

Компактный спектрограф на основе VLS-решетки для диапазона 3–20 nm

© С.С. Морозов¹, М.Ю. Знаменский², С.А. Гарахин¹, М.В. Зорина¹, Д.Г. Реунов¹, Б.А. Уласевич¹, Н.И. Чхало¹

¹ Институт физики микроструктур РАН,
603087 Нижний Новгород, Россия

² НПО „Государственный институт прикладной оптики“,
420075 Казань, Россия
e-mail: morozov_sv@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 28 мая 2025 г.

В окончательной редакции 28 мая 2025 г.

Принято к публикации 28 мая 2025 г.

Разработан компактный спектрограф для мягкого рентгеновского диапазона на основе дифракционной решетки с переменной частотой штрихов (Variable Line Spacing или VLS), работающей в первом внутреннем порядке дифракции. Конструкция включает ряд инновационных решений, позволяющих добиться уменьшения габаритов спектрографа для большей мобильности, а также увеличения светосилы. Основные оптические элементы собраны на едином основании, что исключает рассогласование оптической схемы внутри спектрографа. В качестве детектора использована коммерческая КМОП-матрица GSENSE2020BSI 13.3×13.3 mm с размером пикселя $6.5 \mu\text{m}$ и высокой квантовой эффективностью регистрации в мягком рентгеновском диапазоне. В оптической схеме спектрографа присутствует фокусирующее зеркало с двухслойным отражающим покрытием Cr/C, что позволяет увеличить светосилу спектрографа. Проведены измерения дифракционной эффективности решетки в первом внутреннем порядке, которые совместно с расчетной зависимостью разрешающей способности от длины волны говорят о достаточно высокой четкости спектрального изображения источника. Приведены рентгенооптическая схема спектрографа, расчетные рентгенооптические характеристики, 3D-изображение и фото спектрографа.

Ключевые слова: спектрограф, VLS-решетка, Cr/C-двухслойные зеркала, мягкое рентгеновское излучение, экстремальное ультрафиолетовое излучение.

DOI: 10.61011/JTF.2025.10.61341.119-25

Введение

Компактный спектрограф высокого разрешения позволяет решать широкий круг научных задач, связанных со спектрометрией в мягком рентгеновском (МР) и экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазонах длин волн как в лабораториях, так и на установках класса Мега-сайнс. Наиболее широким классом задач, решаемых с помощью таких приборов, является диагностика плазмы в части измерения спектров излучения из плазмы, получаемой как при лазерном, так и электрическом пробое [1–5]. Также такой класс приборов может применяться в том числе и на синхротронах для анализа неупругих процессов при взаимодействии рентгеновского излучения с веществом [6]. В этом случае, например, для изучения процессов, связанных с возбуждением фононов, при этом энергетическое разрешение должно быть на уровне 0.01 eV, для рассеяния на магнонах — 0.1 eV, для межзонных переходов — 1 eV и для плазмонов — 10 eV. В окрестности 100 eV соответствующее спектральное разрешение прибора $\Delta\lambda/\lambda$ лежит в диапазоне 10^{-4} – 10^{-1} . Для спектроскопии плазмы, где требуется надежно идентифицировать линии ионов различной кратности ионизации или определить материал иона, достаточно разрешения на уровне 10^{-3} [7–9].

В длинноволновой части МР и ЭУФ диапазонах таким разрешением обладают только приборы на основе дифракционных решеток [10–12], однако классические схемы со сферической решеткой Роуленда [13] или с плоской решеткой [14] не обеспечивают плоского дисперсионного поля, и хороши только в качестве крупногабаритных спектрометров-монохроматоров.

Принципиально новые возможности предоставляет использование сферических решеток с переменным шагом штрихов, так называемых VLS-решеток. Оптические элементы такого типа используются в малогабаритных приборах, поскольку фокусирующие свойства вогнутых VLS-решеток позволяют уменьшить количество оптических элементов в схеме, сохраняя при этом достаточно высокое разрешение. Первые работы по созданию спектрографов подобного типа были опубликованы Т. Харадой [15,16]. В них использовалась сферическая VLS-решетка с центральной частотой штрихов $p_0 = 1200 \text{ mm}^{-1}$ и радиусом кривизны $R = 5649 \text{ mm}$. Более современные варианты схем спектрографов на основе VLS-решетки описаны, например, в [17,18]. В настоящее время наиболее компактный спектрограф высокого разрешения со сменной VLS-решеткой создан в ФИАН [19]. Авторам удалось добиться квазиплоской

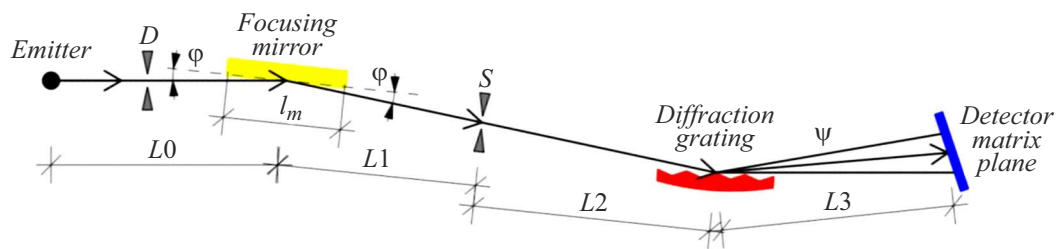


Рис. 1. Оптическая схема спектрографа: D — диафрагма, φ — скользкий угол падения излучения на зеркало, l_m — длина фокусирующего зеркала, $L0$ — расстояние от источника излучения до зеркала, $L1$ — расстояние фокусировки зеркала, S — щель, $L2$ — расстояние от щели до дифракционной решетки, $L3$ — расстояние от решетки до детектора, ψ — угол дифракции.

фокальной кривой, что позволяет получать высокую разрешающую способность порядка 10^3 .

В настоящей работе описывается оптическая схема, характеристики и конструкция разработанного в настоящее время в ИФМ РАН спектрографа. Особенности данного спектрографа по сравнению с одним из наиболее совершенных представителей такого класса приборов [19] являются:

- единая платформа, на которой собраны все рентгенооптические элементы, и малые габаритные размеры, что позволяет встроить его внутрь прибора, например, установить в рефлектометр, описанный в [14], для анализа спектра, отраженного от образца излучения;

- наличие на входе фокусирующего зеркала, кратно увеличивающего приемную апертуру спектрографа, при этом условие фокусировки излучения на входной щели спектрографа сохраняется в широком диапазоне расстояний до источника за счет изменения угла падения излучения на зеркало;

- для автономного использования спектрограф собран внутри одной вакуумной камеры, с фланцем с проходным диаметром 100 mm для откачки турбомолекулярным насосом, что крайне актуально при исследовании ионов тяжелых газов, где поглощение в газе может кардинально повлиять на интенсивность линий и форму спектра в целом [20].

1. Оптическая схема и расчетные характеристики спектрографа

Принципиальная схема спектрографа представлена на рис. 1. Оптическая схема прибора включает антирассеивающую диафрагму D , предназначенную для ограничения геометрических размеров светового потока, прошедшего далее в прибор; сферическое фокусирующее зеркало FM, строящее изображение источника (или настроенное на какую-то область протяженного источника) на входной щели; входную щель прибора S , монохроматические изображения которой с помощью дифракционной решетки строятся в фокальной плоскости; вогнутую сферическую VLS-дифракционную решетку, разлагающую падающее на нее полихроматическое

излучение на спектральные составляющие, и матричный детектор MD.

Работа прибора происходит следующим образом. Фокусирующее зеркало собирает свет из источника на щели. Так как используется зеркало полного внешнего отражения в скользкой геометрии, оно отражает излучение с коротковолновой границей, определяемым углом полного внешнего отражения [21], причем при фиксированном радиусе кривизны в соответствии с условием фокусировки сферического зеркала чем дальше источник от зеркала, тем больше скользкий угол, и наоборот. Фокусировка позволяет существенно увеличить долю мощности излучения источника, используемую при снятии спектра, что позитивно влияет на точность измерений.

Далее прошедший через щель расходящийся пучок падает на дифракционную решетку под центральным углом 6° . В данном случае значение угла выбрано из условий планируемого эксперимента по изучению эмиссионных характеристик разрабатываемого лазерно-плазменного источника для литографа на длину волны 11.2 nm [22]. Благодаря оптическим свойствам решетки можно получить спектральное изображение источника с относительно высоким разрешением на плоском детекторе MD без взаимного перемещения оптических элементов в процессе работы. Изображение источника можно получить и без использования VLS-решетки, но наличие правильно подобранной переменной частоты штрихов положительно сказывается на плоскостности спектральной фокальной кривой и снижает абберационные искажения, что повышает разрешение прибора [18]. Важной особенностью спектрографа на основе VLS-решетки является необходимость сохранения постоянного угла падения на решетку, однако при изменении расстояния до источника $L0$ и неизменном угле наклона фокусирующего зеркала FM нарушается фокусировка на щели. Таким образом, для сохранения оптимального фокуса на щели и постоянного угла падения на дифракционную решетку зеркало устанавливается на четырехкоординатный механический столик, обеспечивающий подстройку угла падения под расстояние $L0$. При этом необходимо обеспечить условие фокусировки отраженного под новым углом рентгеновского пучка

на щели S , что достигается за счет поворота всего прибора вокруг оси фокусирующего зеркала. Для этого спектрограф, как целое, устанавливается на соответствующей криволинейной направляющей, а к исследуемому источнику присоединяется с помощью сильфона. Сильфон и направляющая на рис. 1 не показаны. Детектор MD расположен под углом, обеспечивающим наилучшие условия наблюдения спектрального изображения источника.

Использование VLS-решетки, несмотря на очевидные преимущества, также предполагает ряд трудностей. В частности, поскольку точное соблюдение условий фокусировки возможно только на одной длине волны, фокальная кривая может существенно отличаться от прямой, задающей плоскость детектора.

Известно, что в случае VLS-решеток классическим подходом является разложение частоты штрихов в ряд по степеням y :

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

где y — направление, перпендикулярное штрихам решетки, p_0 — обозначает частоту штрихов в центре апертуры решетки, p_1 — определяет спектральную фокальную кривую, p_2 и p_3 — служат для компенсации аберрации меридиональной комы и сферической аберрации соответственно [18].

Далее вводится функция оптической длины пути

$$F = l_1 + l_2 + m \lambda n(y), \quad (2)$$

где l_1, l_2 — расстояния от источника до центра решетки и от решетки до изображения соответственно, m — порядок дифракции. Раскладывая F в ряд по y и применяя принцип Ферма, можно получить следующие соотношения для $p_0 \dots p_3$:

$$\cos \varphi - \cos \psi = m \lambda p_0, \quad (3)$$

$$\frac{\sin^2 \varphi}{r} - \frac{\sin \varphi}{R} + \frac{\sin^2 \psi}{r_h'} - \frac{\sin \psi}{R} = m \lambda p_1, \quad (4)$$

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\cos \varphi}{r} \left(\frac{\sin^2 \varphi}{r} - \frac{\sin \varphi}{R} \right) - \frac{\cos \psi}{r_h'} \left(\frac{\sin^2 \psi}{r_h'} - \frac{\sin \psi}{R} \right) \right] = -m \lambda p_2, \quad (5)$$

$$2 \left[\left(\frac{\cos \varphi}{r} \right)^2 \left(\frac{\sin^2 \varphi}{r} - \frac{\sin \varphi}{R} \right) + \left(\frac{\cos \psi}{r_h'} \right)^2 \left(\frac{\sin^2 \psi}{r_h'} - \frac{\sin \psi}{R} \right) \right] - \frac{1}{2r} \left(\frac{\sin^2 \varphi}{r} - \frac{\sin \varphi}{R} \right)^2 - \frac{1}{2r_h'} \left(\frac{\sin^2 \psi}{r_h'} - \frac{\sin \psi}{R} \right)^2 = m \lambda p_3. \quad (6)$$

В приведенных соотношениях r — расстояние от источника до решетки, r_h' — расстояние до фокуса, R —

радиус кривизны решетки, ψ — угол дифракции, φ — скользкий угол.

Коэффициенты $p_1 \dots p_3$ вычисляются из соотношений (4)–(6) путем задания условия фокусировки определенной длины волны λ на определенном расстоянии r_h' . Значение кривизны решетки и расстояние до источника расходящегося пучка (щели) являлись, в нашем случае, параметрами оптимизации.

Таким образом, оптимизируя параметры решетки и расстояния между входной щелью и детектором, можно добиться оптимального фокуса на конкретной длине волны. Далее, поскольку спектральная ширина щели (ширины спектрального изображения щели) напрямую связана с разрешающей способностью через соотношение

$$R_c = \frac{\lambda}{S \frac{d\lambda}{d\lambda}}, \quad (7)$$

рассчитав спектральную ширину щели S (в нашем случае — спектральную ширину точечного источника) в плоскости детектора и линейную дисперсию $\frac{d\lambda}{d\lambda}$, можно судить о разрешении прибора в указанном диапазоне длин волн. Важно отметить, что значения дисперсии и спектральной ширины щели так же зависят от расположения плоскости детектора относительно фокальной кривой. Оптимизация данного параметра проводилась из соображений приближения спектральной ширины щели к размеру пикселя матрицы детектора ($6.5 \mu\text{m}$) в как можно более широком диапазоне длин волн.

Изначально, преимущественно из соображений высокой эффективности дифракционной решетки в рабочем диапазоне длин волн и компактности, были выбраны параметры $\varphi = 6^\circ$, $r_h' = r = 70 \text{ mm}$ и $p_0 = 1000$. В результате оптимизации на диапазон 3–20 nm были получены следующие параметры решетки: $R = 712.5 \text{ mm}$, частота штрихов соответствует распределению (рис. 2, а, соотношение (8)):

$$p(y) = 1000 + 20.2991 \cdot y + 0.3963 \cdot y^2 + 0.0079 \cdot y^3. \quad (8)$$

Подобные распределения штрихов технологически возможно получить, например, методом оптической голографии в ГИПО (г. Казань).

На рис. 2, б изображена спектральная фокальная кривая. Видно, что идеальная фокусировка достигается на двух длинах волн — в районе 80 и 130 Å. На остальных длинах волн наблюдается „размытие“ спектрального изображения точечного источника.

Взаимное расположение плоскости детектора и фокальной кривой в реальной оптической схеме представлено на рис. 3.

На рис. 3 центр дифракционной решетки располагается в начале координат. Расчет предполагает, что полная высота изображения точечного источника в диапазоне 3–20 nm составит порядка $S_0 = 6.7 \text{ mm}$ в плоскости детектора. Это означает, что размер изображения источника укладывается в размер матрицы, который равен 13.3 mm по высоте.

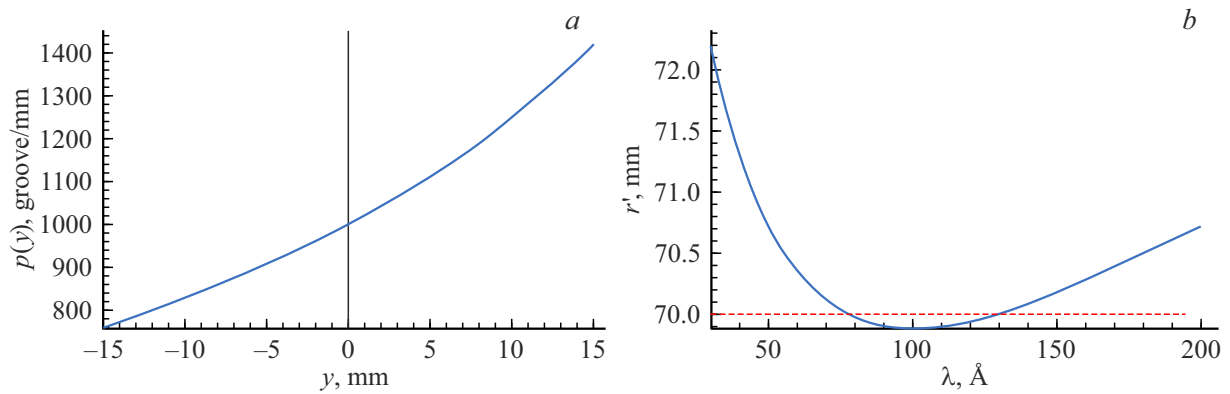


Рис. 2. *a* — распределение плотности штрихов вдоль решетки, *b* — спектральная фокальная кривая. Штрихованной линией помечено фокусное расстояние 70 mm.

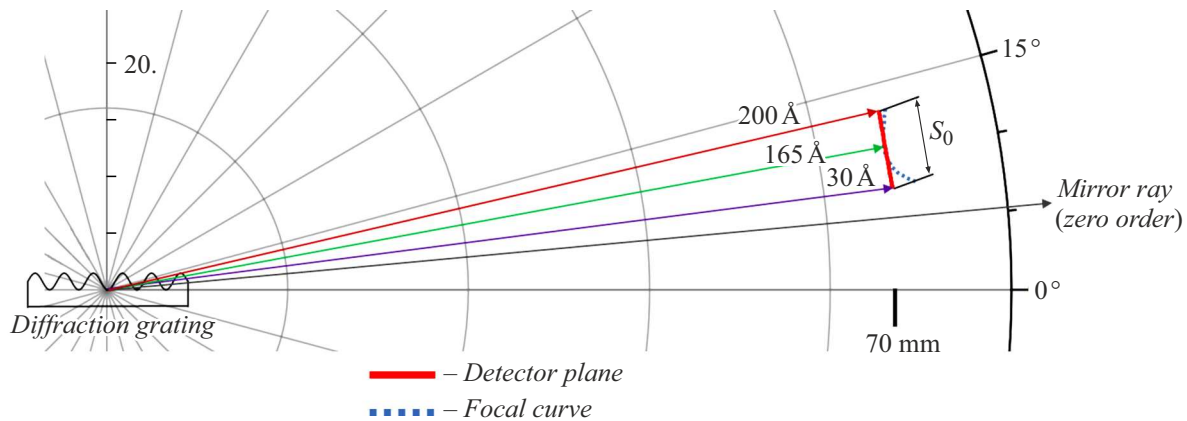


Рис. 3. Сравнение расположения фокальной кривой и плоскости детектора в пространстве.

Зная зависимость ширины изображения точечного источника от длины волны наблюдаемого излучения, и предварительно рассчитав линейную дисперсию в плоскости детектора, можно получить зависимость разрешающей способности прибора от длины волны.

Наиболее полной спектральной характеристикой спектрографов считается разрешающая способность R_c , связанная с обратной линейной дисперсией и спектральной шириной щели S через соотношение (7).

Следует отметить, что при расчете разрешающей способности по соотношению (7) учитывается только геометрическая расфокусировка. Существенным ограничением максимальной разрешающей способности в данном случае является конечный размер пикселя детектора, равный $6.5 \mu\text{m}$. Красная кривая на приведенном ниже графике $R(\lambda)$ обозначает это ограничение. Красную кривую следует считать приоритетной в диапазонах, где синяя кривая лежит выше красной. Расчет влияния аберраций на разрешение подобных спектральных приборов приведен, например, в [23].

Зависимость разрешающей способности от длины волны приведена на рис. 4.

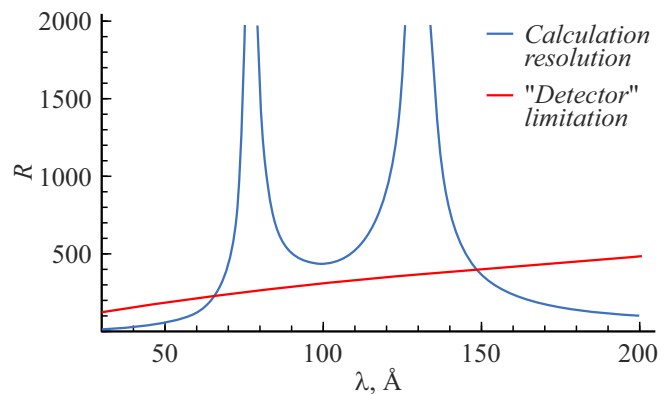


Рис. 4. Синяя кривая соответствует разрешающей способности, рассчитанной с учетом геометрической расфокусировки. Красная кривая отображает ограничение разрешающей способности, связанное с размером пикселя детектора.

В соответствии с приведенной выше зависимостью разрешающей способности от длины волны излучения в приближении точечного источника, спектральное разрешение для излучения вблизи длины волны $\lambda = 100 \text{ Å}$,

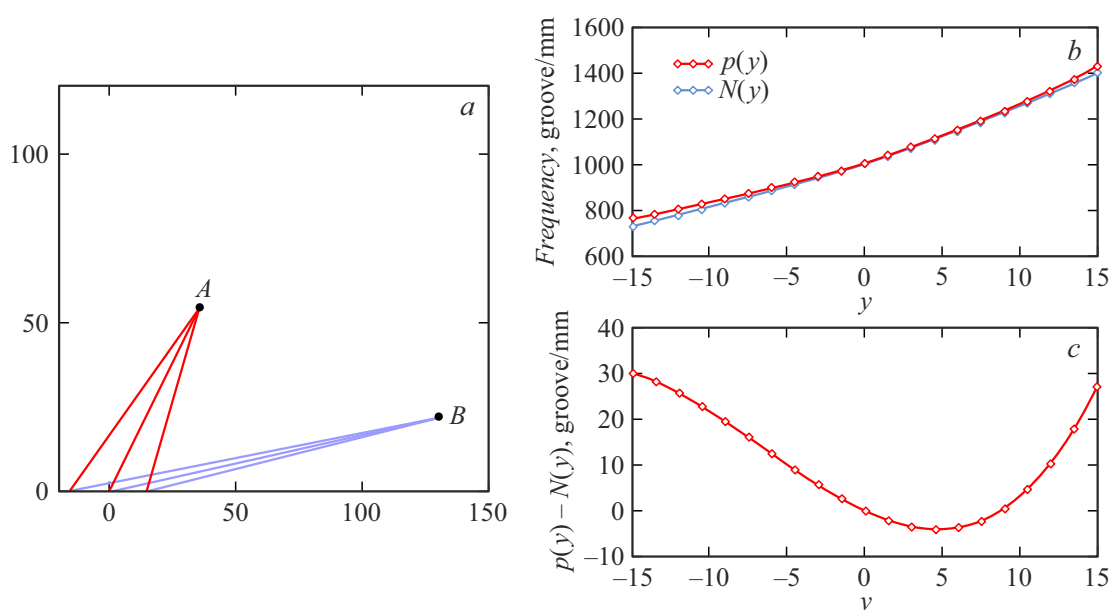


Рис. 5. *a* — схема записи решетки (расположение источников), *b* — сравнение целевой частоты штрихов и ближайшей достижимой, *c* — разница целевой частоты штрихов и ближайшей достижимой.

составит величину порядка $0.16 \text{ \AA}$ при использовании матрицы с размером пикселя $6.5 \mu\text{m}$.

Во всем рабочем диапазоне длин волн разрешающая способность $R(\lambda)$ не превышает 400.

2. Изготовление VLS-решетки и основные параметры элементов спектрографа

Решетка с указанным выше распределением была сформирована голографическим методом в ГИПО г. Казань. Схема записи решетки с основными геометрическими размерами приведена на рис. 5, *a*. Формирование штрихов достигается за счет интерференции двух когерентных сферических волн точечных источников, получаемых в результате фокусировки лазерного излучения на малых апертурах *A* и *B*. Длина волны лазера $\lambda = 441.6 \text{ nm}$. Расчетная частота штрихов несколько отличается от целевой (рис. 5, *b, c*), что связано с особенностями голографического метода нанесения решеток.

Измерения дифракционной эффективности решетки проводились на рефлектометре на основе спектрометра-монохроматора РСМ-500 по классической схеме, в которой излучение падает на решетку, расположенную в центре измерительной камеры, под определенным скольльзящим углом (в данном случае — 6°). Дифрагированное излучение улавливается детектором, который закреплен на плече гониометра. Детектор перемещается на фиксированном радиусе по углу вокруг решетки, угол, приведенный на оси абсцисс (рис. 6) — угол детектора относительно зондового пучка. Таким образом, значение 12° на рис. 6 соответствует зеркальному порядку.

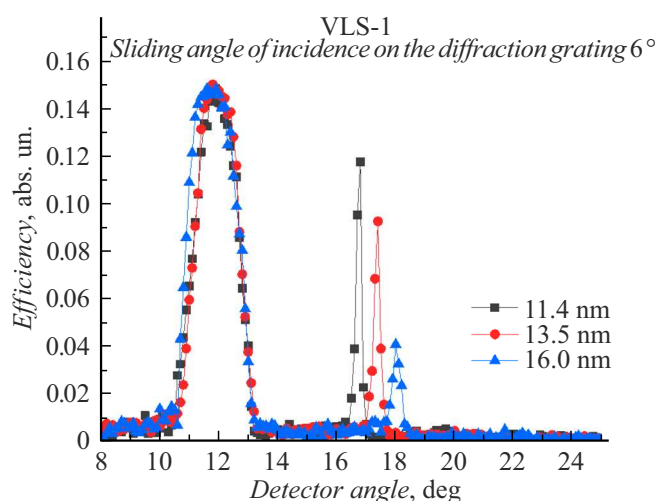


Рис. 6. Дифракционная эффективность VLS-решетки.

Из рис. 6 следует, что дифракционная эффективность исходной решетки с Al-покрытием в рабочем порядке составляет от 4% до порядка 12% в диапазоне 11.4–16 nm. Таким образом, эффективность, особенно вдали от центра диапазона ($\lambda < 6 \text{ nm}$ и $16\text{--}20 \text{ nm}$) невысока, в том числе из-за значительной шероховатости, составляющей, согласно измерениям на атомно-силовом микроскопе, порядка 5–7 nm. Однако в последующем мы надеемся заметно, в разы, повысить эффективность решетки: во-первых, за счет ионной полировки, резко уменьшающей шероховатость штрихов [24]; во-вторых, за счет нанесения высокоотражающего двухслойного Cr/C покрытия, которое существенно превосходит по

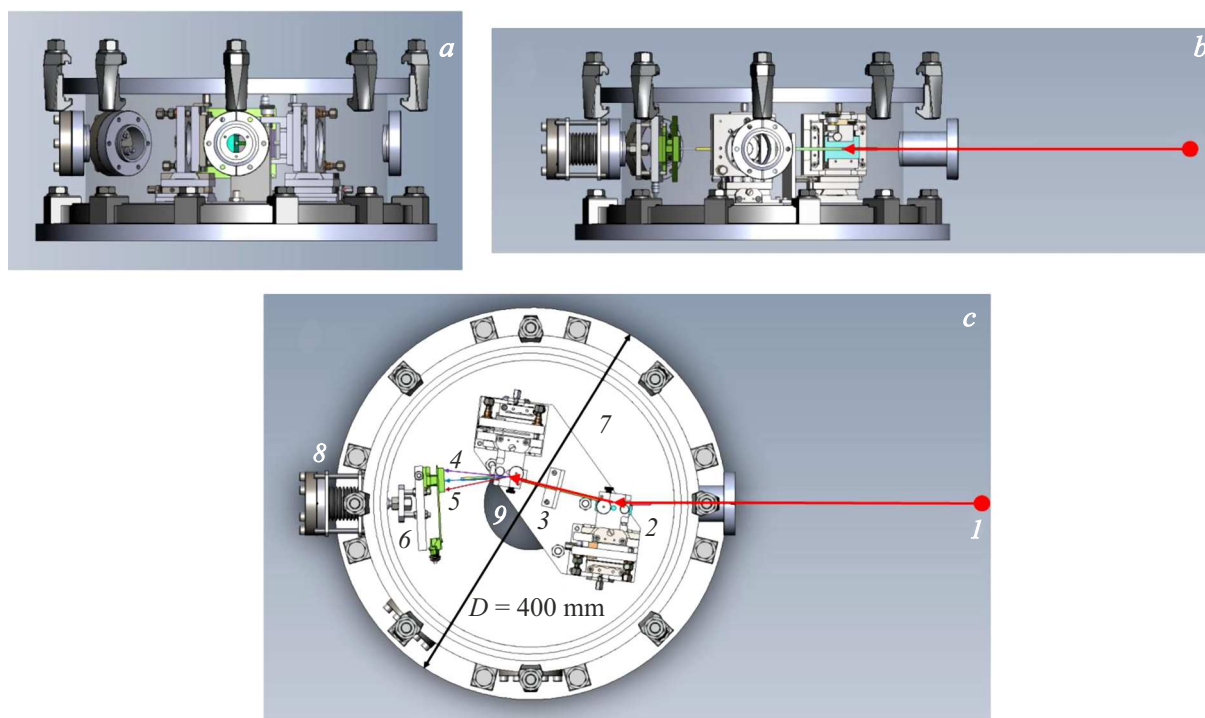


Рис. 7. Модель спектрографа в сборе; *a* — вид с позиции источника, *b* — вид сбоку, *c* — вид сверху: 1 — предполагаемое положение источника, 2 — фокусирующее зеркало, закрепленное на столике с подвижками, 3 — щель, 4 — VLS-решетка, закрепленная на столике с подвижками, 5 — КМОП-матрица на плате, 6 — элемент охлаждения КМОП-матрицы, 7 — камера спектрографа, 8 — сильфонный узел для жидкостного охлаждения матрицы, 9 — расположение отверстия для откачки, красная стрелка обозначает направление рентгеновского излучения. Не приведены: сильфон для пристыковки спектрографа к исследуемому источнику, криволинейная направляющая, на которую устанавливается прибор, и турбомолекулярный насос, установленный в дне прибора.

коэффициенту отражения в этом диапазоне алюминий, используемый в исследованной решетке.

В качестве собирающего зеркала в схеме спектрографа использована подложка из плавленого кварца со сферической кривизной с габаритными размерами $30 \times 30 \times 10$ mm и радиусом кривизны $R = 712.5$ mm. В качестве отражающего покрытия, как и в случае дифракционной решетки, использовано двухслойное Si/C -покрытие, продемонстрировавшее свое превосходство в этом диапазоне длин волн над всеми другими в том числе Au слоями [25].

В настоящее время зеркало изготовлено. Актуальный радиус кривизны составил 711.3 mm, что соответствует углу падения 10° при номинальных расстояниях от источника до зеркала 500 mm и от зеркала до щели — 70 mm. Шероховатость в диапазоне пространственных частот $0.025\text{--}65\text{ }\mu\text{m}^{-1}$ составила около 1 nm, среднеквадратическое отклонение (СКО) формы поверхности от ближайшей сферы составило 7 nm. Эти параметры указывают на хорошее качество изготовленной подложки, которая после нанесения отражающего покрытия обеспечит эффективную фокусировку излучения на щели.

В качестве детектора использована КМОП матрица GSENSE2020BSI с разрешением 4 MP и размером

пикселя $6.5\text{ }\mu\text{m}$. Размер фоточувствительной зоны — 13.3×13.3 mm (2048×2048 пикселей), динамический диапазон порядка 90 dB. Шум считывания данной матрицы составляет не более 1.6 e^- . Максимальная частота кадров составляет 74 кадра в секунду. Детектор обладает высокой квантовой эффективностью ($\geq 80\%$) в диапазоне 3–20 nm (данные с сайта производителя [26]).

3. Изготовление спектрографа

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, была разработана конструкторская документация на спектрограф. На рис. 7 показана 3D-модель спектрографа с убранными стенкой вакуумной камеры (рис. 7, *a, b*) и верхнем фланцем (рис. 7, *c*).

Зеркало и решетка закреплены на столиках с четырьмя степенями свободы, что позволяет настроить оптическую схему на конкретный источник. В данном спектрографе используется КМОП-матрица с комбинированным охлаждением: Пельтье и водяное охлаждение тыльной стороны Пельтье. Матрица устанавливается на регулируемом сильфоне узле, что позволит провести ее настройку как по расстоянию от дифракционной решетки, так и по наклону к плоскости по отношению

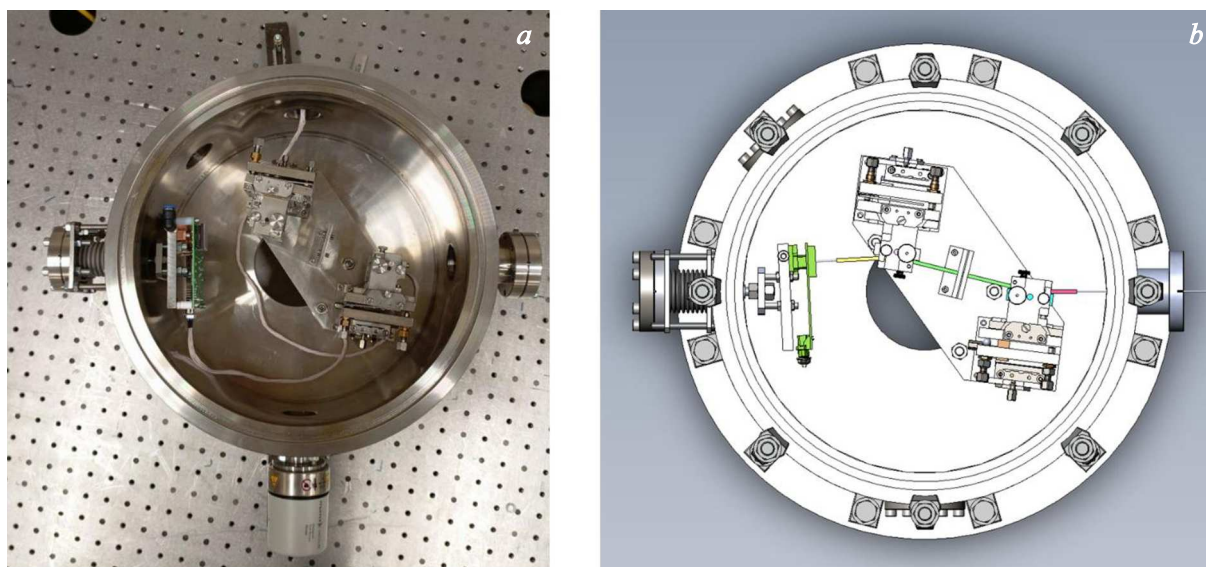


Рис. 8. Слева — фотография спектрографа в сборе, справа — вид сверху сборочной модели.

к нулевому пучку, на рентгеновском пучке, тем самым обеспечив максимальную разрешающую способность. Диаметр камеры составляет 400 mm, что делает данный прибор достаточно компактным.

На данный момент осуществлена подготовка всех узлов спектрографа и произведена его сборка (рис. 8).

В настоящее время запланирован ряд экспериментов по наблюдению спектров лазерно-плазменных источников, используемых в ИФМ РАН, при помощи спектрографа.

Заключение

В работе описывается относительно компактный светосильный высокоразрешающий спектрограф на базе VLS-решетки и матричного детектора. Подробно описан процесс моделирования работы оптических элементов, расчет спектральных характеристик и построения компактного спектрографа для диапазона 3–20 nm. Полученные в результате расчета спектральные характеристики спектрографа несколько ниже крупногабаритных стационарных решеточных спектрометров на основе схем Роуланда, Черни-Тюрнера и Харады [13,14,18]. Однако малые габаритные размеры, общая для всех элементов камера спектрографа, приемное фокусирующее зеркало и возможность эффективной работы с источниками на разных расстояниях от спектрографа, а также наличие автономной откачки и подстройки фокальной плоскости детектора *in situ* делают этот прибор крайне востребованным для рентгеновской спектроскопии плазмы и твердого тела.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках гос. задания № FFUF-2024-0022 в части конструкторской разработки и гранта РФФИ № 21-72-20108-П в части изготовления и настройки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Fiedorowicz, A. Bartnik, M. Szczurek, H. Daido, N. Sakaya, V. Kmetik, Y. Kato, M. Suzuki, M. Matsumura, J. Tajima, T. Nakayama, Th. Wilhein. *Opt. Commun.*, **163** (1–3), 103 (1999). DOI: 10.1016/S0030-4018(99)00100-5
- [2] F. Gilleron, M. Poirier, T. Blenski, M. Schmidt, T. Ceccotti. *J. Appl. Phys.*, **94** (3), 2086 (2003). DOI: 10.1063/1.1587264
- [3] A. Bartnik, P. Wachulak, T. Fok, Ł. Węgrzynski, H. Fiedorowicz, T. Pisarczyk, W. Skrzeczanowski, T. Chodukowski, Z. Kalinowska, R. Dudzak, J. Dostal, E. Krousky, J. Skala, J. Ullschmied, J. Hrebicek, T. Medrik. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **58**, 014009 (2016)
- [4] A. Bartnik, H. Fiedorowicz, R. Jarocki, J. Kostecki, M. Szczurek, P.W. Wachulak. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **647** (1), 125 (2011). DOI: 10.1016/j.nima.2011.05.033
- [5] N.I. Chkhalo, S.A. Garakhin, A.Ya. Lopatin, A.N. Nechay, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, N.N. Tsybin, S.Yu. Zuev. *AIP Advances*, **8** (10), 105003 (2018). DOI: 10.1063/1.5048288
- [6] A.I. Chumakov, A. Barla, R. Rüffer, J. Metge, H.F. Grünsteudel, H. Grünsteudel, J. Plessel, H. Winkelmann, M.M. Abd-Elmeguid. *Phys. Rev. B*, **58** (1), 254 (1998).

- [7] T. Fujimoto, S.A. Kazantsev. Plasma Phys. Controlled Fusion, **39** (9), 1267 (1997).
- [8] S. Alexiou, A. Calisti, P. Gauthier, L. Klein, E. Dalimier, R.W. Lee, R. Stamm, B. Talin. J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, **58** (4–6), 399 (1997).
- [9] V.A. Boiko, A.Ya. Faenov, S.A. Pikuz. J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, **19** (1), 11 (1978).
- [10] M. Boots, D. Muir, A. Moewes. J. Synchrotron Radiation, **20** (2), 272 (2013).
- [11] D.L. Voronov, R. Cambie, R.M. Feshchenko, E.M. Gullikson, H.A. Padmore, A.V. Vinogradov, V.V. Yashchuk. Proc. SPIE 6705, Advances in X-Ray/EUV Optics and Components II, 67050E (20 September 2007). DOI: 10.1117/12.732658
- [12] I. Sakellou, J.R. Peterson, T. Tamura, F.B.S. Paerels, J.S. Kaastra, E. Belsole, H. Böhringer, G. Branduardi-Raymont, C. Ferrigno, J.W. den Herder, J. Kennea, R.F. Mushotzky, W.T. Vestrand, D.M. Worrall. Astronomy Astrophys., **391** (3), 903 (2002).
- [13] С.А. Гарахин, Е.С. Антюшин, М.М. Барышева, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Р.С. Плешков, Р.М. Смертин, Н.И. Чхало. ЖТФ, **94** (8), 1250 (2024).
- [14] S.A. Garakhin, I.G. Zabrodin, S.E. Zuev, I.A. Kas'kov, A.Ya. Lopatin, A.N. Nechay, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, N.N. Tsybin, N.I. Chkhalo, M.V. Svechnikov. Quant. Electron., **47** (4), 385 (2017).
- [15] T. Harada, M. Itou, T. Kita. *A Grazing Incidence Monochromator With A Varied-Space Plane Grating For Synchrotron Radiation*, Proc. SPIE 0503, Application, Theory, and Fabrication of Periodic Structures, Diffraction Gratings, and Moire Phenomena II (12 December 1984). DOI: 10.1117/12.944821
- [16] T. Kita, T. Harada, N. Nakano, H. Kuroda. Appl. Opt., **22**, 512 (1983).
- [17] А.О. Колесников, Е.А. Вишняков, А.Н. Шатохин, Е.Н. Рагозин. Quant. Electron., **49** (11), 1054 (2019).
- [18] Е.А. Вишняков, А.О. Колесников, Е.Н. Рагозин, А.Н. Шатохин. Квантовая электроника, **46** (10), 953 (2016).
- [19] М.В. Зорина, С.А. Гарахин, А.О. Колесников, Е.Н. Рагозин, А.А. Соловьев, А.Н. Шатохин. Квантовая электроника, **54** (1), 58 (2024). [M.V. Zorina, S.A. Garakhin, A.O. Kolesnikov, E.N. Ragozin, A.A. Solov'ev, A.N. Shatokhin. Bull. Lebedev Phys. Institute, **51** (4), S337 (2024). DOI: 10.3103/S1068335624601304]
- [20] J. Beckers, T. van de Ven, R. van der Horst, D. Astakhov, V. Banine. Appl. Sci., **9**, 2827 (2019). DOI: 10.3390/app9142827
- [21] А.В. Виноградов, И.А. Брытов, А.Я. Грудский, М.Т. Коган, И.В. Кожевников, В.А. Слемзие. *Зеркальная рентгеновская оптика* (Машиностроение, Л., 1989)
- [22] N.I. Chkhalo. Russ Microelectron, **53**, 397 (2024). DOI: 10.1134/S1063739724600511
- [23] Е.А. Вишняков, А.О. Колесников, Е.Н. Рагозин, А.Н. Шатохин. Опт. и спектр., **125** (5), 687 (2018). [E.A. Vishnyakov, A.O. Kolesnikov, E.N. Ragozin, A.N. Shatokhin. Opt. Spectr., **125** (5), 783 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X18110346]
- [24] С.А. Гарахин, М.В. Зорина, С.Ю. Зуев, М.С. Михаленко, А.Е. Пестов, Р.А. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало. ЖТФ, **90** (11), 1864 (2020). [S.A. Garakhin, M.V. Zorina, S.Yu. Zuev, M.S. Mikhaylenko, A.E. Pestov, V.N. Pleshkov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko. Tech. Phys., **65**, 1780 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1063784220110110>]
- [25] N.I. Chkhalo, P.K. Gaikovich, N.N. Salashchenko, P.A. Yunin, S.Yu. Zuev. Thin Solid Films, **598**, 156 (2016).
- [26] Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.gpixel.com/en/pro_details_1194.html