

## VLS-спектрографы с плоским полем для мягкого рентгеновского излучения

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

*Проанализированы возможности спектрометров с плоским полем на основе вогнутых отражательных VLS-решёток с точки зрения построения спектральных изображений в мягком рентгеновском диапазоне. Показано, что существуют два типа таких приборов: спектрографы с максимально плоским участком фокальной поверхности (типа спектрографа Харады) и приборы с почти постоянным расстоянием от центра решётки до фокальной поверхности, что позволяет достичь высокого пространственного разрешения при использовании скрещенного фокусирующего зеркала (без потери спектрального разрешения). Рассчитаны три спектрографа типа спектрографа Харады с габаритами около 0.25, 0.5 и 1.5 м для работы в диапазонах 90–250, 50–200 и 20–110 Å соответственно. Показано, что каждый из рассчитанных приборов может быть перестроен в прибор второго типа без существенных изменений геометрии схемы – для работы во втором и четвёртом порядках дифракции. При этом теоретическое пространственное разрешение составляет ~10 мкм во всем диапазоне оптимизации.*

**Ключевые слова:** лазерная плазма, мягкое рентгеновское излучение, спектральные изображения, вогнутые VLS-решётки, спектрографы с плоским полем, спектральная фокальная поверхность.

### 1. Введение

Исследования, объектами которых являются лазерная плазма (в том числе релятивистская), плазма быстрых электрических разрядов, активная среда лазеров мягкого рентгеновского (МР) диапазона, кластерная плазма, так называемое тёплое плотное вещество (warm dense matter, WDM), создаваемое импульсом рентгеновского лазера на свободных электронах, и ряд других нуждаются в получении пространственно дифференцированной спектральной информации в МР области спектра. Спектры с однокоординатным пространственным разрешением и спектральные изображения получаются с помощью изображающего (стигматического) дифракционного спектрометра. Ранее эта задача решалась, как правило, с использованием роуландовского спектрографа скользящего падения, дополненного щелью, скрещенной по отношению к направлению штрихов дифракционной решётки. Пространственное разрешение, достижимое на этом пути, ограничивается дифракцией излучения и для излучения с длиной волны 100–200 Å составляет ~100 мкм, причём достигается ценой уменьшения регистрируемого светового потока и яркости спектральных линий.

Между тем, в ряде экспериментов требуется пространственное разрешение ~10 и даже ~1 мкм. Примерами мо-

гут служить, например, генерация высоких гармоник в релятивистской лазерной плазме под действием излучения мультитераваттного фемтосекундного лазера [1] и генерация МР излучения при отражении излучения Ti:сапфирового лазера от релятивистской плазменной волны, возбуждаемой в импульсной струе гелия (релятивистское «летающее зеркало») [2]. Повышение пространственного разрешения достигается, во-первых, в спектрометре с фокусирующим многослойным зеркалом (МЗ) и плоской VLS-решёткой (varied line-space) [3] и, во-вторых, в спектрометре с вогнутой VLS-решёткой, дополненной фокусирующим оптическим элементом, скрещенным по отношению к решётке. О реализации прибора первого типа недавно сообщалось нами на 15-й Международной конференции по рентгеновским лазерам (ICXRL2016) [4], а о втором приборе речь идет в настоящей работе.

Спектрограф с плоским полем – это спектральный прибор, в котором фокальная поверхность с хорошей точностью аппроксимируется плоскостью, ориентированной почти по нормали (под углом не более 20°) к дифрагированному излучению. Это позволяет достигать высокого разрешения при использовании в качестве детекторов ПЗС-матриц и электронно-оптических камер: при совмещении детектора с фокальной плоскостью прибора исчезает геометрическая расфокусировка, а почти нормальное падение лучей на детектор уменьшает потери сигнала из-за поглощения в мёртвом слое детектора. В классической роуландовской схеме [5, 6] эти недостатки неустранимы: при скользящем падении излучения на вогнутую отражательную решетку фокусировка спектра на плоский детектор происходит либо также при скользящих углах падения (что значительно увеличивает поглощение в мёртвом слое), либо с существенной геометрической расфокусировкой.

В настоящей работе мы будем говорить о спектрографах с плоским полем, построенных на вогнутых отража-

Е.А.Вишняков. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: juk301@mail.ru  
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., 141707 Долгопрудный, Институтский пер., 9;  
e-mail: enragozin@gmail.com, shatohinal@gmail.com

Поступила в редакцию 29 марта 2016 г., после доработки – 4 июля 2016 г.

тельных решётках с переменным шагом штриха, работающих в схеме скользящего падения.

В 1980 г. Т.Харада впервые рассчитал спектрограф скользящего падения с плоским участком фокальной поверхности, отвечающим области длин волн 50–200 Å, в котором дифрагирующие лучи составляют относительно небольшие углы с нормалью к детектору [7]. Позже он продемонстрировал этот спектрограф в действии при регистрации спектров лазерной плазмы [8]. В спектрографе была использована сферическая VLS-решётка с шагом, монотонно изменяющимся от 0.99 до 0.69 мкм на апертуре 50 мм. Пространственная частота штрихов  $p$  в центре составляла  $1200 \text{ мм}^{-1}$ , скользящий угол падения был равен  $3^\circ$ . Этот спектрограф стал коммерчески доступным и сейчас известен как спектрограф Харады. После усовершенствования своего гравировального станка Т.Харада смог изготавливать решётки с  $p \sim 10^4 \text{ мм}^{-1}$  [9], что позволило ему позже создать изображающий спектрометр высокого разрешения на область 250–290 Å для японского космического аппарата Solar-B/ Hinode [10].

Отметим, что ещё до работы Т.Харады по изготовлению VLS-решёток [11] была опубликована работа Ф.М.Герасимова и др. [12], в которой сообщалось об изготовлении решёток ( $R = 1 \text{ м}$ ,  $p = 300$  и  $600 \text{ мм}^{-1}$ ) с полным относительным изменением шага на уровне  $\sim 10^{-2}$ . Такое сравнительно небольшое изменение шага позволяет компенсировать астигматизм в схемах нормального падения.

Недавно в лаборатории LLNL (США) был создан спектрограф высокого разрешения с плоским полем для регистрации спектров лазерной плазмы в области 10–50 Å [13]. В качестве детектора использовалась охлаждаемая ПЗС-матрица. Излучение диспергировалось вогнутой сферической (радиус кривизны  $R = 44.3 \text{ м}$ ) VLS-решёткой со средней пространственной частотой штрихов  $2400 \text{ мм}^{-1}$ , установленной под скользящим углом  $\sim 2^\circ$ . Полный набор параметров оптической схемы спектрографа в работе [13] не приведен.

Среди работ, в которых сообщается об успехах, достигнутых при помощи VLS-решёток, можно выделить работы М.Хеттрика [14, 15]. В них описываются стигматический спектрограф для наблюдения внесолнечных объектов в диапазоне 70–760 Å и ряд астигматических лабораторных спектрометров сверхвысокого разрешения ( $\sim 35000$ ). В работе [16] М.Хеттрик предложил монохроматор на плоской VLS-решётке, не содержащий больше никаких оптических элементов.

Целью нашей работы было проведение анализа возможностей использования вогнутых сферических VLS-решёток для спектрально-диагностических исследований в ВУФ и МР диапазонах и расчёт семейства спектрографов с различными параметрами для создания в дальнейшем приборов этого класса.

## 2. Управление кривизной фокальной поверхности: аналитический подход

Пусть пространственная частота штрихов VLS-решётки описывается полиномиальной зависимостью от координаты  $y$  (рис.1):

$$p(y) = p_0 + p_1y + p_2y^2 + p_3y^3 + \dots, \tag{1}$$

причём  $dn/dy = p(y)$ , где  $n$  – номер штриха. Считая, что источник находится в главной плоскости дифракции, рас-

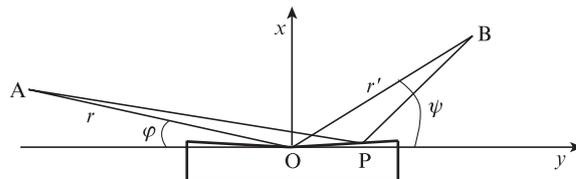


Рис.1. Построение спектрального изображения вогнутой VLS-решёткой; O – центр сферической VLS-решётки и системы координат  $x, y$ . В точке A находится точечный источник, точка B – его спектральное изображение. Точка P( $x, y$ ) находится на произвольном штрихе решётки,  $\varphi$  и  $\psi$  – скользящие углы падения и дифракции центрального луча.

смотрим пучок, целиком лежащий в главной плоскости. Пусть в точке A находится точечный источник, а точка B есть его спектральное изображение на длине волны  $\lambda$  (рис.1). Точка P находится на каком-либо из произвольных штрихов решётки, которые мы полагаем бесконечно тонкими линиями, как это обычно делается для нахождения фокусирующих свойств решётки и aberrаций волнового фронта. Функция оптической длины пути

$$F = l_1 + l_2 + m\lambda n(y), \tag{2}$$

где  $l_1, l_2$  – расстояния AP и PB соответственно;  $m$  – порядок дифракции. Для суммы  $l_1 + l_2$  воспользуемся разложением из работы [17]:

$$l_1^2 = r^2 + x^2 + y^2 - 2xr \sin \varphi + 2yr \cos \varphi, \tag{3}$$

$$l_2^2 = r_h'^2 + x^2 + y^2 - 2xr_h' \sin \psi - 2yr_h' \cos \psi, \tag{4}$$

где  $r$  – расстояние от источника до решётки (AO на рис.1);  $r_h'$  – расстояние до спектрального (горизонтального) фокуса (OB);  $\varphi$  и  $\psi$  – скользящие углы падения и дифракции центрального луча. Поскольку VLS-решётка – сферическая (радиус кривизны  $R$ ), то координаты точки P( $x, y$ ) связаны уравнением

$$(x - R)^2 + y^2 = R^2, \tag{5}$$

что позволяет выразить координату  $x$  через  $y$ . Тогда, раскладывая (2) в ряд Тейлора по  $y$  до членов  $y^4$  и применяя принцип Ферма ( $\partial F/\partial y = 0$ ), получаем следующие выражения:

$$\cos \varphi - \cos \psi = m\lambda p_0, \tag{6}$$

$$\frac{\sin^2 \varphi}{r} - \frac{\sin \varphi}{R} + \frac{\sin^2 \psi}{r_h'} - \frac{\sin \psi}{R} = m\lambda p_1, \tag{7}$$

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \left[ \frac{\cos \varphi}{r} \left( \frac{\sin^2 \varphi}{r} - \frac{\sin \varphi}{R} \right) - \frac{\cos \psi}{r_h'} \left( \frac{\sin^2 \psi}{r_h'} - \frac{\sin \psi}{R} \right) \right] \\ & + \frac{1}{2R^2} \left( \frac{1}{r} - \frac{\sin \varphi}{R} + \frac{1}{r_h'} - \frac{\sin \psi}{R} \right) = -m\lambda p_2, \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} & 2 \left[ \left( \frac{\cos \varphi}{r} \right)^2 \left( \frac{\sin^2 \varphi}{r} - \frac{\sin \varphi}{R} \right) + \left( \frac{\cos \psi}{r_h'} \right)^2 \left( \frac{\sin^2 \psi}{r_h'} - \frac{\sin \psi}{R} \right) \right] \\ & - \frac{1}{2r} \left( \frac{\sin^2 \varphi}{r} - \frac{\sin \varphi}{R} \right)^2 - \frac{1}{2r_h'} \left( \frac{\sin^2 \psi}{r_h'} - \frac{\sin \psi}{R} \right)^2 = m\lambda p_3. \end{aligned} \tag{9}$$

Система уравнений (6), (7) хорошо известна, она задаёт форму спектральной фокальной кривой. Уравнение (6) (уравнение решётки) описывает направление дифракции центрального луча, а (7) – положение параксиального спектрального (горизонтального) фокуса  $r'_i$ . Выражения (8), (9) получены для членов разложения оптической длины пути  $F(2)$  по степеням  $y^3$  и  $y^4$  с учётом [17]. Они описывают условия, при которых меридиональная кома (8) и сферическая абберрация (9) для монохроматического пучка в главной плоскости равны нулю.

Отметим важную особенность формы записи уравнений (6)–(9). В левой части всех равенств содержатся только геометрические характеристики прибора (радиус кривизны решётки  $R$ , расстояния до источника и до изображения, углы  $\varphi$  и  $\psi$ ), а в правой части находятся только члены вида  $m\lambda p_i$ . Это означает, что как только удастся рассчитать удачную геометрию прибора для какой-либо длины волны  $\lambda_0$ , её сразу же можно перенести на любую другую длину волны простым пропорциональным масштабированием всех членов разложения  $p(y)$  (1). Правда, для этого придётся изготовить новую решётку.

Получается, что форма спектральной фокальной поверхности прибора зависит только от отношения коэффициентов  $p_1/p_0$ , угла скользкого падения  $\varphi$ , радиуса кривизны решётки  $R$  и расстояния от входной щели до центра решётки  $r$ . Легко убедиться, что компенсация абберраций происходит при определённых значениях отношений  $p_2/p_0$  и  $p_3/p_0$  для фиксированного угла дифракции  $\psi$ . Следовательно, пропорциональное увеличение или уменьшение всех коэффициентов решётки не изменит изображение спектральной линии при одном и том же угле дифракции, но меняет длину волны, ему соответствующую.

### 3. Методика численного расчёта

Для расчёта и оптимизации спектрографов с вогнутой сферической VLS-решёткой (типа спектрографа Харады) с плоским фокальным полем в рабочей области спектра использовалась следующая последовательность шагов. На первом этапе задавались рабочий спектральный диапазон  $\Delta\lambda$ , а также угол  $\varphi$  и радиус кривизны  $R$ , определяющие спектральное разрешение и габариты прибора. Далее, используя (6) и (7), подбором коэффициентов  $p_1$  и  $p_0$  модифицировалась спектральная фокальная кривая, которая отступает от круга Роуланда (рис.2) и выходит на плоский участок, практически перпендикулярный оси  $y$  (на рис.2 это участок кривой  $p_1 = 16.55$  в интервале  $m\lambda = 90 - 250 \text{ \AA}$ ), при этом падающие лучи составляют угол в пределах  $\pm 20^\circ$  от нормали.

После того как было задано положение спектральной фокальной поверхности, рассчитывалось оптимальное положение плоскости детектора (методом наименьших квадратов либо методом минимизации максимальной геометрической расфокусировки в спектре). Затем по формулам (8), (9) вычислялись коэффициенты  $p_2$  и  $p_3$ , зануляющие абберрацию меридиональной комы и сферическую абберрацию на некоторой длине волны оптимизации  $\lambda_{\text{opt}}$ , выбранной из середины диапазона  $\Delta\lambda$ .

На этом аналитическая стадия расчёта заканчивалась, и далее следовал анализ спектральных изображений входной щели, полученных методом численной трассировки лучей. Использовалась программа ХОР (X-ray Ori-

ented Programs) версии 2.3 с расширением SHADOWVUI, находящаяся на сайте ESRF в свободном доступе [18].

В первую очередь трассировка лучей проводилась на длине волны  $\lambda_{\text{opt}}$ , после чего уточнялся коэффициент  $p_3$  и осуществлялся подбор коэффициента  $p_4$  для минимизации расчётного размера полученного спектрального изображения (по ширине основания). Затем выбирались «реперные» длины волн  $\lambda_f$  (длина волны фокусировки),  $\lambda_d$  (длина волны максимальной расфокусировки) и  $\lambda_{\text{min}}$ ,  $\lambda_{\text{max}}$  (крайние значения спектрального диапазона  $\Delta\lambda$ ), на которых методом численной трассировки лучей были получены спектральные изображения. В некоторых случаях эти длины волн могли частично совпадать.

На практике расчёт и оптимизация носили итеративный характер из-за возможности дополнительного манипулирования некоторыми параметрами. Например, расстояние между входной щелью и VLS-решёткой может отличаться от роуландовского случая  $R\sin\varphi$ . Также можно изменять длину волны  $\lambda_{\text{opt}}$ , на которой меридиональная кома и сферическая абберрация равны нулю.

### 4. Результаты расчётов и их обсуждение

Поведение спектральной фокальной кривой в зависимости от параметра VLS-решётки  $p_1$  иллюстрирует рис.2. Здесь VLS-решётка установлена под скользким углом  $4^\circ$  на расстоянии 130 мм от источника. Средняя пространственная частота штрихов  $p_0 = 1200 \text{ мм}^{-1}$ , радиус кривизны подложки  $R = 2 \text{ м}$ . Начало координат находится в центре решётки. Нижняя линия соответствует кругу Роуланда классической вогнутой решётки с  $R = 2 \text{ м}$ . Лучи, исходящие из центра решётки, указывают направление дифракции при разных значениях  $m\lambda$ .

Видно, что все фокальные кривые при увеличении  $m\lambda$  быстро отступают от круга Роуланда и выходят на почти плоский участок ( $90 - 250 \text{ \AA}$ ), ориентированный под некоторым углом к падающим лучам. При  $p_1 = 16.55$  этот участок фокальной кривой почти перпендикулярен падающим лучам (отклонение от нормали  $\sim 15^\circ$ ), что позволяет использовать в данной схеме ПЗС-матрицу в качестве детектора. Класс спектрографов, в которых используется такой плоский участок фокальной поверхности, мы назовём спектрографами типа спектрографа Харады (рис.3,а). Значение  $p_1 = 16.55$  было выбрано как оптимальное, т. к. при этом длина спектрального участка с плоским полем будет максимальна.

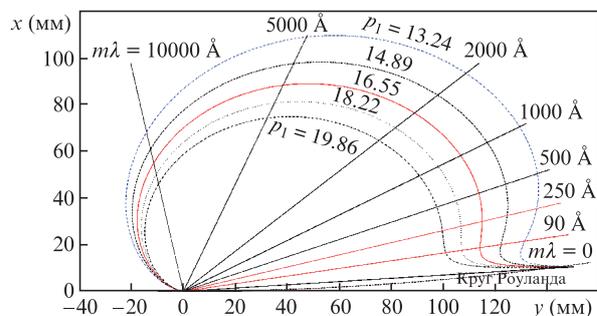


Рис.2. Поведение спектральных фокальных кривых в компактном варианте спектрографа скользкого падения с плоским полем (вариант 1) при изменении параметра  $p_1$ . Участок средней кривой между лучами  $90$  и  $250 \text{ \AA}$  хорошо аппроксимируется отрезком прямой.

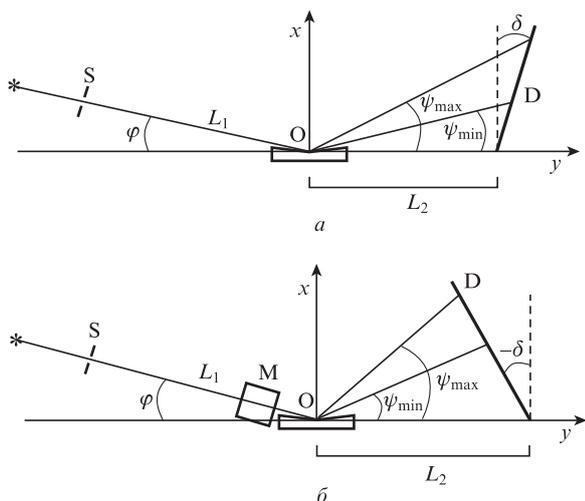


Рис.3. Расположение элементов в астигматическом спектрографе типа спектрографа Харады (а) и в квазистигматическом спектрографе с нормальным падением лучей на детектор (б) (S – входная щель, D – детектор,  $L_1$  – длина отрезка SO, M – скрещенное фокусирующее зеркало).

Интересно, что подбором  $p_1$  можно сориентировать фокальную поверхность нормально к падающим лучам в некотором диапазоне длин волн. При этом фокальная поверхность будет примерно сферической, но за счёт увеличения расстояния  $L_2$  (рис.3,б) можно уменьшить различие между фокальной поверхностью и плоскостью, так, чтобы размер спектрального изображения источника на всех длинах волн из диапазона  $\Delta\lambda$  был порядка размера ячейки ПЗС-матрицы (13 мкм). Такой класс спектрографов позволяет получить высокое пространственное разрешение, используя в скрещенном направлении к VLS-решётке дополнительное фокусирующее зеркало (элемент M на рис.3,б).

Подчеркнём, что поведение спектральных кривых фокусировки и их зависимость от  $p_1$  (см. рис.2) носят общий характер и присущи всем VLS-спектрографам, рассчитанным в настоящей работе. На рис.4 изображены характерные отклонения поверхностей фокусировки от оптимальной плоскости детектора и положения «реперных» длин волн для двух обсуждаемых классов приборов. Видно, что и число «реперов» может быть различным: в

приборах типа спектрометра Харады их обычно пять ( $\lambda_{f1}$ ,  $\lambda_{d1}$ ,  $\lambda_{opt}$ ,  $\lambda_{d2}$ ,  $\lambda_{f2}$ ), а в приборах с пространственным разрешением – три ( $\lambda_{f1}$ ,  $\lambda_{opt}$ ,  $\lambda_{f2}$ ). На рис.4,б приведены кривые как спектральной, так и пространственной фокусировки; последняя получена с учётом скрещенного зеркала.

Нами было рассчитано семейство спектрографов для диапазонов 90–250, 50–200 и 20–110 Å (габариты приборов около 0.25, 0.5 и 1.5 м соответственно). Каждый спектрограф был рассчитан в двух вариантах (см. табл.1): с максимально плоским участком фокальной поверхности (типа спектрографа Харады, варианты 1–3), и с почти постоянным расстоянием от центра решётки до фокальной поверхности (варианты 1а, 2а и 3а).

### 4.1. VLS-спектрографы с плоским полем

Спектрографы с плоским фокальным полем типа спектрографа Харады рассчитывались исходя из различных требований (табл.1, варианты 1–3). Вариант 1 – это компактный прибор с небольшими габаритами; в варианте 2 длина рабочей области спектра согласована с размером чувствительной области нашего ПЗС-детектора (27 мм); вариант 3 – это коротковолновый длиннофокусный прибор ( $\Delta\lambda = 20–110 \text{ Å}$ ).

В табл.1 приведены все геометрические характеристики приборов ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $\varphi$ ,  $\delta$  и др.), рабочий диапазон  $\Delta\lambda$ , параметры VLS-решёток, а также разрешающая способность и дисперсия. Крайние длины волн рабочего спектрального диапазона  $\lambda_{min}$  и  $\lambda_{max}$  тоже являются «реперными» точками спектрографа, как и  $\lambda_f$  и  $\lambda_d$ , но в табл.1 они отдельно не представлены. Вопрос об оптимальной ширине VLS-решётки  $w_{opt}$  ( $w_{theor}$ ) мы обсудим ниже.

На рис.5 в качестве примера представлены спектральные изображения точечного монохроматического источника на «реперных» длинах волн  $\lambda_{min} = 90 \text{ Å}$ ,  $\lambda_{opt} = 143 \text{ Å}$  и  $\lambda_{d2} = 180 \text{ Å}$  для спектрографа варианта 1 (компактный прибор длиной 0.25 м). Видно, что все приведённые спектральные изображения точечного монохроматического источника укладываются в характерный размер ячейки ПЗС-детектора (13 мкм). Расфокусировка будет максимальной на длине волны  $\lambda_{max} = 250 \text{ Å}$ . При этом размер спектрального изображения равен 19 мкм (укладывается в две ячейки ПЗС-детектора). Среднее спектральное разрешение  $\delta\lambda = 0.18 \text{ Å}$ .

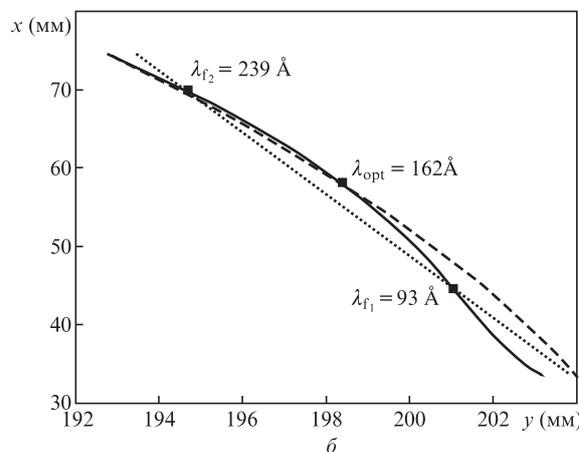
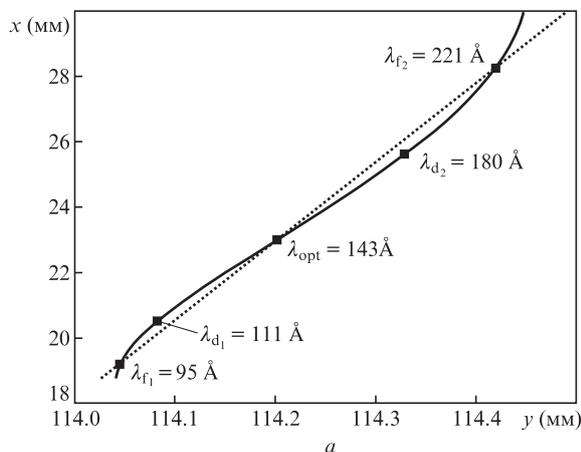
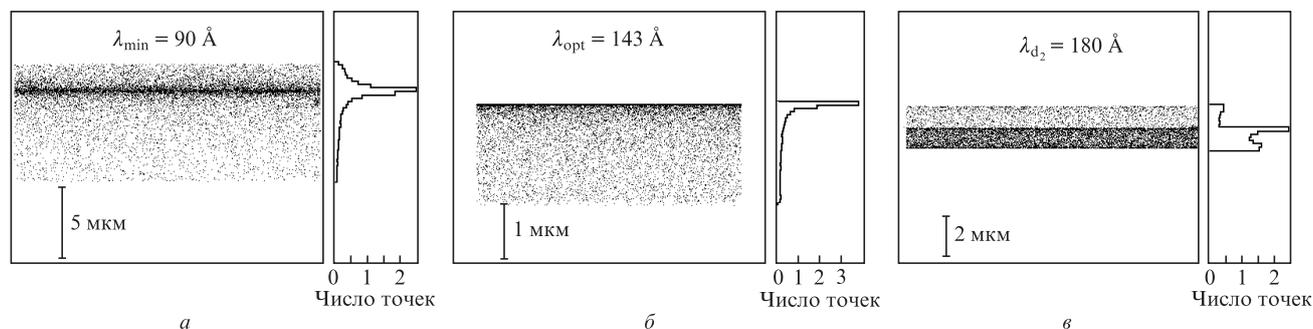


Рис.4. Характерное поведение фокальных поверхностей вблизи плоскости детектора. Вариант спектрографа с плоским полем (типа спектрографа Харады) (а) и вариант спектрографа с почти постоянным расстоянием VLS-решётка – детектор (б). Пунктирная прямая – плоскость детектора, сплошная кривая – спектральная фокусировка, штриховая – пространственная фокусировка.

Табл. 1. Расчётные параметры VLS-спектрографов с плоским полем.

Параметры	Спектрографы типа спектрографа Харады			Спектрографы с пространственной фокусировкой			
	Вариант						
	1	2	3	1а	2а	3а	
Длина (мм)	250	502	1500	234	456	1391	
$\Delta\lambda$ (Å)	90–250	50–200	20–110	90–250	50–275	20–125	
«Реперные» длины волн (Å)	$\lambda_{\text{opt}}$	143	125	48	170	162	73
	$\lambda_{\text{f}}$	95; 221	64; 152	25; 99	116; 227	92; 239	33; 105
	$\lambda_{\text{d}}$	111; 180	90	33; 73	–	–	–
Угол падения $\varphi$ (град)	4	3	2	4	3	2	
$L_1$ (мм)	130.0	252.0	750.0	130.0	252.0	750.0	
$L_2$ (мм)	112.5	250.0	750.0	104.2	212.3	664.8	
$\delta$ (град) (см. рис.3)	4.7	0.0	0.0	–10.4	–14.5	–12.3	
$\psi_{\text{min}} - \psi_{\text{max}}$ (град)	9.3–14.6	7.0–12.9	6.0–13.3	12.6–20.4	9.4–21.2	7.0–12.9	
Угол падения на детектор $\psi + \delta$ (град)	14.0–19.3	7.0–12.9	6.0–13.3	2.2–9.0	–5.1–6.7	–5.3–0.6	
Оптимальная ширина решётки $W_{\text{opt}}$ ( $W_{\text{theor}}$ ) (мм)	30 (24)	50 (48)	60 (120)	30 (24)	10 (48)	10 (120)	
$R$ (м)	2	6	30	2	6	30	
$\rho_0$ (мм <sup>–1</sup> )	200	1200	2400	1200	1200	2400	
$\rho_1$ (мм <sup>–2</sup> )	16.548	8.000	5.634	19.857	10.400	6.761	
$\rho_2$ (мм <sup>–3</sup> )	0.2042	0.0440	0.0106	0.2751	0.0710	0.0149	
$\rho_3$ (10 <sup>–4</sup> мм <sup>–4</sup> )	25.00	2.28	0.19	36.20	5.00	0.29	
$\rho_4$ (10 <sup>–6</sup> мм <sup>–5</sup> )	22.70	1.50	0.035	37.04	3.70	0.05	
Средняя обратная дисперсия (Å/мм)	14.14	5.58	0.90	10.00	5.32	0.78	
Размеры апертуры решётки, ширина × высота (мм)	30 × 10	50 × 18	60 × 18	30 × 10	10 × 18	10 × 18	
Разрешение $\delta\lambda$ (Å)	0.18	0.07	0.01	0.26	0.14	0.02	
Разрешающая способность $\lambda_{\text{opt}}/\delta\lambda$	794	1785	4800	654	1157	3650	

Рис.5. Спектральные изображения точечного источника, расположенного в плоскости входной щели, на длинах волн  $\lambda_{\text{min}}$ ,  $\lambda_{\text{opt}}$  и  $\lambda_{\text{d}_2}$  (вариант 1 компактного спектрографа типа спектрографа Харады); на рис.а, в одно деление соответствует пятистам точкам, на рис.б – тысяче.

В спектрографе варианта 2 рабочий спектральный диапазон  $\Delta\lambda = 50\text{--}200$  Å выбран из соображений удобства проведения экспериментов, когда спектр полностью уместается на чувствительной поверхности детектора. Однако спектральная фокальная поверхность остаётся плоской и в более широком диапазоне длин волн (50–275 Å). Максимальная геометрическая расфокусировка в спектре не превышает 16 мкм на  $\lambda_{\text{max}} = 275$  Å, что позволяет работать без потери спектрального разрешения и в области 200–275 Å. Но при этом полная ширина спектра (38 мм при  $\Delta\lambda = 50\text{--}275$  Å) станет больше размера ПЗС-детектора (27 мм).

Спектрограф варианта 3 был рассчитан как коротковолновый длиннофокусный прибор. Он даёт теоретическую разрешающую способность  $\sim 5 \times 10^3$ , охватывая бо-

лее двух октав длин волн ( $\Delta\lambda = 20\text{--}110$  Å). Спектральные изображения точечного монохроматического источника на всех «реперных» длинах волн, кроме  $\lambda_{\text{min}}$  и  $\lambda_{\text{max}}$ , укладываются в ячейку ПЗС-детектора размером 13 мкм. Для  $\lambda_{\text{min}}$  и  $\lambda_{\text{max}}$  изображения укладываются в две ячейки (см. табл.2). Отметим, что из рассчитанных спектрографов типа спектрографа Харады вариант 3 является наиболее «внероуландовским».

При помещении щели в спектрографе варианта 3 на круг Роуланда (вариант 3р) расстояние от неё до решётки возрастает примерно вдвое, тогда как расстояние от VLS-решётки до детектора почти не изменяется. Одновременно сужается угловой размер области плоского поля, что сокращает рабочий спектральный диапазон на 20 Å (до  $\Delta\lambda = 20\text{--}90$  Å). В этом случае оптимальное значение коэф-

Табл.2. Теоретические ширины спектральных изображений (мкм) для различных типов VLS-спектрографов. В скобках – размер в скрещенном (пространственном) направлении.

«Реперные» длины волн*	Спектрографы типа спектрографа Харады				Спектрографы с пространственной фокусировкой		
	Вариант				1а	2а	3а
	1	2	3	3р			
$\lambda_{\min}$	8	45	19	10	20 (9)	49 (10)	20 (16)
$\lambda_{f_1}$	6	18	4	3	10 (6)	33 (8)	11 (16)
$\lambda_{d_1}$	3	7	6	5	–	–	–
$\lambda_{\text{opt}}$	2	4	0.5	1	12 (7)	15 (10)	15 (17)
$\lambda_{d_2}$	2	–	13	5	–	–	–
$\lambda_{f_2}$	10	10	3	5	28 (16)	20 (18)	5 (19)
$\lambda_{\max}$	19	15	19	17	47 (20)	32 (22)	21 (20)

\* Значения «реперных» длин волн приведены в табл.1.

фициента  $p_4$  приближается к нулю, что может упростить изготовление VLS-решёток методом интерференционной литографии.

В табл.2 указаны размеры спектральных изображений точечного монохроматического источника на «реперных» длинах волн для всех вариантов VLS-спектрографов, включая только что рассмотренный вариант 3р. Размер итогового изображения определяется как геометрической расфокусировкой, так и аберрациями на данной длине волны. В вариантах 1 и 2 спектрографов типа спектрографа Харады роль аберраций резко возрастает по мере удаления от  $\lambda_{\text{opt}}$  к краям диапазона  $\Delta\lambda$ , что нивелирует эффект фокусировки на  $\lambda_{f_1}$  и  $\lambda_{f_2}$ . В случаях вариантов 3 и 3р аберрации менее существенны и геометрический эффект преобладает.

#### 4.2. VLS-спектрографы с пространственной фокусировкой

Как было указано выше, выбор рабочего участка спектральной фокальной поверхности VLS-спектрографа можно сделать в пользу участка с почти нормальным падением лучей на детектор, имея в виду достижение максимального пространственного разрешения при помощи скрещенного вогнутого зеркала. Этот случай соответствует на рис.2 участку кривой  $p_1 = 19.86$  между лучами с  $m\lambda = 250$  и  $500 \text{ \AA}$ , а также участкам между лучами  $500$  и  $1000 \text{ \AA}$  на всех приведённых кривых. Если говорить о регистрации спектров в интервале  $125\text{--}250 \text{ \AA}$ , то для обсуждаемых приборов речь идёт о работе во втором либо в четвёртом порядке дифракции.

В правой части табл.1 представлены варианты VLS-спектрографов, адаптированных для работы со скрещенной пространственной фокусировкой во втором порядке дифракции (1а–3а). В вариантах 2а и 3а рабочие спектральные диапазоны оказались шире, чем в случаях 2 и 3, т. к. они выбирались из соображений максимальной длины участка спектральной фокальной поверхности, расположенного почти нормально к падающим лучам. При этом не требовалось согласовывать длину спектра с размером чувствительной поверхности детектора.

Использование участка фокальной поверхности с нормальным падением лучей после дифракции на VLS-решётке (варианты а) позволяет достичь высокого пространственного разрешения ( $\sim 10$  мкм) при работе с компактным источником, что соответствует размеру ячейки ПЗС-детектора. На рис.6 показан пример пространствен-

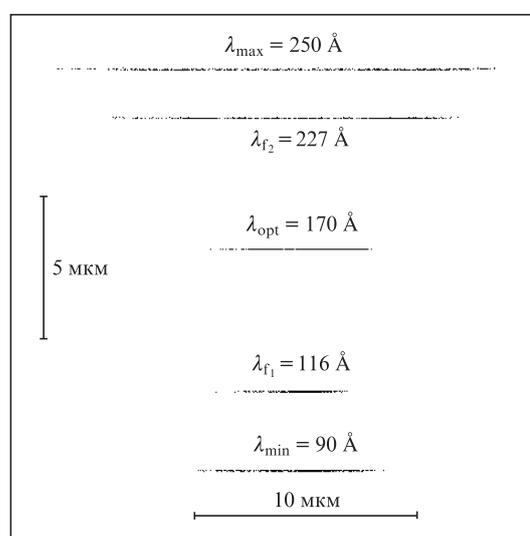


Рис.6. Пример пространственной фокусировки изображения точечного источника на «реперных» длинах волн в варианте VLS-спектрографа 1а.

ной фокусировки в варианте 1а для точечного источника, расположенного на расстоянии  $63$  мм перед входной щелью (масштабы по осям на рис.6 существенно различаются). Пространственная фокусировка осуществляется вогнутым зеркалом ( $R = 2$  м,  $W = 20$  мм), установленным под скользящим углом  $4.26^\circ$  и скрещенным по отношению к VLS-решётке (см. рис.3,б).

Геометрия зеркала должна удовлетворять ряду требований. Радиус кривизны должен быть таким же, как у VLS-решётки, а расстояние от зеркала до решётки должно превышать полусумму их ширины (на  $20\text{--}45$  мм), но при этом не быть слишком большим, чтобы не располагать источник слишком далеко от щели. Длина пути центрального луча от источника до зеркала равна длине его дальнейшего пути до детектора; отсюда находилось расстояние источник–щель (см. рис.3,б). Равные углы падения и отражения вычислялись из условия расположения источника на круге Роуланда, связанном с зеркалом.

В правой части табл.2 приведены размеры изображений точечного монохроматического источника на детекторе в спектральном и пространственном направлениях для рассчитанных вариантов VLS-спектрографов с про-

пространственной фокусировкой. Видно, что добавление в схему фокусирующего зеркала несколько ухудшает спектральную фокусировку (до трёх-четырёх ячеек ПЗС-детектора), но при этом пространственное разрешение составит  $\sim 10$  мкм (одна-две ячейки).

Отметим, что получить пространственное разрешение с помощью скрещенного зеркала можно и в спектрографах типа спектрографа Харады (варианты 1–3). Поскольку дифрагированные лучи от VLS-решётки в схемах составляют с нормалью к детектору угол не более  $20^\circ$ , то длина пути в спектрографе и расстояние решётка–детектор слабо зависят от  $\lambda$ . Например в варианте 2 разность длин путей для  $\lambda = 50$  и  $200$  Å составляет всего 4.65 мм, что намного меньше расстояния от решётки до детектора (250 мм). Поэтому добавление скрещенного фокусирующего зеркала увеличит интенсивность в спектре и обеспечит пространственное разрешение  $\sim 20$  мкм. Поле зрения приборов составит при этом 3–10 мм (в зависимости от варианта VLS-спектрографа).

Во всех рассчитанных вариантах VLS-спектрографов рабочий спектральный диапазон охватывает более октавы длин волн. Если ничего не предпринимать, то это может создать трудности при идентификации длин волн в получаемых спектрах из-за наложения различных порядков дифракции. Использование МЗ в качестве скрещенного зеркала поможет решить эту проблему, выделяя в разных экспериментах разные спектральные диапазоны [19, 20]. Например, в варианте 1 ( $\Delta\lambda = 90\text{--}250$  Å) можно использовать как МЗ Mo/Si [21, 22] для диапазона 125–250 Å, так и МЗ Sb/B4C для области 90–125 Å [23], не меняя при этом VLS-решётку.

#### 4.3. Аберрации и оптимальная ширина VLS-решётки

Напомним, что полная компенсация аберраций (8), (9) возможна лишь для одной длины волны (а точнее, для одного угла дифракции  $\psi_{\text{opt}}$ ), для остальных  $\lambda$  аберрации компенсируются лишь приближённо. Поэтому форма спектрального изображения точечного монохроматического источника для разных  $\lambda$  будет разной, т. к. аберрации зависят только от угла дифракции  $\psi$  (при выбранных отношениях  $p_1/p_0$ ,  $p_2/p_0$  и  $p_3/p_0$ ).

Вследствие быстрого нарастания аберраций при отклонении местных углов дифракции  $\psi$  от  $\psi_{\text{opt}}$  существует оптимальная ширина решётки, при которой реализуется максимум разрешающей способности без потери светосилы. Для классических вогнутых дифракционных решёток в схеме Роуланда эта ширина рассчитывается теоретически по формуле [24]

$$W_{\text{theor}} = 2.42 \left[ \lambda R^3 \frac{\sin \varphi \sin \psi}{(1 - \sin \varphi \sin \psi)(\sin \varphi + \sin \psi)} \right]^{1/4}. \quad (10)$$

Данные, приведённые в табл. 1 в строке «Оптимальная ширина решётки», показывают, что в случае VLS-решёток формула (10) имеет ограниченное применение. Это связано с влиянием коэффициентов  $p_2$ ,  $p_3$  и  $p_4$  на аберрации при различных углах дифракции  $\psi$ . Если на одних длинах волн удаётся скомпенсировать аберрации, то на других  $\lambda$  возможно их непреднамеренное усиление, что исправляется ограничением рабочей области VLS-решётки.

Оптимальная ширина VLS-решётки  $W_{\text{opt}}$  в варианте 1 спектрографа превышает  $W_{\text{theor}}$  на 25%, в варианте 2  $W_{\text{theor}}$  и  $W_{\text{opt}}$  практически совпадают, а в варианте 3  $W_{\text{opt}}$

вдвое меньше, чем  $W_{\text{theor}}$ . В случаях VLS-спектрографов с пространственным разрешением ограничения на  $W_{\text{opt}}$  становятся ещё жёстче (см. табл. 1). В варианте 1а размеры изображений в спектральном направлении возрастают слабо (по сравнению с вариантом 1) и при прежнем уровне  $W_{\text{opt}}$  укладываются в две ячейки детектора. В вариантах 2а и 3а для получения спектрального разрешения порядка двух ячеек детектора  $W_{\text{opt}}$  не должна превышать 10 мм, что значительно меньше оптимальной ширины решётки  $W_{\text{theor}}$  в классическом случае.

При подборе коэффициента VLS-решётки  $p_3$  было замечено, что при  $W_{\text{opt}} > 10$  мм в вариантах 2а и 3а спектральное изображение на длине волны  $\lambda_{\text{opt}}$  принимает нестандартный вид. В распределении интенсивности появляются два-три максимума (как на рис. 5, в) вместо характерного одного, расстояние между которыми может превышать размер ячейки детектора. Уменьшение ширины решётки до 10 мм устраняет лишние максимумы, позволяя получить разрешение на уровне двух ячеек детектора. Однако в варианте 3а становится существенной и геометрическая расфокусировка на длине волны  $\lambda_{\text{opt}}$ . При пересечении фокальными поверхностями плоскости детектора в распределении появляются три максимума (в случае ширины VLS-решётки более 50 мм), а при расчётном положении детектора (на расстоянии 3 мм от фокальной поверхности, в точке с  $\lambda_{\text{opt}}$ ) интенсивность распределена равномерно.

## 5. Заключение

Проанализированы возможности использования сферических VLS-решёток для создания спектрографов с плоским полем в области спектра 20–250 Å. Выбор коэффициентов VLS-решётки позволяет менять радиус кривизны волнового фронта (при помощи коэффициента  $p_1$ ), а также компенсировать аберрацию меридиональной комы ( $p_2$ ) и сферическую аберрацию ( $p_3$ ) на длине волны  $\lambda_{\text{opt}}$ . Проанализировано поведение спектральных фокальных поверхностей VLS-решёток в зависимости от  $p_1$  и показана возможность создания VLS-спектрографов двух типов: с плоским полем (типа спектрографа Харады) и спектрографов с почти сферической формой фокальной поверхности (постоянной длиной пути от решётки до детектора), что можно использовать для получения высокого пространственного разрешения ( $\sim 10$  мкм) при помощи скрещенного фокусирующего зеркала.

Рассчитано по три варианта VLS-спектрографа каждого типа (см. табл. 1), причём спектрографы с пространственной фокусировкой рассчитаны для работы во втором порядке дифракции. В будущем предполагается создать действующий образец VLS-спектрографа.

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

1. Pirozhkov A.S., Kando M., Esirkepov T.Zh., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 135004 (2012).
2. Kando M., Pirozhkov A.S., Kawase K., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 235003 (2009).
3. Вишняков Е.А., Шатохин А.Н., Рагозин Е.Н. *Квантовая электроника*, **45** (4), 371 (2015).
4. *Conf. Program and Book of Abstracts, 15th Intern. Conf. on X-Ray Lasers 2016* (Nara, Japan, 2016, p. 74).
5. Rowland H.A. *Phil. Mag. Ser.*, **5**, 13 (84), 469 (1882).
6. Samson J.A.R. *Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy* (New York: Wiley, 1967).

7. Harada T., Kita T. *Appl. Opt.*, **19** (23), 3987 (1980).
8. Kita T., Harada T., Nakano N., Kuroda H. *Appl. Opt.*, **22** (4), 512 (1983).
9. Kita T., Harada T. *Appl. Opt.*, **31** (10), 1399 (1992).
10. Harada T., Sakuma H., Takahashi K., Watanabe T., Hara H., Kita T. *Appl. Opt.*, **37** (28), 6803 (1998).
11. Harada T., Moriyama S., Kita T. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **14**, Suppl. 14-1, 175 (1975).
12. Герасимов Ф.М., Яковлев Э.А., Пейсахсон И.В., Кошелев Б.В. *Оптика и спектроскопия*, **28** (4), 790 (1970).
13. Dunn J., Magee E.W., Shepherd R., et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 10E314 (2008).
14. Hettrick M.C., Bowyer S., Malina R.F., Martin C., Mrowka S. *Appl. Opt.*, **24** (12), 1737 (1985).
15. Hettrick M.C., Underwood J.H., Watson P.J., Eckart M.J. *Appl. Opt.*, **27** (2), 200 (1988).
16. Hettrick M.C. *Photonics*, **3** (1), 3 (2016).
17. Namioka T. *J. Opt. Soc. Am.*, **49** (5) 446 (1959).
18. <http://www.esrf.eu/Instrumentation/software/data-analysis/xop2.3>.
19. Колачевский Н.Н., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *Квантовая электроника*, **30** (5), 428 (2000).
20. Вишняков Е.А., Каменец Ф.Ф., Кондратенко В.В. и др. *Квантовая электроника*, **42** (2), 143 (2012).
21. Вишняков Е.А., Медников К.Н., Перцов А.А. и др. *Квантовая электроника*, **39** (5), 474 (2009).
22. Ragozin E.N., Mednikov K.N., Pertsov A.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7360**, 73600N-1-12 (2009).
23. Вишняков Е.А., Воронов Д.Л., Гулликсон Э.М. и др. *Квантовая электроника*, **43** (7), 666 (2013).
24. Зайдель А.Н., Шрейдер Е.Я. *Вакуумная спектроскопия и её применение* (М.: Наука, 1976).