ПРОБНАЯ ВЕРСИЯ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.16

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Цель работы – определить период и угловую дисперсию дифракционной решетки.

Введение

Важнейшей деталью любого спектрального прибора является *диспергирующий элемент*, роль которого заключается в разделении электромагнитного излучения на монохроматические составляющие. В качестве диспергирующих элементов используются или стеклянные призмы, или дифракционные решетки. Способность призмы выполнять свою функцию обусловлена явлением дисперсии, т.е. зависимостью показателя преломления стекла от длины волны $n = n(\lambda)$. Способность решетки разлагать свет на монохроматические волны обусловлена сочетанием явлений дифракции и интерференции световых волн.

Различают *прозрачные* и *отражательные* дифракционные решетки. Простейшую прозрачную решетку можно изготовить, если нанести острым резцом на поверхность стеклянной пластины параллельные царапины, отстоящие друг от друга на одинаковом расстоянии. Каждая царапина представляет собой густую сеть тонких трещин и потому непрозрачна для света, который проходит только в промежутки между ними. Для изготовления отражательных дифракционных решеток на зеркальную, чаще всего металлическую, поверхность наносят параллельные бороздки. Иногда царапины или бороздки на решетках называют *штрихами*.

Рассмотрим прозрачную дифракционную решетку, представляющую собой совокупность одинаковых параллельных щелей, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга. На схематично изображающим ее Рис. 1, ширина щелей решетки обозначена буквой a, а ширина непрозрачных участков - буквой b. Величина $d = a + b$ называется *постоянной дифракционной решетки* или ее *периодом*.

Пусть плоская монохроматическая световая волна с длиной λ падает перпендикулярно плоскости решетки. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля,

любая точка просвета решетки может считаться источником вторичных сферических волн, и все такие точечные источники когерентны. Рассмотрим волны, исходящие из гомологичных точек (например, центральных точек просветов) O и O', и идущие вдоль параллельных прямых OM и $O'M'$, направленных под углом ϕ к нормали к решетке. Угол отклонения ϕ света от нормали к решетке называется углом дифракции. На Рис. 1 изображены две нормали ON и $O'N'$, $\angle MON = \angle M'O'N' = \phi$. В точке T на экране, расположенном в фокальной плоскости собирающей линзы L, волны будут интерферировать,

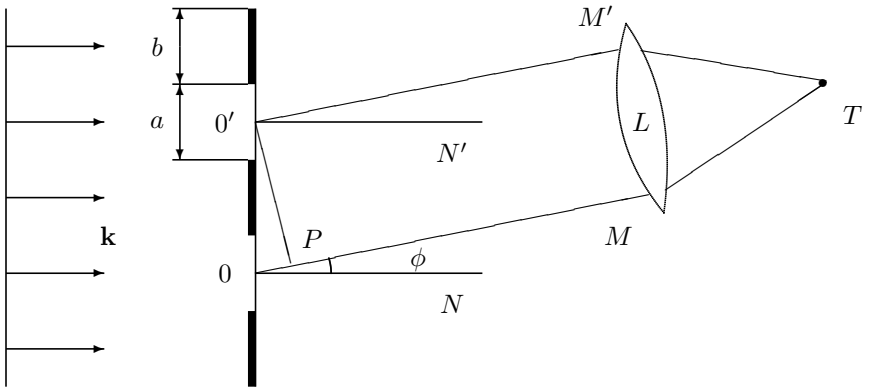

Рис. 1: Ход лучей в дифракционной решетке

причем результат интерференции зависит от оптической разности хода δ этих волн. Так как волны, испускаемые точечными источниками O и O', имеют одинаковую фазу, то оптическую разность хода составляет отрезок OP. Этот отрезок является катетом в прямоугольном треугольнике OPO'. Поскольку угол $\angle OO'P = \phi$, то разность хода равна

$$|OP| = \delta = d \sin \phi. \tag{1}$$

Если на отрезке OP "укладывается" целое число длин волн

$$\delta = k\lambda, \quad k = 0, 1, \dots, \tag{2}$$

то в точке T будет наблюдаться усиление света, если будет выполняться условие

$$\delta = k\lambda + \frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, 1, \dots, \tag{3}$$

то в этой точке будет наблюдаться минимум освещенности. Принимая во внимание выражение (1), получаем уравнение дифракционной решетки

$$d \sin \phi = k\lambda, \quad k = 0, 1, \ldots . \tag{4}$$

Поскольку аналогичные рассуждения справедливы для лучей, отклоняющихся в другую сторону от нормали, то дифракционная картина оказывается симметричной по отношению к *центральному максимуму*, соответствующему $k = 0$. Чтобы отразить этот факт, полагают, что в формуле (4) целое число k принимает как положительные, так и отрицательные значения. Это соответствует возможности наблюдать дифракцию как справа от нормали к решетке, так и слева от нее.

Максимумы, удовлетворяющие условию (4), называются главными, а число k - порядком главного максимума или *порядком спектра*. Значению $k = 0$ соответствует максимум нулевого порядка или центральный максимум. Максимум нулевого порядка один, максимумов первого, второго и т.д. порядков по два - слева и справа от нулевого.

Положение главных максимумов зависит от длины световой волны. Поэтому при освещении решетки белым светом максимумы всех порядков, кроме нулевого, соответствующие разным длинам волн, смещаются друг относительно друга. Таким образом происходит разложение светового пучка на спектральные (монохроматические) составляющие. Фиолетовая (коротковолновая) граница этого спектра обращена к центру дифракционной картины, красная (длинноволновая) - в обратную сторону.

Качество дифракционной решетки как спектрального прибора оценивается *угловой дисперсией* D, которая определяется соотношением

$$D = \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}\lambda}. \tag{5}$$

Здесь $\mathrm{d}\phi$ - угловое расхождение двух спектральных линий, длины волн которых отличаются на бесконечно малую величину $\mathrm{d}\lambda$. Чтобы вычислить D дифакционной решетки, продифференцируем по переменной λ обе части уравнения (4), считая угол ϕ функцией длины волны $\phi = \phi(\lambda)$

$$d \cos \phi \, \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}\lambda} = k.$$

Выражая из полученной формулы производную, получаем искомую формулу

$$D = \frac{k}{d \cos \phi}. \tag{6}$$

Из формулы (6) следует, что угловая дисперсия растет с увеличением порядка спектра k и уменьшается с ростом периода решетки d. Однако уместно напомнить, что с ростом порядка спектра сильно уменьшается интенсивность спектра.

Методика эксперимента

Экспериментальная установка состоит их следующих узлов

- гониометр Г5,
- источник излучения (ртутная, гелиевая или неоновая лампа),
- дифракционная решетка.

Краткое описание гониометра Г5

Гониометром называется оптический прибор, предназначенный для точного измерения углов. На Рис. 4 представлена фотография гониометра Г5.

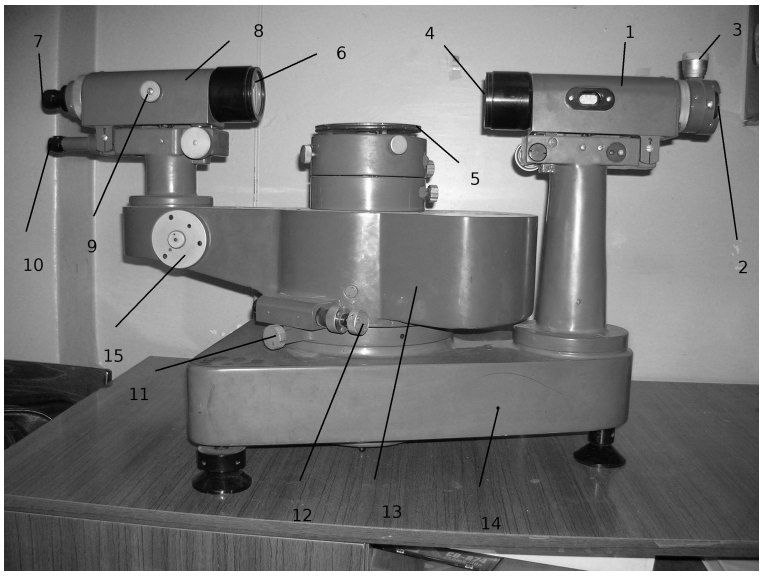

Рис. 2: Фотография гониометра

Функционально гониометр состоит из следующих узлов

- **коллиматора** (1), предназначенного для создания узких пучков параллельных лучей,
- **предметного столика** (5), на котором крепится дифракционная решетка или другой исследуемый объект,

• **зрительной трубы** (8), через которую наблюдается спектр.

Все узлы гониометра смонтированы на **массивной станинине** (14), включая **алидаду** (13), т.е. подвижный кронштейн со зрительной трубой, который можно поворачивать вокруг вертикальной оси, проходящей через центр столика.

Свет от источника излучения (в нашем случае от ртутной или другой газонаполненной лампы) попадает в щель коллиматора (2). Ширина щели регулируется микрометрическим винтом (3). Щель расположена в фокальной плоскости коллиматорной линзы (4), поэтому свет выходит из коллиматора параллельным пучком. Коллиматор укреплен неподвижно на станинине гониометра (14).

Далее свет проходит через дифракционную решетку, помещенную на предметном столике (5). Дифракционная картина наблюдается через зрительную трубу, которая состоит из объектива (6) и окуляра (7). Фокусировка окуляра производится с помощью винта (9). Зрительная труба укреплена на алидаде (13), которую можно вращать или грубо - рукой, после освобождения стопорного винта (11), или точно - микрометрическим винтом (12). Угол поворота зрительной трубы отсчитывается по шкале, видимой в окуляре (10) отсчетного микроскопа. Через отсчетный микроскоп освещается лимб - горизонтальная стеклянная шкала (см. Рис. 5а), разделенная на 360 больших делений.

ЛЕВОЕ ОКНО

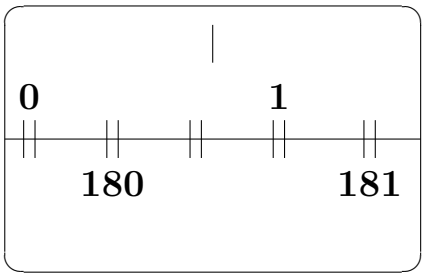

Рис. 5а

ПРАВОЕ ОКНО

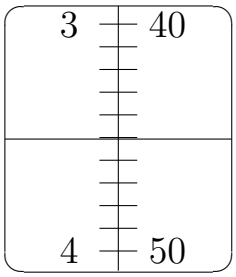

Рис. 5б.

Цена одного деления 1°. Каждое большое деление разделено, в свою очередь, на три малых деления ценою $20'$. В окуляре отсчетного микроскопа в левом окне видны изображения штрихов двух противоположных участков лимба. В правом окне (Рис. 5б) видна вертикальная шкала микрометра, по которой

определяются угловые минуты и секунды.

Измерение угла поворота зрительной трубы на гониометре проводится следующим образом. Маховичок оптического микрометра (13) поворачивается так, чтобы верхние и нижние изображения двойных штрихов лимба в левом окне точно совместились. Если последнее выполнено, то

- число градусов будет равно левой, ближайшей к индексу (т.е. к вертикальной риске в верхней части левого окна) цифре на прямой горизонтальной шкале (на Рис. 5а - $\mathbf{0^o}$);
- число десятков минут равно числу интервалов, заключенных между верхним двойным штрихом, по которому было отсчитано число градусов, и нижним двойным штрихом, отличающимся от верхнего на $\mathbf{180^o}$ (на Рис. 5а - одному интервалу: от $\mathbf{0^o}$ на верхней шкале до $\mathbf{180^o}$ на перевернутой нижней);
- число единиц минут отсчитывается по шкале микрометра в правом окне по левому столбцу чисел с помощью горизонтального индекса (на Рис. 5б - $\mathbf{3'}$);
- число десятков секунд отсчитывается в том же окне по правому столбцу чисел с помощью горизонтального индекса (на Рис. 5б - $\mathbf{40''}$);
- число единиц секунд равно числу делений между штрихами, соответствующими отсчету десятков секунд и индексом (на Рис. 5б - $\mathbf{5''}$);.

Положение, показанное на Рис. 5 соответствует $\mathbf{0^o13'45''}$. Приборная погрешность гониометра Г5 равна $5''$.

Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, установлена ли дифракционная решетка на предметном столике перпендикулярно лучу.
2. Включите ртутную лампу (ртутная лампа может быть заменена гелиевой или неоновой).
3. Включите подсветку отсчетного микроскопа тумблером, находящемся на корпусе гониометра.
4. Отожмите винт (11) и, осторожно поворачивая алидаду рукой, просмотрите спектр ртути первого и второго порядков слева и справа от центральной линии.

5. Выберите яркую линию в спектре первого порядка слева (например, зеленую) и совместите ее с визиром. Зажав стопорный винт (11), произведите с помощью винта (12) более точное совмещение визира со спектральной линией и сделайте отсчет угла $\phi_{Л1}$. Результат занесите в Таблицу.

6. Вращая алидаду от руки (винт 11 отжат), переведите зрительную трубу вправо, наводя ее на такую же линию в правом спектре. Сделайте отсчет угла $\phi_{П1}$ и результат занесите в Таблицу.

7. Повторите эти измерения еще несколько раз для выбранной линии в спектрах первого и второго порядков.

8. Для желтого дублета (близко расположенных двух желтых линий) проведите однократные отсчеты углов в первом и втором порядках слева и справа. Результаты запишите.[1]

Таблица результатов измерений

Порядок спектра	$\phi_{Л1}$	$\phi_{П1}$	ϕ_1	d
Зеленая линия				
Желтый дублет				

Обработка результатов измерений

1. Определите углы дифракции ϕ_1 максимумов первого порядка по формуле

$$\phi_1 = \frac{|\phi_{Л1} - \phi_{П1}|}{2},$$

и по аналогичной формуле для второго порядка. Если нуль шкалы лимба попадает между отсчетами (например, $\phi_{Л1} = 330^o$, а $\phi_{П1} = 32^o$), то использовать необходимо формулу

$$\phi_1 = \frac{360^0 - |\phi_{Л1} - \phi_{П1}|}{2}.$$

Результаты вычислений занесите в Таблицу.

2. Используя полученные значения углов дифракции, по формуле

[1] Измерения п.8 будут использованы только для оценочных вычислений

$$d = \frac{k\lambda}{\sin\phi},$$

следующей из (4), вычислите для каждого измерения постоянную решетки d. Значение длин волн ярких спектральных линий ртути промещены на рабочем столе.

3. Считая полученные значения d результатом прямых многократных измерений, найдите среднее значение постоянной решетки $< d >$ и погрешность к нему.

4. Вычислите количество штрихов данной решетки, приходящихся на 1 мм длины.

5. Используя проведенные в п.8 однократные измерения, вычислите углы дифракции для линий желтого дублета в первом и втором порядках.

6. По приближенной формуле

$$D = \frac{|\phi_1 - \phi_2|}{|\lambda_1 - \lambda_2|},$$

полученной из определения (5), оцените дисперсию данной дифракционной решетки в первом и втором порядках спектра.

7. Сравните полученные результаты с результатами вычислений дисперсии по формуле (6).

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление интерференции света?

2. В чем состоит явление дифракции света?

3. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.

4. Выведите формулу дифракционной решетки (4).

5. Что характеризует дисперсия дифракционной решетки?

6. Как экспериментально определить угловую дисперсию D дифракционной решетки?

Литература

1. Сивухин Д.В., Общий курс физики, т. 4, Оптика, М., ФИЗМАТЛИТ, 2005.

2. Савельев И.В., Курс физики, т. 3, Лань, Спб-Москва-Краснодар, 2007.

3. Ландсберг Г.С., Оптика, М., ФИЗМАТЛИТ, 2002.

4. Лебедева В.В., Экспериментальная оптика, М., Изд-во Моск. ун-та, 1994.