн ( $\lambda_1, \lambda_2$ ) при повороте VLS-решетки и неизменном расстоянии  $r$  до фокуса исходного пучка. Коэффициент  $p_1$ , характеризующий решетку, неизменен:

$$p_1 = \left[ -\frac{\sin^2 \varphi_1}{r} + \frac{\sin^2 \psi_1}{r'_h} \right] \frac{1}{m \lambda_1} = \left[ -\frac{\sin^2 \varphi_2}{r} + \frac{\sin^2 \psi_2}{r'_h} \right] \frac{1}{m \lambda_2}, \tag{3}$$

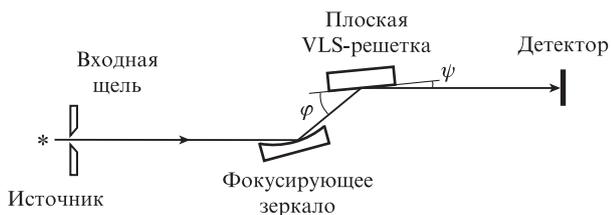


Рис.1. Схема спектрометра. Щель находится на круге Роуланда, связанном с зеркалом.

следовательно,

$$\frac{r'_h}{r} = \frac{\lambda_2 \sin^2 \psi_1 - \lambda_1 \sin^2 \varphi_2}{\lambda_2 \sin^2 \varphi_1 - \lambda_1 \sin^2 \varphi_2}. \tag{4}$$

Учитывая, что  $m \lambda_{1,2} = (\cos \varphi_{1,2} - \cos \psi_{1,2}) / p_0$ , получаем

$$\frac{r'_h}{r} = \frac{(\cos \varphi_2 - \cos \psi_2) \sin^2 \psi_1 - (\cos \varphi_1 - \cos \psi_1) \sin^2 \varphi_2}{(\cos \varphi_2 - \cos \psi_2) \sin^2 \varphi_1 - (\cos \varphi_1 - \cos \psi_1) \sin^2 \varphi_2}. \tag{5}$$

Из выражения (5) видно, что можно зафиксировать некоторые углы падения  $\varphi_{1,2}$  и угол отклонения  $\varphi + \psi$  (или, что то же самое, длины волн  $\lambda_{1,2}$  и  $p_0$ ), а также абсолютные размеры прибора; коэффициент  $p_1$  будет выражаться через них при помощи уравнения (3).

Ниже представлены параметры VLS-спектрометра, реализованного в настоящей работе. В качестве  $\lambda_{1,2}$  были выбраны длины волн 140 и 273 Å. Выбор внешнего порядка дифракции обусловлен двумя обстоятельствами. Во-первых, в схеме с постоянным углом отклонения переход к более коротким длинам волн происходит при уменьшении скольльзящего угла падения на решетку  $\varphi$ , что позволяет поддерживать коэффициент отражения на достаточно высоком уровне. Во-вторых, внешнему порядку дифракции отвечает более сильная дисперсия, что позволяет реализовать более высокую практическую разрешающую способность, учитывая конечный размер ячейки ПЗС-детектора (13.5 мкм).

Радиус кривизны сферического зеркала (мм) . . . . .	6000
Диаметр сферического зеркала (мм) . . . . .	.60
Скольльзящий угол падения на зеркало, равный половине угла отклонения решеткой (град) . . . . .	.8.34
Расстояние между центрами зеркала и решетки (мм) . . . . .	336.7
Расстояние входная щель – зеркало (мм) . . . . .	870.4
Размер «заштрихованной» области решетки (мм) . . . . .	50 × 25
Длина волны строгой фокусировки $\lambda_1$ (Å) . . . . .	140
Угол падения на решетку $\varphi_1$ , соответствующий $\lambda_1$ (град) . . . . .	.10
Угол дифракции $\psi_1$ , соответствующий $\lambda_1$ (град) . . . . .	.6.68
Длина волны строгой фокусировки $\lambda_2$ (Å) . . . . .	.273
Угол падения на решетку $\varphi_2$ , соответствующий $\lambda_2$ (град) . . . . .	11.58
Угол дифракции $\psi_2$ , соответствующий $\lambda_2$ (град) . . . . .	.5.10
Расстояние решетка – детектор (мм) . . . . .	532.6
Расстояние решетка – фокальная точка сходящегося пучка от зеркала (мм) . . . . .	533.7
Частота штрихов в центре апертуры VLS-решетки $p_0$ (мм <sup>-1</sup> ) . . . . .	.600
Коэффициент $p_1$ (мм <sup>-2</sup> ) . . . . .	.2.22
Коэффициент $p_2$ (мм <sup>-3</sup> ) . . . . .	.6 × 10 <sup>-3</sup>
Обратная линейная дисперсия на длине волн $\lambda_1$ (Å/мм) . . . . .	.3.64
Обратная линейная дисперсия на длине волн $\lambda_2$ (Å/мм) . . . . .	.2.78
Разрешающая способность на длине волн $\lambda_1$ , соответствующая размеру одной ячейки ПЗС-детектора (13.5 мкм) . . . . .	3000

На рис.2 приведено положение фокальной кривой (пунктирная линия) при различных углах поворота решетки, отвечающих длинам волн 100, 140, 180, 220, 260 и 273 Å в

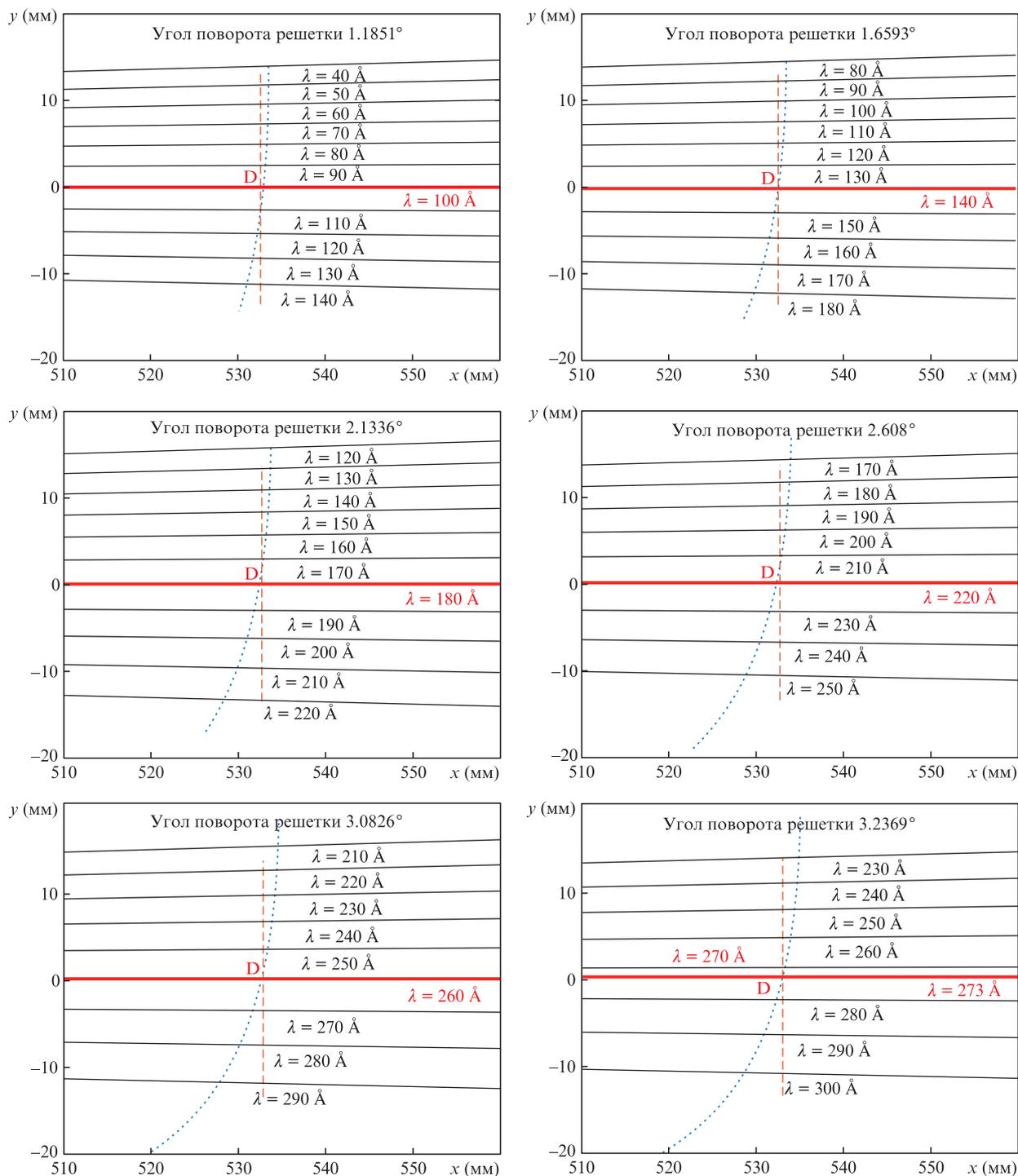


Рис.2. Ход лучей и фокальной кривой (пунктирная линия) при различных углах поворота решетки. По оси  $x$  указано расстояние от центра VLS-решетки, по оси  $y$  – расстояние в перпендикулярном направлении (вдоль направления дисперсии) от центрального луча.

направлении центра детектора (или выходной щели), показанном горизонтальной толстой линией (совпадает с центральным лучом дифрагированного пучка). Тонкие линии показывают ход лучей, соответствующих другим длинам волн при данном угле поворота решетки. Угол поворота решетки, отсчитывается от положения, при котором  $\varphi = \psi$  и в точку D попадает нулевой порядок дифракции. Плоскость детектора с центром в точке D дана вертикальной штриховой линией длиной 27 мм. Фокальная кривая строго совпадает с точкой D при длинах волн  $\lambda_1 = 140 \text{ \AA}$  и  $\lambda_2 = 273 \text{ \AA}$ . В режиме монохроматора (выходная щель находится в точке D) расстояние фокальное

изображение – щель не превышает 0.6 мм, что приводит к расфокусировке изображения менее 6 мкм (вдвое меньше размера ячейки детектора) в диапазоне 100–300 Å. При расчете положения парааксиального фокуса на рис.2 использовались формулы (2) и (1), причем угол  $\varphi$  равен сумме угла  $8.34^\circ$  и угла поворота решетки. В качестве мнимого источника в формуле (2) служило изображение входной щели, построенное зеркалом.

При фиксированных углах поворота VLS-решетки спектральная фокальная кривая имеет малую кривизну и может аппроксимироваться отрезком прямой в довольно широком спектральном интервале, поэтому схема может

рассматриваться как сканирующий спектрометр с плоским полем. Кроме того, в этом случае угол между центральным дифрагирующим лучом и фокальной кривой близок к  $90^\circ$ , что делает схему идеально совместимой с современными ПЗС-детекторами.

В режиме спектрометра при всех углах поворота решетки фокусировка сохраняется в интервале несколько десятков ангстрем, если плоскость чувствительной поверхности детектора перпендикулярна центральному лучу дифрагированного пучка. Поскольку фокальная кривая почти перпендикулярна центральному лучу, то в режиме спектрометра целесообразно повернуть детектор на небольшой («хорошей») фокусировки (при фиксированном угле поворота VLS-решетки) приблизительно до  $100 \text{ \AA}$ .

Режим сканирующего спектрометра удобен для регистрации относительно узкого выбранного участка спектра с высоким разрешением. Примером может служить группа бальмеровских линий иона  $\text{C VI } 4 \rightarrow 2$  ( $135 \text{ \AA}$ ),  $5 \rightarrow 2$  ( $120.5 \text{ \AA}$ ) и  $6 \rightarrow 2$  ( $114 \text{ \AA}$ ), пригодная для измерения электронной плотности плазмы по шарковскому уширению линий. В этом случае режим сканирующего спектрометра имеет неоспоримое преимущество по сравнению с режимом монохроматора, особенно при работе с импульсными источниками с невысокой воспроизводимостью спектров. Таким образом, сильной стороной сканирующего спектрометра является возможность подробного (с большой дисперсией) просмотра участка спектра, выбранного из спектрального рабочего диапазона шириной около двух октав.

На рис.3 показана ширина изображения точечного источника, обусловленная геометрической расфокусировкой при сканировании по длинам волн. Под геометрической расфокусировкой понимается уширение спектрального изображения, вызванное уходом фокальной кривой от положения детектора и равное произведению расстояния фокус–детектор и угла схождения дифрагированного пучка. Как показывают спектральные изображения точечного монохроматического источника, полученные методом численной трассировки лучей, геометрическая расфокусировка дает главный вклад в уширение спектрального изображения. В точках точной фокусировки ( $\lambda_1 = 140 \text{ \AA}$  и  $\lambda_2 = 273 \text{ \AA}$ ) остаточная ширина изображения определяется меридиональной комой и сферической aberrацией, а также дифракционной расходимостью пучка и не превышает размера ячейки детектора. Видно, что ширина изображения точечного источника не превышает размера ячейки детектора в диапазоне длин волн  $\lambda < 330 \text{ \AA}$ . Это

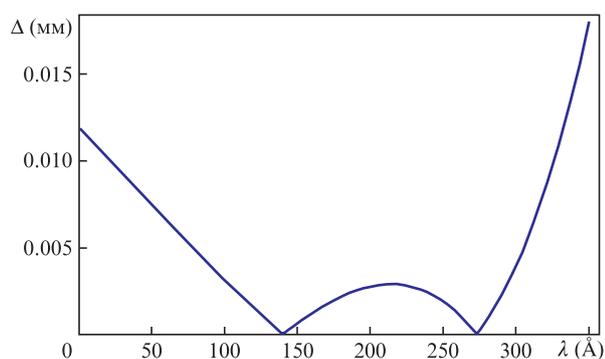


Рис.3. Ширина изображения точечного источника  $\Delta$ , обусловленная геометрической расфокусировкой при сканировании по длинам волн источника (детектор неподвижен).

означает, что на практике коротковолновая граница спектрального рабочего диапазона ограничена лишь коэффициентами отражения зеркала и VLS-решетки, а также яркостью источника. Максимальный приемный угол определяется шириной решетки и зависит от длины волны.

Качество фокусировки проверялось методом численной трассировки лучей путем построения спектральных изображений точечного источника на различных длинах волн. Правильность аналитических расчетов при этом была подтверждена.

### 3. Работа спектрометра

VLS-решетка изготавливалась методом интерференционной литографии в НПО ГИПО (Казань). На сферическое зеркало и VLS-решетку были нанесены золотые отражающие покрытия. Излучение регистрировалось матричным ПЗС-детектором ( $2048 \times 512$  ячеек) Greateyes (Германия). Элементы спектрометра были смонтированы и съюстированы на двухметровой оптической скамье, после чего спектрометр помещался в вакуумную камеру ( $3.8 \times 0.9 \text{ м}$ ). Решетка находилась на моторизованном поворотном столике, а детектор – на моторизованном линейном трансляторе, что позволило провести окончательную юстировку схемы при регистрации линейчатых спектров ЛП без развакуумирования. Спектрометр прошел испытания при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов, возбуждаемых импульсами неодимового лазера ( $0.5 \text{ Дж}$ ,  $8 \text{ нс}$ ,  $1.06 \text{ мкм}$ ).

На рис.4 представлена обзорная спектрограмма магниево-ионной плазмы, полученная «сшивкой» десятка спектрограмм, зарегистрированных при различных углах поворота VLS-решетки. Обзорный спектр приведен исключительно в качестве примера, демонстрирующего высокую спектральную разрешающую силу прибора в широком спектральном диапазоне. Угловое увеличение в схеме зависит от угла поворота решетки и изменяется от 1.5 (при  $\lambda = 140 \text{ \AA}$ ) до 2.3 (при  $\lambda = 273 \text{ \AA}$ ). Из-за этого изображение входной щели проецируется на этих длинах волн в отрезки, ширина которых в 1.5 и 2.3 раза больше ее исходной ширины. Разрешающая способность не снижается, если изображение щели проецируется на одну ячейку детектора ( $13.5 \text{ мкм}$ ), т.е. его ширина на указанных длинах волн должна составлять около 9 и 6 мкм соответственно. В этом случае спектральная разрешающая способность определяется пространственным разрешением детектора и составляет несколько тысяч.

На рис.5 показан участок спектра плазмы, полученный при облучении мишени LiF, а на рис.6 – контур линии  $\text{H}_\alpha$  иона  $\text{C VI}$ , демонстрирующий тонкую структуру линии, при этом разрешающая способность составляет 1300. Для уменьшения доплеровского уширения и наблюдения тонкой структуры источник ЛП сдвигался с оси спектрометра, так что в приемный угол спектрометра

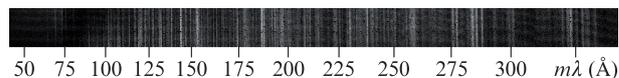


Рис.4. Обзорная спектрограмма магниево-ионной плазмы. Изображение входной щели ( $30 \text{ мкм}$ ) проецировалось на детекторе в отрезки шириной 45 и  $70 \text{ мкм}$  в коротковолновой ( $\lambda_1 = 140 \text{ \AA}$ ) и длинноволновой ( $\lambda_2 = 273 \text{ \AA}$ ) частях спектра соответственно, что в три-пять раз превышало оптимальный размер. Ширины линий и разрешаемые пары линий свидетельствуют о разрешающей способности прибора  $\sim 1000$ .

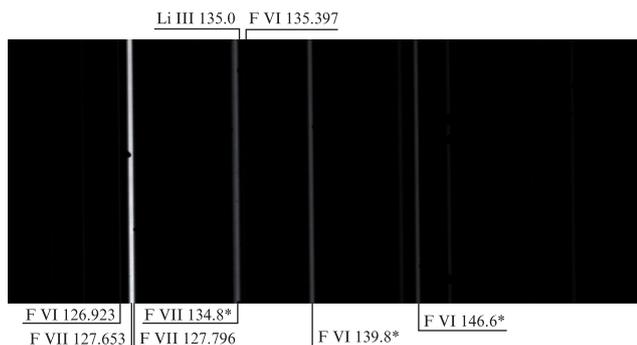


Рис.5. Участок спектра плазмы, полученный при облучении мишени LiF. Астериском (\*) обозначены неразрешенные группы линий.

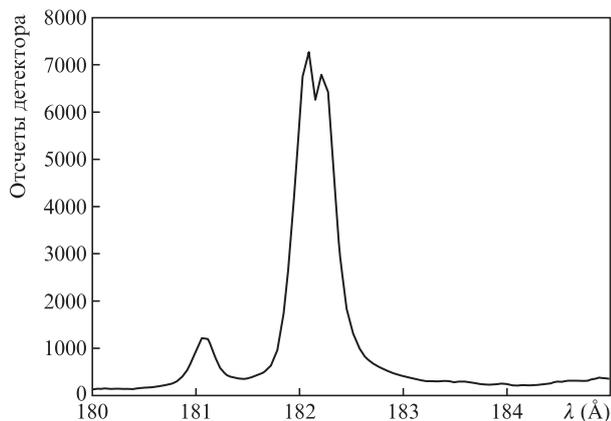


Рис.6. Контур бальмеровской линии  $H_{\alpha}$  иона C VI. Разрешенная тонкая структура линии (0.14 Å) свидетельствует о разрешающей способности 1300 в данной области спектра. Ширина входной щели равна 10 мкм. В районе 181 Å находится неразрешенная группа линий ионов кислорода.

входил только край конуса разлета ионов, для которого величина доплеровского уширения в направлении оси меньше, чем для центральной области плазмы.

#### 4. Заключение

Рассчитан и реализован сканирующий VLS-спектрометр/монокроматор по схеме Хеттрика–Андервуда на область длин волн 50–330 Å. Спектрометр включает сферическое зеркало скользящего падения и плоскую VLS-решетку скользящего падения, работающую во внешнем порядке дифракции. Спектрометр испытан при регистрации линейчатых спектров лазерной плазмы, продемонстрирована спектральная разрешающая способность 1300 на длине волны 182 Å.

Возможны два режима работы прибора. В режиме монокроматора он может быть использован в целях метрологии и рефлектотрии, например, с синхротронным или лазерно-плазменным источником излучения. При этом сканирование по длинам волн осуществляется поворотом решетки, а все остальные элементы, включая источник и выходную щель, неподвижны.

В режиме сканирующего спектрометра прибор предназначен для подробного (с сильной дисперсией и, соответственно, с высоким спектральным разрешением) просмотра участка спектра, выбранного из спектрального рабочего диапазона шириной около двух октав. Одно из возможных применений прибора – измерение ширин и относительных интенсивностей линий, в том числе при работе с импульсными источниками с невысокой воспроизводимостью спектра излучения.

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

- Pirozhkov A.S., Kando M., Esirkepov T.Zh., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 135004 (2012).
- Ragozin E.N., Mednikov K.N., Pertsov A.A., Pirozhkov A.S., Reva A.A., Shestov S.V., Ul'yanov A.S., Vishnyakov E.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7360**, 73600N (2009).
- Бейгман И.Л., Левашов В.Е., Медников К.Н., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н., Толстихина И.Ю. *Квантовая электроника*, **37** (11), 1060 (2007) [*Quantum Electron.*, **37** (11), 1060 (2007)].
- Бейгман И.Л., Вишняков Е.А., Лугинин М.С., Рагозин Е.Н., Толстихина И.Ю. *Квантовая электроника*, **40** (6), 545 (2010) [*Quantum Electron.*, **40** (6), 545 (2010)].
- Kuzin S.V., Zhitnik I.A., Shestov S.V., et al. *Solar Syst. Res.*, **45** (2), 162 (2011).
- Shestov S., Reva A., Kuzin S. *Astrophys. J.*, **780** (1), 15 (2014).
- Strokov V.N., Wang X., Shi M., et al. *J. Synchrotron Rad.*, **21**, 32 (2014).
- Stöhr J. *NEXAFS Spectroscopy* (Berlin: Springer, 1996).
- Fuchs O., Weinhardt L., Blum M., et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **80**, 063103 (2009).
- Warwick T., Chuang Yi-De, Voronov D.L., Padmore H.A. *J. Synchrotron Rad.*, **21**, 736 (2014).
- Louis E., Khorsand A.R., Sobierajski R., et al. *Proc. SPIE*, **7361**, 73610I (2009).
- Kando M., Pirozhkov A.S., Kawase K., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **103** (23), 235003 (2009).
- Вишняков Е.А., Каменец Ф.Ф., Кондратенко В.В. и др. *Квантовая электроника*, **42** (2), 143 (2012) [*Quantum Electron.*, **42** (2), 143 (2012)].
- Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *УФН*, **185** (11), 1203 (2015).
- Gullikson E.M., Underwood J.H., Batson P.C., Nikitin V.J. *X-Ray Sci. Technol.*, **3**, 283 (1992).
- Underwood J.H., Gullikson E.M., Koike M., Mrowka S. *Proc. SPIE*, **3150**, 40 (1997).
- Hettrick M.C., Underwood J.H. *AIP Conf. Proc.*, **147**, 237 (1986).
- Вишняков Е.А., Шатохин А.Н., Рагозин Е.Н. *Квантовая электроника*, **45** (4), 371 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (4), 371 (2015)].
- Вишняков Е.А., Колесников А.О., Кузин А.А., Негров Д.В., Рагозин Е.Н., Сасоров П.В., Шатохин А.Н. *Квантовая электроника*, **47** (1), 54 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (1), 54 (2017)].
- Ragozin E.N., Belokopytov A.A., Kolesnikov A.O., Muslimov E.R., Shatokhin A.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **10235**, 102350L (2017).
- Vishnyakov E.A., Kolesnikov A.O., Shatokhin A.N., Ragozin E.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **10677**, 106770E (2018).
- Shatokhin A.N., Kolesnikov A.O., Sasorov P.V., Vishnyakov E.A., Ragozin E.N. *Opt. Express*, **26** (15), 19009 (2018).
- Вишняков Е.А., Колесников А.О., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н., Шатохин А.Н. *Квантовая электроника*, **48** (10), 916 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (10), 916 (2018)].
- Рагозин Е.Н., Вишняков Е.А., Колесников А.О., Пирожков А.С., Шатохин А.Н. *Аперодические элементы в оптике мягкого рентгеновского диапазона*. Под ред. Е.Н.Рагозина (Москва: Физматлит, 2018).