

РЕНТГЕНОВСКАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ

VLS-спектрометр с плоским полем на область длин волн 50 – 275 Å

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

Рассчитан и реализован VLS-спектрограф с плоским полем на область длин волн 50–275 Å со средней линейной дисперсией 0.18 мм/Å, использующий сферическую VLS-решетку скользящего падения (спектрограф класса Харады). Для изготовления VLS-решетки методом интерференционной литографии разработан алгоритм расчета схемы записи со вспомогательным сферическим зеркалом-аббератором (решение обратной задачи интерференционной литографии). При испытании спектрографа зарегистрированы линейчатые спектры лазерной плазмы твердотельных мишеней фторида лития и тефлона, возбуждаемой сфокусированным пучком лазера (0.5 Дж, 8 нс, 1.06 мкм). Продемонстрирована разрешающая способность $\lambda/\delta\lambda = 800$ в районе длины волны 135 Å.

Ключевые слова: мягкий рентгеновский диапазон, спектрограф с плоским полем, лазерная плазма, сферическая VLS-решетка, интерференционная литография.

1. Введение

Начиная с 1980-х гг. в мире ведутся разработки дифракционных спектрометров мягкого рентгеновского (МР) диапазона с плоским полем и почти нормальным падением дифрагирующих пучков на детектор. Это делает спектрометры такого класса совместимыми с современными матричными ПЗС-детекторами. Первый прибор такого класса, в котором плоское поле занимало область 50–200 Å, был создан Т.Харадой [1, 2]. Он использовал сферическую ($R = 5649$ мм) гравированную VLS-решетку (Varied Line-Space Grating) размером 50 × 30 мм с частотой штрихов $p_0 = 1200$ мм⁻¹ в центре апертуры, причем шаг штрихов изменялся от 0.69 до 0.99 мкм. В дальнейшем были разработаны и созданы спектрометры с плоским полем на другие спектральные диапазоны и с более высокой разрешающей способностью. Так, в LLNL (США) используется спектрограф с плоским полем на область 10–50 Å [3, 4].

На основе сферических VLS-решеток создавались и бесщелевые изображающие спектрографы для регистрации высоких гармоник лазерного излучения и их углового распределения, причем использовалась как решетка Харады с $p_0 = 1200$ мм⁻¹ [5], так и решетка, разработанная М.Койке с соавторами ($R = 15920$ мм, $p_0 = 2400$ мм⁻¹) [6]. VLS-решетки применяются также в эмиссионной спектроскопии МР диапазона (SXES-спектроскопия), совмещенной с электронным микроскопом [7] (см. также обзор [8]). Ключевым элементом спектрометра с плоским полем является VLS-решетка. Работы по созданию VLS-решеток и VLS-спектрометров на их основе активно ведутся и в настоящее время, причем акцент смещается в сторону расширения рабочего спектрального диапазона в сторо-

ну «нежных» рентгеновских лучей (tender X-rays, $\hbar\omega \approx 1.5$ –6 кэВ) [9] и увеличения разрешающей способности [10]. Еще одним перспективным направлением является создание изображающих VLS-спектрометров высокого разрешения на основе вогнутого многослойного зеркала нормального падения и плоской VLS-решетки [11–13].

Целью настоящей работы было создание компактного VLS-спектрометра с плоским полем на область $\lambda \approx 50$ –275 Å. Для изготовления VLS-решетки был выбран метод интерференционной литографии, в основе которого лежит расчет схемы записи, реализующей требуемую зависимость частоты интерференционных полос на экспонируемой апертуре подложки (будущей решетке). Каждый новый VLS-спектрометр, создаваемый для конкретной задачи и конкретного источника излучения, требует оригинальную решетку со своим неповторимым законом изменения шага решетки на апертуре. Поэтому второй, еще более важной задачей, было научиться рассчитывать схему записи для широкого класса VLS-решеток. Эта задача была решена на примере полуметрового VLS-спектрометра с плоским полем.

2. Схема спектрографа

В нашей работе [14] были рассчитаны три спектрографа типа спектрографа Харады с габаритами около 0.25, 0.5 и 1.5 м для работы в диапазонах 90–250, 50–275 и 20–110 Å соответственно. Для реализации в настоящей работе был выбран полуметровый прибор с обратной линейной дисперсией 6.28 Å/мм на длине волны 150 Å. Вблизи $\lambda = 150$ Å теоретически ожидаемая разрешающая способность, соответствующая двум ячейкам детектора, составляет около 920. На рис. 1 показана схема прибора. Частота штрихов VLS-решетки описывается полиномом

$$p(y) = p_0 + p_1y + p_2y^2 + p_3y^3, \quad (1)$$

где p_0 – частота штрихов в центре апертуры решетки. Между краями решетки частота штрихов (1) должна из-

А.О.Колесников, Е.А.Вишняков, А.Н.Шатохин, Е.Н.Рагозин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: alexey6180@gmail.com

Поступила в редакцию 10 июня 2019 г., после доработки – 25 июля 2019 г.

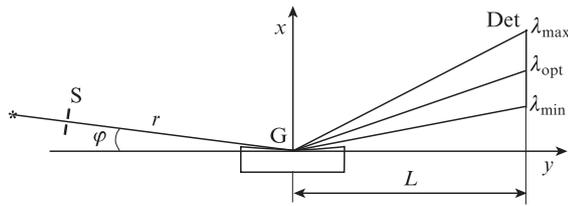


Рис.1. Схема спектрографа: G – центр VLS-решетки; S – входная щель; Det – детектор.

меняться от 1027.5 до 1427.5 мм⁻¹ на апертуре 50 мм. Ниже приведены основные расчетные параметры спектрографа и VLS-решетки.

Радиус кривизны сферической	
решетки R (мм)	6000
Диаметр решетки D (мм)	60
p_0 (мм ⁻¹)	1200
p_1 (мм ⁻²)	8.0
p_2 (мм ⁻³)	0.044
p_3 (мм ⁻⁴)	2.28×10^{-4}
Угол скользкого падения φ (град)	3.0
Длина волны компенсации	
аббераций λ_{opt} (Å)	125
Расстояние входная щель – центр	
решетки r (мм)	252
L (мм)	250

После формулирования требований к параметрам прибора (спектральный диапазон, разрешение, габариты) и выбора основных параметров схемы (φ , p_0 и др.) необходимо провести аналитический расчет паракиальной фокальной кривой и выбор значения p_1 , при котором рабочий участок спектральной фокальной кривой от λ_{min} до λ_{max} наиболее хорошо аппроксимируется отрезком прямой. Затем нужно найти оптимальное положение детектора Det, минимизирующее отклонение его чувствительной поверхности от найденного плоского участка фокальной поверхности. После этого на детекторе методом численной трассировки лучей строятся спектральные изображения точечных монохроматических источников, помещенных на место входной щели (см. [14]). При этом уточняются основные параметры схемы и находятся коэффициенты p_2 и p_3 , минимизирующие абберацию меридиональной комы и сферическую абберацию на заданном участке. Такой алгоритм (верхний цикл на рис.2) является сходящейся самосогласованной процедурой, в результате которой однозначно определяются требования к VLS-решетке.

При выборе метода изготовления VLS-решетки мы остановились на интерференционной литографии. Этапы изготовления решетки описаны ниже. Следует отметить, что при несовпадении полученных и расчетных параметров p_i может потребоваться коррекция оптической схемы прибора. Полная последовательность действий при разработке прибора представлена на схеме рис.2.

3. Изготовление VLS-решетки

Изготовлению VLS-решетки методом интерференционной литографии предшествует расчет оптической схемы записи (решение обратной задачи интерференционной литографии), который проводится с учетом длины вол-

ны записывающего лазера и размеров литографического стола. При записи на подложке должна формироваться интерференционная картина, в которой пространственная частота интерференционных полос на апертуре описывается полиномом (1) с найденными ранее коэффициентами p_1 , p_2 и p_3 . Имеет также значение и радиус кривизны интерференционных полос.

Для изготовления VLS-решетки была выбрана схема записи, состоящая из двух точечных когерентных источников и одного вспомогательного сферического зеркала наклонного падения, которое вносит в волновой фронт одного из интерферирующих пучков контролируемые абберации (рис.3).

Для расчета схем записи такого типа был разработан алгоритм, состоящий из трех этапов. На первом этапе применялось аналитическое обращение прямой задачи интерференционной литографии, подробно изложенной в [15]. Из него находились приблизительные положения точечных источников и зеркала, которые затем использовались в качестве начального приближения при нахождении точного решения на этапе оптимизации. Такая оптимизация возможна за счет наличия степеней свободы в схеме записи, т.е. наличия непрерывного множества значений параметров схемы записи, соответствующих одному и тому же полиному (1). В основе оптимизации лежит минимизация функционала вида

$$\int_{y_{\text{min}}}^{y_{\text{max}}} [p(y) - p^*(y)]^2 \exp\left(-\frac{y^2}{2y_{\text{opt}}^2}\right) dy + a_1 \exp\left(-\frac{r_{\text{groove}}}{r_{\text{opt}}}\right) + a_2 (\exp(\Delta y - \Delta y^*) - 1) + a_3 (\exp(\Delta z - \Delta z^*) - 1), \quad (2)$$

где $p(y)$ – частота штрихов; $\Delta y = y_{\text{max}} - y_{\text{min}}$ – ширина решетки; Δz – высота решетки; r_{groove} – радиус кривизны штрихов; a_i ($i = 1-3$), y_{opt} и r_{opt} – параметры, управляющие процессом оптимизации. Звездочкой обозначены целевые значения величин. Величины без звездочек, получающиеся в схеме записи, вычислялись 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 обеспечивают требуемую апертуру решетки. Пример результата оптимизации приведен на рис.4.

После завершения оптимизации следует проверка схемы записи. Для этого моделируется схема спектрографа с решеткой, соответствующей схеме записи: методом численной трассировки лучей строятся спектральные изображения точечного монохроматического источника, помещенного на входную щель прибора. На этом этапе при необходимости может быть пересмотрена как схема записи решетки, так и схема спектрографа.

Сферические подложки диаметром 60 мм ($R = 6000$ мм) и вспомогательное зеркало-аббератор диаметром 150 мм ($R = 500$ мм) были изготовлены из плавленного кварца КУ-1 (ООО СОТБЕК, Москва). Сферические VLS-решетки были изготовлены в НПО ГИПО (Казань) методом интерференционной литографии на длине волны 0.53 мкм и покрыты отражающим слоем золота. Затем по дифракции лазерного излучения (0.63 мкм) в ФИАНе была измерена реальная зависимость $p_{\text{exp}}(y)$, которая оказалась практически неотличимой от требуемой $p(y)$ (см. разд.2, расчетные параметры схемы и решетки) (рис.5).

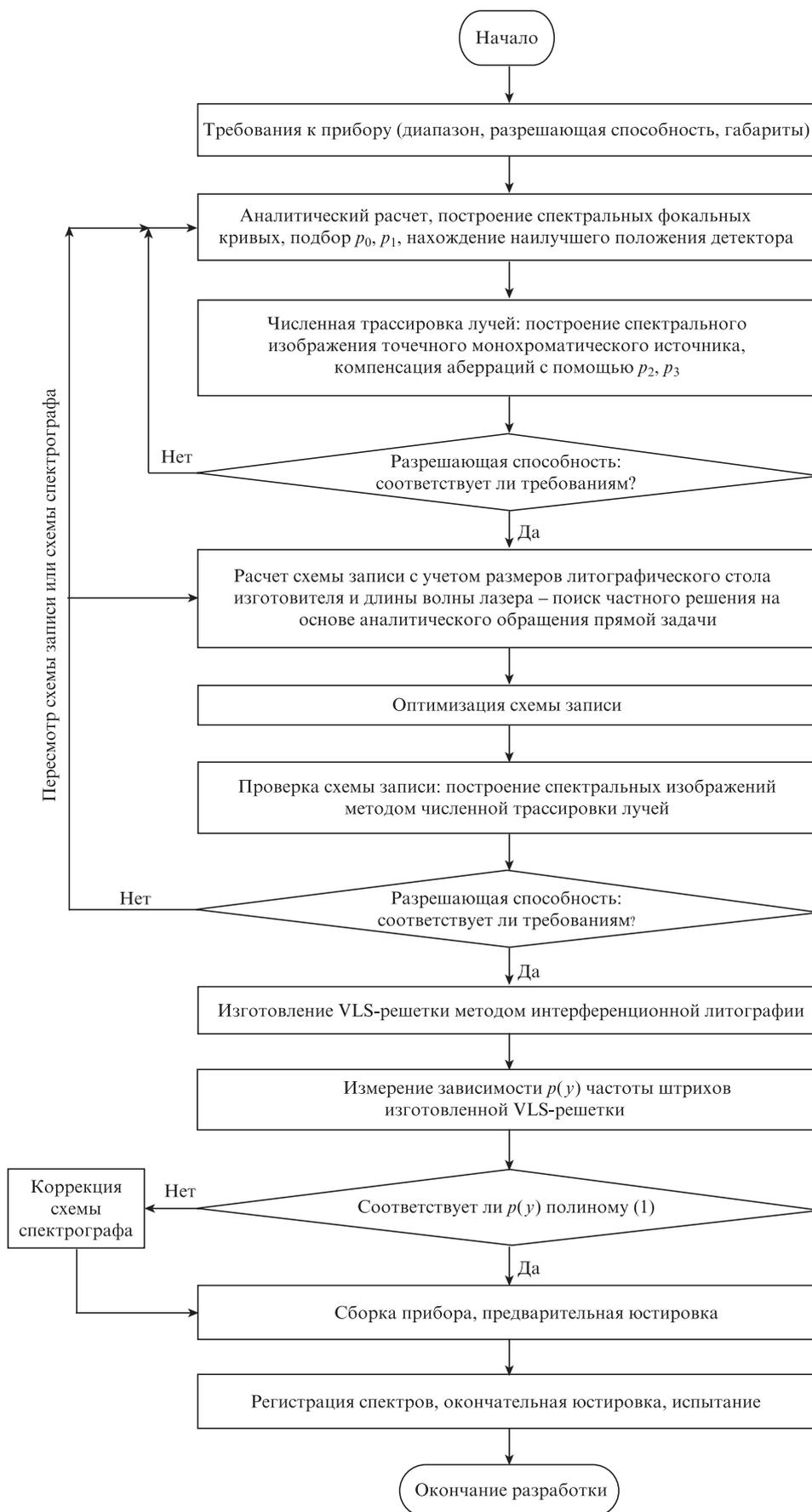


Рис.2. Блок-схема, описывающая цикл разработки VLS-спектрометра.

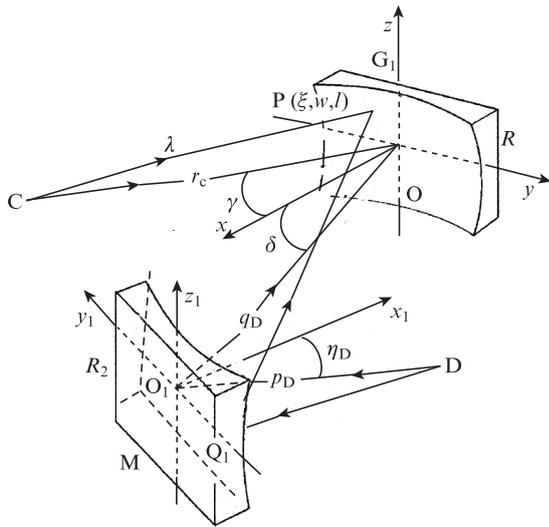


Рис.3. Схема интерференционной литографии со вспомогательным сферическим зеркалом: С и D – точечные когерентные монохроматические источники; G₁ – заготовка дифракционной решетки; M – сферическое вспомогательное зеркало-аббератор радиуса R₂; γ < 0, δ > 0 и η_D < 0 – углы падения центральных лучей на заготовку решетки и зеркало-аббератор; r_c, p_D, q_D – расстояния между источником С и центром заготовки, источником D и зеркалом, центром заготовки и зеркалом соответственно.

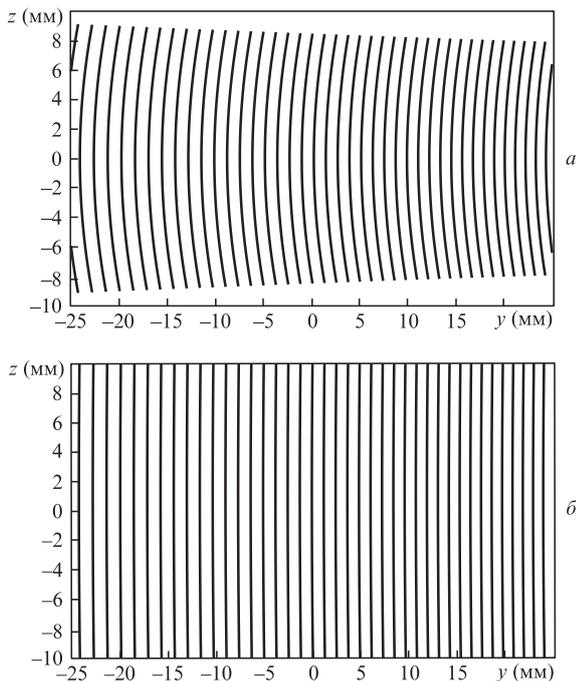


Рис.4. Пример оптимизации схемы записи VLS-решетки, результатом которой явилось увеличение радиуса кривизны линий с 32 (а) до 500 мм (б) и увеличение апертуры при сохранении требуемой зависимости p(y).

4. Реализация спектрографа и регистрация линейчатых спектров многозарядных ионов в лазерной плазме

Элементы спектрографа были смонтированы на жесткой дюралюминиевой плите длиной 0.6 м (рис.6). В качестве детектора использовалась ПЗС-матрица с обратной засветкой (2048 × 1024) с квадратными ячейками разме-

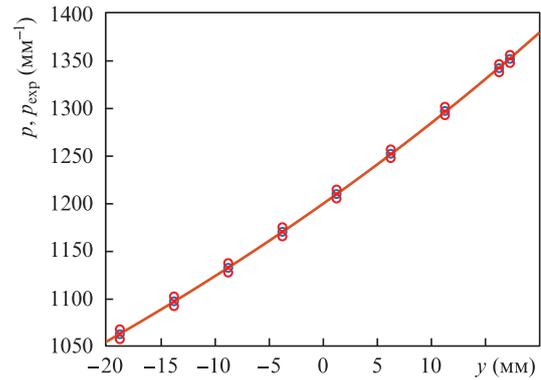


Рис.5. Расчетная (кривая) и измеренная (точки) зависимости частоты штрихов VLS-решетки.

ром 13 мкм и протяженностью чувствительной области 27 мм (ее чувствительность была измерена в [16, 17]). Решетка и детектор помещались на управляемые с компьютера высокоточный поворотный столик и однокоординатный транслятор с электроприводом соответственно. Первичная юстировка спектрографа проводилась с помощью He-Ne-лазера (0.63 мкм). Для тестирования спектрометр помещался в цилиндрическую вакуумную камеру диаметром 0.9 м и длиной 3.8 м, оснащенную системой безмасляной откачки, с остаточным давлением ~10⁻⁵ Тор. Окончательная юстировка проводилась при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов без развакуумирования камеры благодаря высокоточным моторизованным позиционерам Standa Vicon (Литва).

Спектры лазерной плазмы возбуждались лазерными импульсами (0.5 Дж, 8 нс, 1.06 мкм), которые фокусировались линзой с f = 110 мм на твердотельную мишень. Поверхность мишени лежала в плоскости дисперсии прибора.

На рис.7 представлена фотография спектра, полученного за одну лазерную вспышку при облучении мишени LiF и содержащего линии ионов LiIII и FV-FVII. Полуширины (FWHM) одиночных линий составляют две ячейки детектора. Практическое спектральное разрешение ограничивается пространственным разрешением детектора и численно равно произведению обратной линейной дисперсии и удвоенному размеру ячейки ПЗС-матрицы (26 мкм). Поскольку дисперсия зависит от длины волны, то и спектральное разрешение также зависит от нее (рис.8). Теоретическая разрешающая способность, соответствующая двум ячейкам детектора, изменяется от 550 в районе 60 Å до 1170 в районе 220 Å.

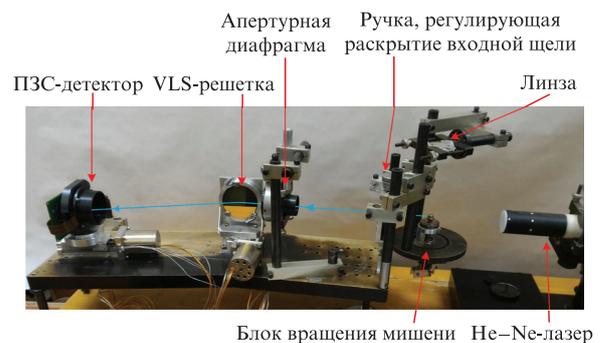


Рис.6. VLS-спектрометр с плоским полем на область 50–275 Å на жесткой плите длиной 0.6 м.

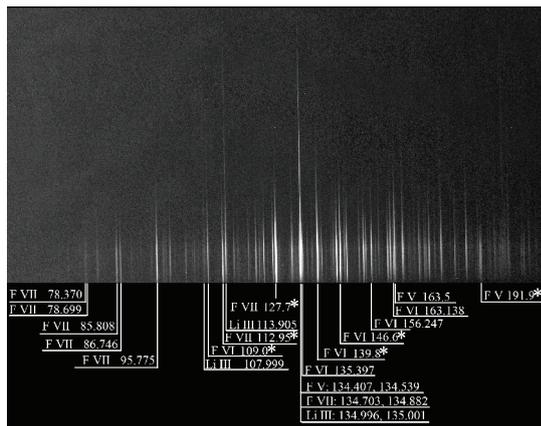


Рис.7. Спектр ионов Li III и F V–F VII (мишень LiF). Звездочка обозначает неразрешенные группы линий.

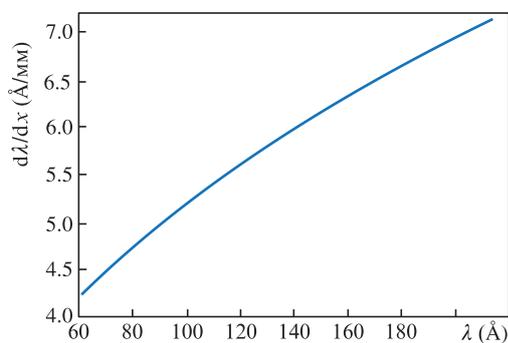


Рис.8. Обратная линейная дисперсия VLS-спектрографа.

В окрестности $\lambda = 135 \text{ \AA}$ расположены близкие линии иона F VII 134.703 и 134.882 \AA , которые из-за наличия рядом линий Li III не удалось разрешить в эксперименте с мишенью LiF. Поэтому для оценки разрешающей способности в окрестности $\lambda = 135 \text{ \AA}$ был получен спектр тефлоновой мишени ($-\text{C}_2\text{F}_4-$). Оцениваемая по указанным линиям иона F VII разрешающая способность прибора составила ~ 750 . Оцифровка спектра тефлона в интервале 133–136 \AA , полученная суммированием отсчетов 10 ячеек детектора вдоль спектральной линии, приведена на рис.9.

Таким образом, реализованный спектрометр обладает разрешающей способностью ~ 750 в районе 135 \AA . Кроме того, в районе 166 \AA разрешается пара линий иона F V 165.983 \AA и 166.177 \AA , что соответствует $\lambda/\delta\lambda \sim 860$. Наблюдается хорошее согласие между расчетными и наблюдаемыми характеристиками спектрометра.

5. Заключение

Создан компактный (длиной 0.5 м) VLS-спектрограф с плоским фокальным полем на область $\lambda \approx 50$ –275 \AA . Спектрограф испытан при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов лития и фтора, возбуждаемых в лазерной плазме. Экспериментально измеренные параметры спектрографа полностью отвечают расчетным. Так, спектральное разрешение соответствует двум ячейкам детектора (26 мкм). В частности, в области длин волн 135 \AA оно составляет 0.153 \AA , что дает разрешающую способность $\lambda/\delta\lambda \approx 880$.

При выборе метода изготовления сферической VLS-решетки мы остановились на интерференционной лито-

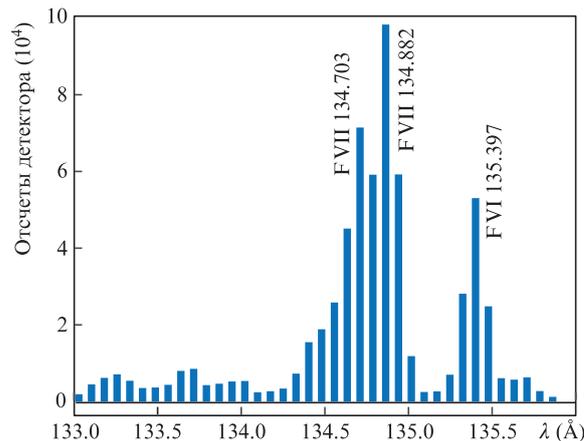


Рис.9. Гистограмма участка спектра 133–136 \AA для тефлоновой мишени. Уверенное разрешение линий F VII свидетельствует о разрешающей способности не менее 750. Полуширина линии иона F VI, равная двум ячейкам детектора, соответствует разрешающей способности 880.

графии. С этой целью была рассчитана схема литографии, включающая вспомогательное зеркало-аббератор, т.е. решена обратная задача интерференционной литографии. В рассчитанной схеме пространственная частота интерференционных полос весьма точно аппроксимировала полином (1) с параметрами p_i , указанными в разд.2. Оптическая литографическая схема была собрана в НПО ГИПО; решетка записывалась на длине волны 0.53 мкм. Таким образом, заложены основы отечественной технологии изготовления VLS-решеток методом интерференционной литографии.

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

1. Kita T., Harada T., Nakano N., Kuroda H. *Appl. Opt.*, **22**(4), 512 (1983).
2. Nakano N., Kuroda H., Kita T., Harada T. *Appl. Opt.*, **23**(14), 2386 (1984).
3. Beiersdorfer P., Magee E.W., Träbert E., et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **75**(10), 3723 (2004).
4. Dunn J., Magee E.W., Shepherd R., et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 10E314 (2008).
5. Neely D., Chambers D., Danson C., et al. *AIP Conf. Proc.*, **426**, 479 (1998).
6. Koike M., Sano K., Gullikson E., Harada Y., Kumata H. *Rev. Sci. Instrum.*, **74**(2), 1156 (2003).
7. Imazono T., Koike M., Kawachi T., et al. *Appl. Opt.*, **51**(13), 2351 (2012).
8. Вишняков Е.А., Колесников А.О., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н., Шатохин А.Н. *Квантовая электроника*, **48**(10), 916 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**(10), 916 (2018)].
9. Imazono T., Ukita R., Nishihara H., Sasai H., Nagano T. *Appl. Opt.*, **57**(27), 7770 (2018).
10. Dvorak J., Jarrige I., Bisogni V., Coburn S., Leonhardt W. *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 115109-12 (2016).
11. Вишняков Е.А., Шатохин А.Н., Рагозин Е.Н. *Квантовая электроника*, **45**(4), 371 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**(4), 371 (2015)].
12. Вишняков Е.А., Колесников А.О., Кузин А.А., Негров Д.В., Рагозин Е.Н., Сасоров П.В., Шатохин А.Н. *Квантовая электроника*, **47**(1), 54 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**(1), 54 (2017)].
13. Shatokhin A.N., Kolesnikov A.O., Sasorov P.V., Vishnyakov E.A., Ragozin E.N. *Opt. Express*, **26**(15), 19009 (2018).
14. Вишняков Е.А., Колесников А.О., Рагозин Е.Н., Шатохин А.Н. *Квантовая электроника*, **46**(10), 953 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**(10), 953 (2016)].
15. Namioka T., Koike M. *Appl. Opt.*, **34**(13), 2180 (1995).
16. Vishnyakov E.A., Kirichenko A.S., Reva A.A., et al. *Proc. SPIE*, **9905**, 99053G (2016).
17. Vishnyakov E.A., Shcherbakov A.V., Pertsov A.A., et al. *Proc. SPIE*, **10235**, 102350W (2017).