

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА

Ляликова Ирина, Б05-911

Работа 4.3.1

Цель работы: Исследовать дифракцию Френеля на узкой щели, на краю экрана, на тонкой нити; исследовать дифракцию Фраунгофера на щели и проследить, как влияют изменение ширины щели и её смещение на характер дифракционной картины; исследовать картину дифракции на двух щелях и оценить влияние размеров источника на чёткость картины; исследовать влияние дифракции на разрешающую способность оптических инструментов.

В работе используются: оптическая скамья, ртутная лампа, монохроматор, щели с регулируемой шириной, рамка с вертикальной нитью, двойная щель, микроскоп на поперечных салазках с микрометрическим винтом, зрительная труба.

Теоретическое введение и установка

А. Дифракция Френеля

Схема установки для наблюдения дифракции Френеля представлена на рис. 1. Световые лучи освещают щель S_2 и испытывают на ней дифракцию. Дифракционная картина рассматривается с помощью микроскопа М, сфокусированного на некоторую плоскость наблюдения П.

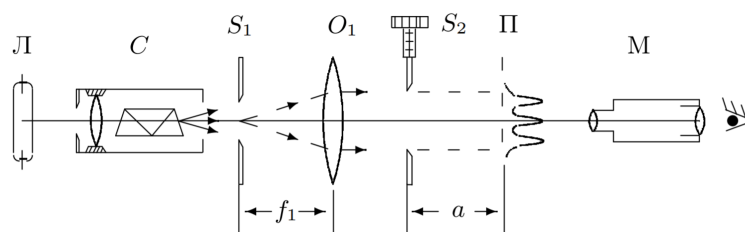


Рис. 1: Схема установки для наблюдения дифракции Френеля

Щель S_2 освещается параллельным пучком монохроматического света с помощью коллиматора, образованного объективом O_1 и щелью S_1 , находящейся в его фокусе. На щель S_1 сфокусировано изображение спектральной линии, выделенной из спектра ртутной лампы Л при помощи простого монохроматора С.

Распределение интенсивности света в плоскости наблюдения П проще всего рассчитывать с помощью зон Френеля (для щели их иногда называют зонами Шустера). При освещении щели S_2 параллельным пучком лучей (плоская

волна) зоны Френеля представляют собой полосы, параллельные краям щели (рис. 2). Результирующая амплитуда в точке наблюдения определяется суперпозицией колебаний от тех зон Френеля, которые не перекрыты створками щели. Графическое определение результирующей амплитуды производится с помощью векторной диаграммы — спирали Корню. Суммарная ширина m зон Френеля z_m определяется соотношением

$$z_m = \sqrt{am\lambda}, \quad (1)$$

где a — расстояние от щели до плоскости наблюдения (рис. 1), а λ — длина волны.

Вид наблюдаемой дифракционной картины определяется числом Френеля Φ : квадрат числа Френеля

$$\Phi^2 = \frac{D}{\sqrt{a\lambda}}.$$

Дифракционная картина отсутствует, когда плоскость наблюдения Π совпадает с плоскостью щели: при $\Phi \rightarrow \infty$ мы имеем дело с геометрической оптикой. При небольшом удалении от щели, когда число Френеля $\Phi \gg 1$ (на щели укладывается огромное число зон), дифракционная картина наблюдается только в узкой области на границе света и тени у краёв экрана.

При последующем небольшом удалении от щели (или изменении ширины щели S_2) эти две группы дифракционных полос перемещаются практически независимо друг от друга. При дальнейшем увеличении расстояния (или уменьшении ширины щели S_2) обе системы дифракционных полос постепенно сближаются и, наконец, при $\Phi \gtrsim 1$ накладываются друг на друга. Распределение интенсивности в плоскости наблюдения в этом случае определяется числом зон Френеля, укладывающихся на полуширине щели. Если это число равно m , то в поле зрения наблюдается $n = m - 1$ тёмных полос. Таким образом, по виду дифракционной картины можно оценить число зон Френеля на полуширине щели.

Б. Дифракция Фраунгофера на щели

Принцип Гюйгенса-Френеля:

Каждый элемент волнового фронта можно рассматривать как центр вторичного возмущения, порождающего вторичные сферические волны, а результирующее световое поле в каждой точке пространства будет определяться интерференцией этих волн.

Теперь рассмотрим первое применение этого принципа, получившее название *метод зон Френеля*

Для этого рассмотрим действие световой волны действующей из точки A в какой-то точке B . В этом случае можно, взяв точку M_0 в качестве центра (см. рис. 1), построить ряд концентрических сфер, радиусы которых начинаются с b и увеличиваются каждый раз на половину длины волны $\frac{\lambda}{2}$. При пересечении с плоским фронтом волны F эти сферы дадут концентрические окружности. Таким образом, на фронте волны появятся кольцевые зоны (зоны Френеля) с радиусами r_1, r_2 и т. д.

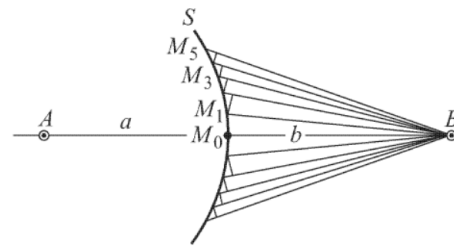


Рис. 2: Построение зон Френеля

Из геометрических соображений посчитав, можно получить, что

$$r_i = i\sqrt{a\lambda}. \quad (2)$$

Картина дифракции упрощается, когда ширина щели становится значительно меньше ширины первой зоны Френеля, т.е. если

$$D \ll \sqrt{a\lambda} \quad (3)$$

Это условие всегда выполняется при достаточно большом a . В этом случае говорят, что *дифракция Фраунгофера*. Дифракционную картину в этом случае называются *дифракцией Фраунгофера*. При выполнении пункта (2) у нас упрощаются фазовые соотношения, что поясняет рис. 2, в итоге с хорошим приближением можно считать, что разность хода между крайними лучами, приходящими от щели в точке наблюдения P , с хорошим приближением равна

$$\Delta = r_2 - r_1 \approx D \sin \theta \approx D \cdot \theta \quad (4)$$

Здесь предполагается, что θ достаточно мал. Дифракцию Фраунгофера можно наблюдать на установке рис. 1, но для удобства к подобной установке добавляется объектив O_2 .

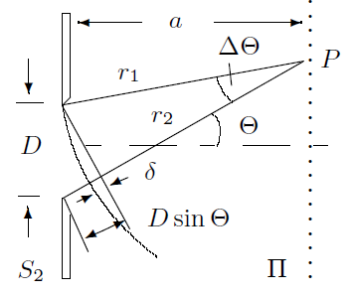


Рис. 3: К фазовым соотношениям при дифракции Фраунгофера

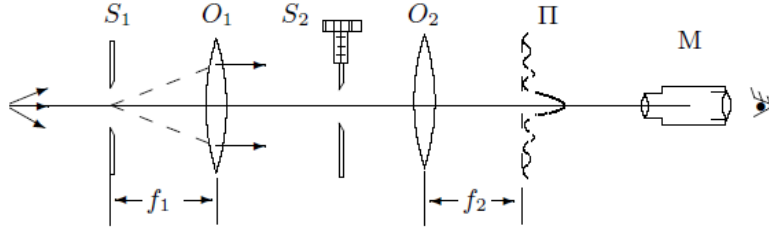


Рис. 4: Схема установки 2.

Дифракционная картина здесь наблюдается в фокальной плоскости объектива O_2 . Каждому значению θ соответствует в этой плоскости точка, отстоящая от оптической оси на расстоянии

$$X = f_2 \tan \theta \approx f_2 \theta. \quad (5)$$

Объектив не вносит разности хода между интерферирующими лучам, поэтому в его фокальной плоскости наблюдается неискажённая дифракционная картина. При $\theta = 0$ разность хода между лучами нулевая, поэтому в центре поля зрения дифракционный максимум. Первый минимум соответствует θ_1 такому, что в точке наблюдения разность хода пробегаем все значения от 0 до 2π . Аналогично рассуждая, для m -й полосы

$$\theta_m = \frac{m\lambda}{D} \quad (6)$$

Расстояние X_m тёмной полосы от оптической оси из (5) и (6)

$$X_m = f_2 m \frac{\lambda}{D} \quad (7)$$

В. Дифракция Фраунгофера для двух щелей

Для наблюдения дифракции Фраунгофера на двух щелях S_2 заменим экраном \mathcal{E} с двумя щелями. При этом для оценки влияния ширины входной щели на чёткость вместо S_1 поставим щель с микрометрическим винтом. Два дифрак-

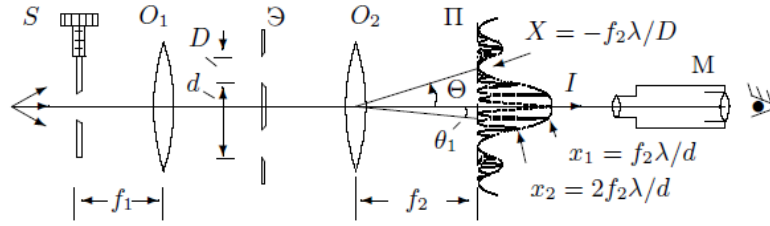


Рис. 5: Схема установки В.

ционных изображения входной щели, одно из которых образовано лучами, прошедшими через левую, а другое – через правую щели, накладываются друг на друга. Если входная щель достаточно узка, то дифракционная картина в плоскости Π подобна той, что получалась при дифракции на одной щели, однако вся картинка испещрена рядом дополнительных узких полос, наличие которых объясняется суперпозицией световых волн через разные щели. Светлая интерференционная полоса наблюдается в случаях, когда разность хода равна целому числу длин волн. Таким образом, угловая координата максимума порядка m равна

$$\theta_m = \frac{m\lambda}{d}, \quad (8)$$

где d – расстояние между щелями. Отсюда расстояние между соседними интерференционными полосами в плоскости Π равно

$$\delta x = f_2 \frac{\lambda}{d} \quad (9)$$

Число интерференционных полос укладывающихся в области центрального максимума равно отношению ширины главного максимума $\frac{2\lambda f_2}{D}$ к расстоянию между соседними полосами:

$$n = \frac{2\lambda f_2}{D} \frac{1}{\delta x} = \frac{2d}{D}. \quad (10)$$

При дифракции света на двух щелях чёткая система интерференционных полос наблюдается только при достаточно узкой ширине входной щели S . При увеличении ширины картинка пропадает и появляется вновь, но полосы при этом сильно размыты и видны плохо.

Г. Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента

В отсутствие щели S_2 линзы O_1 и O_2 создают на плоскости Π изображение щели S_1 и это изображение рассматриваются микроскопом M . Таким образом, установку можно рассматривать как оптический инструмент, предназначенные для получения изображения предмета. Если перед O_2 расположить S_2 , то изображение объекта будет искажено из-за дифракции. Чем меньше ширина щели, тем сильнее искажение. Качественной характеристикой этого искажения может служить φ_{min} – минимальное угловое расстояние между объектами (источниками), которые всё ещё воспринимаются как раздельные. Поместим вместо S_1

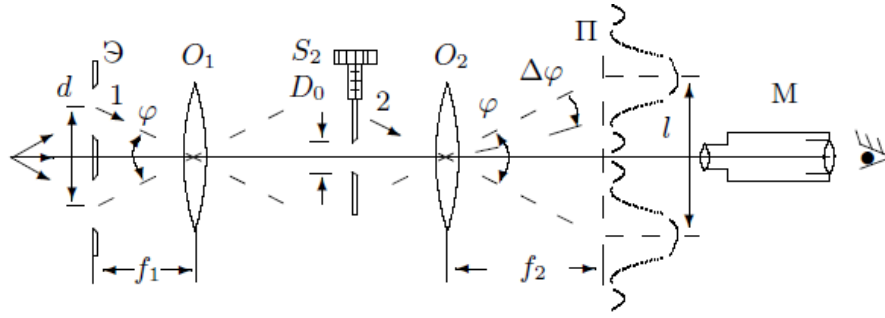


Рис. 6: Схема установки 4.

экран Э с двумя щелями с расстоянием d . Тогда на S_2 будут падать два пучка света с углом

$$\varphi = \frac{d}{f_1} \quad (11)$$

Из геометрии расстояние l между изображениями щелей в плоскости П равно

$$l = \varphi f_2 = d \frac{f_2}{f_1}. \quad (12)$$

Ширина $\Delta\varphi$ определяется дифракцией на S_2 . Условия, при которых изображения различимы разные для разных наблюдателей, поэтому используют *критерий Рэлея* – максимум одного дифракционного пятна должен совпадать с минимумом другого. В наших условиях это значит, что угловая полуширина $\frac{\lambda}{D}$ равна угловому расстоянию $\frac{l}{f_2}$.

Ход работы

А. Дифракция Френеля

1. Добившись наибольшей чёткости дифракционной картины, нашли резкое изображение щели (чёткие края без дифракционных полос). Начальное положение микроскопа — координата по шкале линейки $x_0 = 343$ мм, расположенной на оптической скамье.
2. Приближая микроскоп к щели, сняли зависимость координаты микроскопа от числа n наблюдаемых тёмных полос. Отметим, что эта серия измерений имеет довольно низкую точность из-за отклонений величины x , сравнимых с погрешностью.

n , полос	1	2	3	4	5
x_n , мм	370	361	357	353	351

Из формулы (1) найдём величину $2z_n$ и рассмотрим зависимость $2z_n(n)$, где длина волны зелёной линии ртути $\lambda = 546,1$ нм.

n , полос	1	2	3	4	5
$2z_n$, мкм	240 ± 50	280 ± 20	300 ± 20	290 ± 15	300 ± 12

Усреднённое значение размера зоны Френеля $\langle 2z_n \rangle = 280 \pm 20$ мкм.

3. В соответствии с показаниями микрометрического винта ширина щели в данном опыте $D = 0,280 \pm 0,005$ мм. Измерения D , проведённые с помощью шкалы микроскопа, дают соответствующий результат:

$$D = 27 \text{ дел.} \cdot 0,01 \text{ дел./мм} = 0,27 \pm 0,01 \text{ мм.}$$

Получили, что размер зон Френеля примерно совпадает с шириной щели.

4. Вновь сфокусировали микроскоп на щель. При небольшом удалении микроскопа от щели у её краёв появляются узкие частые полосы. Это дифракция на краю экрана. Возле границы щели расположена самая яркая светлая полоса.
5. Для исследования дифракции Френеля на препятствии поставили вместо щели S_2 рамку с тонкой вертикальной нитью. Настроили микроскоп на резкое изображение нити. При удалении микроскопа от нити на её фоне всегда наблюдается чётное число тёмных дифракционных полос (светлый центр).

Б. Дифракция Фраунгофера на щели

1. Фокусное расстояние линз $f_{O1} = 10,0$ см, $f_{O2} = 16,0$ см. Диаметр щели по показаниям микрометрического винта $D = 135 \pm 5$ мкм. Дифракционная картина очень слабо разрешима, получены координаты только первых двух минимумов. Измерения проводились по шкале с длиной деления $0,04$ мм.

m	-2	-1	0	1	2
k , дел.	$0,80 \pm 0,05$	$1,75 \pm 0,05$	$2,80 \pm 0,05$	$4,25 \pm 0,05$	$5,50 \pm 0,05$
x , мкм	320 ± 20	700 ± 20	1120 ± 20	1700 ± 20	2200 ± 20

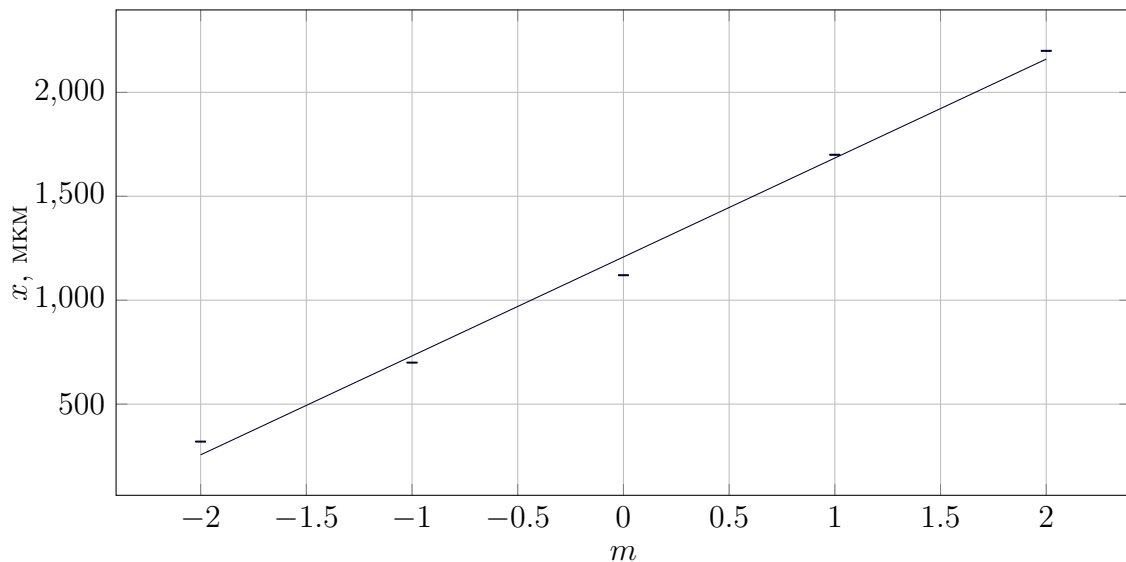


Рис. 7: Координаты минимумов дифракции Фраунгофера

2. По наклону графика методом наименьших квадратов определим среднее расстояние между соседними минимумами $\Delta X = 470 \pm 30$ мкм. Пользуясь этим результатом, с помощью формулы (7) получим значение D :

$$D = \frac{f_2 m \lambda}{X_m} = \frac{f_2 \lambda}{\Delta X} = 180 \pm 10 \text{ мкм.}$$

В. Дифракция Фраунгофера для двух щелей

1. Получим на экране дифракционную картину и проведем измерения. Получим для 1 и 2 максимума слева и справа соответственно координаты:

m	-2	-1	1	2
d_m , дел.	$0,95 \pm 0,05$	$1,60 \pm 0,05$	$1,50 \pm 0,05$	$0,80 \pm 0,05$
x_m , мкм	38 ± 2	80 ± 2	75 ± 2	32 ± 2

Число наблюдаемых полос для первых максимумов $n_1 = 7$, для вторых $n_2 = 3$.

Тогда найдём d по формуле (8):

$$d = \frac{f_2 \lambda}{\delta x} = 1,41 \pm 0,05 \text{ мм.}$$

Г. Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента

1. Изображения почти сливаются при значении $D_0 = 100 \pm 5$ мкм. Заметим, что для него выполняется критерий Релея (соотношение (12)) с учётом $\frac{\lambda}{D_0} = \frac{l}{f_2}$. При этом ширина щелей, измеренная микроскопом $D = 340$ мкм, а расстояние между щелями $d = 1,2$ мм.

Вывод

Изучили два основных типа дифракции: Френеля и Фраунгофера при разных размерах щели и провели качественные наблюдения этих явлений, а также экспериментально проверили справедливость теоретических формул.