

Лабораторная работа № 3. ДИФРАКЦИЯ ФРАУНГОФЕРА

Цель работы: исследования дифракционной картины, получаемой в результате дифракции света в параллельных лучах на одиночной щели, одномерной и двумерной дифракционных решетках.

Экспериментальная установка представляет собой модульный учебный комплекс по волновой оптике (МУК – ОВ), на котором могут выполняться лабораторные работы по исследованию интерференции, дифракции и поляризации света. Установка состоит из механического и электронного блоков.

Механический блок 1 (рис 3.1) представляет собой основание 10, на котором установлены и закреплены: электронный блок 11; стойка 8, служащая вертикальной оптической скамьей, и блок осветителей. На стойке смонтированы оптические узлы 4 - 11, которые имеют возможность поворачиваться и выводиться из поля зрения, если при выполнении эксперимента они не используются. При выполнении данной лабораторной работы используются следующие устройства:

- турель 2, на которой смонтированы объекты исследования для работ по интерференции и дифракции. Каждый из объектов закреплен на вращающейся втулке, ось которой совпадает с серединой объекта. Втулка снабжена указателем, а основание – угломерной шкалой и пиктограммой объекта исследования;

- защитный экран 3, который предназначен для защиты от отраженного от дифракционного элемента лазерного луча.

Электронный блок содержит органы управления, коммутации и индикации (11 – 24). В данной работе используются: кнопка включения электронного блока «Сеть» 22, кнопка включения лазера 17, окно фотоприемника лазерного излучения 24.

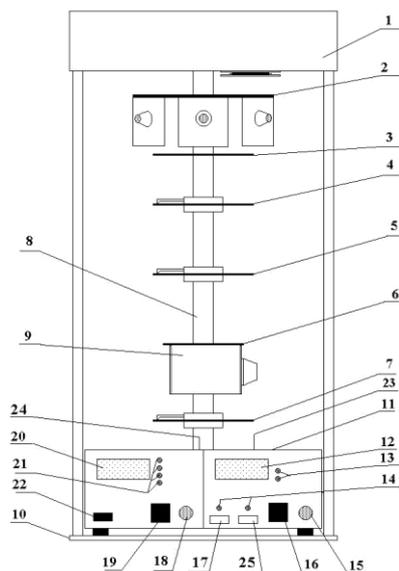


Рис.3.1. Устройство модульного учебного комплекса по волновой оптике (МУК – ОВ)

Общие сведения

Различают два случая дифракции. Если источник света и точка наблюдения расположены от препятствия настолько далеко, что лучи, падающие на препятствие и лучи, идущие в точку наблюдения, образуют практически параллельные пучки, говорят о дифракции Фраунгофера или о дифракции в параллельных лучах. В противном случае говорят о дифракции Френеля или о дифракции в сходящихся пучках. Дифракционную картину Френеля достаточно просто объяснить на основе метода зон Френеля.

Дифракционную картину Фраунгофера чаще всего наблюдают на экране при помощи линзы, устанавливаемой перед экраном так, чтобы он находился в ее фокальной плоскости.

Исследование дифракции Фраунгофера на щели

На рис.3.2 показаны поперечное сечение щели шириной b , образованной в некотором светонепроницаемом препятствии, собирающая линза L , экран \mathcal{E} , а также ход выбранных для рассмотрения дифрагировавших световых лучей. На рисунке обозначены: C – центр линзы, φ – угол дифракции лучей.

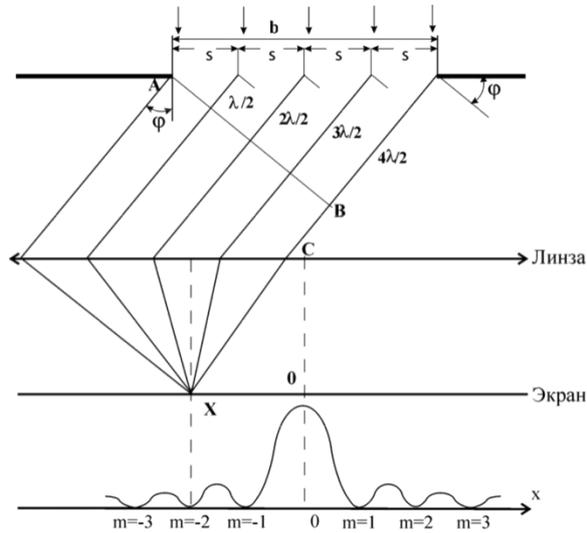


Рис.3.2. Дифракция параллельных лучей света на щели. Распределение интенсивности дифрагированных лучей на экране.

Из множества возможных значений угол дифракции φ выбирается так, чтобы вторичные источники света в щели являлись зонами Френеля шириной s , фазы колебаний в которых сдвинуты на $\delta = \pi$, то есть происходят в противофазе. Для этого разность хода любых двух соседних лучей от их источников до некоторой нормали AB к лучам (волновой поверхности дифрагировавшего пучка света) согласно связи $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$ должна равняться

половине длины волны света $\Delta = \frac{\lambda}{2}$. Поскольку $\Delta = s \sin \varphi = \frac{b}{N} \sin \varphi = \frac{\lambda}{2}$, то на ширине щели укладывается N зон Френеля, если

$$b \sin \varphi = N \frac{\lambda}{2}$$

При повороте щели на угол θ по отношению к нормали к ней ее ширина b становится равной $b^* = b \cos \theta$.

Положения минимумов и максимумов на экране относительно его центра при дифракции на щели определяются соответственно:

$$x_m = \pm m \frac{\lambda}{b} L, \text{ где } m = 1, 2, 3, \dots, \text{ — координаты минимумов}$$

(3.1)

$$x_n = \pm \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{b} L, \text{ где } n = 0, 1, 2, 3, \dots, \text{ — координаты максимумов}$$

где L — расстояние от решетки до экрана.

Исследование дифракции Фраунгофера на нескольких щелях

Прозрачной одномерной дифракционной решеткой называют периодическую систему параллельных щелей в преграде, имеющих одинаковую ширину b и расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Основным параметром решетки является ее период d (постоянная решетки). Дифракционные решетки создают эффект резкого разделения и усиления интенсивности в области максимумов.

На рис. 3.3 показано одно из поперечных сечений ряда щелей дифракционной решетки (ДР), положение линзы Л, экрана Э и ход лучей дифрагировавшего света от $N = 3$ щелей.

На N щелей решетки по нормали падает пучок параллельных лучей. Эти щели можно рассматривать как N когерентных источников света с однофазными колебаниями вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} . На каждой щели происходит дифракция света. Дифрагировавшие под одинаковым углом φ лучи N когерентных источников при суперпозиции интерферируют. Поэтому перераспределение интенсивности света, прошедшего через дифракционную решетку, можно рассматривать как интерференцию N -го числа дифрагировавших лучей.

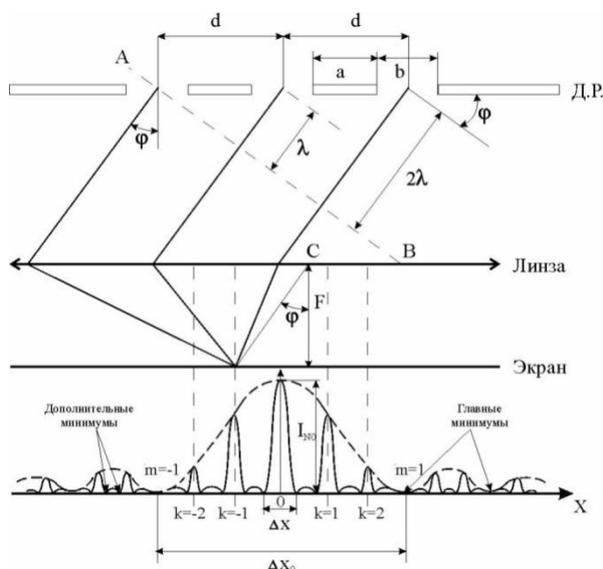


Рис. 3.3. Дифракция параллельных лучей света на одномерной дифракционной решетке. Распределение интенсивности дифрагировавших лучей на экране.

Для одномерной дифракционной решетки положение главных минимумов и максимумов определяются соответственно:

$$b \sin \varphi_m = \pm m \lambda, \text{ где } m = 1, 2, 3, \dots - \text{порядок главного минимума} \quad (3.2)$$

$$d \sin \varphi_k = \pm k \lambda, \text{ где } k = 1, 2, 3, \dots - \text{порядок главного максимума}$$

Распределение интенсивности света при дифракции на решетке определяется зависимостью:

$$I_N = I_\varphi \left[\frac{\sin \left(\pi N \frac{d}{\lambda} \sin \varphi \right)}{\pi \frac{d}{\lambda} \sin \varphi} \right]^2, \quad (3.3)$$

где I_φ – интенсивность света при дифракции на одной щели, определяемая по формуле:

$$I_\varphi = I_0 \left[\frac{\sin \left(\pi \frac{b}{\lambda} \sin \varphi \right)}{\pi \frac{b}{\lambda} \sin \varphi} \right]^2 \quad (3.4)$$

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

$$x_m = \pm m \frac{\lambda}{d} L, \text{ где } m = 1, 2, 3 \dots, \text{ – координаты главных максимумов для решетки;} \quad (3.5)$$

$x_k = \pm k \frac{\lambda}{b} L$, где $k = 1, 2, 3 \dots$, – координаты главных минимумов для решетки.

В точках главных минимумов интенсивности главных максимумов становятся равными нулю (рис.3.3).

Наклонное падение лучей на дифракционную решетку

Если плоская монохроматическая волна падает на решетку, работающую на пропускание, под углом θ (рис. 3), то разность хода двух соседних лучей, дифрагировавших под углом φ равна:

$$\Delta = d(\sin \theta - \sin \varphi) \quad (3.6)$$

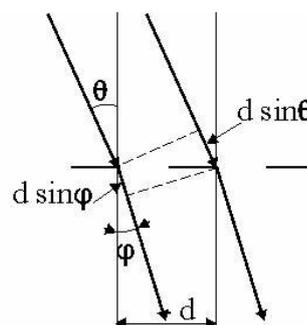


Рис. 3.4 Дифракция лучей при наклонном падении на дифракционную решетку.

В этом случае условие, при котором наблюдаются главные максимумы интенсивности света, для дифракционной решетки запишется в виде:

$d(\sin\theta - \sin\varphi_k)\cos\theta = \pm k\lambda$, где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ – порядок главного максимума.

Эту формулу можно записать как:

$$d^*(\sin\theta - \sin\varphi_k) = \pm k\lambda \quad (3.7)$$

где $d^* = d \cos\theta$ – эффективный период дифракционной решетки.

Дифракция на двумерной решетке

Двумерная решетка 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. Углы между падающими и дифрагировавшими лучами и осями X , Y , Z обозначим, соответственно, через α_0 , β_0 , γ_0 и α , β , γ . Очевидно, что α , β , γ – углы, дополняющие углы дифракции до 90° (рис.4).

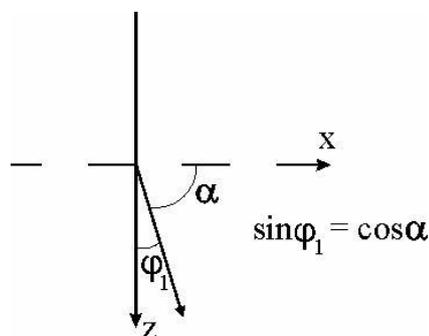


Рис. 3. 5. Соотношения между углами в двумерной решетке.

Пусть на двумерную решетку нормально $\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$, $\beta_0 = \frac{\pi}{2}$, $\gamma_0 = 0$ падает плоская волна. Тогда условия возникновения главных максимумов для излучения с длиной волны λ имеют вид:

$$d_1 \cos\alpha = k_1\lambda, \quad d_2 \cos\beta = k_2\lambda$$

Углы α , β , γ связаны между собой соотношением:

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1; \quad k_1, k_2 = 0, 1, 2, \dots$$

Главные максимумы возникают только тогда, когда $\frac{d_1}{\lambda} \cos \alpha = k_1$, и одновременно $\frac{d_2}{\lambda} \cos \beta = k_2$, где k_1 и k_2 целые числа.

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

$$x_{k_1} = k_1 \frac{\lambda}{d_1} L, \quad y_{k_2} = k_2 \frac{\lambda}{d_2} L, \quad k_1, k_2 = \pm 0, 1, 2, \dots \quad (3.8)$$

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 дифрагировавших волн. В результате на экране, расположенном за двумерной решеткой получится дифракционная картина в виде четких, симметрично расположенных световых пятен, каждому из которых соответствуют два целочисленных индекса k_1 и k_2 (рис.3.6).

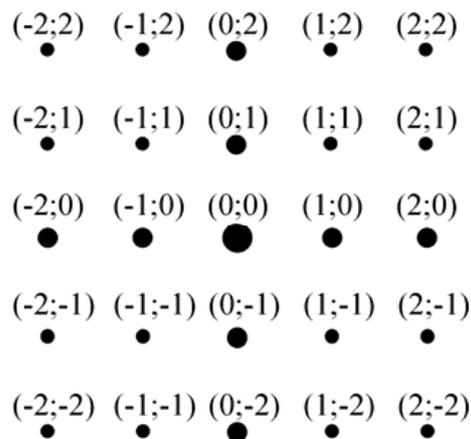


Рис.3.6. Вид дифракционной картины на двумерной дифракционной решетке.

Если волна падает на двумерную решетку наклонно (т.е. углы α_0 и β_0 отличны от $\frac{\pi}{2}$), то условия возникновения главных максимумов примут вид:

$$d_1(\cos \alpha - \cos \alpha_0) = k_1 \lambda, \quad d_2(\cos \beta - \cos \beta_0) = k_2 \lambda$$

Общий характер дифракционной картины, в этом случае, останется прежним, изменятся лишь масштабы по осям X и Y , наблюдаемой дифракционной картины.

Если решетки с периодами d_1 и d_2 взаимно не перпендикулярны, а составляют между собой какой-либо угол, то положение максимумов будет зависеть от угла между штрихами решеток.

Указания по подготовке к работе

1. Подготовьте в протоколе эксперимента таблицы по форме 3.1- 3.4.

Таблица 3.1. Константы эксперимента L, λ (заносятся с панели прибора).

Константы эксперимента L, λ

$L, \text{мм}$	$\theta_L, \text{мм}$	$\lambda, \text{нм}$	$\theta_\lambda, \text{нм}$
370	2	650	5

Таблица 3.2. Выборка значений ширины щели ($\theta_{x_k} = 0.5 \text{мм}$)

k	3	2	1	-1	-2	-3
x_k						
b						

Таблица 3.3. Выборка значений постоянной решетки ($\theta_{x_m} = 0.5 \text{мм}$)

m	3	2	1	-1	-2	-3
x_m						
d						

Таблица 3.4. Определение периодов двумерной дифракционной решетки.

k_1	0	0	1	-1
x_{k1}	0	0		
d_1	-	-		
k_2	1	-1	0	0
y_{k2}			0	0
d_2			-	-

Указания по проведению измерений:

1. Занесите с панели прибора константы эксперимента в Табл. 3.1.

2. Ознакомьтесь с порядком включения и выключения лазерного источника света. Обратите особое внимание на недопустимость попадания в глаза прямого лазерного излучения.

3. Включите электронный блок. На панели «Излучатели» переключите в положение лазер. (Показания индикаторов электронного блока в данной работе не используются).

4. На верхнюю крышку электронного блока поместите лист миллиметровой бумаги (с сеткой 0.5 мм или 1 мм), который будет играть роль экрана и являться в дальнейшем протоколом.

5. Установите 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° . Зарисуйте дифракционную картину для максимумов при $m = \pm 1, 2, 3$. Зарисовывая максимум нулевого порядка, отметьте на нем положение центра.

6. Установите, повернув турель до нужной пиктограммы, одномерную дифракционную решетку. Стрелка, закрепленная на оси вращения пластинки, должна указывать на 0° . Зарисуйте дифракционную картину для главных максимумов при $m = \pm 1, 2, 3$. Зарисовывая максимум нулевого порядка, отметьте на нем положение центра картины.

7. Изменяйте угол θ поворота пластинки (30° ; 45° ; 60°) по отношению к первоначальному положению. Зарисуйте получившиеся дифракционные картины для главных максимумов при $m = \pm 1, 2, 3$.

8. Установите, повернув турель до нужной пиктограммы, двумерную дифракционную решетку. Стрелка, закрепленная на оси вращения пластинки, должна указывать на 0° . Зарисуйте дифракционную картину максимумов при $m = \pm 1, 2, 3$.

9. Изменяйте угол поворота решетки (30° ; 45° ; 60°) по отношению к первоначальному положению. Зарисуйте получившиеся дифракционные картины.

Указания по обработке результатов

1. Для первого объекта исследования – одиночной щели, определите положение x_k минимумов при $k = \pm 1, 2, 3$ и, пользуясь формулой (3.1), рассчитайте ширину щели b для каждого значения m . По полученной выборке значений b объема $N = 6$ определите ширину щели и запишите результат в стандартном виде $b = \bar{b} \pm \Delta \bar{b}$ с $P = 95\%$.

2. В опытах с одномерной дифракционной решеткой определите положение x_m главных максимумов для $m = \pm 1, 2, 3$ порядка. Воспользовавшись формулой (3.5), вычислите период d дифракционной решетки для каждого значения m . По полученной выборке значений d объема $N = 6$ определите постоянную дифракционной решетки и представьте результат в виде $d = \bar{d} \pm \Delta \bar{d}$ с $P = 95\%$.

3. По формуле (3.7) вычислите эффективный период d^* для одномерной дифракционной решетки при углах поворота θ , равных (30° ; 45° ; 60°). Объясните, пользуясь рисунками в протоколе работы, как угол поворота θ влияет на дифракционную картину.

4. В опытах с двумерной дифракционной решеткой определите положение максимумов первого порядка вдоль осей X и Y (рис.3.6). Что соответствует $(k_1, k_2) = (\pm 1, 0)$ и $(k_1, k_2) = (0, \pm 1)$. Рассчитайте периоды \bar{d}_1 и \bar{d}_2 двумерной дифракционной решетки, воспользовавшись формулой (3.8).

5. Объясните, пользуясь рисунками в протоколе работы, 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 эффективный 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? Влияет ли количество щелей на дифракционную картину, наблюдаемую в данной лабораторной работе?