

ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОГРАФ С КОМПЕНСИРОВАННЫМ АСТИГМАТИЗМОМ

Ю. С. Нагулин, Н. К. Павлычева и Э. А. Яковлев

Описан компактный спектрограф со скрещенной дисперсией, в котором спектральный диапазон 200–800 нм уложен в 90 строк на площадке $\varnothing 40$ мм. Компенсация астигматизма коллиматорного и камерного зеркал достигается применением решетки-эшелле с шагом нарезки, изменяющимся по линейному закону. Приведены экспериментальные результаты.

Спектрограф как многоканальный спектральный прибор с большими информативными возможностями широко используется как в спектроаналитической практике, так и в различных исследованиях, особенно в исследованиях быстропротекающих процессов.

В последнее время в спектральных приборах с многоканальной регистрацией спектра все чаще используются приемники телевизионного типа, объединяющие в себе достоинства фотографического и фотоэлектрического способов регистрации оптического сигнала. Эти приемники в соответствии со своими конструктивными особенностями предъявляют специфические требования к построению оптической системы спектрального прибора. Телевизионные приемники позволяют работать со спектральными линиями малой высоты вследствие небольшого размера считывающего потенциальный рельеф электронного луча. Это обстоятельство и форма мишени приемника почти однозначно приводят к схемам спектрографов со скрещенной дисперсией. Благодаря применению скрещенной дисперсии удается на сравнительно небольшой площади разместить широкий спектральный диапазон с большой дисперсией.

В схемах со скрещенной дисперсией очень важно исправление астигматизма, так как последний вызывает удлинение изображения щели на регистрирующем устройстве. Во избежание переналожения порядков спектра при наличии астигматизма приходится уменьшать либо высоту входной щели, что ведет к уменьшению светового потока, поступающего в прибор, либо число регистрируемых порядков, сужая рабочий спектральный интервал. Возможно уменьшение астигматизма [1] ограничением размера дифракционной решетки по высоте. Однако таким образом астигматизм не корректируется полностью ни для одной длины волны, а эффективное относительное отверстие спектрографа уменьшается.

Полная коррекция астигматизма для одной длины волны достигается, если за входной щелью спектрографа расположить цилиндрическую линзу [2], но введение дополнительной линзы ухудшает качество спектра, усложняет конструкцию прибора и уменьшает его светопропускание.

Нами предложено компенсировать астигматизм коллиматорного и камерного зеркал в схеме Эберта—Фасти, применяя решетку-эшелле с переменным шагом нарезки. Условие фокусировки лучей в меридиональной плоскости для дифракционной решетки, расстояние между штрихами которой меняется по закону

$$l(y) = l_0(1 + \mu y), \quad (1)$$

имеет вид [3, 4]

$$\frac{\cos^2 \varphi}{d} + \frac{\cos^2 \varphi'}{d'} - \frac{\cos \varphi + \cos \varphi'}{r} + \frac{k\lambda}{l_0} \mu = 0, \quad (2)$$

где d и d' — расстояния от входной щели и плоскости изображения до вершины решетки, φ и φ' — углы падения и дифракции. Для плоской решетки, установленной в параллельном пучке, условие (2) выразится формулой

$$\frac{\cos^2 \varphi'}{d'} = -\frac{k\lambda}{l_0} \mu. \quad (3)$$

Известно, что суммарный продольный астигматизм коллиматорного и камерного зеркал, имеющих одинаковый радиус r , равен [2]

$$\Delta d' = \frac{r}{8} (\alpha_1^2 + \alpha_2^2), \quad (4)$$

где α_1 и α_2 — углы между падающим и отраженным от зеркал лучами, идущими от центра входной щели к центру выходной щели. Из (3) и (4)

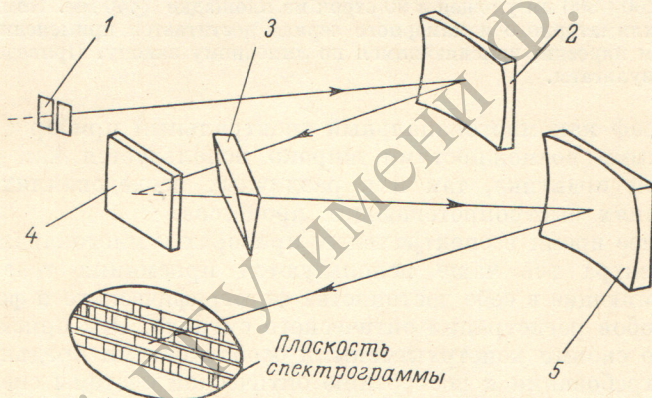


Рис. 1. Оптическая схема спектрографа.

с учетом известных соотношений геометрической оптики определится значение коэффициента неравномерности μ , при котором фокусирующее действие решетки скомпенсирует астигматизм схемы

$$\mu = \frac{l_0 \cos^2 \varphi'}{k\lambda A}, \quad (5)$$

где

$$A = r \left(\frac{2}{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} + 0.125 \right).$$

Разработанный спектрограф для спектрального диапазона 200 ÷ 800 нм построен по схеме Эберта—Фасти (рис. 1), имеет относительное отверстие 1 : 10. Применение решетки-эшелле с большим углом блеска (51°30') позволило получить обратную линейную дисперсию 0.16 нм/мм для 200 нм при небольшом фокусном расстоянии камерного объектива (500 мм). Световой пучок, прошедший входную щель 1, после коллиматора 2 падает на диспергирующий блок, установленный от камерного зеркала на 0.85 его фокусного расстояния для получения плоской поверхности изображения спектра. Диспергирующий блок состоит из решетки-эшелле 4 и установленной перед ней кварцевой призмы 3, осуществляющей вспомогательную дисперсию в направлении, перпендикулярном основной дисперсии. Диспергированный в двух направлениях пучок фокусируется камерным зеркалом 5 в плоскости катода телевизионной трубки Ø40 мм в виде 90 строк. Углы между лучами выбраны из конструктивных соображений и из условия компенсации комы [3], а астигматизм, вызванный

наклонным падением лучей на коллиматорное и камерное зеркала, компенсируется тем, что решетка выполнена с переменным расстоянием между штрихами. Величина продольного астигматизма, присущего данной схеме, составляет 3 мм.

Для его компенсации была изготовлена решетка-эшелле, имеющая 66.7 штр/мм с шагом, меняющимся по закону (1) с коэффициентом неравномерности $\mu = 3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^{-1}$. Фронт дифрагированной волны имел выпуклую форму в виде цилиндра с образующей, параллельной штрихам. Стрелка кривизны фронта в 46-м порядке при $\lambda = 508.6 \text{ нм}$ составляла около 7 интерференционных полос, т. е. приблизительно 1.8 мкм.

Применение решетки-эшелле с переменным шагом позволило значительно скомпенсировать астигматизм во всем спектральном диапазоне, без введения дополнительных оптических элементов. Аберрации спектрографа в меридиональной плоскости не превышают 0.03 мм, а в сагиттальной — 0.1 мм по всему полю.

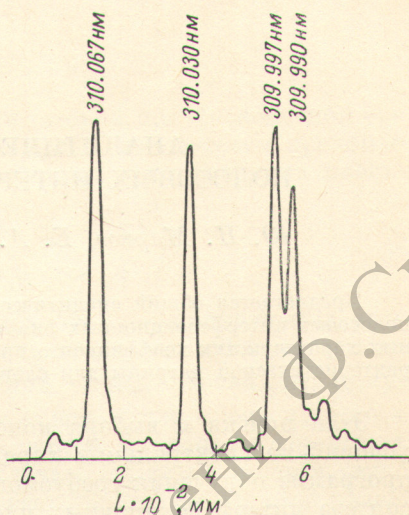


Рис. 2. Микрофотометрическая кривая участка спектра железа.

Максимальный наклон порядков относительно плоскости симметрии спектрографа не превышает $2^\circ 20'$ (29-й порядок), спектральные линии в порядках, близких к этой плоскости, перпендикулярны ей, наклон линий в порядках на краю поля (29-й и 118-й порядки) составляет 3° .

Экспериментальные данные, полученные на макете спектрографа, подтверждают результаты расчетов. На рис. 2 приведена микрофотометрическая кривая участка спектра железа в районе триплета с $\lambda = 310 \text{ нм}$ (источник излучения — высокочастотная лампа).

Литература

- [1] A. Danielsson, P. Lindblom. Phys. Scripta, 5, 227, 1972.
- [2] К. И. Тарасов. Спектральные приборы. «Машиностроение», Л., 1977.
- [3] И. В. Пейсахсон. Оптика спектральных приборов. «Машиностроение», Л., 1975.
- [4] Ф. М. Герасимов, Э. А. Яковлев, И. В. Пейсахсон, Б. В. Кошелев. Опт. и спектр., 28, 790, 1970.

Поступило в Редакцию 11 октября 1979 г.