

Спектрограф на область длин волн 10–60 Å

А. О. Колесников¹, М. Д. Логачев¹, Е. А. Вишняков¹, А. Н. Шатохин¹, Е. Н. Рагозин¹

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН), 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 18 июня 2026 г.

После переработки 6 июля 2026 г.

Принята к публикации 6 июля 2026 г.

Создан и испытан дифракционный спектрограф для мягкого рентгеновского диапазона с углом скользкого падения 1.5° , совместимый с современными ПЗС- и КМОП-детекторами. Разложение в спектр осуществляет высокочастотная сферическая VLS-решетка, формирующая плоское поле в области длин волн 10–60 Å. Спектрограф испытан при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов, возбуждаемых в лазерной плазме тефлона, алюминия и титана.

DOI: 10.7868/S3034576626080122

1. Введение. Диапазон мягкого рентгеновского излучения с длинами волн короче ~ 60 Å представляет большой интерес для исследований по высокотемпературной плазме и физике высоких плотностей энергии, рентгеновской астрономии Солнца, характеристике лабораторных источников излучения, работ с использованием излучения синхротронов и лазеров на свободных электронах и т.п. Совсем недавно была высказана идея и сформулирована концепция развития проекционной рентгеновской литографии с использованием коротковолнового излучения многозарядных ионов кальция, скандия и титана, лежащего как раз в указанном диапазоне спектра [1, 2].

Создание дифракционного спектрографа на область длин волн короче ~ 60 Å сопряжено с использованием малых ($1\text{--}2^\circ$) углов скользкого падения излучения на решетку. Первым таким спектрографом стал двухметровый роуландовский спектрограф с углом скользкого падения 2° и решеткой с частотой штрихов 600 мм^{-1} , сконструированный Аланом Габриэлем (Alan Gabriel) [3], получивший широкую известность и выпускавшийся фирмой Hilger & Watts. Спектрограф был рассчитан на фотографическую регистрацию спектра на круге Роуленда. Позднее спектрометры и монохроматоры с малыми скользящими углами неоднократно создавались для регистрации излучения лабораторных, синхротронных и астрофизических источников, в том числе в исследованиях по физике высокотемпературной плазмы и физике высоких плотностей энергии. Появление ПЗС-детекторов мягкого рентгеновского излучения с плоской чувствительной поверхностью потребовало разработки спектрографов с плоским полем, идеаль-

но совместимых с такими детекторами. Спектрографы с плоским полем создаются на основе решеток с шагом, меняющимся на поверхности решетки по заданному закону (так называемых VLS-решеток – Varied Line-Space gratings) [4, 5]. Первенство в разработке и применении рентгеновских VLS-решеток принадлежит Татсуо Хараде, который создал программируемый гравировальный станок с широкими возможностями, способный изготавливать классические и VLS-решетки размером 300×200 мм с частотой линий до 10000 мм^{-1} [6]. Харада разработал спектрограф с плоским полем на область 5–25 нм, используя VLS-решетку с радиусом 5649 мм и центральной частотой 1200 мм^{-1} [7]. Позднее в Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса (США) был создан спектрограф с плоским полем с решеткой радиусом 44.3 м и центральной частотой 2400 мм^{-1} , которая устанавливалась под углом скольжения 2° [8] при общей длине прибора ~ 3 м. Спектрограф использовался для регистрации спектров майларовой пленки и аэрогеля кварца в диапазоне 15.5–23 Å, возбуждаемых в лазерной плазме излучением с длиной волны 527 нм, длительностью импульса 150–300 пс и энергией до 5 Дж, а также с длительностью импульса 500 пс и энергией до 100 Дж. В работах японских авторов [9, 10] были созданы компактные спектрографы с расстояниями щель–решетка 237 мм и решетка–детектор 235 мм и углом скользкого падения 1.35° . Были зарегистрированы К-линии кислорода (23.6 Å), магния (9.89 Å) и кремния (7.13 Å) [9]. В работе [10] спектр углеродной мишени, возбуждаемый импульсами длительностью 150 пс с энергией 0.25 Дж, содержал линии H-и He-подобных ионов C VI и C V, причем ширина ре-

¹)e-mail: enragozin@gmail.com

зонансной линии C VI (33.43 Å) соответствовала разрешающей способности 277.

В нашей работе мы сообщаем о создании первого отечественного дифракционного спектрографа с плоским полем в области длин волн 10–60 Å. Прибор совместим с современными ПЗС- и КМОП-детекторами мягкого рентгеновского излучения и испытан при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов в лазерной плазме (мишени: тефлон, алюминий, титан).

2. Схема прибора. На рисунке 1а показана оптическая схема спектрографа. Использовалась сферическая VLS-решетка радиусом 23.55 м с центральной частотой штрихов 3200 мм^{-1} [11]. Частота линий (штрихов) решетки задается полиномом вида

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

с проектными коэффициентами $p_0 = 3200 \text{ мм}^{-1}$, $p_1 = 14.43 \text{ мм}^{-2}$, $p_2 = 4.5 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^{-3}$ и $p_3 = 8.0 \times 10^{-4} \text{ мм}^{-4}$, изменяясь от 2850 мм^{-1} до 3600 мм^{-1} при ширине заштрихованной области 50 мм. Решетка была изготовлена методом интерференционной литографии на длине волны аргонового лазера 488 нм. Расчет оптической литографической схемы (решение обратной задачи интерференционной литографии), обеспечивающей проектное распределение частоты интерференционных полос на поверхности сферы радиусом 23.55 м, был выполнен в ФИАНе. Суперполированные сферические подложки были изготовлены в ООО «СОТВЕКС», Москва. Покрытие заготовок фоторезистом, сборка оптической схемы для интерференционной литографии на длине волны 488 нм, экспонирование, проявление и нанесение на решетки отражающего слоя золота было выполнено в ООО «ХолоГрэйт», г. Всеволожск, Ленинградская область. Оптические измерения (ФИАН), выполненные в автоколлимационном режиме на длине волны 0.53 мкм, выявили отличное соответствие измеренного и проектного распределения частоты линий $p(y)$ [11]. Расстояния щель–решетка и решетка–детектор приблизительно равны и составляют 0.4 м. Скользящий угол падения равен 1.5° . Используется первый внутренний порядок дифракции. На рисунке 1б показан ход фокальной кривой в области плоского поля длиной около 46.5 мм, между углами дифракции 4.8° и 11.3° , соответственно, приблизительно между длинами волн 10 и 60 Å. Наклонные прямые показывают ход центральных лучей сходящихся пучков, идущих от решетки к детектору и отвечающим крайним длинам волн из интересующего нас диапазона 10–60 Å.

Для оценки изображающих свойств спектрографа строились спектральные изображения точечного

источника на разных длинах волн методом численной трассировки лучей. Точечный монохроматический источник при этом помещался в главной плоскости в центре входной щели. На рисунке 2 представлены астигматические спектральные изображения пар точечных источников с близкими длинами волн 12 и 12.024, 20 и 20.02, 40 и 40.04, 56 и 56.06 Å. Вертикальное направление на рис. 2 соответствует направлению дисперсии, тогда как горизонтальное направление на рисунке соответствует высоте астигматических спектральных линий (предполагается, что плоскость дисперсии горизонтальна). Видно, что пары близких длин волн уверенно разрешаются, указывая на теоретическую разрешающую способность не ниже 500 (12 Å) и 1000 (20, 40, и 56 Å). На гистограммах справа от спектральных изображений показаны контуры линий, полученные суммированием по высоте спектральных линий (т.е. в горизонтальном направлении на рис. 2) от +5 до –5 мм. Результирующие ширины линий на гистограммах складываются из меридиональных аберраций решетки и некоторого уширения контуров спектральных линий при суммировании перпендикулярно направлению дисперсии из-за их кривизны.

Использовался ПЗС-детектор на основе матрицы с обратной засветкой с квадратными ячейками размером 13 мкм от компании e2v (с 2017 г. Teledyne e2v). Число ячеек детектора в направлении дисперсии составило 2048, в скрещенном (вертикальном) направлении – 1060. Длина чувствительной области детектора (около 26.6 мм) была меньше длины плоского поля, поэтому детектор мог одновременно регистрировать спектр не во всей области плоского поля. Для целей юстировки детектор и решетка помещались соответственно на прецизионных электромеханических столике-трансляторе и поворотном столике в вакуумном исполнении. В диапазоне от 10 до 50 Å обратная линейная дисперсия изменяется от 0.65 до 1.36 Å/мм , практическое разрешение от $1.7 \cdot 10^{-2}$ до $3.5 \cdot 10^{-2} \text{ Å}$, а практическая разрешающая способность от 590 до 1400. Оценка практического разрешения соответствует двум ячейкам детектора. Сопоставление результатов численной трассировки лучей и ограничений на практическое разрешение, накладываемых размером ячеек детектора, говорит о том, что во всем рабочем диапазоне следует ожидать разрешающей способности $\sim 10^3$, за исключением небольшого участка вблизи коротковолновой границы плоского поля, где разрешающая способность может оказаться несколько ниже (~ 600). Эти оценки выполнены без учета конечной ширины входной щели, а также возможных погрешностей юстировки.

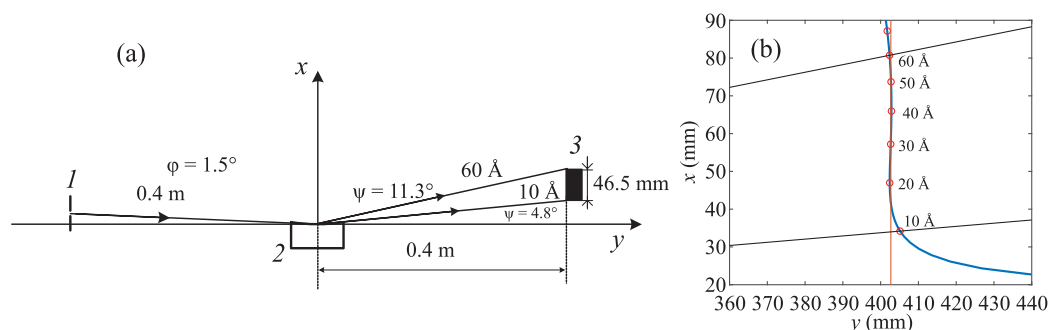


Рис. 1. (Цветной онлайн) (а) – Схема спектрографа. 1 – регулируемая входная щель; 2 – VLS-решетка; 3 – ПЗС-детектор; (б) – участок спектральной (меридиональной) фокальной кривой в области малых углов дифракции (участок плоского поля). Начало координат находится в центре решетки, как показано на рис. 1а. Наклонные прямые обозначают ход центральных лучей сходящихся пучков, идущих от решетки к детектору и отвечающих крайним длинам волн из диапазона плоского поля 10–60 Å. Вертикальная линия на рис. 1б обозначает положение чувствительной поверхности ПЗС-детектора

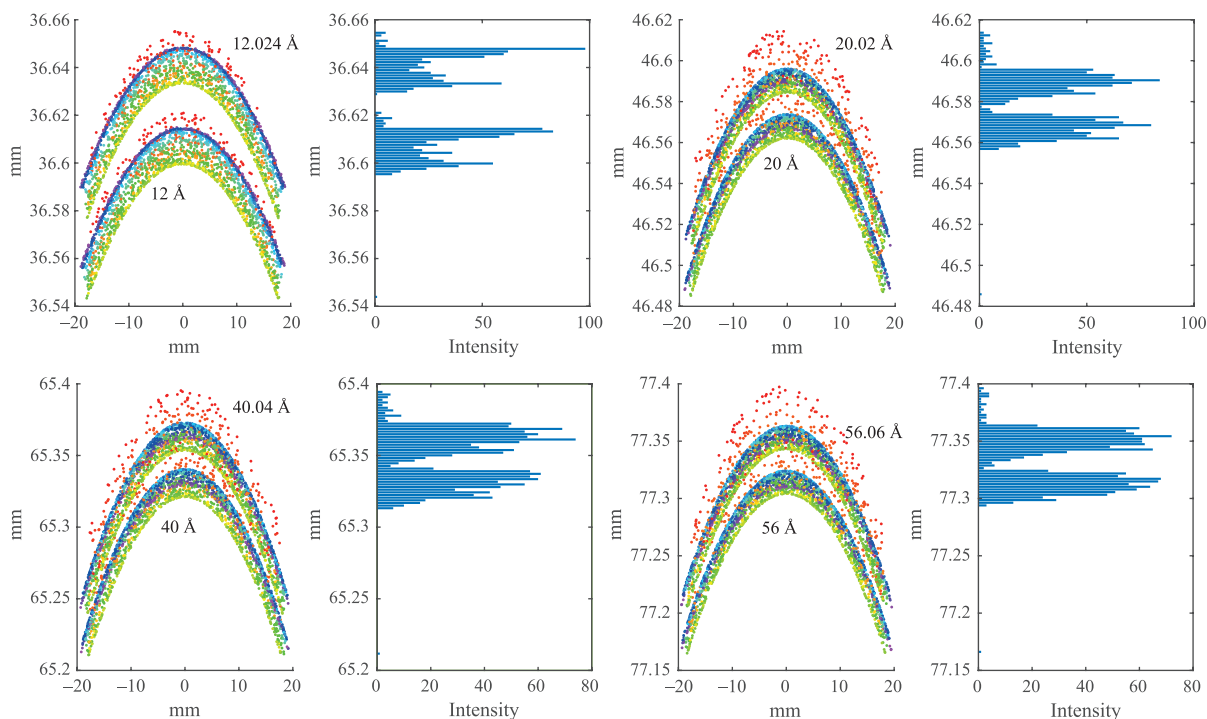


Рис. 2. (Цветной онлайн) Спектральные изображения пар точечных источников с длинами волн 12 и 12.024, 20 и 20.02, 40 и 40.04, 50 и 56.06 Å, полученные методом численной трассировки лучей. Контуры спектральных линий (гистограммы) справа получены суммированием по высоте спектральных линий (горизонтальное направление на рисунке) от +5 до –5 мм

Здесь следует отметить, что в направлении дисперсии угловое увеличение (уменьшение) дифракционной решетки, установленной под малым скольльзящим углом, может сильно отличаться от единицы. Угловое увеличение в плоскости дисперсии

$$\frac{d\psi}{d\varphi} = \frac{\sin \varphi}{\sin \psi} \approx \frac{\varphi}{\psi}, \quad (2)$$

вытекающее из уравнения дифракционной решетки $\cos \varphi - \cos \psi = m\lambda$, во внутреннем порядке дифракции ($\psi > \varphi$) меньше единицы и определяется отношением скольльзящих углов падения (φ) и дифракции (ψ). Так, входная щель шириной 100 мкм в излучении с длиной волны ~ 10 Å отображается в полосу на детекторе шириной около 30 мкм (отношение углов 1/3), что дополнительно может снижать разре-

шение в этой области приблизительно вдвое. На другом конце спектрального рабочего диапазона ($60 \text{ \AA}$) отношение углов составляет 0.13, т.е. входная щель шириной 100 мкм проецируется на детекторе в полосу шириной 13 мкм (размер ячейки детектора также 13 мкм) и не приводит к ухудшению спектрального разрешения, а уменьшение ширины входной щели приведет лишь к потере освещенности в спектральных линиях.

Реальные ширины линий получаются в результате суммирования геометрического изображения входной щели и aberrаций решетки, показанных на рис. 2, а также, при определенных условиях, ширины линий источника (доплеровской, штарковской и др.).

3. Эксперимент. Элементы спектрографа крепились на жесткой дюралевой плите размером $1.1 \times 0.6 \text{ м}$. В экспериментах спектрограф помещался в вакуумную камеру длиной 3.8 м диаметром 0.9 м , в которую вводилось лазерное излучение. Линейчатые спектры многозарядных ионов возбуждались импульсами лазера на кристаллах Nd:YAG ($\lambda \approx 1.064 \text{ мкм}$) с энергией 1 Дж длительностью 10 нс и расходимостью, близкой к дифракционной. Мишенями служили диски из тефлона, алюминия и титана. Лазерный пучок фокусировался на мишень сверху при помощи линзы из ТФ-10 с фокусным расстоянием 65 мм . Интенсивность излучения в фокусе была на уровне $\sim 10^{12} \text{ Вт/см}^2$. Спектры регистрировались за одну лазерную вспышку. В ряде экспериментов для улучшения светоизоляции перед детектором устанавливался свободновисящий алюминиевый фильтр толщиной 0.65 мкм .

При облучении мишени из тефлона были получены спектры гелиеподобных ионов CV и F VIII с потенциалами ионизации 392 и 954 эВ , а также водородоподобных ионов CVI и FIX (490 и 1103 эВ). На рисунке 3 справа показаны линии серии Лаймана $\text{Ly}_\beta\text{--Ly}_\epsilon$ Н-подобного иона CVI; переход Ly_α не вошел в приемную область детектора. Слева показаны линии He-подобного иона F VIII, отвечающие переходам $1s2p \rightarrow 1s^2$, $1s3p \rightarrow 1s^2$, и $1s4p \rightarrow 1s^2$, а также резонансная линия Н-подобного иона F IX. Помимо резонансной линии иона F VIII, видна также слабая интеркомбинационная линия, отвечающая переходу $1s2p^3P_1 \rightarrow 1s^2^1P_1$. Отношение интенсивностей резонансной и интеркомбинационной линий в однородной плазме соответствует электронной плотности $(0.6\text{--}1.0) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Красные “крылья” резонансных линий ионов F VIII и F IX образованы их сателлитами, обусловленными переходами в He- и Li-подобных ионах, большинство из которых не разрешены.

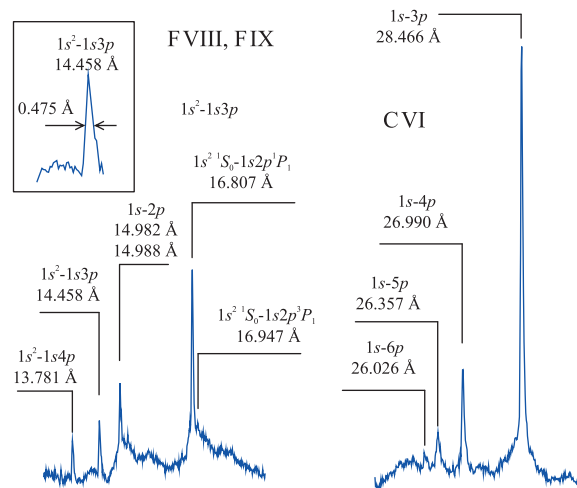


Рис. 3. (Цветной онлайн) Участки спектра тефлоновой мишени, содержащие линии ионов F VIII и F IX (слева) и лаймановскую серию иона CVI (за исключением линии Ly_α , не вошедшей в приемную область детектора). На вставке в увеличенном масштабе показана ширина линии иона F VIII $14.458 \text{ \AA}$, свидетельствующую о разрешающей способности ~ 300 на коротковолновом участке рабочего спектрального диапазона

На рисунке 4 показана “пропись” спектра титановой плазмы. В нем идентифицированы линии ионов Ti XIII, XIV, XV, XVI и XVII, принадлежащие к изоэлектронным последовательностям атомов Ne, F, O, N и C с потенциалами ионизации 788 , 863 , 942 , 1044 , и 1131 эВ . Большинство идентифицированных линий отвечают переходам в основное состояние типа $2s^2 2p^{k-1}nl \rightarrow 2s^2 2p^k$, где $k = 6 \dots 2$. Из-за наличия в плазме ионов нескольких кратностей ионизации, некоторые группы линий не удалось разрешить (помечены звездочками). В этом случае в качестве длины волны указывался их “центр масс”. На вставке показан небольшой участок спектра, полученного при облучении алюминиевой мишени, содержащий линию Ве-подобного иона Al X $57.368 \text{ \AA}$ (переход $2p3d \rightarrow 2p^2$ в дважды возбужденное состояние). Ширина линии свидетельствует о разрешающей способности около 1400 на длинноволновом краю спектрального рабочего диапазона.

Как известно, широкополосные дифракционные спектральные приборы сталкиваются с проблемой наложения порядков дифракции m . В нашем случае имеется специфика: излучение с длинами волн короче $\sim 8 \text{ \AA}$ не отражается из-за падения коэффициента отражения золота в этой области спектра. Вторая особенность: глубина квазисинусоидального профиля штриха VLS-решетки зависит от локальной частоты штрихов, что характерно для технологии интер-

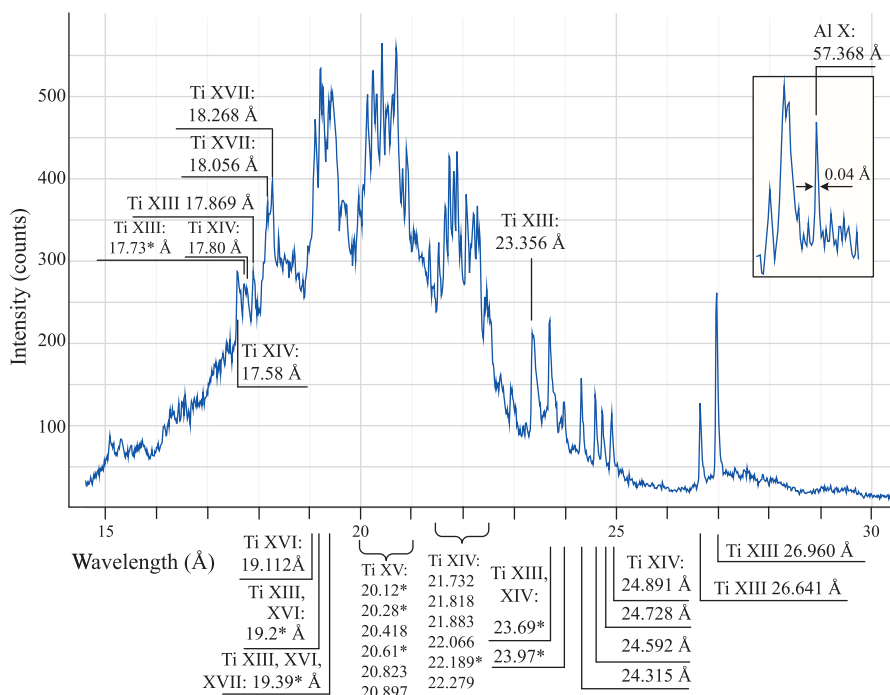


Рис. 4. (Цветной онлайн) Пропись спектра, возбужденного в титановой мишени. Идентифицированы линии ионов Ti XIII–Ti XVII. Звездочками помечены неразрешенные группы линий. В вставке небольшой участок алюминиевого спектра с линией Ве-подобного иона Al X 57.368 Å (переход $2p3d \rightarrow 2p^2$ в дважды возбужденное состояние), свидетельствующей о разрешающей способности около 1400 на длинноволновом краю спектрального рабочего диапазона

ференционной литографии [11]. Расчеты дифракционной эффективности для синусоидального профиля, выполненные с помощью программы для строгих электромагнитных расчетов с учетом граничных условий PCGrate [12], показывают, что второй и третий порядки оказываются в 1.5–2 раза слабее первого. В наших экспериментах порядки дифракции выше первого не наблюдались. Отметим также, что известные линии в порядках выше первого могут быть полезны, служа внутренними реперами в спектре.

Заключение. Создан первый отечественный дифракционный VLS-спектрограф для мягкого рентгеновского диапазона с плоским полем в области 10–60 Å. В приборе использована VLS-решетка с центральной частотой линий 3200 мм^{-1} , изготовленная методом интерференционной литографии. Спектрограф испытан в вакууме при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов углерода, фтора, титана и алюминия в лабораторной лазерной плазме. Экспериментально продемонстрирована разрешающая способность, монотонно увеличивающаяся от ~ 300 в коротковолновой (14 Å) части рабочего диапазона до ~ 1400 в длинноволновой. Показано, что спектрограф может использоваться, в частности, для диагностики высокотемпературной плазмы, содержащей многозарядные ионы.

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках Государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. V. Bakshi, “Blue-X: Exploring Advanced Optical Projection Lithography Below 13.5 nm”, Proc. SPIE 13979, Optical and EUV Nanolithography XXXIX, 139790S (10 Apr 2026); <https://doi.org/10.1117/12.3092615>.
2. R. R. Dammel, “Estimation of dose requirements for exposures at Blue-X wavelengths”, Proc. SPIE 13983, Advances in Patterning Materials and Processes XLIII, 1398311 (9 Apr 2026); <https://doi.org/10.1117/12.3090841>.
3. A. H. Gabriel, J. R. Swain, and W. A. Waller, “A two-metre grazing-incidence spectrometer for use in the range 5–950 Å”, J. Sci. Instr. **42**, 94 (1965); DOI 10.1088/0950-7671/42/2/308.
4. Е. Н. Рагозин, Е. А. Вишняков, А. О. Колесников, А. С. Пирожков, А. Н. Шатохин, *Аперийодические элементы в оптике мягкого рентгеновского диапазона* (ФИЗМАТЛИТ, М., 2018) [Е. N. Ragozin,

- E. A. Vishnyakov, A. O. Kolesnikov, A. S. Pirozhkov, and A. N. Shatokhin, *Aperiodicheskie Elementy v Optike Myagkogo Rentgenovskogo Diapazona* (Fizmatlit, Moscow, 2018)] [in Russian].
5. Е. Н. Рагозин, Е. А. Вишняков, А. О. Колесников, А. С. Пирожков, А. Н. Шатохин, “Спектрометры для мягкого рентгеновского диапазона на основе аperiodических отражательных решеток и их применение”, УФН **191**(5), 522 (2021); DOI: 10.3367/UFNr.2020.06.038799 [E. N. Ragozin, E. A. Vishnyakov, A. O. Kolesnikov, A. S. Pirozhkov, and A. N. Shatokhin, “Soft X-ray spectrometers based on aperiodic reflection gratings and their application”, Phys.-Uspekhi **64**(5), 495 (2021); DOI 10.3367/UFNe.2020.06.038799].
 6. T. Kita and T. Harada, “Ruling engine using a piezoelectric device for large and high-groove density gratings”, Appl. Opt. **31**(10), 1399 (1992); <https://doi.org/10.1364/AO.31.001399>.
 7. T. Kita, T. Harada, N. Nakano, and H. Kuroda, “Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings for a flat-field grazing-incidence spectrograph”, Appl. Opt. **22**(4), 512 (1983); <https://doi.org/10.1364/AO.22.000512>.
 8. J. Dunn, E. W. Magee, R. Shepherd, H. Chen, S. B. Hansen, S. J. Moon, G. V. Brown, M.-F. Gu, P. Beiersdorfer, and M. A. Purvis, “High resolution soft x-ray spectroscopy of low Z K-shell emission from laser-produced plasmas”, Rev. Sci. Instrum. **79**, 10E314 (2008); <https://doi.org/10.1063/1.2968704>.
 9. M. Koike, K. Sano, E. Gullikson, Y. Harada, and H. Kumata, “Performance of laminar-type holographic grating for a soft x-ray flat-field spectrograph in the 0.7–6 nm region”, Rev. Sci. Instrum. **74**(2), 1156 (2003).
 10. T. H. Dinh, Y. Kondo, T. Tamura et al. (Collaboration), “Evaluation of a flat-field grazing incidence spectrometer for highly charged ion plasma emission in soft x-ray spectral region from 1 to 10 nm”, Rev. Sci. Instrum. **87**, 123106 (2016).
 11. А. О. Колесников, М. Д. Логачев, Е. Н. Рагозин, А. Н. Шатохин, Е. А. Вишняков, В. Н. Михайлов, В. П. Ратушный, Р. В. Гайнутдинов, А. Л. Толстикова, “VLS-решетка с высокой частотой штрихов”, Квантовая электроника **56**(2), 103 (2026) [A. O. Kolesnikov, M. D. Logachev, E. N. Ragozin, A. N. Shatokhin, E. A. Vishnyakov, V. N. Mikhailov, V. P. Ratushnyi, R. V. Gainutdinov, and A. L. Tolstikhina, “VLS Grating with a High Line Density”, Bulletin of the Lebedev Physics Institute **53**, Suppl. 2, S173 (2026)].
 12. pcgrate.com.