

Лабораторная работа №10

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Приборы и принадлежности:

Спектрометр, осветитель, дифракционная решетка с периодом 0,01 мм.

Введение

Дифракцией называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики. Дифракция, в частности, приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени.

Для наблюдения дифракции световых волн необходимо создание специальных условий, которые определяются соотношениями размеров препятствий и длины волны. В данной работе явление дифракции можно наблюдать на так называемой дифракционной решетке. Дифракционной решеткой называют совокупность большого числа одинаковых, отстоящих на одно и то же расстояние друг от друга, щелей. Рассмотрим явление дифракции сначала на одной щели, затем на двух, далее на трех щелях, что позволит нам сделать обобщение на дифракционную решетку с N щелями.

Пусть на щель (рис. 1а), ширина которой b , падает плоская световая волна. Поместим за щелью собирающую линзу, а в фокальной плоскости линзы – экран. В соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля интенсивность в любой точке P экрана определяется интерференцией света, пришедшего от зон Френеля, которые укладываются в щели. Число зон Френеля определяется углом φ , под которым видна щель из точки P .

Если $\Delta = b \sin \varphi = \pm k \lambda$, т.е. если в разности хода Δ укладывается четное число зон Френеля, то в точке P будет иметь место минимум интенсивности; первый минимум будет наблюдаться при $\sin \varphi = \pm \frac{\lambda}{b}$ (смотри распределение

интенсивностей в зависимости от $\sin \varphi$ на рис.1а). Максимумы же будут наблюдаться при условии, если в разности хода Δ укладывается нечетное число зон Френеля:

$$\Delta = b \sin \varphi = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Рассмотрим дифракцию от двух щелей (рис. 1б). Расстояние между щелями обозначим через a , а сумму $a + b$ обозначим через d , ($d = a + b$) и назовем постоянной дифракционной решетки или ее периодом.

Все рассуждения, которые были приведены для одной щели, остаются справедливыми и для каждой из этих двух щелей в отдельности. В частности, при $\sin \varphi = \pm \frac{\lambda}{b} k$ всегда будет иметь место минимум интенсивности на экране. Кроме этого будут интерферировать лучи, пришедшие от каждой щели как от самостоятельного источника.

Распределение интенсивности на экране будет определяться разностью хода Δ (см. рис. 1б) и в значительной степени соотношением $\frac{d}{b}$. Положим его для конкретности равным 3 ($\frac{d}{b} = 3$).

Таким образом, распределение интенсивности на экране в случае двух щелей будет определяться соотношениями:

| | | |
|-------------------------|--|-----|
| прежние минимумы | $b \sin \varphi = k\lambda ;$ | |
| главные максимумы | $d \sin \varphi = k\lambda ;$ | (1) |
| дополнительные минимумы | $d \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$ | |

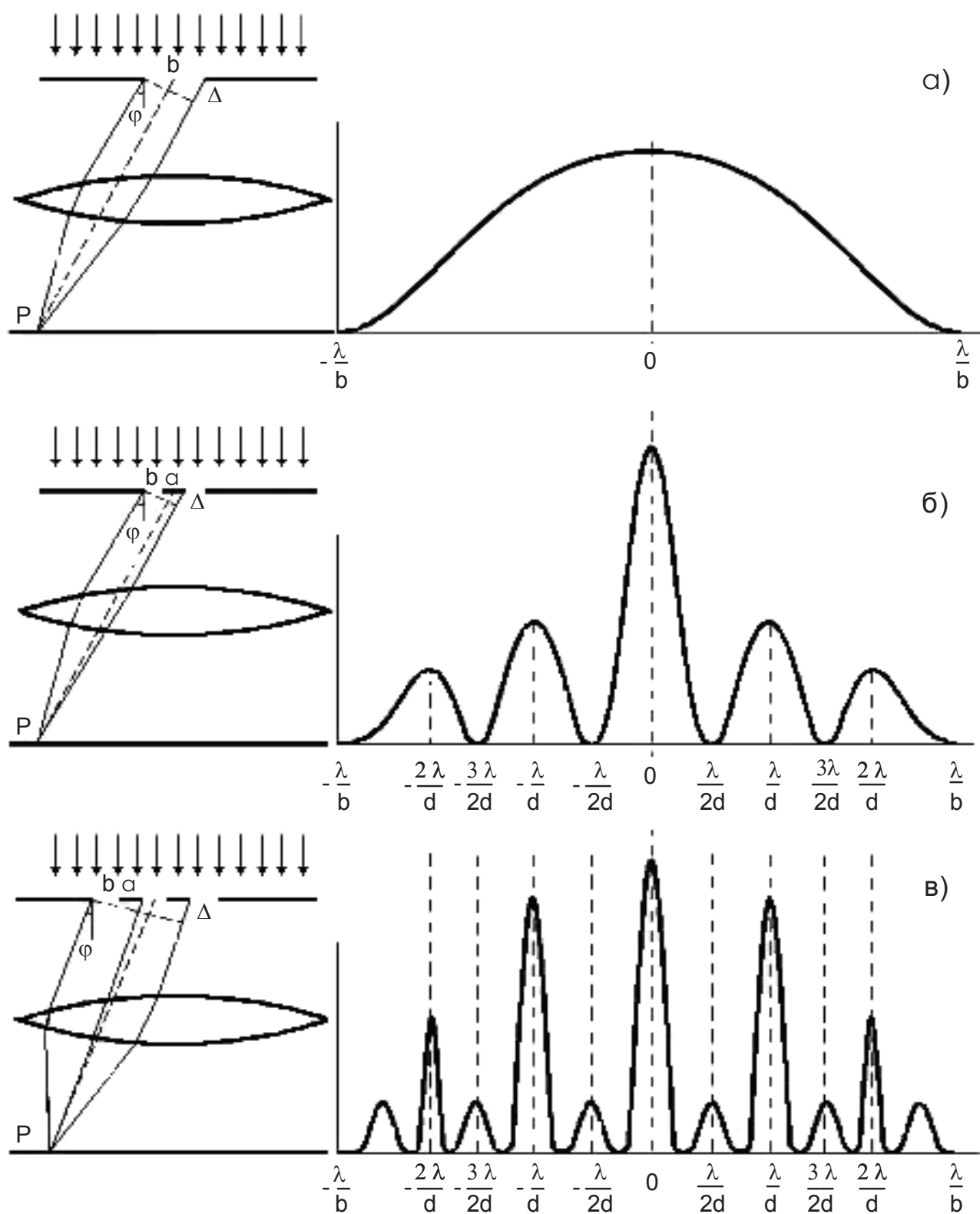


Рис. 1. Дифракция на одной, двух и трех щелях

На рис.1б дано распределение интенсивности на экране с учетом того, что $d = 3b$ в случае двух щелей. Итак, при двух щелях между двумя главными максимумами на экране находится один минимум.

Рассмотрим дифракцию света на трех щелях. Условия (1), записанные для двух щелей остаются справедливыми и для трех щелей. Кроме этого появляются дополнительные условия, обусловленные интерференцией света, идущего от первой и третьей щелей. Запишем всю совокупность условий, которые определяют распределение интенсивности на экране (рис. 1в):

| | | |
|--------------------------|---|-----|
| прежние минимумы | $b \sin \varphi = k\lambda$; | |
| главные максимумы | $d \sin \varphi = k\lambda$; | |
| дополнительные минимумы | $d \sin \varphi = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$; | (2) |
| дополнительные максимумы | $2d \sin \varphi = k\lambda$; | |
| дополнительные минимумы | $2d \sin \varphi = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$. | |

Итак, в случае трех щелей между двумя главными максимумами на экране находятся два дополнительных минимума.

Легко обобщить имеющуюся закономерность в распределении интенсивности на экране на случай N щелей. При дифракции света на N щелях между двумя главными максимумами на экране должно быть $N-1$ дополнительных минимумов, что в краткой форме можно записать так:

| | | |
|-------------------------|---|-----|
| прежние минимумы | $b \sin \varphi = k\lambda$; | |
| главные максимумы | $d \sin \varphi = 0, \lambda, 2\lambda, \dots, k\lambda$; | (3) |
| дополнительные минимумы | $d \sin \varphi = \frac{\lambda}{N}, \frac{2\lambda}{N}, \dots, \frac{(N-1)\lambda}{N},$ $\frac{(N+1)\lambda}{N}, \frac{(N+2)\lambda}{N}, \dots, \frac{m\lambda}{N},$ где $m \neq N, 2N, 3N \dots$ | |

Условие для дополнительных минимумов можно записать также через значение k :

$$d \sin \varphi = \left(k + \frac{p}{N} \right) \lambda, \text{ где } p = 1, 2, 3, \dots, N-1.$$

Кроме того, анализ распределения интенсивности, представленный на рис. 1, показывает, что при возрастании числа щелей главные максимумы становятся более узкими, а их интенсивность возрастает, так как все большее число щелей участвует в явлении дифракции.

Вышеизложенные рассуждения справедливы для монохроматического света. Если на щели падает естественный свет, то каждая длина волны его (в соответствии с условием главных максимумов $d \sin \varphi = k\lambda$) дает свое распределение интенсивности. В результате этого при данном k будет целый набор максимумов различных длин волн, причем при $k = 0$ положение максимумов всех длин волн будет совпадать, давая так называемые максимумы нулевого порядка, а при $k \neq 0$ (1,2,3...) будем иметь спектр, справа и слева от нулевого максимума, соответственно первого, второго порядка и т. д.

Таким образом, при пропускании через совокупность щелей (решетку) белого света все максимумы, кроме нулевого, разложатся в спектр, фиолетовый конец которого обращен к центру дифракционной картины, красный – наружу.

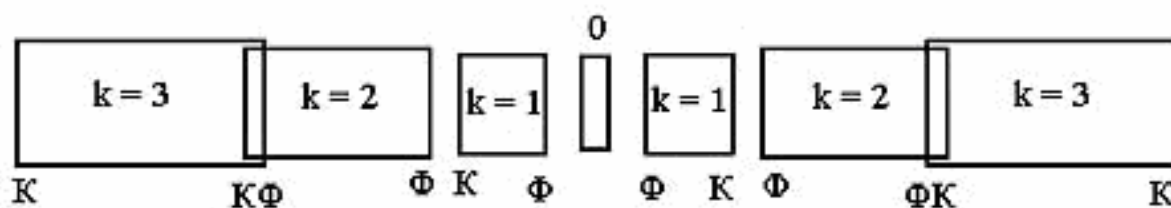


Рис. 2. Схема спектров дифракционной решетки

На рис. 2 показаны схематические спектры разных порядков, даваемые решеткой при пропускании через нее белого света. В центре лежит узкий максимум нулевого порядка. По обе стороны от центрального максимума расположены два спектра 1-го порядка, затем два спектра 2-го порядка и т.д.

Как правило, спектр второго порядка уже начинает перекрываться со спектром третьего порядка (рис. 2).

Основными характеристиками дифракционных решеток являются дисперсия и разрешающая способность. Дисперсия определяет угловое или линейное расстояние между двумя спектральными линиями, отличающимися по длине волны в $1^\circ A$, т.е.:

$$D = \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}.$$

Из условия главных максимумов (3) найдем

$$D = \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi}.$$

Разрешающая способность R определяет минимальную разность длин волн, при которой две линии воспринимаются на спектре отдельно:

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} \quad (4)$$

Две линии в спектре являются вполне разрешимыми, если максимум одной из них совпадает с минимумом другой.

В соответствии с условием максимумов и минимумов (3) для дифракционной решетки имеем:

$$d \sin \varphi_{\max} = k\lambda_1, \quad d \sin \varphi_{\min} = k\lambda_2 + \frac{1}{N} \lambda_2.$$

Тогда $k\lambda_1 = k\lambda_2 + \frac{1}{N} \lambda_2$ и разрешающая способность решетки выразится

$$R = \frac{\partial \lambda}{\lambda} = kN. \quad (5)$$

Таким образом, разрешающая способность решетки тем больше, чем больше порядок спектра и чем больше щелей имеет она.

Настоящая работа позволяет познакомиться с методами измерения длины световой волны при помощи дифракционной решетки, а также позволяет научиться делать оценку основных характеристик решетки.

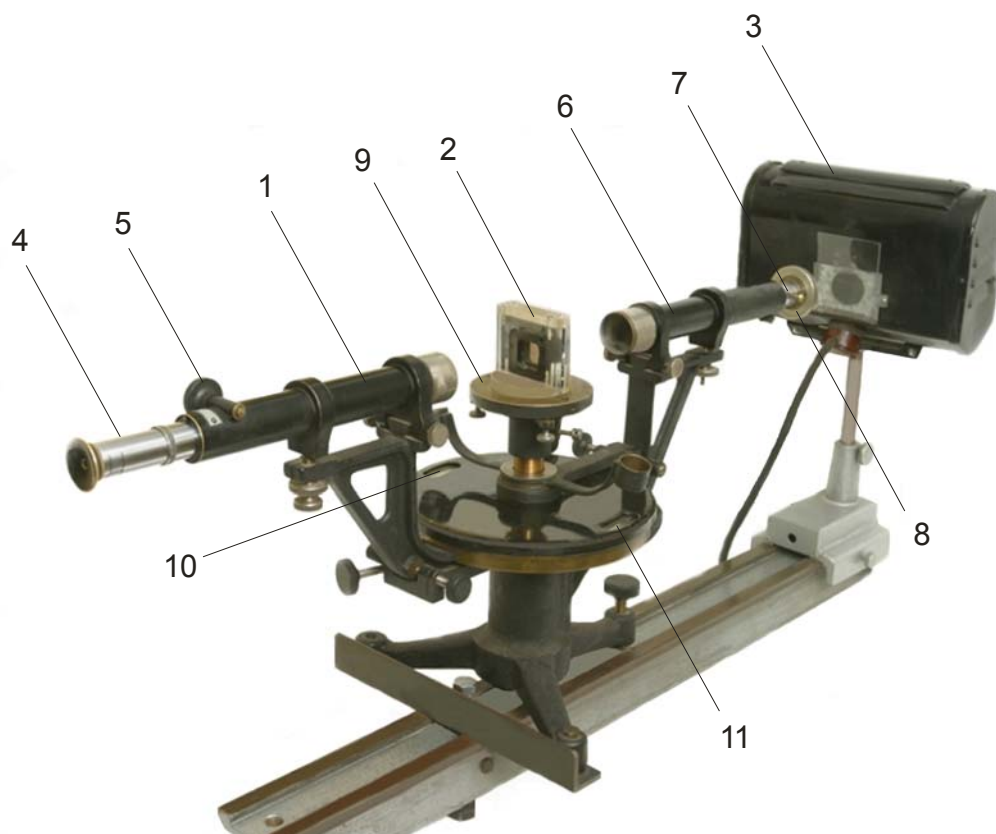


Рис. 3. Установка для изучения дифракционной решетки

На рис. 3 представлен внешний вид установки для изучения дифракционной решетки. Она состоит из гониометра 1, дифракционной решетки 2 и источника света 3 с блоком питания. Перед измерениями нужно произвести настройку установки. Для этого зрительную трубу 4 установить на бесконечность, рассматривая через нее удаленные предметы и получая резкое изображение их вращением винта 5. Затем зажечь источник света 3 (**ртутная лампа ПРК-2**) нажатием кнопки блока питания, предварительно подключив его к розетке. Совместить оптические оси коллиматора 6 и зрительной трубы 4 так, чтобы в поле зрения трубы появилось изображение щели коллиматора. Получить резкое изображение щели вращением барабана 7, и подобрать

достаточно узкую щель вращением барабана 8. Поставить на столик 9 гониометра дифракционную решетку перпендикулярно оптической оси, и при помощи зрительной трубы просмотреть появившийся дифракционный спектр справа и слева от изображения щели- спектра нулевого порядка, имеющего белый цвет, для чего поворачиваем зрительную трубу вправо и влево. После этого можно считать установку готовой к работе.

Угловые положения линий в спектре могут быть зафиксированы при помощи круговых нониусов 10 и 11 гониометра.

Порядок выполнения работы

I. Определение постоянной дифракционной решетки и ее угловой дисперсии.

1. Совместить визирную нить зрительной трубы с серединой изображения щели в спектре нулевого порядка и сделать отсчет φ_0 по нониусу 1 (рис. 4), используя лупу 2.

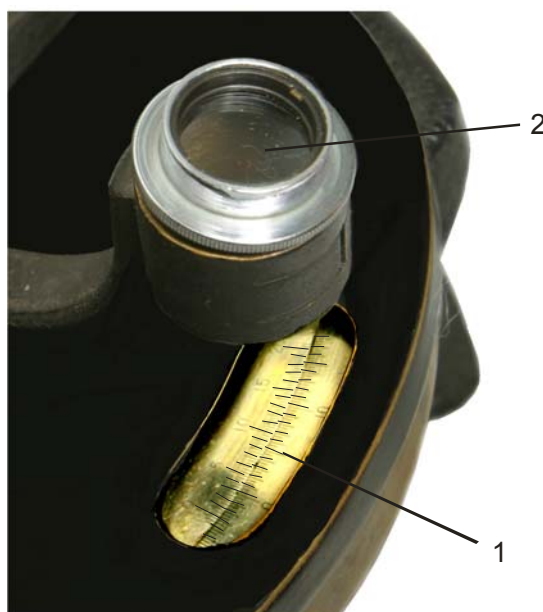


Рис. 4. Внешний вид шкалы нониуса у прибора

2. Вращают трубу влево до тех пор, пока не появится фиолетовая линия (4047 Å) в спектре первого порядка. По нониусу снять показания и занести в таблицу. Подобные измерения сделать для всех линий спектра первого порядка ($k=1$), вращая трубу влево и вправо. Аналогичные измерения сделать для второго и третьего порядка ($k = 2, 3$) и занести в таблицу.

3. Вычислить $\varphi_k = \varphi_0 - \varphi'_k$ и $\varphi_k = \varphi_0 - \varphi''_k$ и занести их в таблицу. По формуле $d \sin \varphi_k = k\lambda$ вычислить постоянную решетки d , взяв для каждого φ_k соответствующую ему длину волны λ фиолетовой линии. Из всех вычисленных значений d взять среднее и найти погрешность.

4. Далее приступают к определению угловой дисперсии решетки. Для этого визирную нить наводят на желтую линию ($\lambda=5780\text{Å}$) в спектре первого порядка и определяют φ'_{k1} . Затем визирную нить совмещают с зеленой линией ($\lambda=5461\text{Å}$) в спектре первого порядка и определяют φ'_{k2} . Угловую дисперсию вычисляют по формуле

$$D = \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}, \quad \text{где } \partial \varphi = \varphi'_{k1} - \varphi'_{k2}, \text{ а } \partial \lambda = \lambda_2 - \lambda_1.$$

То же проделывают в спектре первого порядка справа. За угловую дисперсию решетки в спектре первого порядка берут среднее значение. Аналогичным образом находят дисперсию в спектре второго порядка.

Результаты измерений записывают в таблицу 1.

Таблица 1

$$\varphi_0 =$$

| Цвет | Порядок | Длина волны λ , Å | Слева | | Справа | |
|------------|---------|---------------------------------|--------------|--------------------------------------|---------------|---------------------------------------|
| | | | φ'_k | $\varphi_k = \varphi'_k - \varphi_0$ | φ''_k | $\varphi_k = \varphi''_k - \varphi_0$ |
| Фиолетовая | 1 | 4047 | | | | |
| Синяя | 1 | 4358 | | | | |
| Зеленая | 1 | 5461 | | | | |
| Желтая | 1 | 5780 | | | | |
| Синяя | 2 | 4358 | | | | |
| Зеленая | 2 | 5461 | | | | |
| Желтая | 2 | 5780 | | | | |
| Синяя | 3 | 4358 | | | | |
| Зеленая | 3 | 5461 | | | | |
| Желтая | 3 | 5780 | | | | |

II. Определение длины световой волны и разрешающей способности дифракционной решетки.

Зная постоянную дифракционной решетки d (она определена ранее), легко измерить любую длину волны в спектре дифракционной решетки. В данном случае предлагается измерить длину волны зеленой линии ртути. Для этого берут результаты измерений для зеленой линии спектра ртути из таблицы 1, производят вычисления углов φ_k пункта 3 предыдущего упражнения и находят длину волны по формуле $d \sin \varphi_k = k\lambda$. Из всех найденных значений длины

волны взять среднее и найти погрешность. Результат измерений сравнить с табличным значением.

Оценить разрешающую способность решетки можно следующим образом. Раскрыть максимально щель коллиматора и при помощи листа белой бумаги провести наблюдение за изображением щели (в виде освещенного плоского круга) в плоскости дифракционной решетки. Если освещенный круг по своим размерам не перекрывает размеры рабочей части решетки, то за действующую часть решетки следует взять размеры освещенного круга в плоскости решетки. Измерив действующую часть решетки l миллиметровой линейкой, легко найти число щелей N , участвующих в дифракции ($N = \frac{l}{d}$), и, следовательно, оценить разрешающую способность решетки для соответствующего порядка по формуле: $R = kN$.

Литература

1. С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. Курс общей физики // СПб.: Издательство "Лань", 2006, т.3, §§ 266-271.
2. Д.В. Сивухин. Общий курс физики // М.: Физматлит, Издательство МФТИ, 2002, т.4, §§ 39-41, 44-47.