

3. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Основные теоретические положения, закономерности явления дифракции света, особенности экспериментальных методов наблюдения этого явления подробно изложены в [1]–[5]. В данном разделе настоящего учебного пособия кратко приводятся общие теоретические сведения и методические описания лабораторных работ по дифракции света физического практикума кафедры физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Дифракцией называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резко выраженными неоднородностями и связанных с отклонением от прямолинейного распространения колебаний по законам геометрической оптики [4], [5]. Дифракция, в частности, приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени. При дифракции, как и при интерференции, можно видеть перераспределение интенсивности светового потока в результате суперпозиции волн. Наиболее четко дифракционная картина наблюдается, когда размеры препятствия соизмеримы с длиной волны. В качестве основы рассмотрения явления дифракции света используется *принцип Гюйгенса–Френеля*, согласно которому каждый элемент волнового фронта рассматривается в качестве источника вторичных когерентных волн, при наложении которых друг на друга в пространстве наблюдается интерференционная картина.

Явления дифракции принято классифицировать [3] в зависимости от расстояний источника и точки наблюдения (экрана) от препятствия, поставленного на пути распространения света. Если эти расстояния очень велики (бесконечно велики), то рассматривается дифракция в параллельных лучах или дифракция Фраунгофера. В противоположном случае (при непараллельных лучах) говорят о дифракции Френеля.

В данном лабораторном практикуме изучается дифракция Фраунгофера. Практически этот вид дифракции наблюдается, когда точечный источник света располагают в фокусе собирающей линзы. Получающийся после прохождения линзы параллельный пучок света дифрагирует на каком-либо препятствии. Дифракционная картина наблюдается на экране, расположенном в фокальной плоскости второй линзы, поставленной на пути дифрагированного света.

Дифракция Фраунгофера на одной щели. Пусть параллельный пучок монохроматического света (плоская волна) падает нормально на непрозрачное препятствие, в котором прорезана длинная ($l \rightarrow \infty$) узкая щель (рис. 3.1) шириной b .

Световое поле после прохождения щели можно рассматривать как результат интерференции когерентных вторичных волн, исходящих из различных участков волнового фронта на щели. В качестве таких участков волнового фронта будем рассматривать полоски шириной dx , параллельные краям щели. Волна, исходящая от полоски волнового фронта dx в направлении под углом дифракции φ , опережает по фазе волну того же направления, исходящую из центра щели (точка O на рис. 3.1) на $kx \cdot \sin \varphi$. Напряженность результирующего электрического поля, создаваемого всей щелью в бесконечности, можно представить в виде [3]

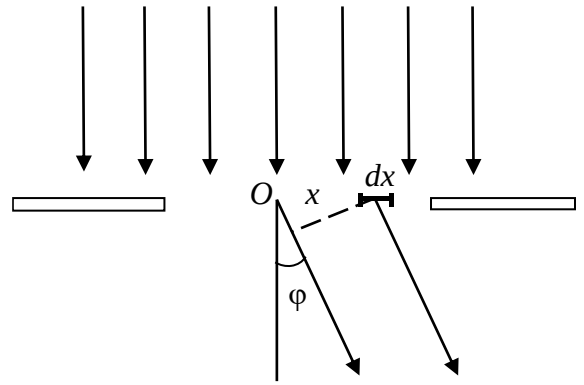


Рис. 3.1. Дифракция Фраунгофера на длинной узкой щели

$$E = \int_{-b/2}^{+b/2} e^{ikx \sin \varphi} dx.$$

Вычислив этот интеграл, получим:

$$E = (b \cdot \sin u)/u,$$

где $u = (kb \cdot \sin \varphi)/2 = (\pi b \cdot \sin \varphi)/\lambda$.

Поскольку интенсивность света $I \sim E^2$, то распределение интенсивности света по направлениям

$$I_{\varphi} = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2, \quad (3.1)$$

где I_0 – интенсивность в направлении падающей на щель волны.

Дифракционная (интерференционная) картина представляет собой чередование дифракционных максимумов и минимумов. При $u = m\pi$, где $m = \pm 1, \pm 2, \dots$, функция (3.1) обращается в ноль, т. е. в этих точках наблюдаются минимумы интенсивности. Между двумя соседними минимумами располагаются максимумы различных порядков. Их положение определяется решением трансцендентного уравнения $u \cdot \cos u - \sin u = 0$. Практически можно считать, что максимумы располагаются посередине между соседними минимумами.

Условие минимума $u = m\pi$ можно представить и в следующем виде:

$$b \cdot \sin \varphi_m = m\lambda. \quad (3.2)$$

Вывод формул (3.1) и (3.2) с использованием приближенного метода Френеля возможен при соблюдении условия $b \gg \lambda$.

Дифракция Фраунгофера на дифракционной решетке. Дифракционная решетка представляет собой пластину из прозрачного материала (обычно стекло), на поверхности которой нанесено большое число параллельных равноотстоящих непрозрачных штрихов, либо непрозрачный экран, в котором имеются одинаковые равноотстоящие параллельные щели. При дифракции на нескольких однотипных щелях в непрозрачном экране проявляется интерференционное взаимодействие когерентных дифрагированных волн от щелей решетки, если расстояния между щелями равны или изменяются по определенному закону.

Если обозначить ширину прозрачной полосы (щели) дифракционной решетки b , ширину непрозрачной полосы a , то расстояние между серединами соседних щелей $d = a + b$ называют *периодом* или *постоянной решетки*, общее число щелей N . Пусть на решетку падает нормально плоская монохроматическая волна и дифракционная картина наблюдается на экране, установленном в фокальной плоскости линзы (рис. 3.2) [6].

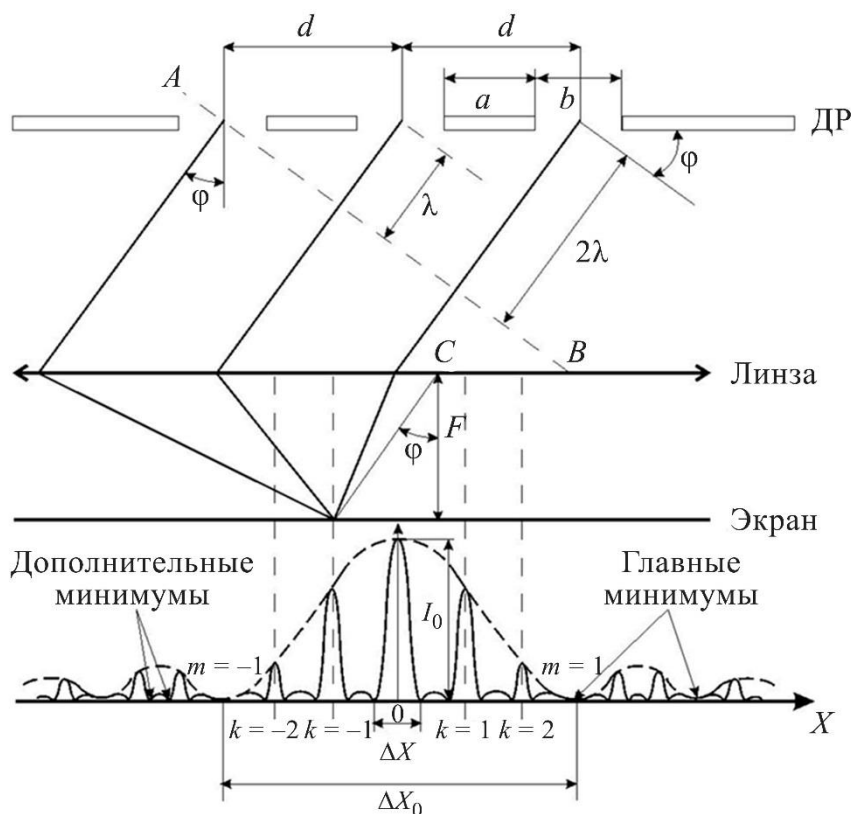


Рис. 3.2. Дифракция на решетке

В решетке осуществляется многолучевая интерференция когерентных дифрагированных пучков света, исходящих от щелей решетки при ее освещении. Дифракционная картина наблюдается по методу Фраунгофера, в

данном случае в фокальной плоскости линзы, расположенной на пути дифрагированных пучков света. Расчет дифракционной картины выполняется интегрированием излучения от когерентных источников вторичных волн, исходящих из различных участков волнового фронта в соответствии с принципом Гюйгенса–Френеля в пределах каждой щели решетки, и затем суммированием полей вектора E , пришедших от всех щелей по методу векторных (или фазовых) диаграмм.

Окончательное выражение для интенсивности света, распространяющегося под углом φ к нормали после дифракции на правильной структуре из N щелей, записывается в виде

$$I_{\varphi} = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2 \left(\frac{\sin(N\delta/2)}{\sin(\delta/2)} \right)^2, \quad (3.3)$$

где $u = (\pi b/\lambda) \sin \varphi$, $\delta = \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \right) \sin \varphi$. Множитель $(\sin u/u)^2$ характеризует распределение интенсивности в результате дифракции плоской волны на каждой щели и представляет собой функцию распределения интенсивности на экране от одной щели, а множитель $\left(\frac{\sin(N\delta/2)}{\sin(\delta/2)} \right)^2$ учитывает интерференцию между пучками, исходящими от всех щелей.

Значение I_0 определяет интенсивность светового излучения в направлении $\varphi = 0$.

Если дифракционную решетку расположить перпендикулярно лучам белого света, то за решеткой на экране, находящемся в фокальной плоскости собирающей линзы, наблюдается спектр ярких линий *различной цветности*. А в направлении, совпадающем с нормалью к поверхности решетки, *всегда наблюдается белая полоса*, которая соответствует дифракционному максимуму порядка $k = 0$ для всех длин волн (центральный максимум или максимум нулевого порядка). В направлениях, которые не совпадают с нормалью к поверхности решетки, по обе стороны от центрального максимума наблюдается чередование затемненных полос и полос определенного цвета (дифракционные максимумы k -го порядка для составляющих света с длинами волн λ). В спектре каждого порядка максимумы более коротких длин волн находятся ближе к нулевому максимуму, а максимумы для более длинных волн – дальше от него. Угловые координаты направлений, вдоль которых наблюдаются *главные дифракционные максимумы* порядка k , удовлетворяют условию

$$d \sin \varphi_k = \pm k \lambda, \text{ где } k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.4)$$

На рис. 3.2 изображены один центральный максимум нулевого порядка и симметрично, влево и вправо от него, максимумы 1-го, 2-го и т. д. порядков.

В направлениях, удовлетворяющих условию

$$b \sin \varphi_m = \pm m \lambda, \text{ где } m = 1, 2, 3, \dots, \quad (3.5)$$

расположены главные дифракционные минимумы m -го порядка как для *одной щели*, так и для *решетки*.

При больших расстояниях L от решетки до экрана суперпозиция параллельных дифрагированных пучков осуществляется на экране и без собирающей линзы в точке $x \approx L \sin \varphi$, когда координаты главных минимумов и максимумов соответствуют формулам

$$\min: x_m = \pm m \frac{\lambda}{b} L, m = 1, 2, 3, \dots, \quad \max: x_k = \pm k \frac{\lambda}{d} L, k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.6)$$

При выполнении условия (3.4) интенсивность световой волны за системой из N щелей возрастает в N^2 раз по сравнению с интенсивностью света, прошедшего через каждую щель.

Главные максимумы (3.4) разделены между собой не только главными минимумами (3.5), но и рядом дополнительных минимумов, которые образуются вследствие интерференции N световых пучков при колебаниях вектора напряженности электрического поля в противофазе. Такие пучки гасят друг друга. Между двумя главными максимумами возникают $(N - 1)$ «*дополнительных минимумов*» и $(N - 2)$ очень слабых «*побочных максимумов*» (см. рис. 3.2).

Основными характеристиками дифракционной решетки, определяющими ее качество как спектрального прибора, являются *дисперсия (угловая или линейная) и разрешающая способность*.

Угловая дисперсия определяется как $D_\varphi = \delta\varphi/\delta\lambda$, где $\delta\varphi$ – угол между направлениями на дифракционные максимумы k -го порядка (рис. 3.3), соответствующие спектральным линиям с близкими длинами волн λ_1 и λ_2 , $\delta\lambda = |\lambda_2 - \lambda_1|$. Угловую дисперсию принято выражать в радианах на нанометр [рад/нм]. Выражение для D_φ можно получить, если продифференцировать (3.4) по λ при $k = \text{const}$:

$$D_\varphi = d\varphi/d\lambda = k/(d \cos \varphi). \quad (3.7)$$

Линейная дисперсия (D_l) определяет линейное расстояние dl в фокальной плоскости линзы между линиями спектра λ и $\lambda + d\lambda$, т. е.

$D_l = dl/d\lambda$. Для малых углов $d\varphi$ можно считать, что $dl = F d\varphi$, где F – фокусное расстояние линзы (рис. 3.3). Тогда $D_l = F \cdot D_\varphi$.

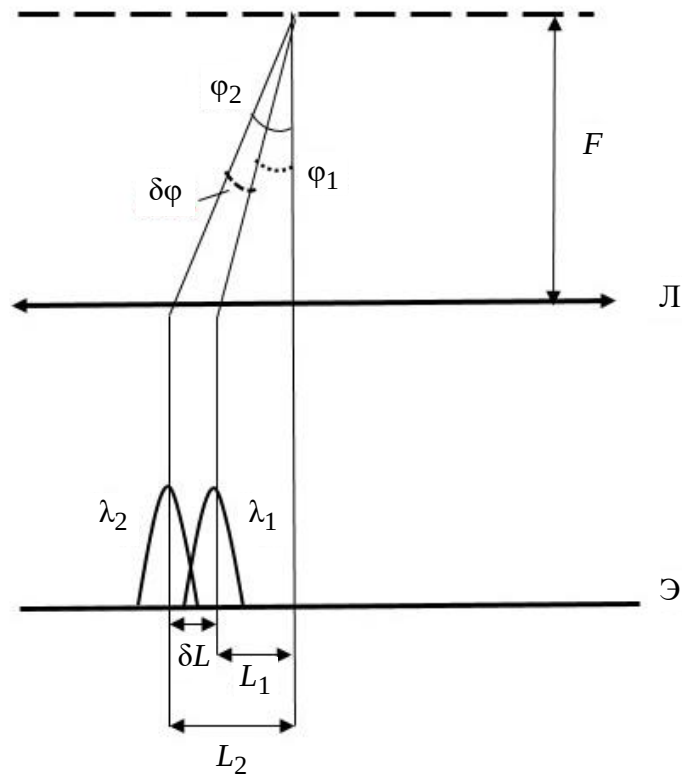


Рис. 3.3. Иллюстрация понятий угловой и линейной дисперсии

Способность решетки разделять близкие спектральные линии с $\lambda_1 = \lambda$ и $\lambda_2 = \lambda + d\lambda$ определяется не только угловым расстоянием $d\varphi$ между ними, но и шириной спектральной линии. Если дифракционные максимумы размыты и имеют значительную ширину, то даже при сравнительно большом угловом расстоянии между ними результирующая кривая, возникающая при их наложении, неотличима от картины одиночного дифракционного максимума (рис. 3.4, в).

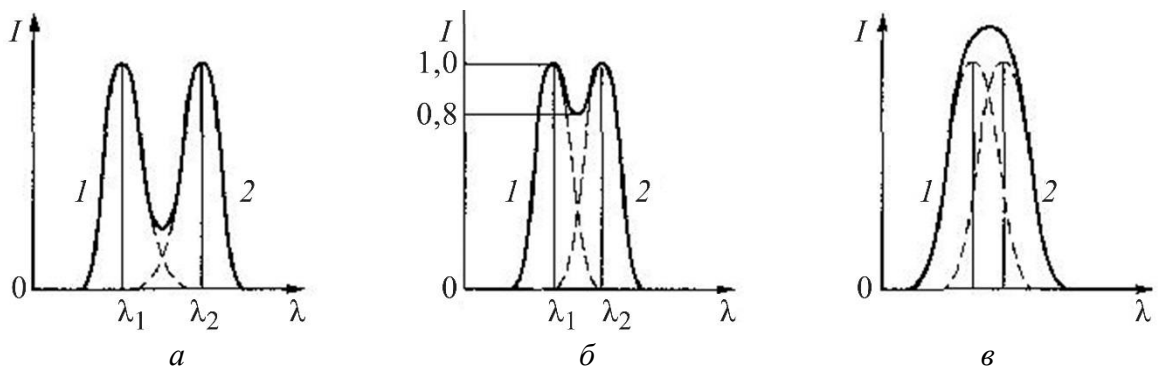


Рис. 3.4. Иллюстрация критерия Рэлея: а – линии видны раздельно; б – предельный случай, когда линии можно разделить; в – две линии сливаются в одну

Возможность разрешения (раздельного восприятия) двух близких спектральных линий зависит не только от расстояния между ними, но и от

ширины спектрального максимума. На рис. 3.4 показана результирующая интенсивность, наблюдаемая при наложении двух близких максимумов: *в* – оба максимума воспринимаются как один, *а* – максимумы видны отдельно.

Рэлей предложил следующий критерий (рис. 3.4, *б*), согласно которому две спектральные линии считаются разрешенными в том случае, когда главный максимум одной длины волны λ_2 совпадает с первым добавочным минимумом для другой λ_1 , т. е. в этом случае совпадают углы дифракции. В этом случае (при равной интенсивности I_0 исследуемых симметричных максимумов) глубина «провала» между горбами составит $0.2I_0$. Наличие такого провала в наблюдаемом результирующем контуре устанавливается вполне уверенно как при визуальных, так и при объективных (фотографических и электрических) методах регистрации.

За меру *разрешающей способности (разрешающей силы)* R принимают безразмерную величину, равную отношению длины волны λ , около которой находятся разрешаемые линии, к наименьшему различию в длинах волн $\delta\lambda = |\lambda_2 - \lambda_1|$, которое удовлетворяет *критерию Рэля*: $R = \lambda / \delta\lambda$.

Для определения разрешающей силы дифракционной решетки составим условия по критерию Рэля для дифракционного максимума k -го порядка для λ_2 и добавочного минимума для λ_1 :

$$d \sin \varphi = k\lambda_2 = k(\lambda_1 + d\lambda) \quad \text{и} \quad d \sin \varphi = (k + 1/N)\lambda_1.$$

Из этих уравнений получим: $k(\lambda_1 + d\lambda) = (k + 1/N)\lambda_1$, откуда $kd\lambda = \frac{\lambda_1}{N}$.

Так как λ_1 и λ_2 близки между собой, т. е. $d\lambda$ – малая величина, то разрешающая сила определяется выражением

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = kN. \quad (3.8)$$

Лабораторная работа 3.1

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА НА ОДНОМЕРНОЙ И ДВУМЕРНОЙ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТКАХ

Методическое описание данной лабораторной работы разработано на кафедре общей физики Новосибирского ГТУ [6]. Макет изготовлен в ООО «Опытные приборы» (г. Новосибирск).

Цели работы: исследование дифракционной картины, получаемой в результате дифракции Фраунгофера на одномерной и двумерной дифракционных решетках; определение характеристик дифракционных решеток.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка для изучения дифракции Фраунгофера представляет собой модульный учебный комплекс по волновой оптике (МУК-ОВ).

Установка состоит из механического и электронного блоков (рис. 3.5). Механический блок 1 представляет собой основание 10, на котором установлены и закреплены: стойка 17, служащая вертикальной оптической скамьей; турель 19; защитный экран 18; электронный блок 5. На стойке смонтированы оптические узлы 2–4, 16, которые могут вращаться и выводиться из поля зрения, если при выполнении эксперимента не используются.

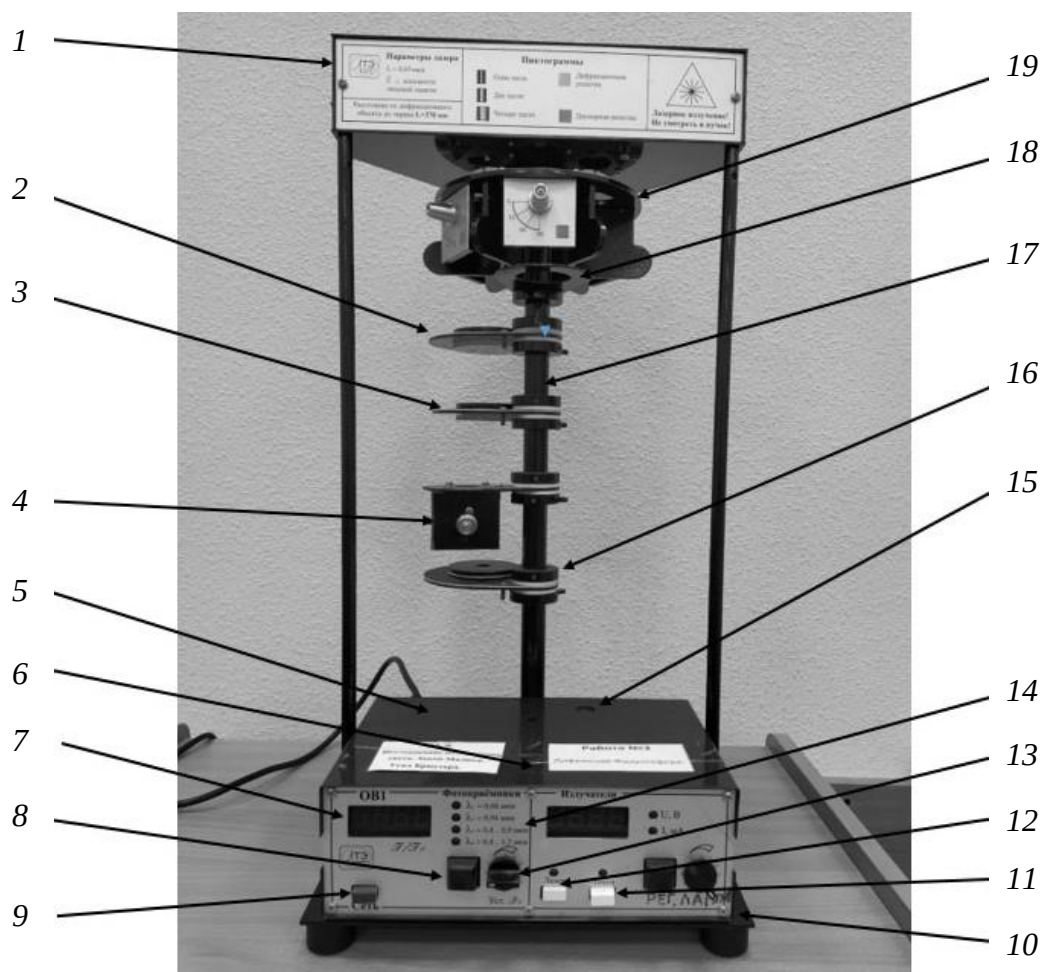


Рис. 3.5. Экспериментальная установка по волновой оптике (МУК-ОВ)

Электронный блок содержит кнопки 8, 9, 11, 12, индикатор 7 измерительных устройств, регулятор 13 относительная интенсивность $\langle J/J_0 \rangle$, индикатор 14 включенного фотоприемника, а также окна фотоприемников: белого осветителя 15 и лазерного излучения 6.

При выполнении данной лабораторной работы используются следующие узлы механического блока 1: защитный экран 18, турель 19. На турели смонтированы объекты исследования, закрепленные вращающейся втулкой,

ось которой совпадает с серединой объекта. Втулка снабжена указателем, а основание – угломерной шкалой и пиктограммой объекта исследования. На электронном блоке 5 используются: кнопка включения электронного блока «Сеть» 9; кнопка включения лазера 12.

Исследуемые закономерности

Теоретическое рассмотрение закономерностей, исследуемых в данной лабораторной работе для случаев *дифракции Фраунгофера на одной щели и на одномерной дифракционной решетке* при нормальном падении лучей света, приведено в общих сведениях разд. 3.

Дифракция Фраунгофера при наклонном падении лучей света на дифракционную решетку. Если плоская волна падает на решетку под углом θ (рис. 3.6) [1], то разность хода двух соответствующих волн равна

$$AC - DB = \Delta = d(\sin \theta - \sin \varphi_k).$$

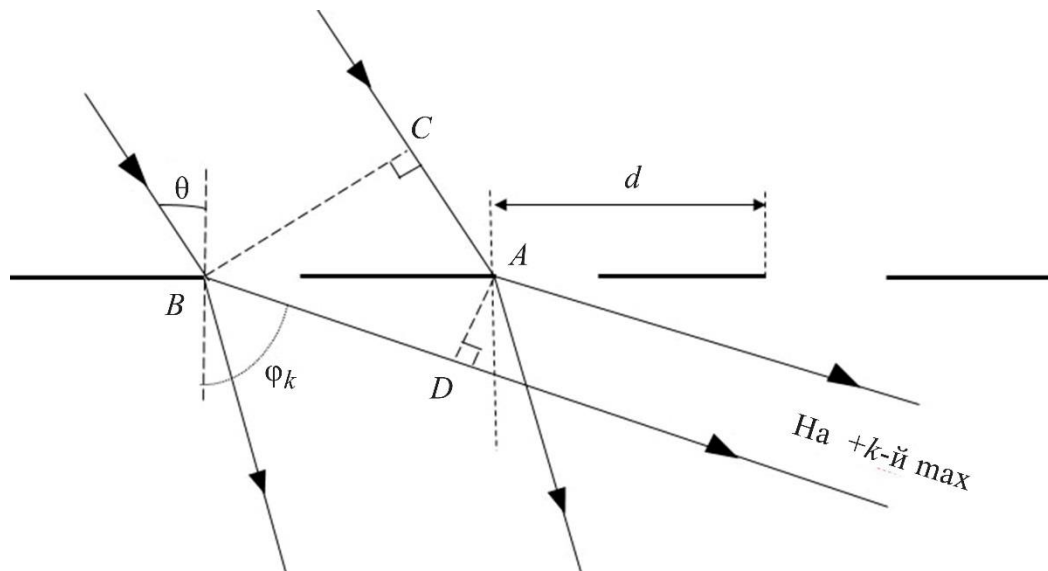


Рис. 3.6. Дифракция лучей при наклонном падении на дифракционную решетку

Условия образования главных дифракционных максимумов имеют вид

$$d(\sin \theta - \sin \varphi_k) = k\lambda, \quad (3.9)$$

где φ_k – направление на главный максимум k -го порядка, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$.

Из (3.9) следует, что

$$\sin \varphi_k = \sin \theta - \frac{k\lambda}{d}. \quad (3.10)$$

Дифракция Фраунгофера на двумерной решетке. Двумерная решетка [6] представляет собой скрещенные перпендикулярно друг другу решетки с периодами d_1 и d_2 , причем часто $d_1 = d_2$. Пусть ось X перпендикулярна щелям

первой решетки, ось Y – щелям второй, а ось Z направлена перпендикулярно плоскости двумерной решетки.

При больших расстояниях L от решетки до экрана суперпозиция параллельных дифрагированных лучей осуществляется на экране и без собирающей линзы, и координаты главных максимумов вдоль оси X и вдоль оси Y определяются, соответственно, как

$$x_{k_1} = k_1 \frac{\lambda}{d_1} L, \quad y_{k_2} = k_2 \frac{\lambda}{d_2} L, \quad k_1, k_2 = \pm 0, 1, 2, \dots \quad (3.11)$$

Если в каждой решетке число щелей N_1 и N_2 достаточно велико, то максимумы будут очень острыми и в них сосредоточится практически вся световая энергия дифрагированных волн. В результате на экране, расположенном за двумерной решеткой, будет наблюдаться дифракционная картина в виде четких, симметрично расположенных световых пятен, каждому из которых соответствуют два целочисленных индекса k_1 и k_2 (рис. 3.7) [6].

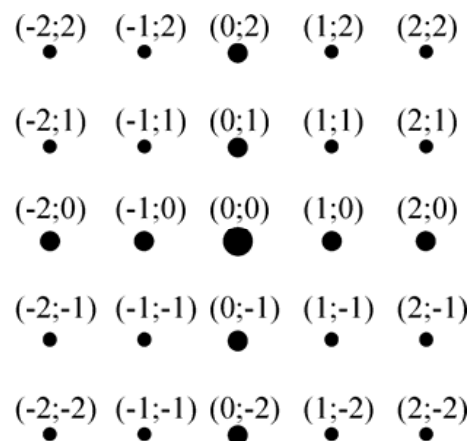


Рис. 3.7. Вид дифракционной картины на двумерной дифракционной решетке

Задания для подготовки к лабораторной работе

1. Изучить общие сведения о дифракции Фраунгофера на одной щели, на одномерной и двумерной дифракционных решетках при нормальном падении лучей света на дифракционную решетку. Выяснить отличия в дифракционной картине при наклонном падении лучей для одномерной дифракционной решетки.

2. Привести формулы, используемые для расчетов в данной лабораторной работе, и пояснить параметры, входящие в эти формулы.

3. Вывести формулы для нахождения погрешностей измерений ширины щели и периода дифракционной решетки.

4. Подготовить протокол наблюдений, в который будут заноситься результаты экспериментов.

Указания по выполнению эксперимента

1. Включить электронный блок (кнопка 9 на рис. 3.5). На панели «Излучатели» установить кнопку 12 в положение «Лазер» (см. рис. 3.5;

показания индикаторов электронного блока в данной работе не используются). *Обратить особое внимание на недопустимость попадания в глаза прямого лазерного излучения.*

2. На верхнюю крышку электронного блока поместить лист миллиметровой или белой бумаги, который будет играть роль экрана и являться в дальнейшем протоколом. Зарисовывая максимум нулевого порядка в каждом из опытов, отметить положение его центра.

3. Занести в протокол с панели прибора значения констант эксперимента L и λ .

4. Установить первый объект исследования (одиночная щель) в положение, перпендикулярное направлению светового пучка. Это достигается поворотом турели до соответствующей пиктограммы. Стрелка, закрепленная на оси вращения пластинки со щелью, должна указывать на 0° . Зарисовать дифракционную картину для максимумов при $k = \pm 1, 2, 3$.

5. Установить, повернув турель до нужной пиктограммы, одномерную дифракционную решетку. Стрелка, закрепленная на оси вращения пластинки, должна указывать на 0° . Зарисовать дифракционную картину для главных максимумов при $k = \pm 1, 2, 3$.

6. Изменяя угол θ поворота пластинки ($30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$) по отношению к первоначальному положению, зарисовать получившиеся дифракционные картины для максимумов при $k = \pm 1, 2, 3$.

7. Установить, повернув турель до нужной пиктограммы, двумерную дифракционную решетку. Стрелка, закрепленная на оси вращения пластинки, должна указывать на 0° . Зарисовать дифракционную картину для максимумов при $k = \pm 1, 2, 3$.

8. Изменяя угол θ поворота решетки ($\theta_i = 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$) по отношению к первоначальному положению, зарисовать получившиеся дифракционные картины.

Указания по обработке результатов наблюдений

1. Для первого объекта исследования – одиночной щели найти положение x_m минимума при $m = \pm 1, 2, 3$ и, пользуясь (3.3), рассчитать ширину щели b для каждого значения m . Вычислить среднее значение и погрешность измерения ширины щели и представить результат в стандартном виде. В расчетах (пп. 1, 2) коэффициент Стьюдента для шести наблюдений принять равным 2,57.

2. В опытах с одномерной дифракционной решеткой найти положение x_k главных максимумов для $k = \pm 1, 2, 3$ при $\theta = 0^\circ$. Воспользовавшись (3.6),

вычислить период d дифракционной решетки для каждого значения k . Рассчитать среднее значение и погрешность измерения периода дифракционной решетки и представить результат в стандартном виде.

3. По результатам наблюдений п. 6 при $k = 2$ найти значения $\sin \theta_i$. Принимая во внимание, что для малых углов $\sin \varphi_{ki} \approx \tan \varphi_{ki}$, где $\tan \varphi_{ki} = x_{ki}/L$, рассчитать значения $\sin \varphi_{ki}$ для каждого θ_i при $k = 2$ и построить график зависимости $\sin \varphi_{ki} = f(\sin \theta_i)$. Воспользовавшись (3.10) и графиком функции $\sin \varphi_{ki}(\sin \theta_i)$, определить значение периода дифракционной решетки и сравнить его с результатом измерений, полученным в п. 2 для $k = 2$.

4. В опытах с двумерной дифракционной решеткой найти положение максимума первого порядка вдоль осей X и Y . Рассчитать периоды двумерной дифракционной решетки, воспользовавшись (3.11).

5. Проанализировать, как влияет поворот пластинки с двумерной решеткой на дифракционную картину.

Контрольные вопросы

1. Как определить координаты максимумов и минимумов при дифракции Фраунгофера от одной щели?
2. Как определить интенсивность света при дифракции Фраунгофера на дифракционной решетке?
3. Как определяются положения главных максимумов (минимумов) для дифракционной решетки?
4. Как связаны между собой период и уменьшенный период дифракционной решетки?
5. Что представляет собой двумерная дифракционная решетка?
6. При каких условиях наблюдаются главные максимумы на двумерной дифракционной решетке?
7. Где нашли применение двумерные дифракционные решетки?
8. Влияет ли количество щелей на дифракционную картину, наблюдаемую в данной лабораторной работе?
9. Как влияет на дифракцию Фраунгофера от одной щели длина волны? ширина щели?
10. Что наблюдается на экране при дифракции Фраунгофера от щели, если ширина щели равна длине волны света? Если ширина щели значительно больше длины волны света?

Лабораторная работа 3.2

ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Макет и первое описание данной лабораторной работы были разработаны на кафедре физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [7].

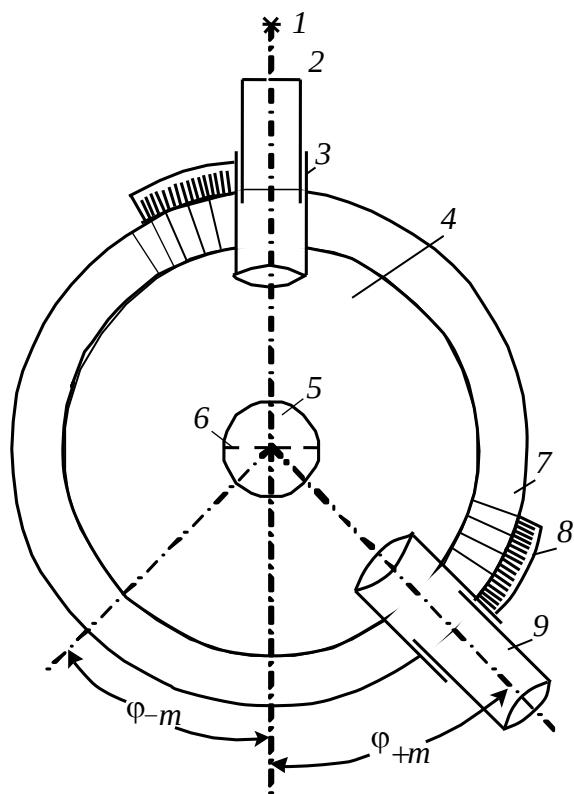


Рис. 3.8. Схема экспериментальной установки

Цели работы: исследование дифракции света на прозрачной дифракционной решетке; нахождение параметров дифракционной решетки и спектрального состава излучения.

Приборы и принадлежности. В состав экспериментальной установки входят источник света 1 (ртутная лампа, дающая линейчатый спектр), гониометр 4, закрепленные на нем коллиматор 3, зрительная труба 9 и дифракционная решетка 6 (рис. 3.8).

Источник света находится в кожухе с круглым выходным отверстием. Кожух лампы закреплен на блоке питания, сбоку которого имеется тумблер для включения (выключения) установки. Вид экспериментальной установки приведен на рис. 3.9.

Гониометр представляет собой устройство для точных измерений углов, имеет основную круговую шкалу (лимб 7). Лимб разделен на 360° , а каждый градус – на два деления, по $30'$ каждое, т. е. цена деления лимба составляет $30'$. Вдоль лимба вместе со зрительной трубой движется скрепленный с ней нониус 8, диапазон шкалы которого от 0 до $30'$, а цена деления – $1'$. К гониометру крепится осветительный коллиматор 3, который дает пучок параллельных лучей (входная щель коллиматора 2 расположена в фокальной плоскости объектива коллиматора), и зрительная труба 9. Ширина щели коллиматора регулируется винтом, расположенным сбоку на держателе щели. В центре гониометра в держателе 5 находится дифракционная решетка 6. Дифракционную решетку

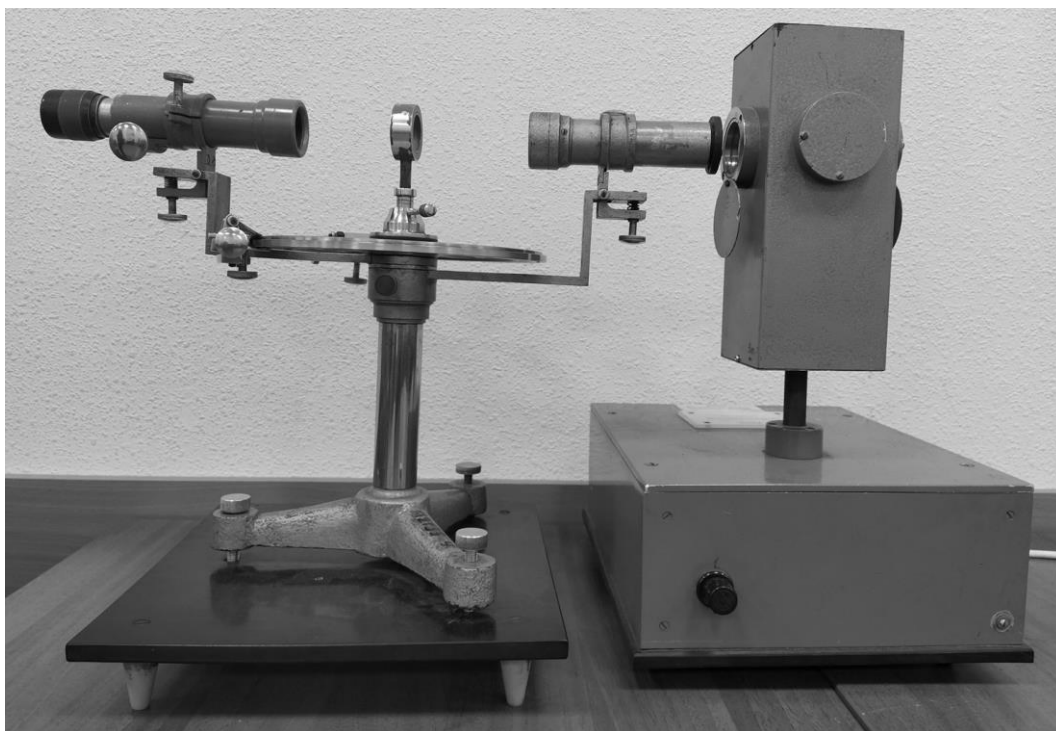


Рис. 3.9. Экспериментальная установка с дифракционной решеткой

устанавливают так, чтобы параллельный пучок лучей из коллиматора был направлен перпендикулярно на дифракционную решетку. Спектр, полученный с помощью дифракционной решетки, наблюдается в зрительную трубу 9, которая может поворачиваться вокруг вертикальной оси гониометра, оставаясь при этом все время направленной по радиусу кругового лимба 7 гониометра. В окуляре зрительной трубы имеется вертикальная нить, которую совмещают с исследуемой линией спектра. При измерении угла число градусов



Рис. 3.10. Отсчет угла по шкалам лимба и нониуса гониометра

смотрят по шкале лимба напротив нуля нониуса (рис. 3.10). Если ноль нониуса не совпал точно с делениями лимба, то к полученным градусам надо прибавить угловые минуты, определяемые по делению шкалы нониуса, которое точно совпадает с делением шкалы лимба гониометра (пример определения угла по шкале лимба с нониусом приведен в лабораторной работе 1.2).

Поскольку начало отсчета по шкале гониометра может не совпадать с направлением нормали к поверхности решетки, то угол дифракции φ_k определяется разностью двух углов $(\alpha_k - \alpha_0)$, где α_0 – угол, соответствующий центральному $k = 0$ дифракционному максимуму. Более подробно устройство гониометра и методика измерения углов с его помощью описаны в лабораторной работе 1.2.

Исследуемые закономерности

Теоретическое рассмотрение закономерностей, исследуемых в данной лабораторной работе для случая *дифракции Фраунгофера на одномерной дифракционной решетке* при нормальном падении лучей света, приведено в общих сведениях разд. 3.

Задания для подготовки к лабораторной работе

1. Изучить общие сведения о явлении дифракции на прозрачной дифракционной решетке.
2. Ознакомиться с описанием экспериментальной установки и методикой эксперимента.
3. Нарисовать эскиз лабораторной установки, записать формулы для расчетов.
4. Подготовить протокол наблюдений, в который будут заноситься результаты экспериментов. Протокол должен содержать три таблицы для разных длин волн.

Указания по проведению эксперимента

1. Включить ртутную лампу (в некоторых установках – галогенную лампу). Совместить щель коллиматора с осветительным окном кожуха ртутной лампы. Проверить, стоит ли дифракционная решетка перпендикулярно выходящему из коллиматора пучку лучей. Отрегулировать входную щель и положение коллиматора, чтобы в зрительной трубе наблюдалась дифракционная картина в виде ярких спектральных линий различного цвета (синих, зеленых и желтых – для ртутной лампы или синих, зеленых и красных – для галогенной лампы), расположенных симметрично

влево и вправо относительно центральной белой линии. Поворачивая винт, расположенный на зрительной трубе, получить четкое изображение дифракционной картины и вертикальной черной нити в зрительной трубе.

2. С помощью микрометрического винта навести зрительную трубу на центральную белую спектральную линию, совместив данную линию с черной нитью в окуляре трубы. Выполнить по шкалам лимба и нониуса отсчет углового положения центральной белой линии спектра (угол α_0). Сбивая влево, вправо с помощью микрометрического винта положение зрительной трубы, повторить еще два раза настройку наведения зрительной трубы (нити в окуляре) на центральную белую линию спектра и сделать еще два отсчета угла α_0 . Результаты наблюдений занести в протокол.

3. С помощью микрометрического винта повернуть зрительную трубу против часовой стрелки вокруг оси гониометра, навести зрительную трубу на желтую (или красную) спектральную линию 3-го порядка, совместив данную линию с черной нитью в окуляре трубы. Если хода винта не хватает, чтобы совместить нить окуляра с желтой линией 3-го порядка, то ослабить зажимной винт, который крепит зрительную трубу к лимбу и нониусу гониометра, и, поворачивая микрометрический винт, добиться, чтобы хода микрометрического винта хватало для прохода необходимой части спектра (от плюс третьего порядка до минус третьего порядка для желтых линий спектра). Закрепить заново зажимной винт. Теперь все передвижения зрительной трубы проводить только с помощью микрометрического винта. Выполнять по шкалам лимба и нониуса отсчет углового положения третьей желтой линии спектра (угла α_{+3}). Затем, поворачивая микрометрическим винтом зрительную трубу по часовой стрелке и последовательно совмещая нить окуляра зрительной трубы с яркими спектральными линиями (желтой, зеленой, синей) разных порядков ($k = +3; +2; +1$), находящимися справа от центрального максимума (линии белого цвета), определить соответствующие углы α_{+k} для каждого цвета и записать их значения в соответствующие таблицы протокола наблюдений (пример такой таблицы для одного цвета – табл. 3.1).

4. Продолжить поворачивать зрительную трубу по часовой стрелке влево за белую линию центрального максимума, последовательно наводя нить зрительной трубы на синюю, зеленую, желтую линии спектра для разных порядков ($k = -1; -2; -3$). Определить соответствующие углы α_{-k} , результаты наблюдений занести в таблицы протокола.

Измерение углов дифракции для линий цвета

$ k $	1	2	3
α_{+k}			
α_{-k}			

5. Наблюдения по пп. 3, 4 проделать 3 раза для последующей статистической обработки результатов наблюдений.

Указания по обработке результатов наблюдений

1. Рассчитать средние значения углов дифракции $\bar{\varphi}_k = \bar{\alpha}_k - \bar{\alpha}_0$ для всех спектральных линий и всех порядков ($k = \pm 1; \pm 2; \pm 3$), используя данные из протокола наблюдений. По полученным значениям $\bar{\varphi}_k$ вычислить значения $\sin \bar{\varphi}_k$.

2. В координатах $\{y = \sin \bar{\varphi}_k; x = k\}$ на миллиметровой бумаге отметить положение совместных значений $\{\sin \bar{\varphi}_k; k\}$ для синей, зеленой и желтой линий и через полученные совокупности точек провести аппроксимирующие прямые $y = \bar{a}x$ для каждого цвета.

3. По построенным на графике линейным зависимостям найти для каждого из цветов значения углового коэффициента $\bar{a}$. Оценить погрешность измерений $\Delta \bar{a}$.

4. Рассчитать постоянную дифракционной решетки. Для этого, используя формулу для углового коэффициента $a = \lambda/d$, найденное значение $\bar{a}_{\text{зел}}$ для зеленой линии и учитывая значение длины волны $\lambda_{\text{зел}} = 546 \text{ нм}$, вычислить значения $\bar{d}$ и погрешности измерений $\Delta \bar{d}$.

5. Найти длины волн излучения $\bar{\lambda} = \bar{a}\bar{d}$ и их погрешности $\Delta \bar{\lambda}$, соответствующие желтому и синему участкам спектра ртутной лампы.

6. По экспериментальным данным и соотношению (3.7) оценить угловую дисперсию D_{φ} дифракционной решетки для желтого, зеленого и синего участков спектра для порядков спектра $k = 1; 3$.

7. Рассчитать разрешающую силу R решетки (3.8) для дифракционных максимумов 1-го и 3-го порядков. Принять ширину дифракционной решетки равной 20 мм.

Контрольные вопросы

1. В чем сущность явления дифракции? При каких условиях дифракционные явления заметны?

2. В чем различие между явлениями интерференции и дифракции?
3. Сформулируйте принцип Гюйгенса–Френеля.
4. В чем преимущество дифракционной решетки как спектрального прибора по сравнению с отдельной щелью?
5. Сформулируйте условия наблюдения главных и добавочных дифракционных максимумов и минимумов для прозрачной дифракционной решетки.
6. Что характеризует угловая дисперсия спектрального прибора? Как определяется угловая дисперсия для решетки?
7. Сформулируйте критерий Рэлея разрешения двух спектральных линий.
8. Что такое разрешающая способность (сила) спектрального прибора? Чем определяется разрешающая сила дифракционной решетки?
9. Как в данной работе определялись длины волн излучения?
10. Чем отличается дифракционная картина от дифракционной решетки при освещении ее монохроматическим и белым светом?

Список литературы

1. Ландсберг Г. С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – 928 с.
2. Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики: учеб.: в 3 т. Т. 3: Оптика. Атомная физика. – СПб.: Лань, 2009. – 656 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики: учеб. пособие для вузов: в 5 т. Т. IV: Оптика. – М.: Физматлит, 2006. – 792 с.
4. Савельев И. В. Курс общей физики: учеб. пособие: в 3 т. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – СПб.: Лань, 2007. – 496 с.
5. Иродов И. В. Волновые процессы. Основные законы: учеб. пособие для вузов. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 264 с.
6. Оптика. Методическое руководство к лабораторным работам № 30, 32, 35 / сост.: Б. Л. Паклин, С. А. Стрельцов, Г. Е. Невская, А. В. Морозов, В. В. Христофоров, А. М. Погорельский, А. А. Шевченко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 45 с.
7. Волновая и квантовая оптика: руководство к выполнению лабораторных работ по физике: в 2 ч. Ч. 2 / под ред. А. Г. Граммакова; ЛЭТИ. – Л., 1975. – 58 с.