

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛУЧАХ (ДИФРАКЦИЯ ФРАУНГОФЕРА)

Цель работы – наблюдение дифракционной картины при дифракции в параллельных лучах на одной и двух щелях; определение ширины щели и расстояния между центрами щелей.

1. Теоретические основы работы

Дифракцией называется совокупность явлений, связанных с распространением света в среде с резкими оптическими неоднородностями (препятствиями), и проявляющихся в нарушении законов геометрической оптики. Так, при отражении от оптически неоднородной среды нарушается закон отражения света, а при прохождении света через узкую щель или дифракционную решетку нарушается закон прямолинейного распространения света – свет огибает препятствия и проникает в область геометрической тени.

Дифракция возникает в тех случаях, когда длина волны λ излучения соизмерима с линейными размерами b оптической неоднородности ($b \approx \lambda$). Более строгие условия возникновения дифракции определяются соотношением расстояния l от оптической неоднородности до плоскости наблюдения дифракции и длиной дифракции l_d . Длиной дифракции называется расстояние от оптической неоднородности, на котором расширение (в оптике говорят – уширение) светового пучка за счет дифракции равно линейному размеру неоднородности. Длина дифракции

$$l_d = \frac{b^2}{\lambda}.$$

При условии $l \ll l_d$ дифракция себя не проявляет, и выполняются законы геометрической оптики. При $l \sim l_d$ имеет место дифракция Френеля (дифракция сферических волн), при этом наблюдаемая на экране картина является дифракционным изображением объекта, на котором происходит дифракция. При $l \gg l_d$ имеет место дифракция Фраунгофера (дифракция в параллельных лучах).

1.1. Дифракция Фраунгофера на одной щели

Оптическая схема наблюдения дифракции Фраунгофера приведена на рис. 1. Узкую щель шириной b (рис. 1, *a*) в непрозрачном экране \mathcal{E}_1 освещают параллельным пучком света. Дифракционную картину наблюдают на удалённом экране \mathcal{E}_2 . Так как $b \ll l$, то все лучи, вышедшие из щели в направлении точки экрана \mathcal{E}_2 с координатой x (рис. 1, *б*), можно считать почти параллельными. На экране \mathcal{E}_2 возникает интерференционная (дифракционная) картина, распределение интенсивности в которой определяется соотношением фаз колебаний, возбуждаемых волнами, приходящими из всех точек щели. Применим для качественной оценки получающейся на экране \mathcal{E}_2 интерференционной картины метод *зон Френеля*.

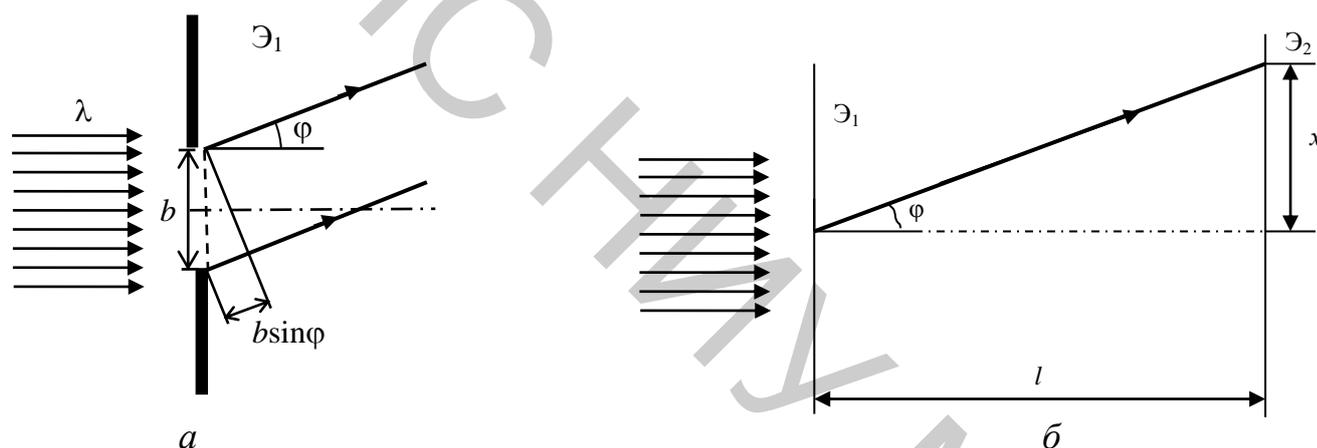


Рис. 1. Оптическая схема дифракции на одной щели

Область щели AB разобьем на зоны так, чтобы разность хода лучей, выходящих от краев каждой зоны в данном направлении φ была равна $\lambda/2$. Для этого разность хода лучей, идущих от краев щели (отрезок BC на рис. 2), разобьем на отрезки длиной $\lambda/2$ и проведем через края этих отрезков плоскости, перпендикулярные отрезку BC . Следы этих плоскостей представлены пунктиром на рис. 2.

Их пересечение с плоскостью щели AB разделит ее на зоны Френеля,

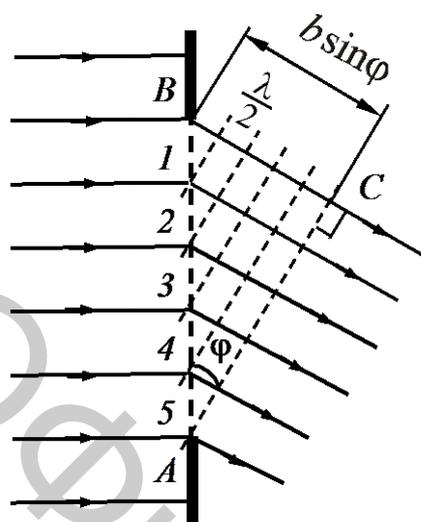


Рис. 2. Построение зон Френеля

которые на рисунке пронумерованы арабскими цифрами. Очевидно, на щели шириной b уместается $b \sin \varphi / (\lambda/2)$ зон Френеля. В качестве примера на рис. 2 изображено пять зон.

Волны от двух соседних зон приходят в соответствующую углу φ точку экрана \mathcal{E}_2 с разностью хода $\lambda/2$, т.е. в противофазе; амплитуды этих волн, а, следовательно, и интенсивности

равны. Поэтому в результате интерференции волны от двух соседних зон Френеля гасят друг друга. Если число зон, образовавшихся на щели AB , четное, то в соответствующей точке на экране \mathcal{E}_2 (рис. 1) мы будем наблюдать темную полосу (дифракционный минимум).

Если угол φ принимает такое значение, что длина отрезка BC оказывается кратной нечетному числу $\lambda/2$, то на щели AB укладывается нечетное число зон Френеля. При этом действие одной из зон сохраняется. Соответствующая точка на экране \mathcal{E}_2 будет освещенной, что соответствует дифракционному максимуму.

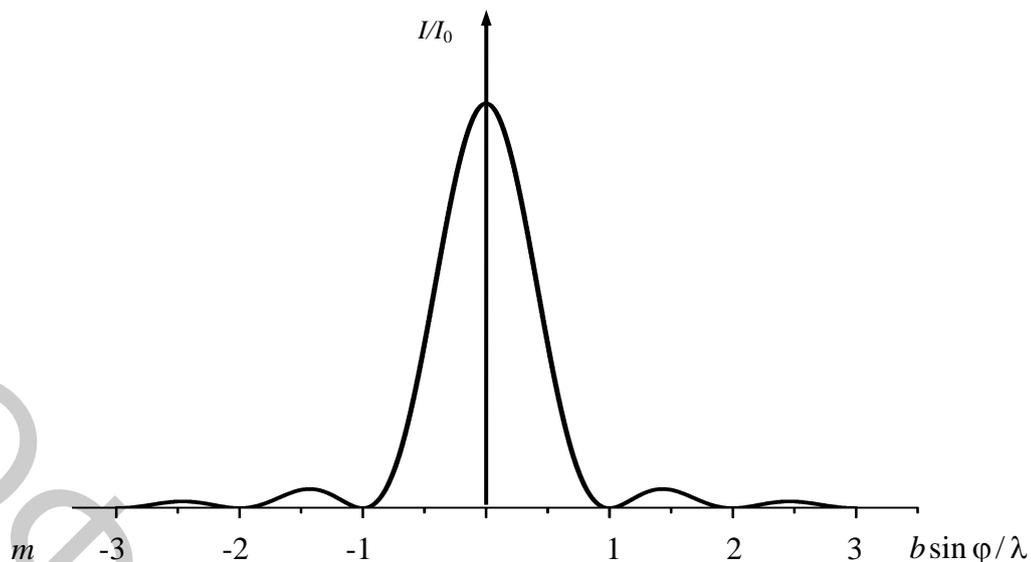
Таким образом, метод зон Френеля дает достаточно точные значения направлений на максимумы и минимуму дифракционной картины на экране \mathcal{E}_2 .

В соответствии с вышесказанным, максимумам соответствуют углы дифракции, для которых выполняется условие:

$$b \sin \varphi = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (k = 1, 2, 3, \dots). \quad (1)$$

Минимумам соответствуют углы дифракции, для которых выполняется условие

$$b \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (2)$$



Если длина волны λ известна, то, определив экспериментально угловое направление φ_k на максимум порядка k , можно из формулы (2) найти ширину щели:

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

Учитывая, что для малых углов дифракции $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi \approx x/l$, можно записать:

$$b = \frac{2k + 1}{2} \cdot \frac{l\lambda}{2x_k}. \quad (3)$$

На рис. 3 приведен график распределения интенсивности света на экране при дифракции на одной щели. По оси абсцисс отложена величина $b \sin \varphi / \lambda$, определяющая порядок дифракционных минимумов m .

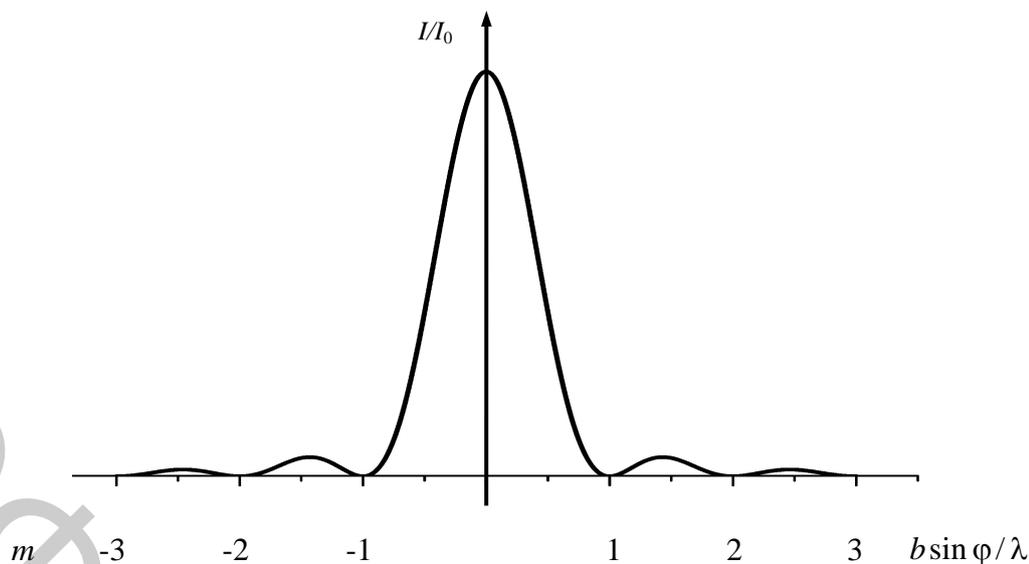


Рис. 3. Распределение интенсивности света на экране при дифракции на одной щели

На центральный максимум приходится около 85% падающей на щель энергии. Интенсивность центрального максимума превышает интенсивность максимума первого порядка приблизительно в 22 раза.

1.2. Дифракция Фраунгофера на двух щелях

Рассмотрим теперь дифракцию света на двух одинаковых щелях шириной b с расстоянием между центрами щелей d (см. рис. 4).

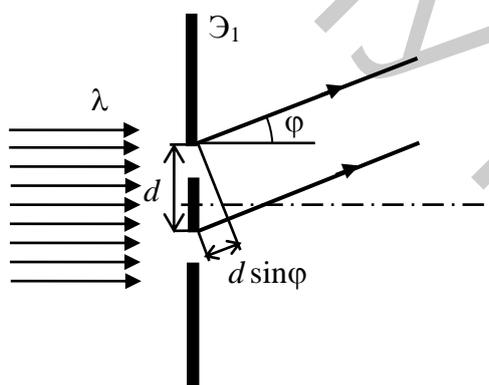


Рис. 4. Оптическая схема дифракции на двух щелях

В этом случае, также как и при дифракции на одной щели, условия минимумов определяются условием (2):

$$b \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

Действительно, если каждая щель под данным углом дифракции φ не посылает свет на экран, то и от двух щелей интенсивность света под данным углом будет равна нулю.

Максимумы дифракции на двух щелях, которые называются *главными*, возникают в результате интерференции волн, выходящих из соответствующих точек двух щелей (соответствующие точки находятся на расстоянии d друг от друга). Максимумы будут возникать для таких углов дифракции, при которых разность хода волн от соответствующих точек двух щелей $d \sin \varphi$ до экрана равна целому числу длин волн. Таким образом, условие главных максимумов при дифракции на двух щелях запишется в виде

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda, \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

где d – расстояние между центрами или любыми соответствующими точками двух щелей.

Из формулы (4) с учетом того, что $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi \approx x/l$, можно выразить расстояние d между центрами щелей

$$d = k \frac{l \lambda}{x_k}. \quad (5)$$

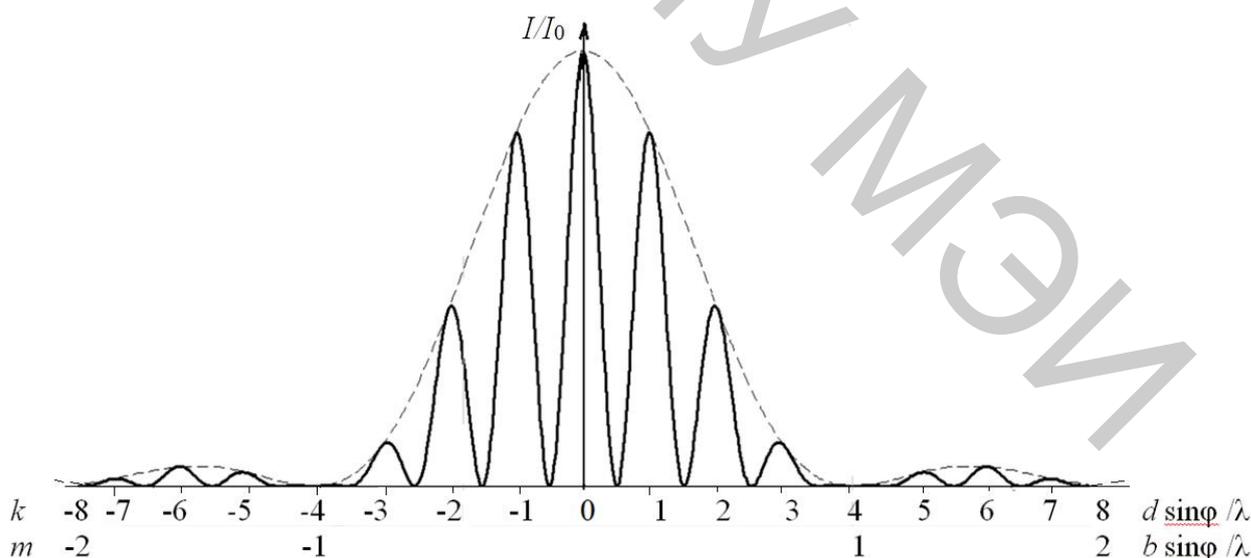


Рис. 5. Распределение интенсивности света на экране при дифракции на двух щелях ($d/b = 4$)

На рис. 5 приведен график распределения относительной интенсивности света на экране при дифракции на двух щелях. Пунктирной линией показано

распределение приведенной интенсивности при дифракции на одной щели. На рис. 5 видно, что интенсивность всех максимумов, кратных четырем оказалась равной нулю, они пропали. Это произошло потому, что одним и тем же углам соответствуют как условия главных максимумов, так и условия дифракционных минимумов от дифракции на любой из щелей. При $\varphi_{\max} = \varphi_{\min}$ из условий $d \sin \varphi_{\max} = k\lambda$ и $b \sin \varphi_{\min} = m\lambda$ следует, что

$$\frac{d}{b} = \frac{k}{m}.$$

И, поскольку пропали все максимумы, для которых $k/m = 4$, можно сделать вывод, что распределение интенсивности света на экране, приведенное на рис. 5, соответствует случаю, когда расстояние между щелями в четыре раза больше ширины каждой щели. Можно показать, также, что число главных максимумов, появляющихся при дифракции на двух щелях справа и слева от оси симметрии интерференционной картины в пределах максимумов дифракции на одной щели равно $(d/b - 1)$.

Очевидно, что при дифракции света на двух щелях главные максимумы разделены минимумами, которые возникают в результате интерференции волн, выходящих из соответствующих точек двух щелей.

2. Описание экспериментальной установки

Для выполнения работы используется лабораторный оптический комплекс ЛОК-1. Схема установки представлена на рис. 6. Одинарная 1 и двойная 2 щели получены травлением металлизированной поверхности стеклянной пластинки 3, помещенной в оправу 4. Оправу 4 с пластиной 3 можно перемещать рукой в держателе 5 в горизонтальном направлении перпендикулярно лучу 6 лазера 7, и таким образом переходить от наблюдения дифракции на одной щели к наблюдению дифракции на двух щелях.

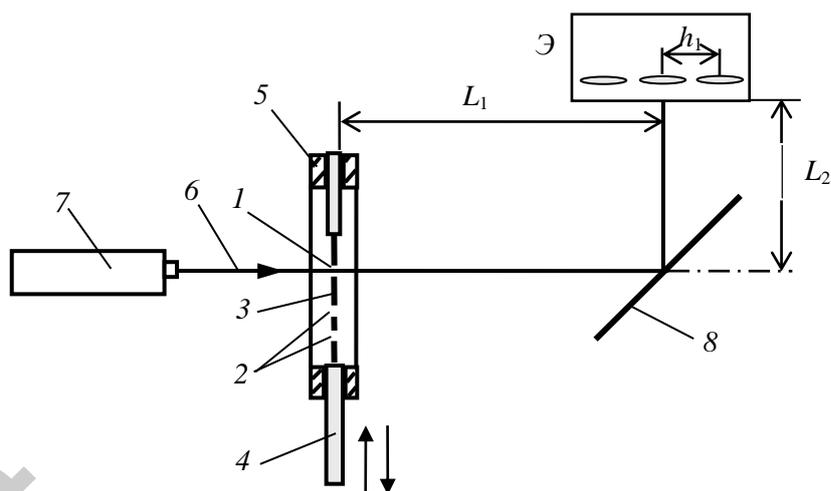


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

Кроме того, в комплекте установки имеется раздвижная щель. Изменение ширины щели производится вращением специального винта. Зеркало 8 отражает дифракционную картину на боковой экран Э, на котором с помощью миллиметровой шкалы производятся измерения.

3. Порядок выполнения работы

Заполните табл. 1 спецификации измерительных приборов и запишите данные установки.

Таблица 1. Спецификация измерительных приборов

Название прибора и его тип	Пределы измерения	Цена деления	Инструментальная погрешность

Данные установки

Длина волны излучения лазера $\lambda =$ нм

Расстояние от оптической оси скамьи до экрана $L_2 =$ мм

1. Проведите наблюдение зависимости дифракционной картины от ширины щели, для этого

- установите на оптическом рельсе, на расстоянии 4 – 5 см от лазера держатель 5 и вставьте в него раздвижную щель;
- включите лазер и наблюдайте на экране дифракционную картину;

- изменяя ширину щели, следите за изменениями в дифракционной картине. При оформлении отчета опишите результаты наблюдения.

2. Измерьте расстояние от центрального максимума до максимума первого порядка при дифракции на одной щели, для чего:

- вставьте в держатель 5 оправу 4 со стеклянной пластиной 3.

Передвигая оправу в держателе, подведите под лазерный пучок ту часть пластины, на которой расположена одиночная щель, и получите на экране отчетливую дифракционную картину, на которой различимы центральный максимум и максимумы первого порядка справа и слева от центрального;

- измерьте расстояние от плоскости щели до зеркала 8 и запишите результат в протокол измерений;

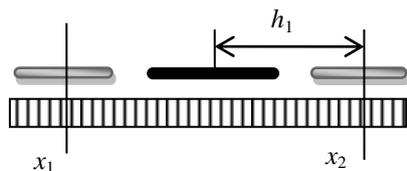
- измерьте по шкале на экране координаты центров максимумов первого порядка справа и слева от центрального максимума и запишите их в табл. 2 протокола измерений;

3. Измерьте расстояние от центрального максимума до главного максимума первого порядка при дифракции на двух щелях, для чего:

- передвигая оправу 4 в держателе, подведите под лазерный пучок ту часть пластины, на которой близко расположены две щели, и получите на экране отчетливую дифракционную картину, на которой различимы центральный максимум и главные максимумы справа и слева от центрального (в пределах области, которую занимал центральный максимум при дифракции на одной щели);

- измерьте по шкале на экране координаты центров максимумов первого порядка справа и слева от центрального максимума и запишите их в табл. 3 протокола измерений.

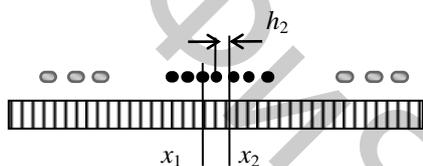
Таблица 2. Измерение координат максимумов первого порядка при дифракции на одной щели



$$h_1 = \frac{x_2 - x_1}{2}$$

Номер измерения	x_2 , мм	x_1 , мм	h_1 , мм
1			
2			
3			
Среднее значение h_{1cp}			

Таблица 3. Измерение координат главных максимумов первого порядка при дифракции на двух щелях



$$h_2 = \frac{x_2 - x_1}{2}$$

Номер измерения	x_2 , мм	x_1 , мм	h_2 , мм
1			
2			
3			
Среднее значение h_{2cp}			

4. Обработка результатов измерений

1. По результатам измерений табл. 2 рассчитайте среднее значение расстояния h_{1cp} между центральным максимумом и максимумом первого порядка при дифракции на одной щели и определите ширину щели по формуле

$$b = \frac{(2k+1)l}{2h_{1cp}} \lambda,$$

где $k = 1$, $l = L_1 + L_2$, (L_1 равно расстоянию от щели до поворотного зеркала, L_2 равно расстоянию от поворотного зеркала до экрана).

2. По результатам измерений табл. 3 рассчитайте среднее значение расстояния h_{2cp} между центральным максимумом и максимумом первого порядка при дифракции на двух щелях и определите расстояние между щелями по формуле

$$d = \frac{kl}{h_{2cp}} \lambda, \text{ где } k = 1.$$

3. Определите отношение расстояния между щелями к ширине одной щели d/b . Сравните полученный результат со значением d/b , которое следует из наблюдаемой дифракционной картины.
4. Рассчитайте погрешности измеренных величин и запишите окончательный результат в стандартном виде.
5. Опишите, чем отличаются картины дифракции на одной и двух щелях.

5. Контрольные вопросы

1. Какое явление называется дифракцией света? Какие виды дифракции Вам известны?
2. Примените метод зон Френеля к расчету условий максимумов и минимумов при дифракции света на щели.
3. Нарисуйте примерный вид распределения интенсивности света при дифракции на двух щелях.
4. Чем отличаются между собой распределения интенсивности на экране при дифракции на двух щелях и от одной щели?
5. Как зависит вид дифракционной картины при дифракции света на узкой щели от соотношения длины волны света и ширины щели?
6. Поясните с помощью метода зон Френеля уменьшение интенсивности дифракционных максимумов с ростом угла дифракции при дифракции на одной щели.