

слагаемое в (7) связано с разогревом электронов светом и вклада в дихроизм не дает.

В заключение отметим, что в принципе можно разделить разогревный и динамический вклады в нелинейность поглощения, используя их различие в инерционности.

Литература

- [1] В. М. Буймистров, В. П. Олейник. ФТП, 1, 85, 1967.
- [2] Е. Д. Жаксимов. ФТТ, 11, 203, 1969; 15, 644, 1973.
- [3] В. А. Паздзерский. ФТП, 6, 758, 1972.
- [4] В. Л. Малевич, Э. М. Эпштейн. Опт. и спектр., 35, 591, 1973.
- [5] В. В. Павлович, Э. М. Эпштейн. ФТП, 8, 159, 1974.
- [6] Н. И. Балмуш, Е. П. Показилов, А. А. Ключанов, В. М. Фомин, ФТП, 10, 234, 1976.
- [7] Ан. В. Виноградов. ЖЭТФ, 68, 1091, 1975; 70, 999, 1976.
- [8] Д. А. Паршин. ФТТ, 19, 2039, 1977.
- [9] Е. Л. Ивченко. ФТТ, 14, 3489, 1972.
- [10] А. М. Данишевский, Е. Л. Ивченко, С. Ф. Кочегаров, М. И. Степанова. Письма ЖЭТФ, 16, 625, 1972.
- [11] Е. Л. Ивченко, Е. Ю. Перлин. ФТТ, 15, 2781, 1973.
- [12] Э. М. Эпштейн, ФТТ, 12, 3461, 1970.
- [13] Э. М. Эпштейн. Изв. вузов, Радиофизика, 13, 1398, 1970.

Поступило в Редакцию 9 февраля 1982 г.

УДК 535.818.8

АБЕРРАЦИИ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ СИММЕТРИЧНОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ СХЕМЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРА С ПЛОСКОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

И. В. Пейсахсон

В книге [1] приведены формулы аберраций вертикальной симметричной зеркальной схемы спектрографа и монохроматора с плоской решеткой для случая, когда коллиматорное и фокусирующее зеркала имеют общий центр кривизны. Однако в практике спектрального приборостроения в качестве объективов нередко используют два зеркала, установленные независимо друг от друга. Тогда величина угла δ , образуемого с плоскостью главного сечения решетки падающими и дифрагированными лучами, идущими из центра входной щели, не связана с углами α между главными лучами в вершинах зеркал O_1 и O_2 (рисунок). Минимальные значения углов α и δ определяются конструктивными условиями.

Пусть f — фокусное расстояние обоих зеркал, x — расстояние от зеркал до решетки, H — длина штрихов решетки, h — высота щели. Тогда при $x \leq f$ пучок, расходящийся от входной щели, и пучки, сходящиеся к их изображениям на фотослое или выходной щели, не задевают решетку, если

$$\alpha > (2/\tilde{x} - 1) \frac{H}{2f} - (2 - \tilde{x}) \frac{h}{2f}, \quad (1)$$

где $\tilde{x} = x/f$. Если же $x \geq f$, то щель и спектр не попадают в пучки света, падающие на решетку и отраженные от нее, когда

$$\alpha > \frac{H + h\tilde{x}}{2f}. \quad (2)$$

Угол δ должен удовлетворять условию

$$\delta > \frac{H}{2x} + \frac{h}{4f}. \quad (3)$$

С учетом размеров оправ зеркал и решетки реальные значения углов α и δ выбирают, как правило, в 1.5—2 раза больше, чем из условий (1)—(3).

Поперечные aberrации в изображении щели в вертикальной симметричной схеме спектрального прибора можно вычислить как сумму aberrаций коллиматорного зеркала, рассчитанных в обратном ходе, и aberrаций камерного (фокусирующего) зеркала. Как и при выводе формул aberrаций горизонтальной схемы в [1], используем известные выражения для aberrаций третьего порядка вогнутого сферического зеркала в параллельном пучке лучей (без учета дисторсии, не влияющей на резкость спектральных линий)

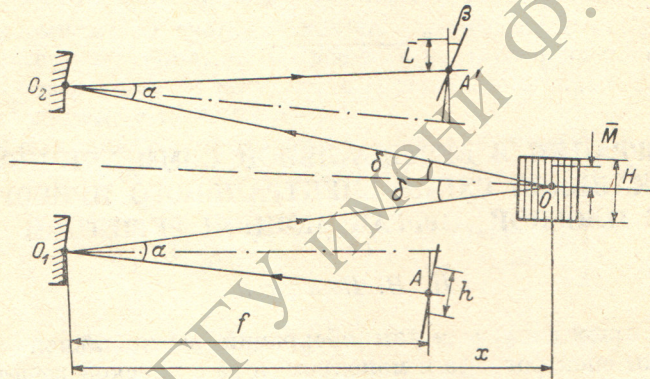
$$2f^2\delta y' = -m(m^2 + M^2)S_I + [(3m^2 + M^2)l + 2mML]S_{II} - [m(3l^2 + L^2) + 2mlL^2]S_{III} - m(l^2 + L^2)S_{IV}; \quad (4)$$

$$2f^2\delta z' = -M(m^2 + M^2)S_I + [(m^2 + 3M^2)L + 2mMl]S_{II} - [M(l^2 + 3L^2) + 2MLL]S_{III} - M(l^2 + L^2)S_{IV}, \quad (5)$$

где m и M — координаты в плоскости входного зрачка, l и L — координаты в плоскости изображения, а коэффициенты aberrаций равны

$$S_I = \frac{1}{4}, \quad S_{II} = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{\tilde{x}}{2}\right), \quad S_{III} = \left(1 - \frac{\tilde{x}}{2}\right)^2, \quad S_{IV} = -1. \quad (6)$$

Примем за оси коллиматорного и камерного зеркал нормали в точках падения O_1 и O_2 главных лучей, идущих от центра входной щели и к центру спектро-



Ход лучей в вертикальном сечении.

граммы (выходной щели). Введем координаты \bar{M} и \bar{L} , не связанные с выбором осей (на рисунке \bar{M} и $\bar{L} > 0$). При небольших α и δ

$$M_1 = \bar{M} + \alpha a/2, \quad L_1 = -(\bar{L} + f\alpha/2), \quad M_2 = \bar{M} - \alpha a/2, \quad L_2 = \bar{L} + f\alpha/2. \quad (7)$$

Здесь величины с индексом 1 относятся к коллиматорному зеркалу, с индексом 2 — к камерному. Aberrации коллиматорного объектива в обратном ходе зависят от m , M , L и α , а aberrации камерного объектива спектрографа — еще и от расстояния l до центра спектрограммы, причем $|m| \leq a/2$, $|M| \leq H/2$ и $|\bar{L}| \leq h/2$ (a — ширина диспергируемого пучка).

Используя выражения (4)—(6) и принимая во внимание (7), можно вычислить суммарные aberrации системы. Как и в схеме с общим центром кривизны зеркал, поверхность изображения, на которой составляющие aberrаций $\delta y'$ в направлении дисперсии минимальны, является цилиндром с радиусом $R = -f/(3S_{III} + S_{IV})$; при $R > 0$ фокальная поверхность выпуклая, при $R < 0$ — вогнутая. Если расположить щель перпендикулярно главному лучу AO_1 , то плоскость, касательная к цилиндру в центре спектрограммы A' , в вертикальном сечении образует с плоскостью, перпендикулярной главному лучу O_2A' , угол $\beta = \alpha(1 + \tilde{x}/2)$ (на рисунке $\beta > 0$). Остаточные aberrации третьего порядка на этой цилиндрической поверхности определяются формулами

$$\delta y'_{3n} = \left[-m(m^2 + \bar{M}^2)S_I + \frac{1}{2}(3m^2 + \bar{M}^2)lS_{II} - m\bar{L}^2(S_{III} + S_{IV}) - M\bar{L}S_{III} \right] / f^2, \\ \delta z'_{3n} = \left[-M(m^2 + \bar{M}^2)S_I + m\bar{M}lS_{II} - M\bar{L}^2(3S_{III} + S_{IV}) - (m\bar{L} - M\bar{L}^2)S_{III} \right] / f^2, \quad (8)$$

где коэффициенты $S_I - S_{IV}$ находят из (6). Кроме того, имеют место aberrации первого и второго порядков, свойственные децентрированным оптическим системам, зависящие от угла α

$$\delta y'_{\text{дец}} = -Ml(1 - \tilde{x}/2)\alpha/2f; \quad \delta z'_{\text{дец}} = -M\alpha^2/2 - (ml/2 + 2M\bar{L})(1 - \tilde{x}/2)\alpha/f. \quad (9)$$

Легко видеть, что при $\tilde{x}=2$ aberrации минимальны: отсутствуют кома и астигматизм третьего порядка, а из aberrаций децентрировки остается лишь постоянный по всему спектру астигматизм первого порядка, вызывающий удлинение спектральных линий $\delta h = H\alpha^2/2$. При этом фокальная поверхность имеет радиус кривизны $R=f$, а габариты схемы велики.

Плоскую фокальную поверхность можно получить при $\tilde{x} \approx 0.85$. Но тогда, как и при общем центре кривизны зеркал, резкость изображения щели быстро ухудшается с удалением от центра спектрограммы.

Для вертикальной схемы монохроматора aberrации можно вычислить, положив в (8) и (9) $l=0$; здесь несущественны составляющие aberrаций $\delta z'$ вдоль спектральной линии. Aberrации децентрировки в направлении дисперсии отсутствуют, и остаются лишь члены третьего порядка

$$\delta y' = -[m(m^2 + M^2)S_I + m\bar{L}^2(S_{III} + S_{IV})]/f^2.$$

Однако в этой схеме наряду с искривлением спектральных линий имеет место их наклон, изменяющийся с длиной волны λ при сканировании спектра: касательная к спектральной линии в плоскости выходной щели образует с вертикалью угол $\epsilon \approx 2 \operatorname{tg} \bar{\varphi} \operatorname{tg} \delta$, где $\bar{\varphi} = \arcsin(k\lambda N/2 \cos \delta)$, k — порядок спектра, N — частота штрихов решетки.

Полученные выражения для aberrаций являются приближенными, но для приборов малой и средней светосилы результаты вычислений по этим формулам хорошо согласуются с данными точного расчета хода лучей.

Литература

- [1] И. В. Пейсахсон. Оптика спектральных приборов. 2-е изд. Машиностроение, Л., 1975.

Поступило в Редакцию 19 апреля 1982 г.