

А. А. Сырбаков^{1,2✉}, И. А. Зарубин^{1,2}, А. А. Дзюба², С. В. Додонов²

Согласование параметров эшелле-решетки с размерами фотоприемной матрицы

¹ Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: aleksei.syrbakov@yandex.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается актуальность разработки отечественного эшелле-спектрометра со скрещенной дисперсией для проведения анализа методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС). Основное внимание уделяется преимуществам эшелле-спектрометров, таким как высокое разрешение, широкий спектральный диапазон, высокая светосила и компактные размеры. Определены ключевые параметры спектрометров для проведения анализа методом ИСП-АЭС, такие как спектральный диапазон и разрешающая способность. Проведен анализ отечественных дифракционных эшелле-решеток из каталога Государственного оптического института (ГОИ) и Государственного института прикладной оптики (ГИПО), которые могут быть применены для создания спектрометра. Представлена таблица с характеристиками эшелле-решеток и оптической системы, обеспечивающих необходимые параметры. На основе проведенного анализа выбраны оптимальные эшелле-решетки для разработки отечественного спектрометра.

Ключевые слова: эшелле-решетка, спектрометр со скрещенной дисперсией, ИСП-АЭС

A. A. Syrbakov^{1,2✉}, I. A. Zarubin^{1,2}, A. A. Dzuba², S. V. Dodonov²

Agreement of parameters of the echelle-grating with dimensions of photodetector array

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

² Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: aleksei.syrbakov@yandex.ru

Abstract. In this paper we consider the relevance of the development of a domestic crossed-dispersion echelle spectrometer for analysis by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). The main attention is paid to the advantages of echelle spectrometers, such as high resolution, wide spectral range, high light transmission and compact size. Key parameters of spectrometers for ICP-AES analysis, such as spectral range and resolution, are determined. The analysis of domestic diffraction echelle grating from the catalog of the State Optical Institute and the State Institute of Applied Optics, which can be applied to create a spectrometer, has been conducted. The table with the characteristics of echelle-gratings and optical system providing the necessary parameters is presented. On the basis of the analysis, the optimal echelle-gratings for the development of a domestic spectrometer are selected.

Keywords: echelle-grating, crossed-dispersion spectrometer, ICP-AES

Введение

В настоящее время спектрометрия является одним из наиболее востребованных методов для идентификации элементного состава и количественного опреде-

ления концентраций в исследуемых пробах [1, 2]. Атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) получила широкое распространение по всему миру и продолжает развиваться, благодаря возможности одновременного определения большого числа элементов, низким пределам обнаружения и высокой стабильности измерений.

Развитие спектроскопии в значительной степени определяется улучшением характеристик спектрального оборудования [3], включая спектральный диапазон, разрешающую способность, светосилу, и стабильность параметров. В этом контексте эшелле-спектрометры со скрещенной дисперсией демонстрируют значительные преимущества по сравнению с традиционными системами, работающими в одном дифракционном порядке, такими как схемы Черни-Тернера [4–6], Эберта-Фасти [7], Пашена-Рунге [8–10] и т.д.

Указанные характеристики в эшелле-спектрометрах со скрещенной дисперсией являются оптимальными при использовании таких приборов в элементном спектральном анализе [11, 12]. Однако, производство коммерческих эшелле-спектрометров для проведения атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой осуществляется иностранными компаниями, что приводит к затруднениям в поставке данного оборудования на территорию Российской Федерации. В связи с этим возникает необходимость разработки отечественных аналогов в рамках программы импортозамещения для удовлетворения потребностей внутреннего рынка.

При этом количество доступных эшелле-решеток в Российской Федерации ограничено каталогами Государственного оптического института (ГОИ) и Государственного института прикладной оптики (ГИПО), производящих дифракционные оптические элементы. Это позволяет определить решетки, пригодные для изготовления эшелле-спектрометра, соответствующего требованиям метода ИСП-АЭС.

Теоретическая часть

Рассмотрим особенности дифракции на эшелле-решетке. Соотношение падающих и дифрагированных лучей задается уравнением плоской отражательной решетки:

$$\sin \varphi + \sin \varphi' = k\lambda N, \quad (1)$$

где φ – угол падения лучей на решетку; φ' – угол дифрагированного луча; λ – длина волны; N – частота штрихов; k – дифракционный порядок.

В случае эшелле-решетки дифракционная эффективность максимальна, когда падающий и дифрагированный лучи удовлетворяют условию зеркального отражения:

$$\varphi + \varphi' = 2\gamma, \quad (2)$$

где γ – угол блеска.

Эшелле-решетка характеризуется применением в высоких дифракционных порядках, что обеспечивает высокую угловую дисперсию. Основным параметром таких решеток является угол блеска γ , под которым устанавливается решетка (режим автоколлимации). Луч, зеркально отраженный от поверхности решетки под этим углом, обладает максимальной дифракционной эффективностью. Длина волны, соответствующая этому углу, называется длиной волны блеска.

Дифракционные порядки ограничены свободным спектральным диапазоном [13], в пределах которого дифракционная эффективность составляет не менее 40%. Граничные длины волн определяются следующим уравнением:

$$\lambda = \frac{\lambda_{1,0}}{k \pm 0,5}, \quad (3)$$

где $\lambda_{1,0}$ – длина волны блеска 1-го дифракционного порядка.

Распределение дифракционной эффективности носит периодический характер (рис. 1) и описывается формулой [14]:

$$\Phi_m(\lambda) = \left[\frac{\sin \pi \left(k - \frac{\lambda_{1,0}}{\lambda} \right)}{\pi \left(k - \frac{\lambda_{1,0}}{\lambda} \right)} \right]^2. \quad (4)$$

Разрешающая способность [15], характеризующая способность спектрального прибора различать две близкие спектральные линии, задается формулой:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \quad (5)$$

где $\Delta\lambda$ – спектральное разрешение прибора на длине волны λ .

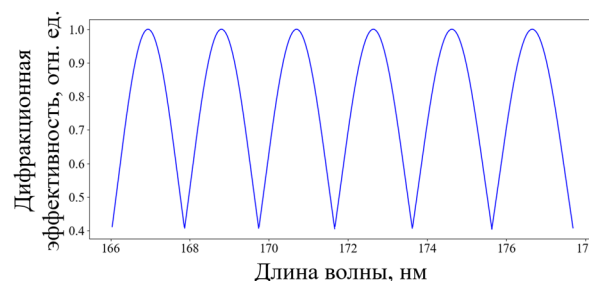


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности от длины волны для ряда дифракционных порядков (87-90)

Результаты

На российском рынке изготовление коммерчески доступных дифракционных эшелле-решеток осуществляется в Государственном оптическом институте (ГОИ) и Государственном институте прикладной оптики (ГИПО). Ассортимент доступных решеток ограничен, что позволяет провести детальный анализ их применимости для разработки спектрометров, предназначенных для проведения анализа методом атомно-эмиссионного спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС).

Для реализации метода ИСП-АЭС спектрометр должен обладать следующими характеристиками [3, 15]:

- 1) спектральный диапазон от 167 до 780 нм;
- 2) разрешающая способность $R \sim 30000$.

На основании наиболее распространенных параметров фотоприемных матриц [14], используемых в эшелле-спектрометрах, была определена необходимая линейная дисперсия для обеспечения заданного разрешения в 30000. Размер фотоячейки 27 мкм с количеством пикселей 1024×1024. В качестве щели используется отверстие с диаметром 54 мкм. В табл. 1 представлено соотношение параметров эшелле-решетки, размера детектора, охватывающего весь спектр по высоте, и фокусного расстояния спектрометра с разрешением 30000.

Обсуждение

На основании анализа табл. 1 можно сделать вывод о возможности использования отечественных эшелле-решеток для разработки спектрометра со скрещенной дисперсией, оснащенного фотоприемной матрицей с наиболее распространенными параметрами.

При применении решетки №1 весь регистрируемый спектр будет непрерывным, однако расстояние между 60-м и 61-м дифракционными порядками при использовании призмы из фторида кальция составит 37 мкм. Это приведет к наложению дифракционных порядков, аналогично ситуации при использовании решеток №2 и №6.

Таблица 1

Параметры эшелле-решеток и оптической системы спектрометра
с разрешающей способностью $R = 30000$

№	Параметры эшелле-решетки		Фокусное расстояние, мм	Количество диф. порядков (167-780 нм)	Высота детектора, мм	Количество пикселей детектора по высоте
	Частота штрихов, мм ⁻¹	Угол блеска, градусы				
1	37,5	63,5	403,85	226 (61-286)	26,61	986
2	50	66	360,63	173 (47-219)	34,68	1284
3	75	64,2	391,57	114 (31-144)	52,79	1955

4	150	60	467,66	56 (15-70)	110,52	4094
5	94,7	46	782,21	72 (19-91)	85,46	3165
6	25	62,5	421,65	335 (91-425)	17,82	660
7	100	71	278,91	91 (24-114)	73,29	2714
8	79	63	412,71	107 (29-135)	56,38	2089
9	75	64	395,06	114 (31-144)	52,77	1955
10	75	75	217,03	123 (33-155)	56,48	2092

При использовании решеток №3, 4, 5, 7, 8, 9, 10 образуются пропуски в спектре, как это реализовано в спектрометрах фирмы Agilent. Увеличение размеров фотоприемной матрицы при сохранении относительного отверстия приводит к ухудшению фокусировки оптической схемы и снижению разрешающей способности на краях детектора. В связи с этим необходимо заранее установить аналитические линии определяемых элементов, попадающие на детектор.

Кроме того, использование решеток № 4 и № 5 позволяет применять прямоугольную щель вместо отверстия благодаря увеличенному расстоянию между дифракционными порядками, что повышает светосилу прибора, но при этом возрастает количество пробелов в спектре.

Заключение

В данной работе рассмотрена возможность создания эшелле-спектрометра со скрещенной дисперсией для проведения атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой на базе отечественного каталога эшелле-решеток. В ходе исследования были определены потенциальные варианты решеток (№3, 4, 5, 7, 8, 9, 10) обеспечивающие спектральный диапазон от 167 до 780 нм с разрешающей способностью $R = 30000$, для фотоматрицы размером 1024×1024 пикселя с размером фотоячейки 27 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пелипасов О. В. и др. Аналитические возможности спектрометра «Гранд» при анализе растворов с использованием индуктивно-связанной плазмы //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85. – №. 1 (II). – С. 82–85.
2. Labusov V. A. et al. Спектрометры оптические Гранд – новое средство измерения массовых долей определяемых элементов //Аналитика и контроль. – 2024. – Т. 28. – №. 3. – С. 259–269.
3. Бакшаев, М. К. Разработка оптической схемы эшелле-спектрографа / М. К. Бакшаев // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы Международной молодежной научной конференции. В 6-ти томах, Казань, 07–08 ноября 2019 года. Том III. – Казань: ИП Сагиева А.Р., 2019. – С. 151–154.
4. Зарубин И. А. Малогабаритные многоканальные оптические спектрометры на основе схемы Черни-Тернера : дис. – автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата техн. наук: спец. 05.11. 07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Новосибирск, 2011.

5. Зарубин И. А. Возможности малогабаритного спектрометра «Колибри-2» в атомно-эмиссионном спектральном анализе //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83. – №. 1 р. II. – С. 114–117.
6. Борзов С. М. и др. Использование спектрометра «Колибри-2» для исследования излучения пламени //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83. – №. 7. – С. 13–18.
7. Дробышев А. И., Савинов С. С. Экспериментальное исследование аппаратной функции и разрешающей способности оптического цифрового спектрографа на базе полихроматора МФС //Оптический журнал. – 2014. – Т. 81. – №. 1. – С. 44–52.
8. Дзюба А. А., Лабусов В. А., Бабин С. А. Анализаторы МАЭС с линейками фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 в сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектрометрии // Аналитика и контроль. – 2019. – Т. 23, №. 1. – С. 35–42.
9. Дзюба А. А., Лабусов В. А., Зарубин И. А. Новый атомно-эмиссионный спектрометр «Гранд-2000» //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2022. – Т. 88. – №. 1 (II). – С. 27–33.
10. Лабусов В. А. и др. Новые многоканальные оптические спектрометры на основе анализаторов МАЭС // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78. – №. 1-2. – С. 7–13.
11. Wang Y. et al. Construction, Spectral Modeling, Parameter Inversion-Based Calibration, and Application of an Echelle Spectrometer //Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 14. – С. 6630.
12. Chen S. et al. A new type of wide spectral coverage echelle spectrometer design for ICP-AES //Optical Design and Testing V. – SPIE, 2012. – Т. 8557. – С. 347–355.
13. Zhang Y. et al. Echelle grating spectroscopic technology for high-resolution and broadband spectral measurement //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 21. – С. 11042.
14. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. – Машиностроение, 1975.
15. Пелипасов О. В. и др. Атомно-эмиссионные спектрометры с аргоновой индуктивно связанной плазмой Гранд-ИСП //Аналитика и контроль. – 2024. – Т. 28. – №. 4. – С. 370–381.

© А. А. Сырбаков, И. А. Зарубин, А. А. Дзюба, С. В. Додонов, 2025