

Создание плоских и вогнутых VLS-решеток для вакуумной области спектра методом интерференционной литографии и их применение

А. О. Колесников¹, В.Н. Михайлов², Е. Н. Рагозин¹, В. П. Ратушный², А. Н. Шатохин¹

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

² ООО «ХолоГрэйт», Санкт-Петербург, Россия

Методом интерференционной литографии изготовлены плоские и вогнутые VLS-решетки, т.е. дифракционные решетки с частотой линий, монотонно меняющейся на апертуре по наперед заданному закону. Решена обратная задача интерференционной литографии для литографической схемы с одним сферическим зеркалом-аббератором. Запись VLS-решеток двух типов производилась на халькогенидном фоторезисте с использованием непрерывного излучения аргонового лазера на длине волны 488 нм с частотами в центре 600 мм⁻¹ для плоских решёток и 2400 мм⁻¹ для сферических решёток. Частота изменялась в пределах от 530 мм⁻¹ до 670 мм⁻¹ для плоских решёток и от 2100 мм⁻¹ до 2700 мм⁻¹ для сферических решёток на краях апертуры. Параметры решеток соответствуют расчетным. Решетки испытаны в спектрометрах скользящего падения с плоским полем, получены линейчатые спектры многозарядных ионов с высоким разрешением, возбуждаемые в лазерной плазме.

Ключевые слова: VLS-решетка, интерференционная литография, халькогенидный фоторезист, спектрограф с плоским полем, мягкое рентгеновское излучение, лазерная плазма.

Цитирование: Колесников, А. О. Создание плоских и вогнутых VLS-решеток для вакуумной области спектра методом интерференционной литографии и их применение / А. О. Колесников, В. Н. Михайлов, Е. Н. Рагозин, В. П. Ратушный, А. Н. Шатохин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 134–137.

Введение

Современные спектральные приборы для ВУФ и мягкой рентгеновской области спектра основаны на применении плоских и вогнутых VLS-решеток, т.е. дифракционных решеток, у которых частота линий на апертуре монотонно меняется по наперед заданному закону: $p(y) = p_0 + p_1 y + p_2 y^2 + p_3 y^3 + \dots$ [1]. Применение VLS-решеток позволяет создавать (i) монохроматоры с постоянным фокусным расстоянием, постоянным углом отклонения и неподвижными щелями; (ii) спектрографы с плоским полем, совместимые с современными ПЗС-детекторами. VLS-решетки используются в приборах рентгеновской астрономии, при работе с синхротронными источниками, ЛСЭ, лазерной плазмой, быстрыми электрическими разрядами и др. VLS-решетки изготавливают на программируемых гравировальных станках, электронно-литографических установках с точностью позиционирования ~10 нм на апертуре ~100 × 10 мм, а также методом интерференционной литографии. В настоящей работе мы сообщаем об изготовлении плоских и вогнутых VLS-решеток методом интерференционной литографии на длине волны 488 нм.

1. Оптическая схема интерференционной литографии и изготовление решеток

На первом этапе выполнялся расчет оптических схем, в каждом отдельном случае реализующих требуемое распределение частоты интерференционных полос на апертуре подложки. В схеме применялось сферическое зеркало-аббератор. В таблице 1 даны расчетные (проектные) и измеренные коэффициенты p_i для плоской VLS-решетки, предназначенной для работы в изображающих спектрометрах на области 111 – 138 Å и 125 – 250 Å, а на рисунке 1 – расчетная литографическая схема на длине волны 488 нм.

Незначительное отличие коэффициентов p_i от расчетных легко компенсируется при окончательной юстировке спектрографа.

Использовались суперполированные подложки из стекла К8 (плоские) и кварцевого стекла КУ1 ($R = 6000$ мм). На подложки в камерах вакуумного напыления наносился слой халькогенидного фоторезиста с заданными параметрами, обеспечивающими необходимую светочувствительность. Последующее экспонирование лазерным излучением с длиной волны 488 нм и химическое травление обеспечивало получение заданной глубины рельефа. После этого было нанесено золотое отражающее покрытие толщиной 40 нм.

Таблица 1. Расчётные и измеренные коэффициенты p_i для плоской VLS-решетки

Параметр	Расчет	Измерение
p_0 , мм ⁻¹	600	599,98
p_1 , мм ⁻²	2,37	2,285
p_2 , мм ⁻³	$6,94 \times 10^{-3}$	$6,63 \cdot 10^{-3}$
p_3 , мм ⁻⁴	$1,79 \times 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$

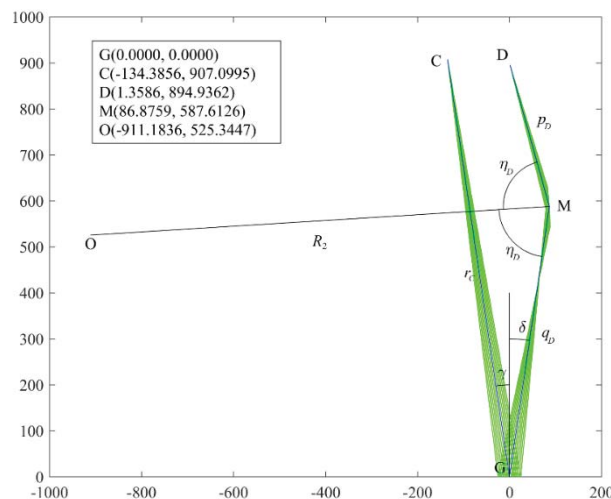


Рис. 1. Расчетная схема записи плоской VLS-решетки. С и D – “точечные” источники сферической волны. G – записываемая решетка. Центр решетки, G – начало координат. Поверхность решетки параллельна оси x . Нормаль R_2 берется в т. М. Угол η_b отсчитывается от этой нормали. O – центр кривизны зеркала радиусом 1000 мм. На вставке даны координаты точек с избыточной точностью.

На рисунке 2 показаны расчетная и измеренная частота линий VLS-решетки с $p_0 = 2400 \text{ мм}^{-1}$, а в таблице 2 — её расчётные и измеренные коэффициенты p_i . Измерения проводились в автоколлимационной схеме с применением прецизионных поворотного и трансляционного столиков. Глубина квазисинусоидального профиля, измеренная по отношению интенсивностей первого и нулевого порядков дифракции на длине волны 6328 \AA , составила 11,9, 10,8 и 7,5 нм соответственно на низкочастотном краю, в центре, и на высокочастотном краю апертуры.

Таблица 2. Расчётные и измеренные коэффициенты p_i для сферической VLS-решетки

Параметр	Расчёт	Измерение
$p_0, \text{мм}^{-1}$	2405.2	2402.0
$p_1, \text{мм}^{-2}$	15.659	15.616
$p_2, \text{мм}^{-3}$	8.2086×10^{-2}	8.0812×10^{-2}
$p_3, \text{мм}^{-4}$	5.1155×10^{-4}	6.9708×10^{-4}

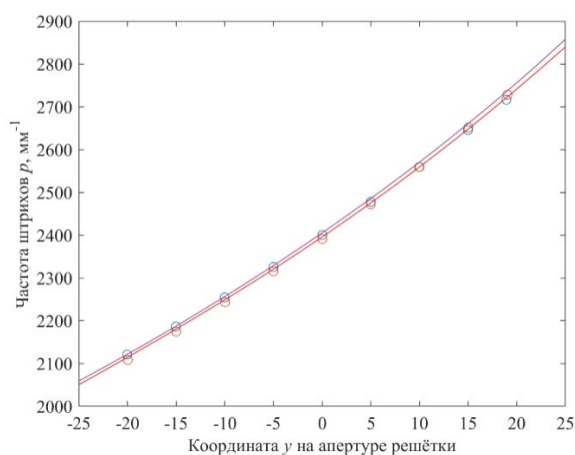


Рис. 2. Зависимость частоты линий от координаты y . Кружки — измеренные значения в ± 1 порядках дифракции. Нижняя кривая — аппроксимация результатов измерения полиномом (1), верхняя — расчётный полином (исходя из параметров схемы записи).

Плоская решетка была испытана в схеме изображающего спектрометра на область $111 - 138 \text{ \AA}$, и были зарегистрированы линейчатые спектры многозарядных ионов Li и F, возбуждаемые в лазерной плазме.

Заключение

Изготовлены плоские и сферические VLS-решетки методом интерференционной литографии на длине волны 488 нм , в том числе с высокой частотой линий (2400 мм^{-1} в центре апертуры). Параметры решеток близки к проектным значениям.

Список источников

- [1] Рагозин Е. Н. / Е. Н. Рагозин, Е. А. Вишняков, А. О. Колесников, А. С. Пирожков, А. Н. Шатохин// Успехи физических наук. — 2021. — Том 191. — № 5. — С. 522–542.

Production of plane and concave VLS gratings for the vacuum spectral domain by interference lithography and their application

A. O. Kolesnikov¹, V. N. Mikhailov², E. N. Ragozin, V. P. Ratushnyi², A. N. Shatokhin¹

¹ P. N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russia

² HoloGreat LLC, Saint Petersburg, Russia

Plane and concave VLS gratings were fabricated by interference lithography, i.e. diffraction gratings with a line density that varies monotonically across the aperture according to a predefined law. The inverse problem of interference lithography for a lithographic scheme with one spherical aberrator mirror was solved. Two types of VLS gratings were recorded on a chalcogenide photoresist using cw argon laser radiation at a wavelength of 488 nm with central line densities of 600 mm⁻¹ for plane gratings and 2400 mm⁻¹ for spherical gratings. The frequency varied from 530 mm⁻¹ to 670 mm⁻¹ for plane gratings and from 2100 mm⁻¹ to 2700 mm⁻¹ for spherical gratings at the edges of the aperture. The grating parameters correspond to the design ones. The gratings were tested in flat-field grazing incidence spectrometers, and high-resolution line spectra of multiply charged ions excited in a laser plasma were obtained.

Keywords: VLS grating, Interference lithography, Chalcogenide photoresist, Flat-field spectrograph, Soft X-rays, Laser plasma.