

# ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.7.063; 681.785.55

## СПЕКТРОГРАФ С ГОЛОГРАММНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ, ЗАПИСАННОЙ В НЕГОМОЦЕНТРИЧЕСКИХ ПУЧКАХ

© 2010 г. А. А. Белокопытов\*; Н. Ф. Шакиров\*\*

\* НПО “Государственный институт прикладной оптики”, Казань

\*\* НПО “Сетал”, Казань

E-mail: aabelokopitov@yandex.ru, nailshakirov@rambler.ru

Разработан спектрограф, предназначенный для анализа металлов, сплавов, горных пород и почв. Оптическая схема спектрографа основана на применении вогнутой голограммной дифракционной решетки, записанной в негomoцентрических пучках, установленной на круге Роуанда. Представлены результаты расчета оптической схемы спектрографа и абберационных характеристик вогнутых голограммных дифракционных решеток, голографическая установка, на которой записана решетка второго поколения, образцы спектров, полученные на макете спектрографа.

*Ключевые слова:* спектральный прибор, голография, дифракционная решетка с коррекцией аббераций.

Коды OCIS: 050.1950, 090.1000

Поступила в редакцию 05.10.2009

Методы спектрального анализа давно нашли широкое применение в таких областях науки и отраслях промышленности, как химия, биология, металлургия, геология, медицина, криминалистика, фармацевтика, пищевая промышленность, мониторинг окружающей среды. Атомно-эмиссионный спектральный анализ (АЭСА) занимает одну из лидирующих позиций в элементном анализе веществ, так как обладает высокой точностью, позволяет одновременно анализировать большое количество элементов, проведение анализа не занимает много времени.

Анализаторы для проведения АЭСА постоянно совершенствуются и отличаются большим разнообразием схемных решений. В настоящее время наблюдается тенденция к уменьшению габаритов спектроаналитических комплексов при сохранении высоких требований, предъявляемых к рабочему спектральному диапазону, дисперсии прибора и качеству изображения спектральных линий. Одной из важнейших частей любого спектрального прибора, опреде-

ляющих его разрешение, рабочий спектральный диапазон, отношение сигнал/шум и другие технические характеристики, является диспергирующий элемент. Развитие технологий производства дифракционных решеток, и в частности, голографических, практически вывело из употребления призмные приборы. Производители спектрального оборудования все большее предпочтение отдают вогнутым голограммным дифракционным решеткам (ВГДР).

Существенным недостатком ВГДР является наличие аббераций. При использовании многоканальных фотоприемников серьезной проблемой может стать наличие астигматизма, значительно снижающего реальную светосилу прибора. Одним из наиболее эффективных средств повышения качества изображения, даваемого ВГДР в плоскости регистрации, является коррекция аббераций в процессе записи дифракционной решетки за счет намеренного искажения волновых фронтов лазерных пучков, которыми осуществляется запись, например с помощью вогнутых зеркал (ВГДР 2-го поколения [1–3]).

Появление линейных позиционно-чувствительных приемников привело к тому, что все большее применение находят спектрометры, построенные по схеме Пашена–Рунге с расположением приемников излучения на круге Роуланда.

Перед НПО “Сетал” была поставлена задача разработки малогабаритного спектроанализатора для анализа основных типов металлов, сплавов, горных пород и почв. Для выбора требуемых технических характеристик прибора были определены круг анализируемых элементов и их основные аналитические линии, а также линии, которые могут их перекрывать. Исходя из этого, рабочий спектральный диапазон должен составлять 190–360 нм при обратной линейной дисперсии не хуже 0,5 нм/мм.

Учитывая требования к габаритам прибора, была выбрана схема, в которой в качестве диспергирующего элемента используется вогнутая голограммная дифракционная решетка с пространственной частотой  $3600 \text{ мм}^{-1}$ , радиусом кривизны подложки 501,2 мм и фокусировкой спектра на круге Роуланда. Оптическая схема спектрографа представлена на рис. 1. Угол падения излучения на ВГДР  $\varphi = 42^\circ$ , расстояние от щели до вершины решетки  $d = 371,57 \text{ мм}$ . Расстояния от вершины решетки до точек фокусировки лучей  $d'$  и соответствующие углы дифракции  $\varphi'$  приведены в табл. 1.

При использовании в такой схеме классической дифракционной решетки, имеющей пря-

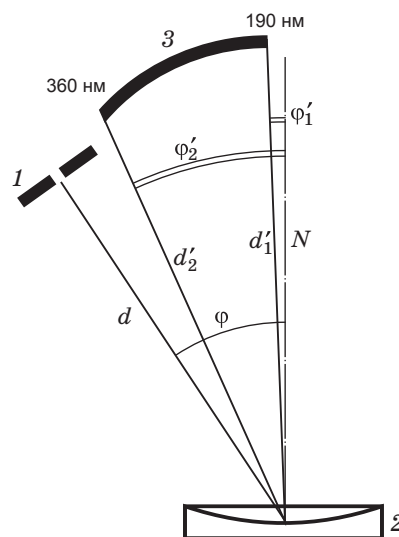


Рис. 1. Оптическая схема спектрографа для АЭСА. 1 – входная щель, 2 – дифракционная решетка, 3 – поверхность фокусировки спектра.

молинейные, эквидистантные штрихи, происходит удлинение изображения входной щели  $\delta z'$ , вызванное астигматизмом. Характеристики aberrаций такой схемы приведены в табл. 2.

Астигматизм значительно ухудшает энергетические параметры выходного сигнала, так как размер чувствительной площадки приемника излучения по высоте значительно меньше высоты спектральной линии.

В связи с этим возникает необходимость в дифракционной решетке с компенсацией aberrаций, в том числе астигматизма. Голограммная решетка, записанная точечными источниками, исправляя астигматизм, вносит значительную сагиттальную кому: для данной схемы в центре спектрограммы  $\delta y' = -1,205 \text{ мм}$ ,  $\delta z' = -0,774 \text{ мм}$ . Исправить астигматизм без ухудшения разрешающей способности позволяет регистрация

Таблица 1. Параметры оптической схемы спектрографа

$\lambda$ , нм	190	275	360
$d'$ , мм	499,95	473,56	389,56
$\varphi'$ , °	0,85	18,72	38,82

Таблица 2. Аберрационные характеристики спектрографа с классической ВГДР

$y$	$z$	190 нм		275 нм		360 нм	
		$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$
23	0	0,013		0,019		0,028	
11,5	0	0,002		0,002		0,004	
-11,5	0	-0,001		-0,002		-0,003	
-23	0	-0,011		-0,017		-0,025	
0	11,5	0,114	6,928	0,077	7,744	-0,014	9,914
0	23	0,456	13,844	0,307	15,474	-0,058	19,806

**Таблица 3.** Аберрационные характеристики спектрографа с ВГДР 2-го поколения

$y$	$z$	190 нм		275 нм		360 нм	
		$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$	$\delta y'$	$\delta z'$
23	0	-0,004		-0,014		-0,015	
11,5	0	-0,001		-0,002		-0,003	
-11,5	0	-0,002		-0,002		-0,004	
-23	0	-0,008		-0,011		-0,019	
0	11,5	0,018	1,653	-0,005	-0,390	-0,013	1,154
0	23	0,073	3,309	-0,024	-0,771	-0,052	2,318

решетки в негомоцентрических пучках. При такой записи корректируются астигматизм, меридиональная и сагиттальная кома и сферическая аберрация третьего порядка.

В работе [4] представлены результаты расчета схемы регистрации ВГДР 2-го поколения со скомпенсированными аберрациями, в которой для создания необходимой негомоцентричности используются вогнутые цилиндрические зеркала. Характеристики аберраций спектрографа с ВГДР 2-го поколения приведены в табл. 3.

Параметры схемы регистрации ВГДР 2-го поколения: длина волны записи  $\lambda = 441,6$  нм, радиус кривизны подложки  $R = 501,2$  мм, расстояние от точечного источника 1 до цилиндрического зеркала 4 с  $R = 40,8$  мм – 66,7 мм, расстояние от точечного источника 2 до цилиндрического зеркала 6 с  $R = 51,2$  мм – 337,9 мм, расстояние от зеркала 4 до подложки 3 – 246,5 мм, расстояние от зеркала 6 до подложки 3 – 390,3 мм.

### Описание голографической установки

Опытные образцы ВГДР 2-го поколения для светосильного малогабаритного спектрографа “Радуга”, дифракционного стигматичного полихроматора ДСП и малогабаритного автоматизированного спектрографа “Сириус” изготавливались в НПО ГИПО на голографической установке (для создания негомоцентричности использовались цилиндрические линзовые объективы и наклонное падение на вогнутые сферические зеркала) и показали принципиальную возможность изготовления подобных дифракционных элементов, хотя последние и не достигли всех расчетных характеристик [1, 5, 6].

Для записи ВГДР 2-го поколения в ГИПО была создана специальная голографическая

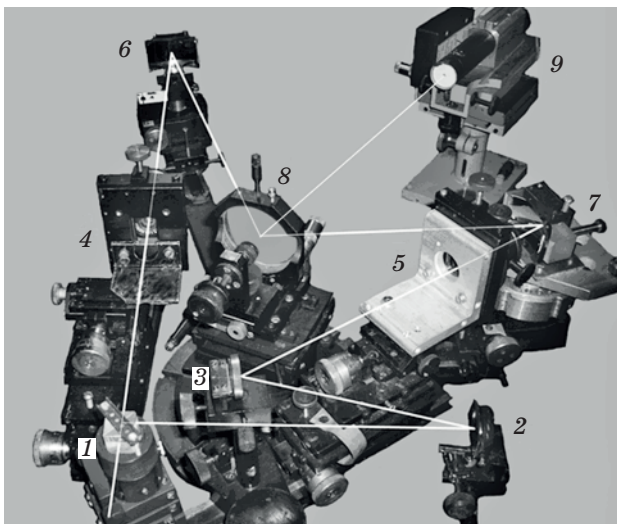
установка, в которой для создания негомоцентричности пучков используется наклонное падение на вогнутые цилиндрические зеркала [7]. Установка представляет собой массивную виброзащищенную плиту с размещенными на ней узлами крепления оптических элементов и юстировочными механизмами: делительным столом с установленным на нем узлом крепления подложки, поворотными зеркалами, светоделителем и двумя узлами крепления микрообъективов и точечных диафрагм.

Данная голографическая установка позволяет получать ВГДР 2-го поколения с частотой штрихов от 400 до 3600 мм<sup>-1</sup> на заготовках диаметром до 70 мм. Достоинствами установки являются: универсальность, высокая виброустойчивость, относительная простота юстировки и эксплуатации. Применяемая методика юстировки позволяет собирать схему регистрации с погрешностью взаимного расположения оптических элементов порядка 0,1 мм. Установка может быть использована в производстве как серийных, так и уникальных ВГДР.

### Схема регистрации, экспонирование и обработка

Установка для записи дифракционных решеток была собрана в специализированной лаборатории, расположенной под землей на глубине 15 м. Фотография установки представлена на рис. 2. Все узлы размещались на массивной виброзащищенной голографической плите. С целью максимальной защиты голографической установки от воздействия конвективных потоков воздуха, присутствующих в любом помещении, голографическая установка со всех сторон закрывалась ширмами.

В качестве источника когерентного излучения использовался одномодовый He-Cd-лазер



**Рис. 2.** Фотография голографической установки для записи голограммных дифракционных решеток 2-го поколения. 1 – светоделитель, 2, 3 – плоские зеркала линии задержки, 4, 5 – узлы крепления микрообъективов и точечных диафрагм, 6, 7 – цилиндрические зеркала, 8 – подложка, 9 – юстировочный лазер.

ГКЛ-50 с  $\lambda = 441,6$  нм, мощностью около 20 мВт и вертикальной поляризацией (степень поляризации 100:1). Лазер располагался над голографической установкой так, чтобы исключить влияние конвективных потоков воздуха от нагретого активного элемента и вибраций, порождаемых охлаждающими вентиляторами. Излучение лазера направлялось в установку системой поворотных зеркал.

ВГДР 2-го поколения изготавливались по стандартной технологии, применяемой в ГИПО при производстве серийных ВГДР. Решетки регистрировались на фоточувствительном слое селенида мышьяка  $As_2Se_3$ , который наносился вакуумным напылением.

Проявление решеток проводилось при комнатной температуре в проявителе на основе этилендиамина. Затем дифракционные решетки подвергались прогреву в сушильной камере при температуре около 80 °С в течение нескольких часов.

На заключительной стадии обработки на ВГДР вакуумным напылением наносился отражающий алюминиевый слой.

### Макетирование спектрографа

В НПО “Сетал” был собран макет спектрографа. Для сравнения качества изображения

спектральных линий, полученных с помощью ВГДР 2-го поколения, в макет устанавливалась классическая ВГДР, записанная в параллельных пучках. Для этой же цели использовался один из лучших в своем классе отечественных спектрографов ДФС-458 с рабочей дифракционной решеткой  $1800 \text{ мм}^{-1}$  (нарезная, с компенсацией аберраций), работающей во втором порядке дифракции.

Во всех случаях в качестве приемника излучения использовалась одна и та же линейка ПЗС фирмы “Toshiba” с размером элементарной чувствительной площадки  $8 \times 200$  мкм и общей длиной чувствительной поверхности 29 мм. Источником излучения служил дуговой разряд, получаемый с помощью генератора переменного тока “Прима-М” (производства фирмы ИВС, Санкт-Петербург). Дуга зажигалась между железным и графитовым электродами. В макете спектрографа использовалась двухлинзовая система освещения с шириной входной щели 15 мкм.

Были исследованы два участка спектра железа в дуговом разряде: в области триплета железа (310 нм) и участок спектра в диапазоне 232,5–234,5 нм. Данные участки были выбраны как наиболее характерные для спектра железа в этом виде разряда.

На рис. 3 представлены участки спектра железа в области триплета (310 нм). Из рисунка видно, что качество изображения спектральных линий для всех решеток хорошее, триплет железа разрешается примерно одинаково. Чуть худшее разрешение макета спектрографа, чем серийного спектрографа ДФС-458, возможно объясняется незначительными погрешностями при его сборке. Время интегрирования сигнала приемником излучения, при всех прочих равных условиях, составило 30 мс для макета с обеими ВГДР и 80 мс для ДФС-458. Это свидетельствует о несколько большей дифракционной эффективности голограммных решеток. Полуширина аппаратной функции около 27 мкм для всех случаев.

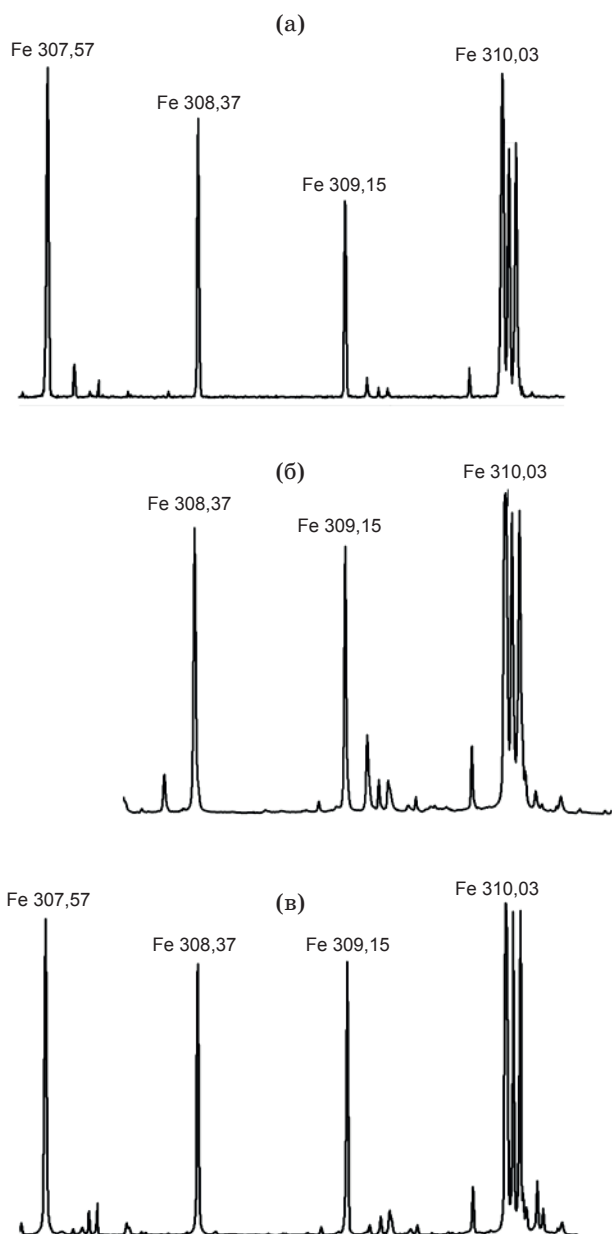
На рис. 4 представлены участки спектра железа в области 232 нм. По разрешению справедливо то же замечание, что и в случае с участком спектра в области триплета железа. В изображении спектральных линий, полученном на ДФС-458, начинает сказываться кома, скомпенсированная для ВГДР 2-го поколения, и также отсутствующая у решетки, записанной в параллельных пучках. При более детальном рассмотрении видно, что качество изображе-

ния несколько лучше у ВГДР 2-го поколения. Время интегрирования сигнала для макета с обеими ВГДР составило 30 мс, а для ДФС-458 – 100 мс. В этой области дифракционная эффективность голограммных решеток также оказалась выше. Полуширина аппаратной функции около 27 мкм для всех случаев.

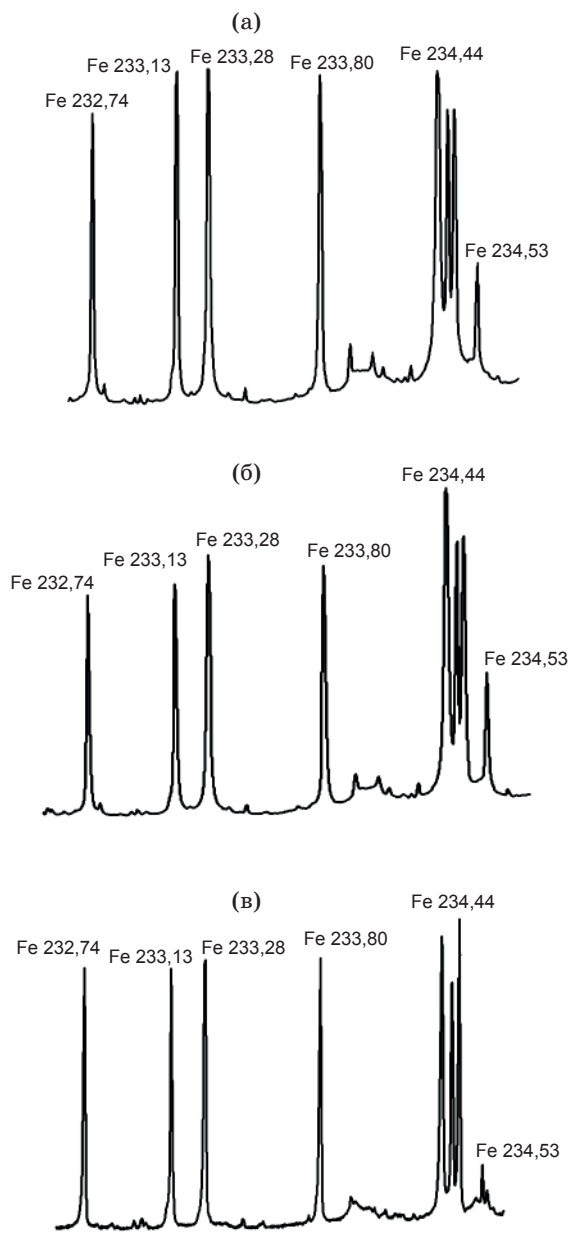
Для ВГДР была измерена высота спектральных линий по поддиапаонам. Измерение проводилось при высоте входной щели 2 мм. Для решетки, записанной в негомоцентрических

пучках, высота линий составила 3,5 мм по всем поддиапаонам. Для решетки, записанной в параллельных пучках, высота линий составила 15 мм, т. е. наблюдалось значительное удлинение изображения.

То обстоятельство, что дифракционная эффективность обеих ВГДР при этом оказалась практически одинаковой, по всей видимости, объясняется тем, что решетки записывались разными по мощности лазерами. ВГДР 2-го поколения была записана маломощным лазером



**Рис. 3.** Спектры железа в области  $\lambda = 310$  нм, полученные с помощью макета спектрографа с ВГДР 2-го поколения (а), макета спектрографа с классической ВГДР (б), спектрографа ДФС-458 с нарезной решеткой  $1800 \text{ мм}^{-1}$  (в).



**Рис. 4.** Спектры железа в области  $\lambda = 232$  нм, полученные с помощью макета спектрографа с ВГДР 2-го поколения (а), макета спектрографа с классической ВГДР (б), спектрографа ДФС-458 с нарезной решеткой  $1800 \text{ мм}^{-1}$  (в).



с довольно большим временем экспозиции. Очевидно, что с увеличением времени экспонирования значительно возрастает негативное влияние вибрации элементов схемы регистрации, конвективных потоков и акустических колебаний воздуха на видность регистрируемой интерференционной картины, что в итоге приводит к появлению неоднородностей глубины профиля штрихов ВГДР, снижению дифракционной эффективности решетки, увеличению уровня рассеянного света. Таким образом, радикально повысить значение дифракционной эффективности решетки путем увеличения времени экспозиции невозможно. Применение более мощного лазера для записи ВГДР 2-го поколения могло бы увеличить дифракционную эффективность решетки значительно.

### Выводы

Сравнительный анализ результатов эксперимента показал, что спектрограф с ВГДР 2-го поколения обладает хорошим качеством изображения спектральных линий и высоким разрешением, не уступающим ДФС-458. При этом прибор имеет значительно меньшие массогабаритные характеристики и все преимущества, предоставляемые фотоэлектрической регистрацией: автоматизация измерений, удобство и быстрота выполнения рутинных операций, оперативность проведения анализа.

Рассчитанная схема записи ВГДР 2-го поколения позволяет скомпенсировать меридиональную и сагиттальную кому, сферическую аберрацию третьего порядка и астигматизм.

Существует возможность использования данной решетки для вакуумного спектрометра.

Не меняя параметры оптической схемы, планируется расширить спектральный диапазон до 170 нм, что позволит включить в список анализируемых элементов серу, фосфор и углерод. Увеличение дифракционной эффективности ВГДР в данной области спектра может быть достигнуто за счет применения технологии ионного травления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. Казань: изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2003.
2. Павлычева Н.К. Голограммные дифракционные решетки 2-го и 3-го поколений в схеме спектрографа Роуленда // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 4. С. 69–74.
3. Palmer C. Theory of second-generation holographic diffraction gratings // J. Opt. Soc. Amer. 1989. V. A6. № 8. P. 1175–1178.
4. Белокопытов А.А., Павлычева Н.К., Шакиров Н.Ф. Спектрограф с голограммной решеткой второго поколения // Труды междунар. конф. “Прикладная оптика 2008”. Санкт-Петербург, 2008. С. 340–344.
5. Афанасьева В.Л., Гимушин И.Ф., Кадрова Г.Н., Кит И.Е., Нагулин Ю.С., Павлычева Н.К., Селезнев В.А. Малогабаритный светосильный спектрограф // ОМП. 1986. № 2. С. 20–22.
6. Павлычева Н.К., Демин А.П., Горбачев С.Ф., Кит И.Е. Малогабаритный светосильный спектрометр на область спектра 200÷1300 нм // Оптический журнал. 1996. № 11. С. 61–62.
7. Белокопытов А.А., Павлычева Н.К., Селезнев В.А. Получение голограммных дифракционных решеток в негомоцентрических пучках // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 3. С. 60–64.