

Из этих двух соотношений находим  $\Delta\vartheta_1$  и  $\Delta\vartheta_2$ , а после этого — расстояние между максимумами:

$$\Delta x = \Delta x_1 = \Delta x_2 = \frac{h_1}{\cos^2 \vartheta_1} \Delta\vartheta_1 = - \frac{h_2}{\cos^2 \vartheta_2} \Delta\vartheta_2.$$

Результат можно упростить, заметив, что углы  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  мало отличаются от угла падения  $\vartheta_0$ , соответствующего зеркальному отражению. Заменяя эти углы на  $\vartheta_0$ , находим

$$\Delta x = \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \frac{\lambda}{d \cos^3 \vartheta_0}.$$

При этом

$$\cos \vartheta_0 \approx \frac{h_1}{x_1} \approx \frac{h_2}{x_2}, \quad \text{или} \quad \cos \vartheta_0 = \frac{h_1 + h_2}{x_1 + x_2} = \frac{h_1 + h_2}{a} = \frac{1}{10}.$$

Подстановка численных значений дает  $\Delta x = 1$  см.

## § 47. Дифракционная решетка как спектральный прибор

1. Положение главных максимумов в дифракционной решетке зависит от длины волны. Исключение составляют только главные максимумы нулевого порядка ( $m = 0$ ), положения которых от длины волны не зависят. Белый и всякий сложный свет можно рассматривать как суперпозицию монохроматических волн с различными длинами. Эти волны при дифракции на решетке ведут себя *независимо*. Поэтому решетка в каждом порядке  $m \neq 0$  разложит падающий свет в спектр, в котором отдельные монохроматические компоненты окажутся пространственно разделенными. Главные дифракционные максимумы, соответствующие  $m = 1$ , образуют *спектр первого порядка*. За ним идет *спектр второго* ( $m = 2$ ), *третьего* ( $m = 3$ ) и *высших порядков*. Если падающий свет белый, то спектр каждого порядка имеет вид цветной полосы, в которой встречаются все цвета радуги. В такой полосе наиболее отклоненными будут красные лучи, наименее отклоненными — фиолетовые.

Положение спектральных линий в спектрах дифракционной решетки определяется простыми соотношениями (46.4) или (46.8). В этом отношении дифракционные спектры выгодно отличаются, например, от спектров призматических, получаемых разложением света дисперсионными призмами. В призматических спектрах положение спектральной линии определяется сложной зависимостью показателя преломления материала призмы от длины волны. Спектр называется *нормальным*, если координата  $x$ , характеризующая положение спектральной линии в спектре, линейно меняется с длиной волны. При малых углах дифракции, когда изменением косинуса угла  $\vartheta$  можно пренебречь, дифракционная решетка дает *нормальный спектр*.

Важными характеристиками дифракционной решетки и других спектральных аппаратов являются *угловая дисперсия*, *дисперсионная область* и *разрешающая способность*.

2. Угловая дисперсия. Угловой дисперсией называется производная  $d\vartheta/d\lambda$ . Чем больше угловая дисперсия, тем больше расстояние в спектре между двумя спектральными линиями с фиксированными длинами волн. Дифференцируя формулу (46.8) при постоянном  $\vartheta_0$ , находим для решетки

$$\frac{d\vartheta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \vartheta} = \frac{\sin \vartheta - \sin \vartheta_0}{\lambda \cos \vartheta}. \quad (47.1)$$

Следовательно, угловая дисперсия не зависит от параметров решетки, а определяется, помимо длины волны, только углами  $\vartheta$  и  $\vartheta_0$ . При заданных  $d$  и  $m$  она возрастает с увеличением угла  $\vartheta$ . Наличие косинуса в знаменателе объясняет выгоду скользящего падения (см. конец предыдущего параграфа).

3. Дисперсионная область. Если спектры соседних порядков перекрываются, то спектральный аппарат становится непригодным для исследования соответствующего участка спектра. Максимальная ширина спектрального интервала  $\Delta\lambda$ , при которой еще нет перекрытия, называется дисперсионной областью спектрального аппарата. Найдем дисперсионную область для дифракционной решетки. Пусть длины волн падающего излучения лежат в спектральном интервале от  $\lambda$  до  $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$ . Пусть правый конец спектра  $(m + 1)$ -го порядка для длины волны  $\lambda$  совпадает по своему положению с левым концом спектра  $m$ -го порядка для длины волны  $\lambda'$  (см. рис. 182). Тогда

$$\begin{aligned} d(\sin \vartheta - \sin \vartheta_0) &= m\lambda', \\ d(\sin \vartheta - \sin \vartheta_0) &= (m + 1)\lambda. \end{aligned}$$

Отсюда  $m\lambda' = (m + 1)\lambda$ , а следовательно,

$$\lambda' - \lambda \equiv \Delta\lambda = \lambda/m. \quad (47.2)$$

Это и есть дисперсионная область дифракционной решетки в рассматриваемом участке спектра. При заданной длине волны она определяется только порядком спектра  $m$ . Чем больше  $m$ , тем уже дисперсионная область. В дифракционных решетках используются спектры низких порядков (обычно второго или третьего). Поэтому дифракционные решетки характеризуются широкими областями дисперсии и пригодны для исследования широких участков спектра. В этом основное преимущество дифракционных решеток перед интерференционными спектральными аппаратами, у которых из-за высоких порядков  $m$  дисперсионные области очень узкие.

4. Разрешающая способность. Большая дисперсия еще не означает, что две спектральные линии с близкими длинами волн  $\lambda$  и  $\lambda' = \lambda + \delta\lambda$  разрешаются спектральным аппаратом, т. е. при их наблюдении воспринимаются как отдельные спектральные линии. Каждая спектральная линия, как бы узка она ни была, изображается спектральным аппаратом не в виде линии, а в виде

более или менее размытой дифракционной картины с максимумами и минимумами интенсивности. Дисперсия определяет расстояние, на которое спектральный аппарат разводит центры дифракционных картин, возникающих от двух спектральных линий с различными длинами волн. Если сами картины размыты и имеют значительную ширину, то даже при сравнительно большом разведении их результирующая картина, возникающая от их наложения, неотличима от дифракционной картины, возникающей от одиночной спектральной линии. Чем уже дифракционные картины от двух близких спектральных линий, тем на меньшее расстояние требуется развести их центры, чтобы разрешить эти спектральные линии. *Наименьшая разность длин волн двух спектральных линий  $\delta\lambda$ , при которой спектральный аппарат разрешает эти линии, называется спектральным разрешаемым расстоянием, а величина  $R = \lambda/\delta\lambda$  — разрешающей способностью аппарата.*

Разрешаемое спектральное расстояние  $\delta\lambda$  относится к числу не вполне точно определенных понятий и может быть указано лишь ориентировочно. Для дифракционной решетки Рэлея предложил следующий критерий спектрального разрешения. *Спектральные линии с близкими длинами волн  $\lambda$  и  $\lambda'$  считаются разрешенными, если главный максимум дифракционной картины для одной длины волны совпадает по своему положению с первым дифракционным минимумом в том же порядке для другой длины волны.* Если такой критерий выполняется, то на основании формулы (46.9) можно написать

$$d(\sin \vartheta - \sin \vartheta_0) = \left(m + \frac{1}{N}\right)\lambda,$$

$$d(\sin \vartheta - \sin \vartheta_0) = m\lambda'.$$

Отсюда  $(m + 1/N)\lambda = m\lambda'$ , и следовательно,  $\delta\lambda \equiv \lambda' - \lambda = \lambda/(Nm)$ ,

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = Nm. \quad (47.3)$$

С целью обоснования критерия Рэлея начертим распределение интенсивности для спектральных линий  $\lambda$  и  $\lambda'$ , сдвинутых одна относительно другой на расстояние  $\delta\lambda$  (рис. 193). Так как спектральные линии с различными длинами волн некогерентны, то результирующая интенсивность найдется простым сложением интенсивностей обеих линий. Она представлена на рис. 193 сплошной кривой, когда интенсивности обеих спектральных линий одинаковы, а расстояние между ними  $\delta\lambda$  соответствует критерию Рэлея. В центре кривой получился провал или минимум, интенсивность в котором, как легко подсчитать, составляет около 80% максимальной. При наличии такого провала нормальный глаз обычно воспринимает получившуюся картину как «двойную спектральную линию».

5. Для повышения разрешающей способности можно либо увеличивать число штрихов  $N$ , либо повышать порядок интерференции  $m$ . Первый путь используется в дифракционных решетках, второй — в интерференционных спектральных приборах. В Советском Союзе изготавливаются плоские и вогнутые дифракционные решетки различных размеров и с различным числом штрихов на миллиметр. Для ультрафиолетовой и видимой областей изготавливаются дифракционные решетки, имеющие 1200 и 600 штрихов на миллиметр при размерах  $100 \times 100 \text{ мм}^2$  и  $150 \times 150 \text{ мм}^2$ , а для инфракрасной области — от 300 до 1 штриха на миллиметр при размерах от  $150 \times 150 \text{ мм}^2$  до  $300 \times 300 \text{ мм}^2$ . Таким образом, общее число штрихов доходит приблизительно до 200 000, а разрешающая способность во втором порядке — до 400 000. Важным достоинством дифракционной решетки является малый порядок спектра  $m$ . Благодаря этому дифракционные решетки обладают широкими дисперсионными областями  $\Delta\lambda = \lambda/m$  и пригодны для исследования *широких интервалов спектра*. Недостатками дифракционных решеток являются малая светосила и сложность в обращении.

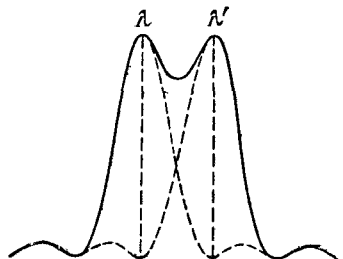


Рис. 193.

В интерференционных спектральных приборах число интерференционных пучков  $N$  относительно невелико (несколько десятков, в интерферометре Майкельсона  $N = 2$ ), тогда как порядки спектров  $m$  очень высоки (около 10 000 и больше). Поэтому интерференционные спектральные приборы имеют малые дисперсионные области. Они могут применяться для исследования только *очень узких участков спектра*, например для изучения структуры отдельных спектральных линий, выделенных каким-либо другим спектральным аппаратом с большей дисперсионной областью, но с недостаточной разрешающей способностью. Однако эти приборы более просты в обращении и имеют большую светосилу, чем дифракционные решетки.

6. К решетке, как точному спектральному прибору, предъявляются очень высокие требования. Надо нанести десятки или сотни тысяч совершенно идентичных штрихов с идеальной периодичностью. Поэтому техника изготовления дифракционных решеток совершенствовалась довольно медленно. Первая дифракционная решетка, по-видимому, была изготовлена в 1785 г. американским астрономом Риттенгаузом. Но ни самим Риттенгаузом и никем другим она не использовалась для получения и изучения спектров. Решетка была вновь открыта в 1821 г. Фраунгофером, который заложил основы дифракции в параллельных лучах и выполнил первые исследования с помощью дифракционного спектроскопа (в частности, открыл темные линии в спектре солнечного излучения). Фраунгофер построил решетки с числом штрихов от 15 до 130 на сантиметр, наматывая тонкую проволоку на два параллельных вилла. До недавнего времени подобные прово-

лочные решетки применялись в области длинных (инфракрасных) волн. Затем Фраунгофер стал изготовлять более совершенные решетки штриховкой слоя золота на поверхности стекла и, наконец, штриховкой самого стекла алмазным острием. Наилучшие решетки были получены последним методом. Лучшая решетка имела ширину около 12 мм и период  $3 \cdot 10^{-3}$  мм (3300 штрихов на сантиметр).

После Фраунгофера многие искусные механики уделяли много внимания штриховке решеток. Особо следует отметить астронома-любителя Л. М. Резерфорда, большая часть решеток которого была изготовлена в 1880 г. Его решетки значительно превосходили все предшествующие. Резерфорд ввел в практику отражательные решетки, нанося делительной машиной штрихи на зеркальной поверхности металла. Металл более мягок, чем стекло, и поэтому значительно меньше изнашивает алмазное острие, от постоянства которого так сильно зависит качество решетки.

Но наиболее значительные усовершенствования были сделаны Роулэндом (1848—1901). Он усовершенствовал способы изготовления винтов для делительной машины и первый стал изготовлять вогнутые отражательные решетки, выполняющие одновременно функции решетки и собирающей линзы. Решетки Роулэнда имели до 8000 штрихов на сантиметр при ширине до 10 см и превосходном качестве. Они сделали возможным выполнение важнейших спектроскопических исследований в конце XIX и начале XX веков.

Дальнейшие улучшения в машины Роулэнда ввели Андерсон и Вуд, которые после смерти Роулэнда заменили его в его лаборатории. Из этой лаборатории и поныне выходят наиболее совершенные решетки, имеющие до 12 000 штрихов на сантиметр. С таких гравированных решеток получают дешевые копии (реплики) путем изготовления отпечатков на желатине или специальных пластмассах. В СССР налажено производство дифракционных решеток, а также реплик высокого качества. Их параметры были указаны выше.

## § 48. Эшелон Майкельсона и интерференционные спектральные приборы

1. Дифракционная решетка, как уже указывалось, есть спектральный прибор, в котором осуществляется многолучевая интерференция идентичных световых пучков, из которых каждый сдвинут по фазе относительно предыдущего на одну и ту же величину. Ко всем приборам, работающим по этому принципу, применимы общие результаты, изложенные в двух предыдущих параграфах. В частности, их спектральная разрешающая способность выражается формулой  $\lambda/\delta\lambda = Nt$ , т. е. равна разности хода между крайними интерферирующими лучами, выраженной в длинах волн. Высокая разрешающая способность достигается как увеличением числа интерферирующих пучков  $N$ , так и повышением порядка интерференции  $t$ . В дифракционных решетках число интерферирующих пучков очень велико (до 200 000 и больше), а порядки интерференции  $t$  низкие (не выше 3). В так называемых *интерференционных спектральных приборах*, наоборот, порядки интерференции  $t$  очень высокие (до  $10^5$  и выше), а число интерферирующих пучков сравнительно невелико (20—40). Одним из таких приборов является ступенчатая решетка, или *эшелон Майкельсона*.

2. Эшелон Майкельсона состоит из нескольких (30—40) пластин из очень однородного стекла, толщина  $h$  которых порядка 1—3 см.