

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-03-48-59

УДК 681.785.55: 535-32

Создание плоских и вогнутых решеток с переменным шагом для вакуумной области спектра методом интерференционной литографии и их применение

АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ КОЛЕСНИКОВ¹, ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ МИХАЙЛОВ²,
ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ РАГОЗИН³✉, ВЛАДИСЛАВ ПЕТРОВИЧ РАТУШНЫЙ⁴,
АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ СОЛОВЬЕВ⁵, АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ШАТОХИН⁶

^{1, 3, 6}Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

^{2, 4}ООО ХолоГрэйт, Санкт-Петербург, Россия

⁵Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

⁶Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

¹alexey6180@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2511-762X>

²viktor.mikhailov@holograte.com

<https://orcid.org/0000-0002-7340-0385>

³enragozin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5912-9229>

⁴vlad@holograte.com

<https://orcid.org/0000-0001-6734-5976>

⁵7oloviev@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8595-5604>

⁶ShatohinAL@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6057-3535>

Аннотация

Предмет исследования. Возможность создания решеток с шагом, изменяющимся на поверхности решетки по заданному закону (так называемых *Varied Line-Space gratings*, или VLS-решеток), со средней (порядка 600 мм^{-1}) и высокой (до 3000 мм^{-1}) частотой штрихов методом интерференционной литографии на длине волны аргонового лазера 488 нм. **Цель работы.** Разработка VLS-решеток для спектрографов высокого разрешения с плоским полем для вакуумной ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областей спектра и их испытание при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов в лазерной плазме. **Метод.** Разработанный метод позволяет создавать дифракционные VLS-решетки для работы в спектрографах при скользящем падении излучения. На первом этапе проводится расчет оптической схемы со сферическим зеркалом-аббератором, обеспечивающей требуемое распределение частоты интерференционных полос на поверхности решетки. После «записи» решетки на фоторезисте и его проявления измеряются параметры полученной решетки по дифракции лазерного излучения (632,8 нм), далее проводятся юстировка спектрографа, регистрация линейчатых спектров в мягкой рентгеновской области и оценка характеристик прибора. **Основные результаты.** Созданы VLS-решетки с золотым отражающим покрытием – плоские (с частотой штрихов на краях решетки 530 и 670 мм^{-1}) и сферические (радиус кривизны 6 м, частоты 2100 и 2700 мм^{-1}). Параметры VLS-решеток близки к проектным. Получены спектры многозарядных ионов в области 10–25 нм и продемонстрирована спектральная разрешающая способность 10^3 , ограниченная лишь размером ячеек (13 мкм) используемого детектора ПЗС. **Практическая значимость.** Продемонстрированы возможности отечественной технологии интерференционной литографии для создания VLS-решеток и VLS-спектрографов на их основе для мягкого рентгеновского диапазона спектра. Спектрограф будет использован для регистрации мягкого рентгеновского излучения при взаимодействии мультитераваттного лазерного излучения с различными мишенями.

Ключевые слова: VLS-решетка, интерференционная литография, мягкий рентгеновский диапазон, спектрограф с плоским полем, стигматический спектрограф, многослойные рентгеновские зеркала

Благодарность: работа выполнена при поддержке РНФ (Грант 20-62-46050).

Ссылка для цитирования: Колесников А.О., Михайлов В.Н., Рагозин Е.Н., Ратушный В.П., Соловьев А.А., Шатохин А.Н. Создание плоских и вогнутых решеток с переменным шагом для вакуумной области спектра методом интерференционной литографии и их применение // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 3. С. 48–59. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-03-48-59>

Коды OCIS: 050.1950, 110.3960, 120.6200, 300.6540, 300.6560, 340.7470

Fabrication of plane and concave varied line-space gratings for the vacuum spectral domain by interference lithography and their application

ALEKSEI O. KOLESNIKOV¹, VIKTOR N. MIKHAILOV², EVGENY N. RAGOZIN³✉, VLADISLAV P. RATUSHNYI⁴, ALEXANDER A. SOLOVIEV⁵, ALEXEY N. SHATOKHIN⁶

^{1, 3, 6}P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{2, 4}HoloGrate LLC, St. Petersburg, Russia

⁵Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

⁵Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

¹alexey6180@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2511-762X>

²viktor.mikhailov@holograte.com

<https://orcid.org/0000-0002-7340-0385>

³enragozin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5912-9229>

⁴vlad@holograte.com

<https://orcid.org/0000-0001-6734-5976>

⁵7oloviev@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8595-5604>

⁶ShatohinAL@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6057-3535>

Abstract

Subject of study. The feasibility of making gratings with a spacing that varies on the grating surface according to a given law (the so-called varied line-space gratings), with an average (about 600 mm^{-1}) and high (up to 3000 mm^{-1}) groove frequency by interference lithography at an argon laser wavelength of 488 nm. **Aim of study.** Development of high-resolution flat-field varied line-space grating spectrographs for the vacuum ultraviolet and soft X-ray regions of the spectrum and their testing by grating recording line spectra of multiply charged ions in laser plasma. **Method.** The developed method makes it possible to make diffraction varied line-space gratings for operation in spectrographs at grazing incidence of radiation. At the first stage, the optical scheme with a spherical aberrator mirror is designed, which provides the required frequency distribution of the interference fringes on the grating surface. After the “writing” of the grating on the photoresist and its development, the parameters of the resulting grating are measured by the diffraction of laser radiation (632.8 nm), the spectrograph is aligned, line spectra are recorded in the soft X-ray region of the spectrum, and the characteristics of the instrument are evaluated. **Main results.** Varied line-space gratings with a gold reflective coating were fabricated: plane (with groove frequencies of 530 and 670 mm^{-1} at the edges of the grating) and spherical (curvature radius is 6 m, frequencies are 2100 and 2700 mm^{-1}). The parameters of the varied line-space gratings are close to the design ones. The spectra of multiply charged ions were obtained in the range of 10–25 nm, and the spectral resolving power of 10^3 , limited only by the pixel size (13 μm) of the CCD detector in use, was demonstrated. **Practical significance.** The capabilities of the domestic technology of interference lithography for the fabrication of varied line-space gratings and varied line-space grating spectrographs based on them for the soft X-ray range of the spectrum are demonstrated. The spectrograph will be used to detect soft X-rays during the interaction of multiterawatt laser radiation with various targets.

Keywords: varied line-space grating, interference lithography, soft X-ray range, flat-field spectrograph, stigmatic spectrograph, X-ray multilayer mirrors

Acknowledgment: the work was supported by the Russian Science Foundation (Grant 20-62-46050).

For citation: Kolesnikov A.O., Mikhailov V.N., Ragozin E.N., Ratushnyi V.P., Soloviev A.A., Shatokhin A.N. Fabrication of plane and concave varied line-space gratings for the vacuum spectral domain by interference lithography and their application [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 3. P. 48–59. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-03-48-59>

OCIS codes: 050.1950, 110.3960, 120.6200, 300.6540, 300.6560, 340.7470

ВВЕДЕНИЕ

Использование отражательных дифракционных решеток с шагом, изменяющимся на поверхности по заданному закону (так называемых *Varied Line-Space gratings*, VLS-решеток), позволяет создавать рентгеновские спектрографы с плоским полем [1], идеально совместимые с современными детекторами ПЗС. Такие решетки нашли применение в монохроматорах синхротронного излучения, где требуется сохранять неизменными положение выходной щели и направление выхода излучения [2]. В спектрометрах/монохроматорах по схеме Хеттрика–Андервуда [3] сканирование по длинам волн достигается лишь поворотом решетки, а угол отклонения и фокусное расстояние постоянны. Это исключительно удобно с точки зрения эксперимента, позволяя сохранять неподвижными детектор и источник излучения, в качестве которого может служить источник синхротронного излучения (СИ) на электронной орбите, лазерная плазма (ЛП) и др. Недавно была предложена концепция одноэлементного VLS-монохроматора для близкорасположенного источника и для источника СИ [4], в котором сканирование по длинам волн осуществляется перемещением VLS-решетки вдоль ее поверхности, причем положение источника, выходной щели/детектора и направление выхода излучения сохраняются. Наконец, совместное использование многослойной рентгеновской оптики и VLS-решеток приводит к созданию широкополосных стигматических спектрометров в ультрамягком рентгеновском диапазоне [5, 6].

VLS-спектрометры находят многочисленные применения в эксперименте. Вот некоторые из них: спектроскопия плазмы, включая спектроскопию релятивистской ЛП в экспериментах с мультитераваттными лазерными импульсами [7, 8], регистрация высоких гармоник лазерного излучения и характеристика других лабораторных источников мягкого рентгеновского излучения, рефлектометрия/

метрология рентгенооптических элементов с использованием ЛП и СИ, исследование новых структур, соединений и композитов методами ARPES¹ и спектроскопии поглощения (NEXAFS/XANES², EXAFS³) с помощью СИ, спектроскопия молекул, материалов и биологических объектов методом резонансного неупругого рентгеновского рассеяния, исследование материалов методом эмиссионной спектроскопии, совмещенной со сканирующим электронным микроскопом. Этим вопросам посвящен недавний обзор в журнале Успехи физических наук [9].

Одним из методов, успешно применяемых для изготовления VLS-решеток, является интерференционная литография (ИЛ). В настоящей работе сообщается об изготовлении плоских VLS-решеток с центральной частотой штрихов $p_0 = 600 \text{ мм}^{-1}$ и сферических (радиус 6000 мм) с $p_0 = 2400 \text{ мм}^{-1}$ методом ИЛ на длине волны 488 нм. Решетки предназначались для двух приборов — стигматического спектрографа на спектральную область 125–250 Å и харадовского спектрографа с плоским полем в области 25–140 Å. Схема стигматического спектрографа, включающего плоскую VLS-решетку скользящего падения и фокусирующее многослойное (Mo/Si или Mo/Be) рентгеновское зеркало нормального падения, детально обсуждалась ранее в публикации [6]. Она обеспечивает точный стигматизм (т.е. совпадение вертикального и горизонтального фокусов) на двух длинах волн и практический стигматизм в диапазоне двух октав (в данном случае приблизительно от 90 до 360 Å). Термин «практический стигматизм» в данном случае означает, что астигматическое размытие изображения точечного монохроматического

¹ Фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением.

² Тонкая структура поглощения рентгеновского излучения вблизи края.

³ Протяженная тонкая структура поглощения рентгеновского излучения.

источника не превосходит размер ячейки детектора (13 мкм в нашем случае). Харадовский спектрограф астigmaticен: он использует сферическую решетку, установленную под скользящим углом 3° . Оба прибора были испытаны при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов, возбуждаемых в ЛПИ.

Еще одним методом, успешно применяемым для изготовления специфических отражательных решеток (VLS-решеток [10], решеток веерного типа для работы в условиях конической дифракции [11, 12], решеток с эффективным углом блеска [13, 14]), является электроннолучевая литография. Этот вопрос не освещается в данной работе.

Целью работы является разработка VLS-решеток для спектрографов высокого разрешения с плоским полем для вакуумной ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областей спектра и их испытание при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов в ЛПИ.

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ VLS-РЕШЕТОК

Частоту штрихов VLS-решетки принято описывать полиномом

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

где y — координата на поверхности решетки в направлении поперек штриха, т.е. в горизонтальной плоскости. В случае сферической решетки координата y отсчитывается вдоль касательной к центру решетки. В центре VLS-решетки $y = 0$. Здесь p_0 отвечает за направление дифрагированного пучка, p_1 модифицирует спектральную фокальную кривую, p_2 и p_3 управляют комой и сферической аберрацией соответственно. Среди коэффициентов p_i важными являются p_0 и p_1 , так как они определяют геометрию схемы. Набор коэффициентов p_i определяется оптической схемой спектрального прибора, для которого изготавливается решетка, и индивидуален для каждого прибора. Они находятся с помощью принципов геометрической оптики заранее — на этапе расчета прибора. На этапе изготовления решетки и, в частности, при постановке обратной задачи ИЛ эти коэффициенты заданы.

Прямая задача ИЛ с использованием одного или двух вспомогательных сферических зеркал аббераторов, т.е. нахождение интерференционной картины на покрытой фоторезистом подложке, была решена Такеши Намиокой и Масато Койке [15] (рис. 1).

В настоящей работе решалась обратная задача ИЛ, т.е. нахождение оптической схемы, реализующей заданное распределение частоты интерференционных полос на поверхности плоской или сферической подложки на длине волны аргонового лазера 488 нм. На первом этапе находится начальное приближение с требуемыми p_i . Начальное приближение основано на аналитическом обращении прямой задачи ИЛ [15]. Ответ в прямой задаче (коэффициенты p_i как функции параметров схемы записи) превращается в систему нелинейных алгебраических уравнений, которая и решается

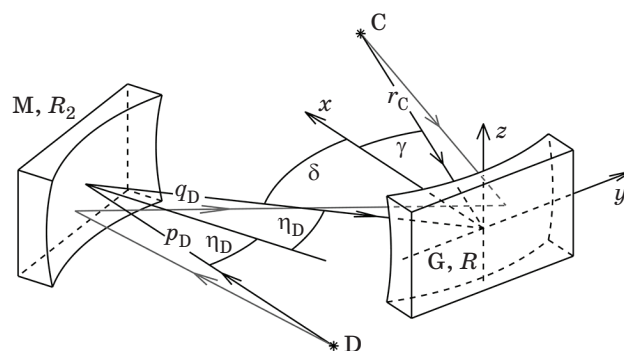


Рис. 1. Схема интерференционной литографии с одним сферическим зеркалом-аббератором. С и D — точечные когерентные монохроматические источники, G — экспонируемая подложка (заготовка VLS-решетки), R — радиус подложки, M — сферическое зеркало-аббератор радиуса R_2 , углы падения центральных лучей на заготовку решетки и зеркало-аббератор соответственно — γ , η_D , δ , расстояния между источником С и центром заготовки, источником D и центром зеркала-аббератора, центром заготовки и центром зеркала-аббератора соответственно — r_C , p_D и q_D [15]

Fig. 1. Interference lithography scheme with one spherical aberrator mirror. C and D are point coherent monochromatic sources, G is the irradiated substrate (VLS grating blank), R is substrate radius, M is a spherical aberrator mirror of radius R_2 , γ , η_D , δ are the central rays incidence angles on the grating blank and the aberrator mirror, and r_C , p_D , q_D are the distances between the source C and the center of the blank, the source D and the center of the aberrator mirror, the center of the blank and the center of the aberrator mirror respectively [15]

при поиске начального приближения. Известными параметрами выступают коэффициенты p_0, p_1, p_2 и p_3 . Неизвестные параметры, которые нужно найти — три угла и три расстояния схемы записи, обозначенные на рис. 1, а также радиус зеркала-аббератора.

Поскольку неизвестных (семь) больше, чем уравнений (четыре), то ответ не является единственным. Часть параметров фиксируется, а остальные находятся из системы. Далее проводится оптимизация по фиксированным параметрам. При этом учитываются ограничения практического характера.

Фиксируются угол γ , расстояние p_D и радиус зеркала R_2 . Также фиксируется расстояние r_C . Из выражений для p_0, p_1 и p_2 находятся углы δ, η_D и расстояние q_D . При этом коэффициент p_3 и кривизна штрихов не соответствуют требуемым. Для уменьшения разности полученного и требуемого p_3 варьируется зафиксированный параметр r_C .

Обычно в двумерном пространстве параметров γ и p_D с помощью сеточного перебора ищется наилучшая точка (в каждой точке этой сетки система уравнений решается заново). Процесс автоматизированный, но управляемый, например, с использованием коэффициентов отклонения от полинома и кривизны штрихов в функционале «наилучшей точки». Если необходимо, то точка (γ, p_D) может быть выбрана вручную.

Затем проводится проверка найденного решения методом численной трассировки лучей, т.е. вычисляется интерференционная картина, которую даст литографическая схема с параметрами, найденными на первом этапе. На третьем этапе, при необходимости, осуществляется оптимизация решения. Для этого минимизируется функционал вида

$$\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \left(p(y) - p^*(y) \right)^2 \exp(-y^2 / 2y_{\text{opt}}^2) dy +$$

$$+ a_1 \exp(-R/r_{\text{opt}}) + a_2 \left(\exp(\Delta y - \Delta y^*) - 1 \right) +$$

$$+ a_3 \left(\exp(\Delta z - \Delta z^*) - 1 \right), \quad (2)$$

где $p(y)$ — частота штрихов, $\Delta y = y_{\max} - y_{\min}$ — ширина решетки, Δz — высота решетки, R — радиус кривизны штрихов, a_i ($i = 1, 2, 3$), y_{opt} и r_{opt} — параметры, управляющие процессом оптимизации. Астериском обозначены целе-

вые величины, а без него — величины, получающиеся в схеме записи, которые вычисляются моделированием схемы записи в лучевом приближении. Первое слагаемое функционала отвечает за точность соблюдения требуемой частоты штрихов $p(y)$, второе — за уменьшение кривизны интерференционных полос, а третье и четвертое — за требуемые размеры решетки. После завершения оптимизации моделируется схема спектрографа с решеткой, соответствующей схеме записи: методом численной трассировки лучей строятся спектральные изображения точечного монохроматического источника, помещенного на входную щель прибора, как в главной плоскости, так и вне ее.

На рис. 2 представлена схема ИЛ на длине волны излучения 488 нм, которая использовалась при изготовлении плоской VLS-решетки для стигматического спектрографа.

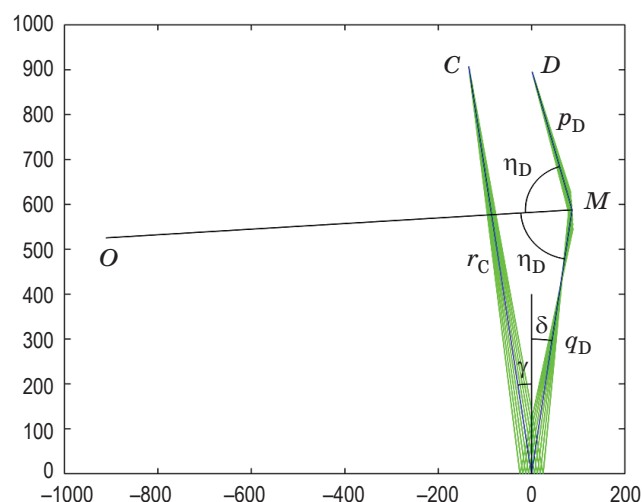


Рис. 2. Схема записи плоской VLS-решетки на длине волны излучения 488 нм. C и D — точечные когерентные источники, M — центр сферического зеркала-аббератора ($R_2 = 1000$ мм), O — его центр кривизны, центр плоской экспонируемой подложки, покрытой фоторезистом, находится в начале координат (0, 0). Координаты точек C (–134,3856, 907,0995), D (1, 3586, 894,9362), M (86,8759, 587,6126), O (–911,1836, 525,3447)

Fig. 2. Scheme for writing the plane VLS grating at a wavelength 488 nm. C and D are point coherent sources, M is the center of the spherical aberrator mirror ($R_2 = 1000$ mm), O is its center of curvature, the center of the plane substrate under irradiation coated with photoresist is at the origin (0, 0). Point coordinates are C (–134.3856, 907.0995), D (1, 3586, 894.9362), M (86.8759, 587.6126), O (–911.1836, 525.3447)

Подложка для сферического зеркала-аббератора (радиус 1000 мм) диаметром 150 мм изготовлена из плавленного кварца КУ1 (ООО СОТВЕКС, Москва).

Для измерения параметров плоской VLS-решетки она помещалась на прецизионный столик и освещалась по нормали пучком He-Ne лазера. На экране, расположенном на расстоянии 2 м от решетки, измерялось расстояние между ± 1 -ми порядками дифракции, что давало локальное значение частоты штрихов. Направляющая столика была перпендикулярна лазерному пучку, и при перемещении решетки проводились измерения с шагом 5 мм. Полученная зависимость аппроксимировалась полиномом (1), коэффициенты которого представлены в табл. 1.

Незначительное отличие между проектными и измеренными коэффициентами p_1 легко компенсируется за счет окончательной юстировки прибора, которая проводилась при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов в вакуумной камере. Для этого оправа с решеткой помещалась на прецизионный поворотный столик, а детектор ПЗС — на прецизионный электромеханический однокоординатный столик. Оба столика управлялись с компьютера без развакуумирования камеры.

Измерения полученного профиля на атомно-силовом микроскопе показали, что он близок к синусоидальному. В дальнейшем это позволило оценивать глубину профиля по отношению интенсивностей излучения He-Ne лазера, отраженного в 0-ом и 1-ом порядках дифракции, по формуле

$$I_1 / I_{m=0} \approx (\pi h / \lambda)^2, \quad (3)$$

справедливой при выполнении условия $h \ll \lambda$, где h — глубина профиля, а $\lambda = 632,8$ нм — длина волны лазерного излучения, используемого

в измерениях. Результаты обоих видов измерений (на атомно-силовом микроскопе и по отношению интенсивностей с использованием формулы (3)) оказались близки: в центре решетки $h \approx 20$ нм, и в последующем глубина профиля определялась по формуле (3). Было показано, в частности, что глубина профиля несколько убывает при увеличении частоты штрихов.

Была рассчитана и реализована литографическая схема для VLS-решеток с центральной частотой 2400 мм^{-1} , предназначенных для харадовского спектрографа. Суперполированные, со среднеквадратической шероховатостью поверхности не более 3 \AA , сферические подложки для решеток диаметром 60 мм (радиус кривизны 6000 мм) и подложка для зеркала-аббератора диаметром 150 мм (радиус 500 мм) были изготовлены из плавленного кварца КУ1 (ООО СОТВЕКС, Москва). После экспонирования, проявления и отжига решетки покрывались слоем золота.

На рис. 3а приведена схема для измерения частоты штрихов на поверхности VLS-решетки (радиус 6000 мм, $p_0 = 2400 \text{ мм}^{-1}$, $p_1 = 16 \text{ мм}^{-2}$). VLS-решетка в юстировочной оправке крепилась на однокоординатном столике, который устанавливался на прецизионном электромеханическом однокоординатном столике с диапазоном перемещения ± 50 мм, который в свою очередь помещался на прецизионном электромеханическом поворотном столике (рис. 3б). Направляющие столика перпендикулярны направляющим электромеханического однокоординатного столика. Столик служил для совмещения поверхности решетки с осью вращения поворотного столика, чтобы при повороте решетки освещенное пятнышко на решетке не смещалось по ее поверхности. Измерения проводились в автоколлимационном режиме по разности углов поворота решетки в автоколлимационной схеме, когда поочередно бралось отражение в 0-ом и ± 1 -х порядках дифракции. В табл. 2 сопоставлены расчетные и измеренные коэффициенты p_i для сферической VLS-решетки. Как видно из рис. 3в и табл. 2, измеренная зависимость частоты штрихов от координаты находится в хорошем соответствии с расчетной. Глубина синусоидального профиля сферических решеток в центре решетки составила 10,8 нм. На расстоянии 15 мм от центра на низкочастотной стороне решетки она составила 11,9 нм и около 7,5 нм на расстоянии 15 мм от центра на высокочастотной стороне.

Таблица 1. Проектные и измеренные коэффициенты p_i плоских VLS-решеток

Table 1. Design and measured p_i coefficients for plane VLS gratings

Параметр	Проект	Измерение
$p_0, \text{мм}^{-1}$	600	599,98
$p_1, \text{мм}^{-2}$	2,37	2,29
$p_2, \text{мм}^{-3}$	$6,94 \times 10^{-3}$	$6,63 \times 10^{-3}$
$p_3, \text{мм}^{-4}$	$1,79 \times 10^{-5}$	$1,88 \times 10^{-5}$

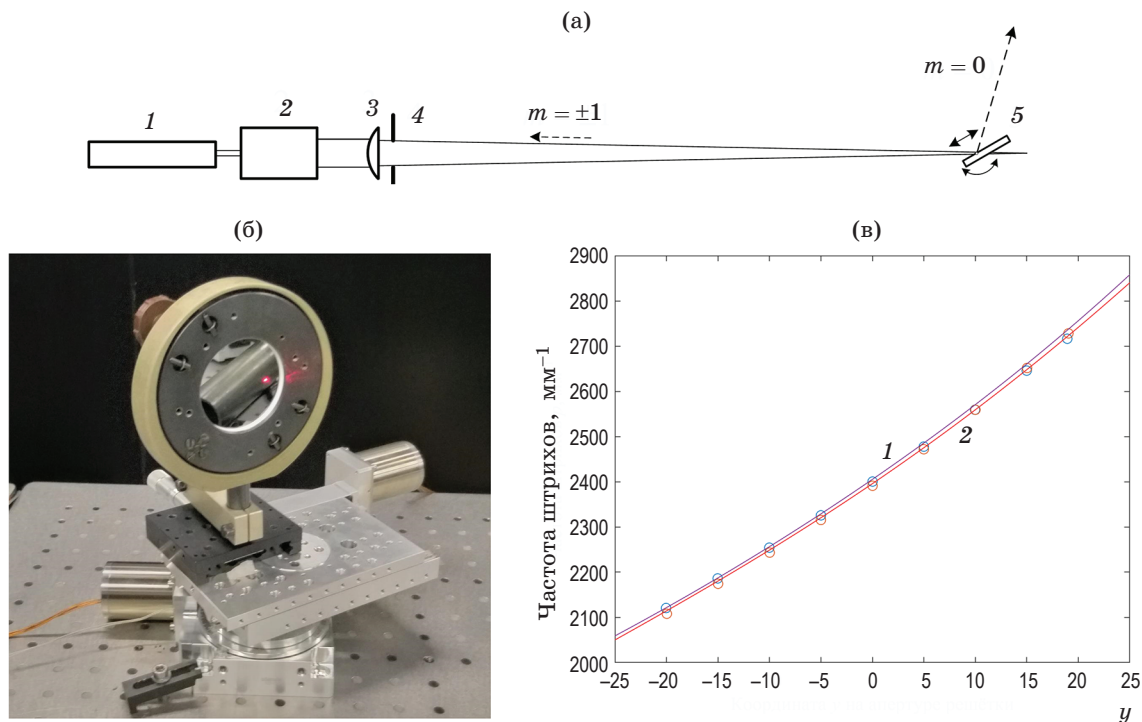


Рис. 3. Оптико-механическая схема для измерения частоты штрихов на поверхности VLS-решетки (а). Гелий-неоновый лазер (1), телескопическая система (2), линза (3), ирисовая диафрагма (4), VLS-решетка (5). Решетка в оправе на электромеханических столиках (б), расчетная (1) и измеренная (2) зависимости частоты штрихов решетки от координаты y (в). Данные измерений в ± 1 -х порядках незначительно отличаются

Fig. 3. (a) Optical-mechanical scheme for measuring the groove frequency on the surface of the VLS grating. (1) Helium-neon laser, (2) telescopic system, (3) lens, (4) iris diaphragm, (5) VLS grating. (b) Framed grating on electromechanical stages, (v) dependences of the grating groove frequency on the y coordinate (1) calculated and (2) measured. The measurement data in ± 1 th orders slightly differ

Таблица 2. Проектные и измеренные коэффициенты p_i для сферических VLS-решеток

Table 2. Design and measured p_i coefficients for spherical VLS gratings

Параметр	Проект	Измерение
$p_0, \text{мм}^{-1}$	2405,2	2402,0
$p_1, \text{мм}^{-2}$	15,66	15,62
$p_2, \text{мм}^{-3}$	$8,21 \times 10^{-2}$	$8,08 \times 10^{-2}$
$p_3, \text{мм}^{-4}$	$5,12 \times 10^{-4}$	$6,97 \times 10^{-4}$

ПРИМЕНЕНИЕ VLS-РЕШЕТОК В СПЕКТРОГРАФАХ И ОЦЕНКА ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Плоская VLS-решетка в комбинации с фокусирующим широкополосным многослойным зеркалом нормального падения Mo/Si (12,5–25 нм) или Mo/Be (11–14 нм) входила в состав стигматического спектрографа, рабочий спектральный диапазон которого опреде-

лялся используемым зеркалом (рис. 4). Сферическая решетка была единственным оптическим элементом харадовского спектрографа (рис. 5). Оба прибора испытаны при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов в ЛП.

Точка 7 на рис. 4 находится в положении горизонтального фокуса в изображении щели, создаваемом многослойным зеркалом сзади VLS-решетки. Точка 8 находится в положении вертикального фокуса в изображении источника, создаваемом многослойным зеркалом сзади решетки. Вертикальная фокальная кривая спектрографа 5 есть окружность, проведенная вокруг центра VLS-решетки с радиусом, равным расстоянию от центра решетки до точки 8. Спектральная фокальная кривая спектрографа пересекается с вертикальной на выбранных длинах волн $\lambda_{1,2}$. Чувствительная (плоская) поверхность детектора располагается на прямой, соединяющей две точки,

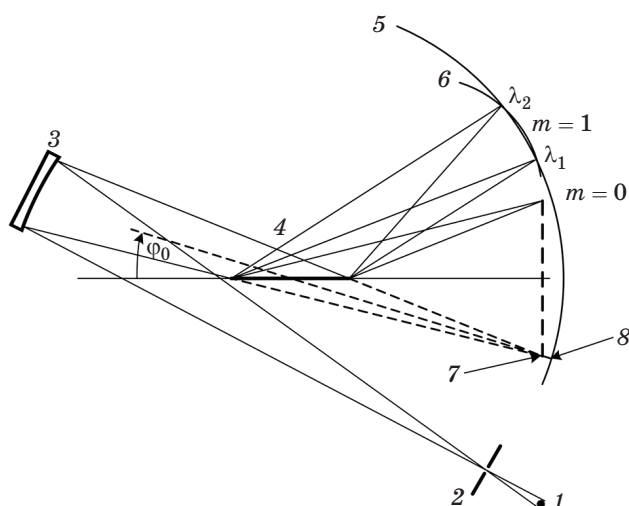


Рис. 4. Схема метрового стигматического спектрографа с фокусирующим многослойным зеркалом ($R = 1$ м) нормального падения и плоской VLS-решеткой скользящего падения. Источник (1), входная щель (2), вогнутое многослойное зеркало (3), VLS-решетка (4), вертикальная фокальная кривая спектрографа (5), спектральная фокальная кривая спектрографа (6), горизонтальный фокус (7), вертикальный фокус (8). Обратная линейная дисперсия составила $5,36 \text{ \AA/mm}$ на длине волны $\lambda_1 = 144 \text{ \AA}$ и $6,40 \text{ \AA/mm}$ на $\lambda_2 = 272 \text{ \AA}$. Ширина щели составляла 15 мкм

Fig. 4. Meter-long stigmatic spectrograph scheme with a focusing ($R = 1$ m) normal-incidence multilayer mirror and a plane grazing-incidence VLS grating. (1) Source, (2) entrance slit, (3) concave multilayer mirror, (4) VLS grating, (5) vertical focal curve of the spectrograph, (6) spectral focal curve of the spectrograph, (7) horizontal focus, (8) vertical focus. The plate scale was 5.36 \AA/mm at a wavelength $\lambda_1 = 144 \text{ \AA}$ and 6.40 \AA/mm at $\lambda_2 = 272 \text{ \AA}$. The slit width was $15 \text{ }\mu\text{m}$

обозначенные на рисунке как λ_1 и λ_2 . При этом на детектор отображается горизонтальный (спектральный) фокус входной щели и вертикальный фокус источника (ЛП). Плоскость лазерной мишени горизонтальна. Таким образом, в эксперименте регистрировался спектр с однокоординатным пространственным разрешением вдоль нормали к мишени.

На рис. 6а представлен спектр плазмы с пространственным разрешением, полученный за одну лазерную вспышку ($0,5 \text{ Дж}$) при облучении мишени LiF, а на рис. 6б — его спектрограмма, сделанная выше границы света и тени. Виден ряд тонких эффектов, наблюдение

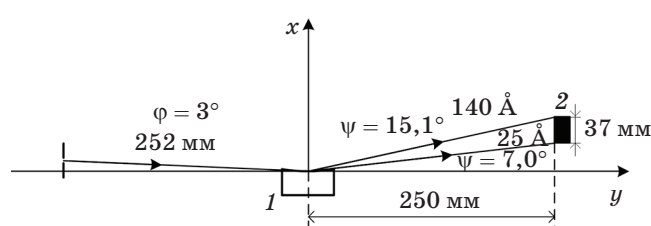


Рис. 5. Схема полуметрового спектрографа харадовского типа с плоским полем в диапазоне $25\text{--}140 \text{ \AA}$. 1 — VLS-решетка ($R = 6000 \text{ мм}$, $p_0 = 2400 \text{ мм}^{-1}$), 2 — матричный детектор ПЗС с обратной засветкой (2048×1024 квадратных ячеек размером $13 \times 13 \text{ мкм}$). Обратная линейная дисперсия составила $2,1 \text{ \AA/mm}$ на длине волны 30 \AA и $3,6 \text{ \AA/mm}$ на длине волны 110 \AA

Fig. 5. Scheme of a half-meter Harada-type spectrograph with a flat field in the range of $25\text{--}140 \text{ \AA}$. (1) VLS grating ($R = 6000 \text{ mm}$, $p_0 = 2400 \text{ mm}^{-1}$), (2) back-illuminated CCD array detector (2048×1024 square pixels $13 \times 13 \text{ }\mu\text{m}$ in size). The plate scale was 2.1 \AA/mm at a wavelength 30 \AA and 3.6 \AA/mm at a wavelength 110 \AA

которых возможно благодаря наличию одновременно высоких спектрального и пространственного разрешений. Резкая граница света и тени соответствует поверхности мишени. Вблизи мишени линия $113,90 \text{ \AA}$ (линия $\text{Lu}\beta$ иона LiIII) испытывает штарковское уширение, зависящее от плотности плазмы и, соответственно, от расстояния до мишени. Наконец, вблизи мишени на удалении до 50 мкм наблюдается, как и следовало ожидать, самообращение оптически толстой резонансной линии иона LiIII (135 \AA), обусловленной переходом $2p \rightarrow 1s$ ($\text{Ly}\alpha$). Пространственное разрешение составляет две ячейки детектора ПЗС (26 мкм в данном случае).

Спектральное разрешение также определяется размером ячейки детектора и численно равно произведению обратной линейной дисперсии и удвоенного размера ячейки. На рис. 7 приведена гистограмма отсчетов детектора вблизи линий $127,65$ и $127,80 \text{ \AA}$ иона FVII . Гистограмма показывает, что спектральное разрешение действительно составляет две ячейки детектора. Линии уверенно разрешаются, провал между ними составляет около 20% от их интенсивности. Спектральный интервал между ними отвечает практической разрешающей способности $\lambda/\delta\lambda \approx 850$.

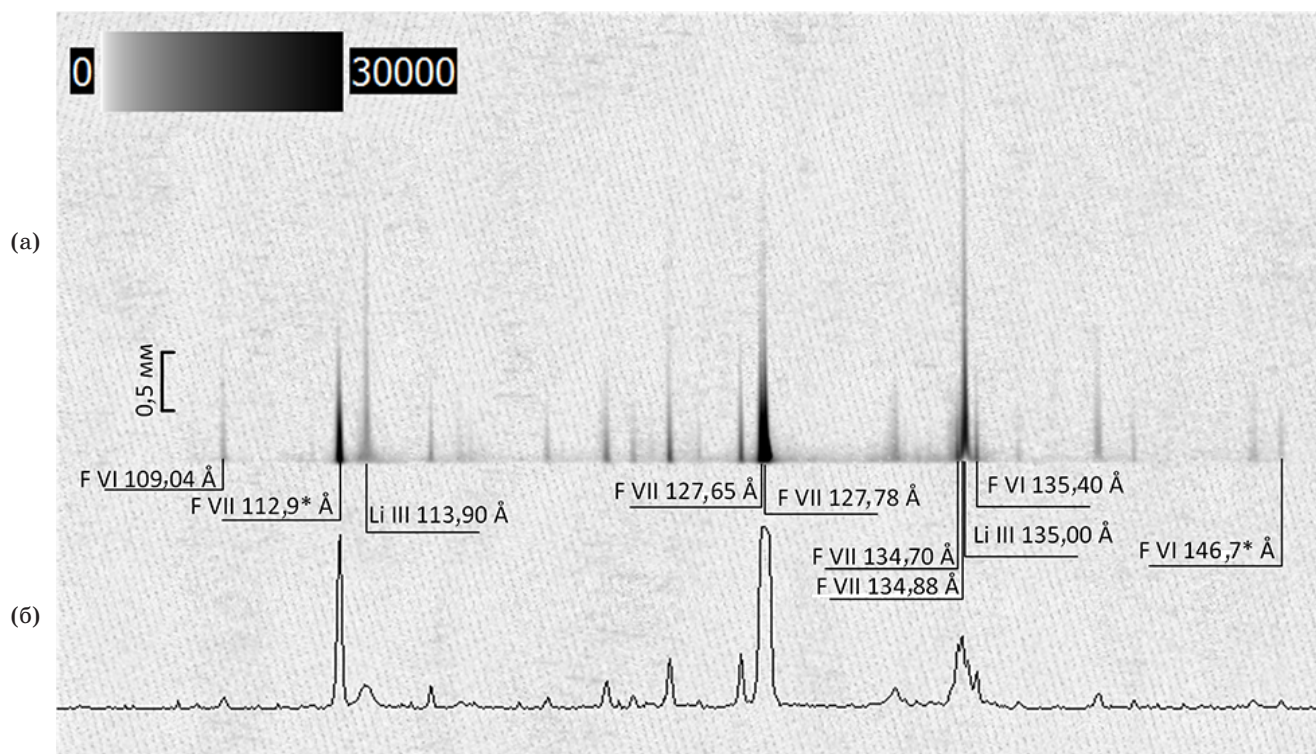


Рис. 6. Спектр плазмы (мишень LiF) с пространственным разрешением по нормали к мишени в диапазоне 109–147 Å (а) и его спектрограмма (б). Вариант спектрографа с зеркалом Mo/Be

Fig. 6. (a) Plasma spectrum (target LiF) with a spatial resolution along the normal to the target in the range 109–147 Å and (b) its spectrogram. Version of the spectrograph with a Mo/Be mirror

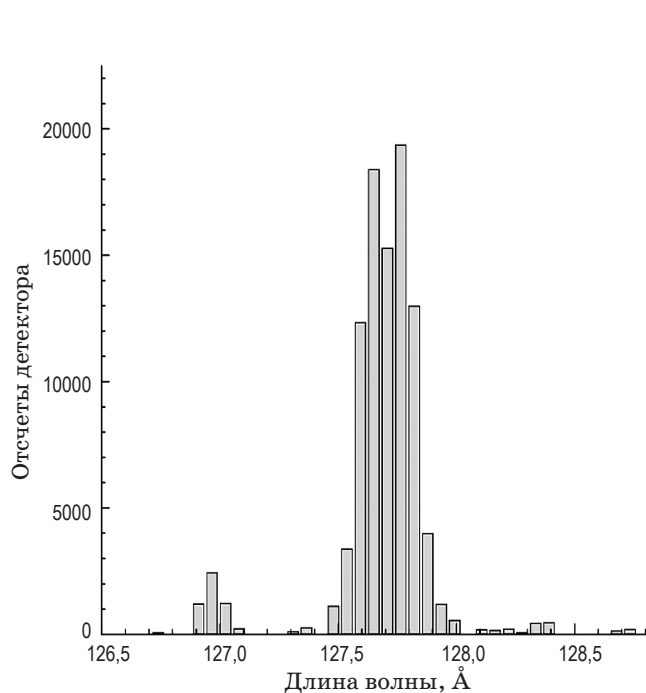


Рис. 7. Гистограмма отсчетов детектора вблизи линий 127,65 и 127,80 Å иона FVII

Fig. 7. Histogram of detector counts near the 127.65 and 127.80 Å FVII ion lines

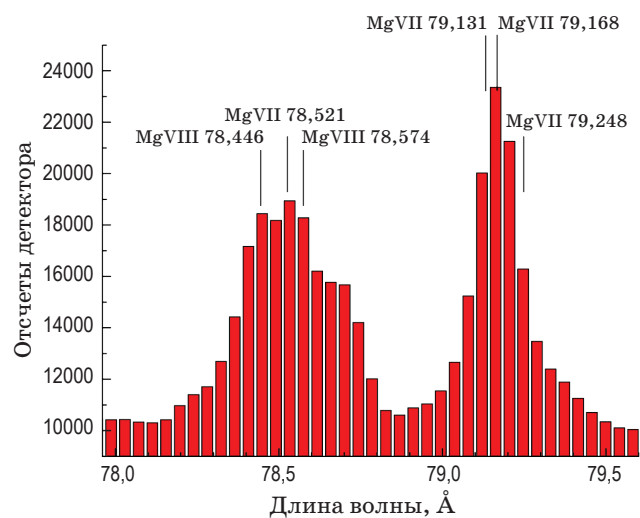


Рис. 8. Гистограмма отсчетов детектора в области длин волн 78–79,5 Å. Левый пик образован линиями иона MgVIII (78,446 и 78,574 Å) и иона MgVII 78,521 Å. Правый пик образован линиями иона MgVII (79,131, 79,168 и 79,248 Å)

Fig. 8. Histogram of detector counts in the wavelength range 78–79.5 Å. The left peak is formed by the 78.446 and 78.574 Å MgVIII ion lines and the 78.521 Å MgVII ion line. The right peak is formed by the MgVII ion lines 79.131, 79.168, and 79.248 Å

На рис. 8 представлена гистограмма участка в спектре магния, полученного при использовании харадовского спектрографа со сферической VLS-решеткой. В спектре магния присутствует очень большое число спектральных линий, поэтому не удалось найти одиночную линию, прямо характеризующую аппаратную функцию. По косвенным данным в этом приборе, также как и в стигматическом спектрографе, практическое разрешение определяется размером ячейки детектора, так что практическое разрешение приблизительно равно произведению обратной линейной дисперсии и удвоенного размера ячейки детектора. Так, линии 78,446 Å иона MgVIII и 78,521 Å иона MgVII разрешаются. Правый пик на рис. 8 образован линиями 79,131, 79,168 Å и впятеро более слабой линией 79,248 Å иона MgVII. Полуширина этого пика составляет три ячейки детектора. Если учесть, что на одну ячейку детектора приходится спектральный интервал 0,04 Å, приблизительно равный расстоянию 0,037 Å между линиями, то ширина аппаратной функции составит две ячейки детектора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kita T., Harada T., Nakano N., Kuroda H. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings for a flat-field grazing-incidence spectrograph // *Appl. Opt.* 1983. V. 22. № 4. P. 512–513. <https://doi.org/10.1364/AO.22.000512>
2. Harada T. Design and application of a varied-space plane grating monochromator for synchrotron radiation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 1990. V. 291. № 1–2. P. 179–184. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)90056-C](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)90056-C)
3. Hettrick M.C., Underwood J.H. Varied-space grazing incidence gratings in high resolution scanning spectrometers // *AIP Conf. Proc. American Institute of Physics.* 1986. V. 147. № 1. P. 237–245. <https://doi.org/10.1063/1.35993>
4. Kolesnikov A., Vishnyakov E., Shatokhin A., Ragozin E. Conception of a single-component broadband high-resolution plane-VLS-grating monochromator // *Appl. Opt.* 2022. V. 61. № 17. P. 5334–5340. <https://doi.org/10.1364/AO.462053>
5. Вишняков Е.А., Шатохин А.Н., Рагозин Е.Н. Концепция широкополосных стигматических спектрометров высокого разрешения для мягкой рентгеновской области спектра // *Квант.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе решена «обратная задача» интерференционной литографии: расчет оптической схемы, реализующей проектное распределение частоты интерференционных полос на поверхности заготовки решетки. Методом интерференционной литографии на длине волны 488 нм созданы высококачественные VLS-решетки: плоские с частотой, изменяющейся на поверхности по заданному закону в пределах 530–670 мм⁻¹, $p_0 = 600$ мм⁻¹, и сферические (радиус 6 м) с частотой 2100–2700 мм⁻¹, $p_0 = 2400$ мм⁻¹.

Плоская решетка испытана в стигматическом VLS-спектрографе, а сферическая решетка — в харадовском VLS-спектрографе с плоским полем. Продемонстрированы возможности спектрографов для диагностики плазмы с высоким спектральным разрешением, причем стигматический спектрограф предоставляет дополнительные возможности благодаря высокому пространственному разрешению. Показано, что практическое спектральное разрешение обоих приборов определяется размером ячейки детектора ПЗС (13 мкм в данном случае).

REFERENCES

1. Kita T., Harada T., Nakano N., Kuroda H. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings for a flat-field grazing-incidence spectrograph // *Appl. Opt.* 1983. V. 22. № 4. P. 512–513. <https://doi.org/10.1364/AO.22.000512>
2. Harada T. Design and application of a varied-space plane grating monochromator for synchrotron radiation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 1990. V. 291. № 1–2. P. 179–184. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)90056-C](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)90056-C)
3. Hettrick M.C., Underwood J.H. Varied-space grazing incidence gratings in high resolution scanning spectrometers // *AIP Conf. Proc. American Institute of Physics.* 1986. V. 147. № 1. P. 237–245. <https://doi.org/10.1063/1.35993>
4. Kolesnikov A., Vishnyakov E., Shatokhin A., Ragozin E. Conception of a single-component broadband high-resolution plane-VLS-grating monochromator // *Appl. Opt.* 2022. V. 61. № 17. P. 5334–5340. <https://doi.org/10.1364/AO.462053>
5. Vishnyakov E.A., Shatokhin A.N., Ragozin E.N. Conception of broadband stigmatic high-resolution spectrometers for the soft X-ray range // *Quantum Electron.* 2015. V. 45. № 4. P. 371–376.

- электрон. 2015. Т. 45. № 4. С. 371–376. <https://doi.org/10.1070/QE2015v045n04ABEH015595>
6. Shatokhin A.N., Kolesnikov A.O., Sasorov P.V., Vishnyakov E.A., Ragozin E.N. High-resolution stigmatic spectrograph for a wavelength range of 12.5–30 nm // *Opt. Exp.* 2018. V. 26. № 15. P. 19009–19019. <https://doi.org/10.1364/OE.26.019009>
 7. Soloviev A., Burdonov K., Chen S.N., Ereemeev A., Korzhimanov A., Pokrovskiy G.V., Pikuz T.A., Revet G., Sladkov A., Ginzburg V., Khazanov E., Kuzmin A., Osmanov R., Shaikin I., Shaykin A., Yakovlev I., Pikuz S., Starodubtsev M., Fuchs J. Experimental evidence for short-pulse laser heating of solid-density target to high bulk temperatures // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. Article ID: 12144. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11675-2>
 8. Pirozhkov A.S., Esirkepov T.Zh., Pikuz T.A., Faenov A.Ya., Ogura K., Hayashi Y., Kotaki H., Ragozin E.N., Neely D., Kiriyaama H., Koga J.K., Fukuda Y., Sagisaka A., Nishikino M., Imazono T., Hasegawa N., Kawachi T., Bolton P.R., Daido H., Kato Y., Kondo K., Bulanov S.V., Kando M. Burst intensification by singularity emitting radiation in multi-stream flows // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. № 1. Article number: 17968. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17498-5>
 9. Рагозин Е.Н., Вишняков Е.А., Колесников А.О., Пирожков А.С., Шатохин А.Н. Спектрометры для мягкого рентгеновского диапазона на основе аperiодических отражательных решеток и их применение // *УФН.* 2021. Т. 191. № 5. С. 522–542. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.06.038799>
 10. Lin D., Liu Z., Dietrich K., Sokolov A., Sertsu M.G., Zhou H., Huo T., Kroker S., Chen H., Qiu K., Xu X., Schäfers F., Liu Y., Kley E.-B., Hong Y. Soft X-ray varied-line-spacing gratings fabricated by near-field holography using an electron beam lithography-written phase mask // *J. Synchrotron Radiation.* 2019. V. 26. № 5. P. 1782–1789. <https://doi.org/10.1107/S1600577519008245>
 11. DeRoo C.T., Termini J., Gris   F., McEntaffer R.L., Donovan B.D., Eichfeld C. Limiting spectral resolution of a reflection grating made via electron-beam lithography // *Astrophys. J.* 2020. V. 904. № 2. P. 142–151. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abbe15>
 12. Колесников А.О., Рагозин Е.Н., Шатохин А.Н. Концепция стигматического рентгеновского спектрографа с плоским полем на основе конической дифракции // *Квант. электрон.* 2022. Т. 52. № 5. С. 491–496. <https://doi.org/10.1070/QEL18048>
 13. McCoy J.A., McEntaffer R.L., Miles D.M. Extreme ultraviolet and soft X-ray diffraction efficiency of a blazed reflection grating fabricated by thermally activated selective topography equilibration // *Astrophys. J.* 2020. V. 891. № 2. P. 114–125. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab76d3>
 6. Shatokhin A.N., Kolesnikov A.O., Sasorov P.V., Vishnyakov E.A., Ragozin E.N. High-resolution stigmatic spectrograph for a wavelength range of 12.5–30 nm // *Opt. Exp.* 2018. V. 26. № 15. P. 19009–19019. <https://doi.org/10.1364/OE.26.019009>
 7. Soloviev A., Burdonov K., Chen S.N., Ereemeev A., Korzhimanov A., Pokrovskiy G.V., Pikuz T.A., Revet G., Sladkov A., Ginzburg V., Khazanov E., Kuzmin A., Osmanov R., Shaikin I., Shaykin A., Yakovlev I., Pikuz S., Starodubtsev M., Fuchs J. Experimental evidence for short-pulse laser heating of solid-density target to high bulk temperatures // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. Article ID: 12144. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11675-2>
 8. Pirozhkov A.S., Esirkepov T.Zh., Pikuz T.A., Faenov A.Ya., Ogura K., Hayashi Y., Kotaki H., Ragozin E.N., Neely D., Kiriyaama H., Koga J.K., Fukuda Y., Sagisaka A., Nishikino M., Imazono T., Hasegawa N., Kawachi T., Bolton P.R., Daido H., Kato Y., Kondo K., Bulanov S.V., Kando M. Burst intensification by singularity emitting radiation in multi-stream flows // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. № 1. Article number: 17968. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17498-5>
 9. Ragozin E.N., Vishnyakov E.A., Kolesnikov A.O., Pirozhkov A.S., Shatokhin A.N. Soft X-ray spectrometers based on aperiodic reflection gratings and their application // *Physics — Uspekhi.* 2021. V. 64. № 5. P. 495–514. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.06.038799>
 10. Lin D., Liu Z., Dietrich K., Sokolov A., Sertsu M.G., Zhou H., Huo T., Kroker S., Chen H., Qiu K., Xu X., Schäfers F., Liu Y., Kley E.-B., Hong Y. Soft X-ray varied-line-spacing gratings fabricated by near-field holography using an electron beam lithography-written phase mask // *J. Synchrotron Radiation.* 2019. V. 26. № 5. P. 1782–1789. <https://doi.org/10.1107/S1600577519008245>
 11. DeRoo C.T., Termini J., Gris   F., McEntaffer R.L., Donovan B.D., Eichfeld C. Limiting spectral resolution of a reflection grating made via electron-beam lithography // *Astrophys. J.* 2020. V. 904. № 2. P. 142–151. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abbe15>
 12. Kolesnikov A.O., Ragozin E.N., Shatokhin A.N. The concept of a stigmatic flat-field X-ray spectrograph based on conical diffraction // *Quantum Electron.* 2022. V. 52. № 5. P. 491–496. <https://doi.org/10.1070/QEL18048>
 13. McCoy J.A., McEntaffer R.L., Miles D.M. Extreme ultraviolet and soft X-ray diffraction efficiency of a blazed reflection grating fabricated by thermally activated selective topography equilibration // *Astrophys. J.* 2020. V. 891. № 2. P. 114–125. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab76d3>

14. Harzendorf T., Michaelis D., Flügel-Paul T., Bianco A., Oliva E., Zeitner U. Surface relief gratings manufactured by lithographic means being a candidate for VLT MOONS instrument's main dispersers // Proc. SPIE. 2018. V. 10706. P. 1070621. <https://doi.org/10.1117/12.2313164>
15. Namioka T., Koike M. Aspheric wave-front recording optics for holographic gratings // Appl. Opt. 1995. V. 34. № 13. P. 2180–2186. <https://doi.org/10.1364/AO.34.002180>

АВТОРЫ

Алексей Олегович Колесников — кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-2511-762X>; alexey6180@gmail.com

Виктор Николаевич Михайлов — кандидат физико-математических наук, инженер-оптик, ООО «ХолоГрэйт», Санкт-Петербург, 190013, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-7340-0385>; viktor.mikhailov@holograte.com

Евгений Николаевич Рагозин — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-5912-9229>; enragozin@gmail.com

Владислав Петрович Ратушный — инженер-оптик, ООО «ХолоГрэйт», Санкт-Петербург, 190013, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-6734-5976>; vlad@holograte.com

Александр Андреевич Соловьев — кандидат физико-математических наук, заместитель заведующего отделом по научной работе, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия; доцент, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603022, Россия; Scopus ID: 57154365600; <https://orcid.org/0000-0001-8595-5604>; 7oloviev@gmail.com

Алексей Николаевич Шатохин — кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-6057-3535>; ShatohinAL@gmail.com

14. Harzendorf T., Michaelis D., Flügel-Paul T., Bianco A., Oliva E., Zeitner U. Surface relief gratings manufactured by lithographic means being a candidate for VLT MOONS instrument's main dispersers // Proc. SPIE. 2018. V. 10706. P. 1070621. <https://doi.org/10.1117/12.2313164>
15. Namioka T., Koike M. Aspheric wave-front recording optics for holographic gratings // Appl. Opt. 1995. V. 34. № 13. P. 2180–2186. <https://doi.org/10.1364/AO.34.002180>

AUTHORS

Aleksei O. Kolesnikov — PhD, Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-2511-762X>; alexey6180@gmail.com

Viktor N. Mikhailov — PhD, Optics Engineer, HoloGrate LLC, St. Petersburg, 190013, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-7340-0385>; viktor.mikhailov@holograte.com

Evgeny N. Ragozin — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-5912-9229>; enragozin@gmail.com

Vladislav P. Ratushnyi — Optics Engineer, HoloGrate LLC, St. Petersburg, 190013, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-6734-5976>; vlad@holograte.com

Alexander A. Soloviev — PhD, Deputy Head of the Department, Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod, 603950, Russia; Associate Professor, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, 603022, Russia; Scopus ID: 57154365600; <https://orcid.org/0000-0001-8595-5604>; 7oloviev@gmail.com

Alexey N. Shatokhin — PhD, Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-6057-3535>; ShatohinAL@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.10.2022
Одобрена после рецензирования 30.11.2022
Принята к печати 26.01.2023

The article was submitted to the editorial office 17.10.2022
Approved after review 30.11.2022
Accepted for publication 26.01.2023