Лабораторная работа 3.07

ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА КАК СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПРИБОР

А.И. Бугрова

Цель работы: Экспериментальное определение периода и угловой дисперсии дифракционной решетки как спектрального прибора.

Задание: Определив угловое положение максимумов нулевого, первого, второго и третьего порядков дифракционного спектра, рассчитать период решетки и угловую дисперсию.

Подготовка к выполнению лабораторной работы: Изучить явление дифракции Фраунгофера на дифракционной решетке; разобраться в понятиях: дифракция, дифракционная решетка, дифракционный спектр решетки, характеристики спектральных приборов.

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1987, т. 3, гл. 4.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. М., Наука, 1976, гл. 9.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление дифракции света? Какой вид дифракции носит название дифракции Фраунгофера?
2. Что такое дифракционная решетка? Условия образования максимумов и минимумов в спектре дифракционной решетки?
3. Чему равно предельное число дифракционных порядков, которое можно получить при помощи данной решетки?
4. Как связана ширина (резкость) и интенсивность дифракционных максимумов с числом щелей?
5. Почему дифракционная решетка является спектральным прибором? Дайте определение и поясните физический смысл понятия угловой дисперсии спектрального прибора.
6. Чем определяется угловая дисперсия дифракционной решетки?
7. Как производится отсчет угла по шкале гониометра?

8. Как измениться спектр, если при том же количестве щелей уменьшить период решетки?
9. Как измениться спектр, если, не меняя периода решетки, уменьшить количество щелей?
10. Как получить формулу, определяющую положение главных максимумов?
11. Изобразите дифракционную картину, полученную при нормальном падении на решетку монохроматического света.
12. Как объяснить неодинаковую интенсивность главных максимумов?

Описание аппаратуры и метода измерений

Дифракцией называется явление непрямолинейного распространения света, огибание светом препятствий, размер которых сравним с длиной волны λ. Тип дифракции, при котором рассматривается дифракционная картина, образованная параллельными лучами, получил название дифракции Фраунгофера. Рассмотрим пример дифракции Фраунгофера на дифракционной решетке. Дифракционная решетка представляет собой пластину, на которой имеется система параллельных щелей шириной b каждая, отделенных друг от друга непрозрачными промежутками одинаковой ширины a. Величина $d = a+b$ называется периодом решетки. При освещении такой пластины монохроматическим светом щели действуют как источники вторичных когерентных световых волн. За решеткой эти волны создают дифракционную картину. В первом приближении она совпадает с интерференционной картиной от точечных источников, число которых равно числу щелей. Резкое возрастание амплитуды результирующего колебания от всех щелей будет в тех случаях, когда колебания от соседних щелей имеют сдвиг фаз кратный 2π, что соответствует разности хода Δ, кратной целому числу длин волн, то есть

$$\Delta = d \sin\varphi = m\lambda;\ m = 0, \pm1, \pm2,\ldots \qquad (1)$$

Эти пики интенсивности называются главными максимумами. Число m называется порядком дифракции или порядком главного максимума. Из (1) следует, что максимум нулевого по-

рядка наблюдается под углом $\varphi = 0$ и является единственным. Каждый максимум ненулевого порядка наблюдается дважды в направлениях, ориентированных симметрично относительно направления, которое задается углом $\varphi = 0$. Поэтому нулевой максимум принято называть центральным. Число главных максимумов всегда ограничено. Так как абсолютное значение $\sin\varphi$ не превосходит единицы, то

$$|m| \le \frac{d}{\lambda}. \qquad (2)$$

Для направлений, определяемых условием

$$b \sin\varphi = m\lambda;\ m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots, \qquad (3)$$

амплитуда колебаний от каждой щели обращается в нуль (вследствие дифракции света на одной щели), поэтому и амплитуда результирующего колебания в соответствующей точке экрана будет равна нулю. Условие (3) определяет положение главных минимумов интенсивности для решетки.

Кроме того, имеются направления, для которых колебания от отдельных щелей взаимно гасят друг друга. В общем случае для N щелей положение добавочных минимумов определяется условием

$$d \sin\varphi = \pm\frac{K\lambda}{N},\ K = 1, 2, \ldots, N\text{-}1, N\text{+}1, 2N\text{-}1, 2N\text{+}1 \ldots, \qquad (4)$$

где K принимает все целочисленные значения, кроме 0, N, $2N$,…, т.е. кроме тех, при которых условие (4) переходит в условие (1). Таким образом, между двумя соседними главными максимумами (1) лежат по (N - 1) добавочных минимумов.

Расчет дифракционной картины показывает, что интенсивность главных максимумов пропорциональна квадрату числа щелей $\sim N^2$, вторичные максимумы очень слабы: самый сильный из них составляет не более 5% от главного. Поэтому дифракционная картина от решетки состоит из резких четких максимумов, разделенных практически темными промежутками. Характерная картина распределения интенсивности в фокальной плоскости линзы, получаемая при нормальном падении на решетку монохроматического света, приведена на рис. 1.

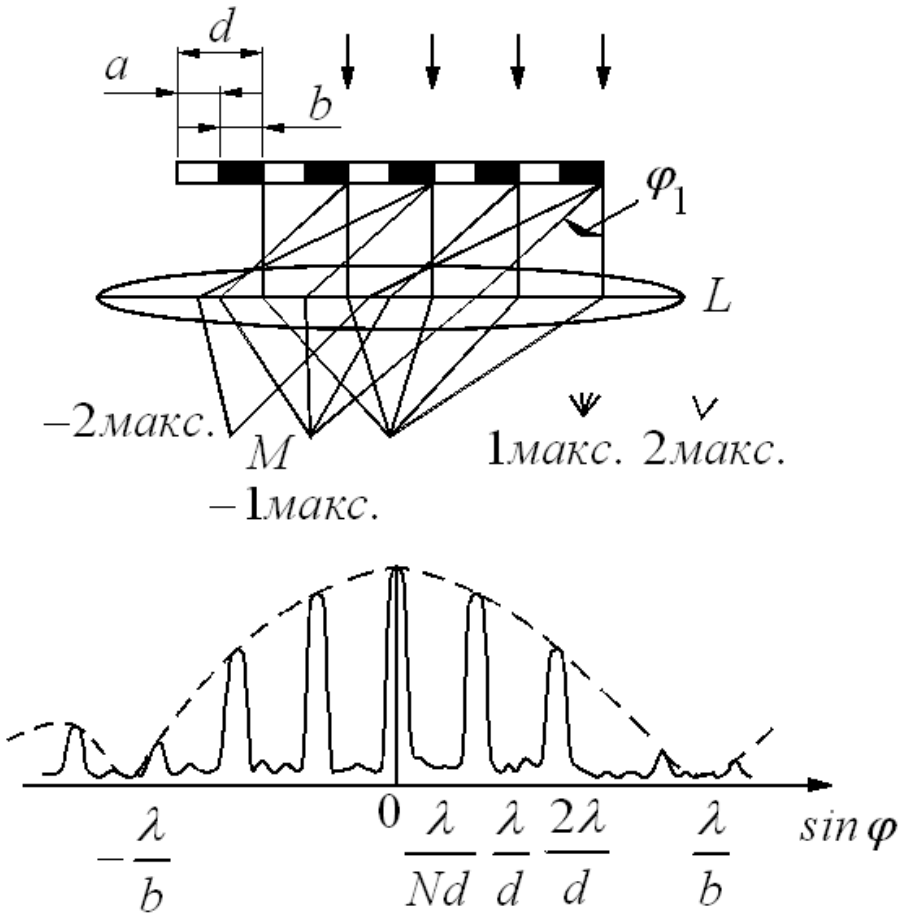

Рис. 1

Местоположение главных максимумов (за одним только исключением – положением центрального максимума) зависит от длины волны света, как это следует из (1–4). Поэтому дифракционная решетка является спектральным прибором, т.е. устройством, которое пространственно разделяет световые волны разных длин волн. Например, если на решетку направить белый свет, то все дифракционные максимумы, кроме центрального, разложатся в спектр. При этом фиолетовый край каждого спектра (малые длины волн) будет ближе к центру, а красный край (большие длины волн) окажется на периферии. Значение $\varphi = 0$ определяет максимум для всех λ. Поэтому в этом направлении собираются лучи всех длин волн. Дисперсию определяют как угловое или линейное расстояние между двумя спектральными линиями, отличающимися по длине волны на единицу (например,

на 1Å=10^{-1} нм). В случае угловой дисперсии расстояние между линиями измеряют в угловых единицах. Угловая дисперсия:

$$D = \left|\frac{d\varphi}{d\lambda}\right|, \tag{5}$$

где $d\varphi$ – угловое расстояние между спектральными линиями, отличающимися по длине волны на $d\lambda$.

Найдем угловую дисперсию дифракционной решетки. Из (1) с точностью до знака следует: $d\cos\varphi\, d\varphi = md\lambda$. Поэтому:

$$D = \left|\frac{d\varphi}{d\lambda}\right| = \frac{m}{d\cdot\cos\varphi}. \tag{6}$$

Таким образом, угловая дисперсия дифракционной решетки тем больше, чем меньше период решетки и чем выше порядок получаемого с ее помощью спектра.

В качестве источника света в работе используется излучение газового разряда в парах натрия («натриевая» лампа). Спектр излучения паров натрия приведен на рис. 2. Для определения периода дифракционной решетки и угловой дисперсии используется прибор, называемый гониометром (рис. 3). Он представляет собой столик Т, на котором укреплена дифракционная решетка ДР так, что штрихи ее расположены вертикально (перпендикулярно) плоскости (рис. 3). Свет от источника направляется на решетку при помощи трубы К, называемой коллиматором. На конце трубы К, обращенной к источнику, имеется узкая вертикальная щель, ширину которой можно уменьшить с помощью специального винта. Щель находится в фокусе линзы O_2. Лучи, пройдя линзу, попадают на решетку параллельным пучком. Щель коллиматора, будучи освещена источником, сама становится источником, поэтому дифракционные изображения имеют вид узких полосок, параллельных щели коллиматора.

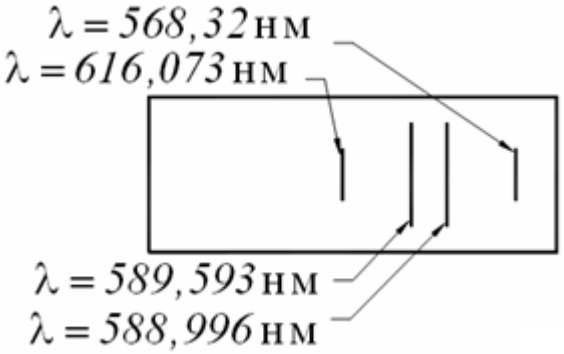

Рис. 2

Для наблюдения дифракционных максимумов вместо экрана используется труба ЗР. Ее объектив O_3 представляет собой линзу, служащую для получения в ее фокальной плоскости дифракционных изображений. Последние рассматриваются при помощи окуляра O_4. В окуляре имеется вертикальная риска. Поворачивая зрительную трубу ЗР, можно добиться совмещения визирной риски с интересующим нас дифракционным максимумом. Измерив угол поворота зрительной трубы, можно определить угол дифракции.

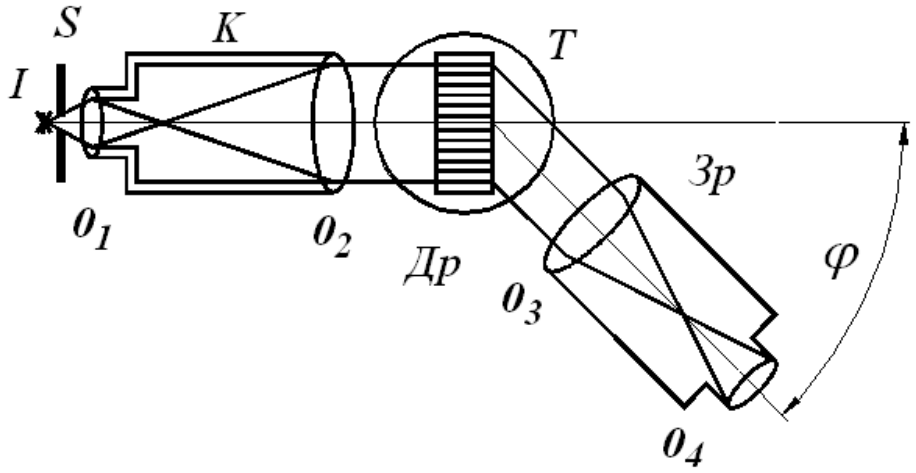

Рис. 3

Измерение угла поворота зрительной трубы на гониометре ГС-5 проводится следующим образом. Для отсчета по лимбу необходимо повернуть маховичок оптического микрометра настолько, чтобы верхние и нижние изображения штрихов лимба в левом окне точно совместились (маховичок расположен под зрительной трубой справа).

Число градусов будет равно видимой ближайшей левой от вертикальной риски цифре. Число десятков минут равно числу интервалов, заключенных между верхним штрихом, который соответствует отсчитанному числу градусов, и нижним штрихом, отличающимся от верхнего на 180°.

Число единиц минут отсчитывается по шкале микрометра в правом окне по левому ряду чисел. Число десятков и единиц секунд – в том же окне по правому ряду чисел. Вид измерительных шкал приведен на рис. 4. Положение цифровых индексов соответствует $0\ 45^{/}\ 55^{//}$.

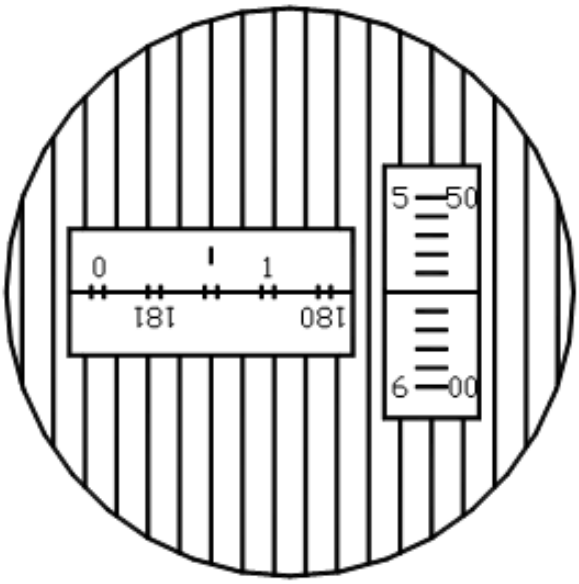

Рис. 4

Определив угол дифракции и зная порядок спектра, можно по дифракционной картине света с известной длиной волны вычислить период решетки

$$d = \frac{m\lambda}{\sin\varphi} \qquad (7)$$

Гониометр позволяет также непосредственно измерить угловую дисперсию дифракционной решетки и сравнить ее с вычисленной по формуле (6).

Порядок выполнения работы

1. Поместить перед щелью коллиматора натриевую лампу (в ра-

боте возможно использование ртутной лампы, в спектре которой также имеется желтый «дублет».)

2. Поставив зрительную трубу на одной оси с коллиматором, добиться с помощью регулировочных винтов коллиматора, зрительной трубы и щели узкой и резкой полоски нулевого максимума.
3. Просмотреть спектр. Найти линии «дублета» натрия в первом, втором и, если видно, в третьем порядке. Обратить внимание на то, что с увеличением порядка дифракционного спектра расстояние между линиями «дублета» будет в соответствии с (6) увеличиваться.
4. Поворотом зрительной трубы совместить визирную риску окуляра с нулевым максимумом.
5. Произвести отсчет угла, соответствующего нулевому максимуму.
6. Поворотом зрительной трубы установить визирную риску на первую линию «дублета» (ближайшую к нулевому дифракционному максимуму). Произвести отсчет угла φ_1. Перевести визир на вторую линию и замерить угол φ'_1.
7. Аналогично измерить положение обеих линий для второго и, если удастся, для третьего дифракционных порядков.
8. Измеренные значения углов занести в табл. 1.

Таблица 1

$\varphi_0 = \cdots$			$\lambda_1 = \cdots$			$\lambda_2 = \cdots$	
Порядок дифр.	Углы отсчета	Углы дифракции	***d***	$\Delta\varphi$(град)	$\Delta\varphi$(рад)	*D*	*D'*
m=1	$\varphi_1 =$	$\varphi_{D_1} =$					
	$\varphi'_1 =$	$\varphi'_{D_1} =$					
m=2	$\varphi_2 =$	$\varphi_{D_2} =$					
	$\varphi'_2 =$	$\varphi'_{D_2} =$					
m=3	$\varphi_3 =$	$\varphi_{D_3} =$					
	$\varphi'_3 =$	$\varphi'_{D_3} =$					
			$d_{ср} =$				

Обработка результатов измерений

Упражнение 1

1. Рассчитать углы дифракции φ_D измеренных спектральных компонент излучения паров натрия. Углы определяются как $(\varphi_1 - \varphi_0)$, $(\varphi_1' - \varphi_0)$ и т.д. Результаты расчетов занести в таблицу.
2. По известным длинам волн излучения натрия для каждой измеренной компоненты и каждого порядка дифракции вычислить период решетки d по формуле (7)
$$d = \frac{m\lambda}{\sin\varphi},$$
результаты вычислений также занести в таблицу.
3. Вычислить среднее арифметическое значение периода дифракционной решетки.
4. Рассчитать случайную погрешность измерения периода дифракционной решетки.
5. Результат измерения представить в виде ($d \pm \Delta d$) мм.

Упражнение 2

1. Вычислить в градусах разность углов $\Delta\varphi$ для двух линий «дублета» для всех наблюдавшихся порядков дифракции. Перевести полученные значения $\Delta\varphi$ в радианы. Результаты вычислений занести в таблицу.
2. Определить угловую дисперсию по формуле (для каждого порядка дифракции)
$$D = \frac{\Delta\varphi}{\lambda_2 - \lambda_1}.$$
3. Вычислить значение угловой дисперсии для каждого порядка дифракции по формуле
$$D' = \frac{m}{d \cdot \cos\varphi}.$$
4. Все вычисленные значения занести в таблицу.
5. Сравнить полученные по разным формулам значения угловой дисперсии для каждого из наблюдавшихся порядков дифракции.