

Московский физико-технический институт
(государственный университет)
Факультет общей и прикладной физики

Лабораторная работа № 4.3.1
(Общая физика: оптика)

Изучение дифракции света

Работу выполнил:
Иванов Кирилл, 625 группа

г. Долгопрудный
2018 год

Цель работы: исследовать явления дифракции Френеля и Фраунгофера на щели, изучить влияние дифракции на разрешающую способность оптических инструментов.

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

1. Дифракция Френеля

1.1 Экспериментальная установка

Схема установки для наблюдения дифракции Френеля на щели 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.

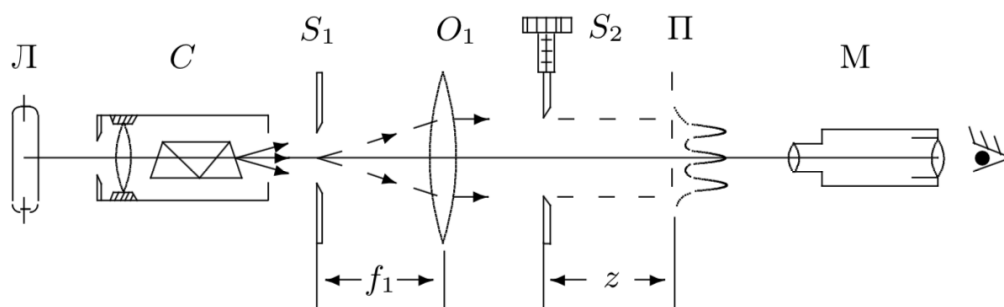


Рис. 1: Экспериментальная установка А

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, в котором используется призма прямого зрения. 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 n зон Френеля (Шустера) определяется соотношением:

$$\xi_n = \sqrt{zn\lambda} \quad (1)$$

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

Вид наблюдаемой дифракционной картины на щели шириной b определяется волновым параметром p или числом Френеля C (число открытых полных зон):

$$p = \frac{\sqrt{z\lambda}}{b}, \quad C = \frac{1}{p^2}$$

Дифракционная картина отсутствует вблизи щели при $p \ll 1$ ($C \gg 1$, т. е. на щель укладывается огромное число зон), а распределение интенсивности света за щелью можно приближённо получить с помощью законов геометрической оптики. Дифракционная картина в этом случае наблюдается только в узкой области на границе света и тени у краёв экрана.

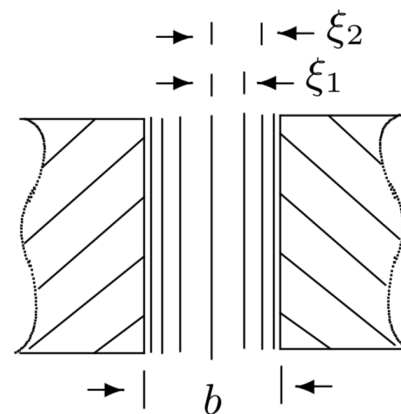


Рис. 2: Зоны Френеля

При небольшом удалении от щели (или изменении ширины щели S_2) эти две группы дифракционных полос перемещаются практически независимо друг от друга. Каждая из этих групп образует картину дифракции Френеля на краю экрана. Распределение интенсивности при дифракции света на краю экрана может быть найдено с помощью спирали Корню.

При дальнейшем увеличении расстояния z (или уменьшении ширины щели S_2) обе системы дифракционных полос постепенно сближаются и, наконец, при $C \gtrsim 1$ накладываются друг на друга. Распределение интенсивности в плоскости наблюдения в этом случае определяется числом зон Френеля, укладывающихся на полуширине щели $b/2$. Если это число равно n , то в поле зрения наблюдается $m = n - 1$ тёмных полос. Таким образом, по виду дифракционной картины можно оценить число зон Френеля на полуширине щели.

1.2 Измерения и обработка результатов

Запишем ширину щели: $b = 0,280 \pm 0,005$ мм.

Приближая микроскоп к щели, снимем зависимость координаты микроскопа от числа n темных полос по формуле $a_n = x_n - x_0$, где $x_0 = 52,4$ мм — положение нуля. Результаты занесем в табл. 1 и построим график зависимости величины $2\xi_n$ (формула (1)) от n . Длина волны зеленого света $\lambda = 5461 \cdot 10^{-10}$ м.

Таблица 1: Зависимость координаты микроскопа от числа n темных полос

x_n , мм	n	a_n , мм	ξ_n , мм
551	2	27	0.343
542	3	18	0.343
537	4	13	0.337
534	5	10	0.33
532	6	8	0.324

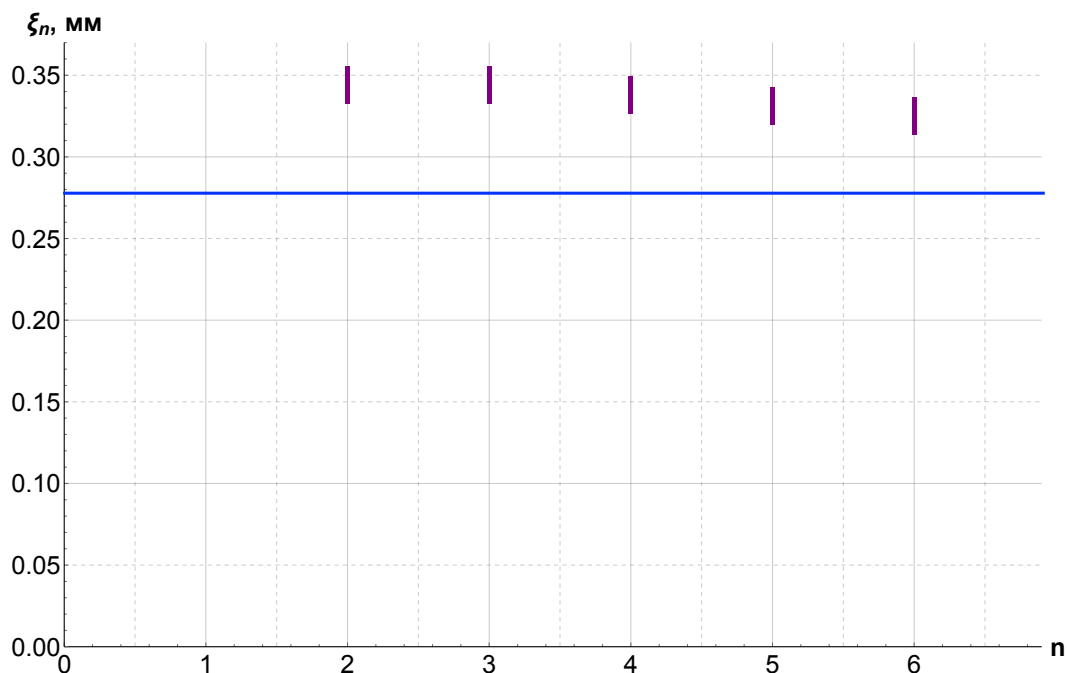


Рис. 3: График зависимости суммарной ширины зон Френеля от их числа

Таким образом, ширина примерно совпадает с шириной щели и является постоянной величиной. «Сдвиг» объясним неточностью в измерении нуля.

2. Дифракция Фраунгофера на одной щели

2.1 Экспериментальная установка

На значительном удалении от щели, когда выполнено условие $C \ll 1$ (то есть ширина щели становится значительно меньше ширины первой зоны Френеля, $b \ll \sqrt{\lambda z}$), изображение щели размывается и возникает дифракционная картина, называемая дифракцией Фраунгофера.

Дифракцию Френеля и Фраунгофера можно наблюдать на одной и той же установке (рис. 1). Однако при обычных размерах установки дифракция Фраунгофера возникает только при очень узких щелях.

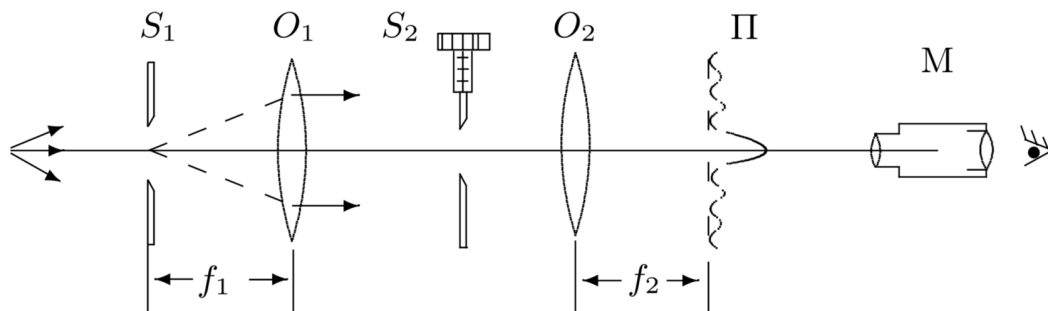


Рис. 4: Экспериментальная установка В

Например, при $z \approx 20\text{--}40$ см и $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-5}$ см получаем $b \ll 0,3$ мм. Поскольку работать с такими тонкими щелями неудобно, для наблюдения дифракции Фраунгофера к схеме, изображённой на рис. 1, добавляется объектив O_2 (рис. 3).

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

$$x = f_2 \operatorname{tg} \theta \approx f_2 \theta \quad (2)$$

Поскольку объектив не вносит дополнительной разности хода между интерферирующими лучами (таутохронизм), в его фокальной плоскости наблюдается неискаженная дифракционная картина Фраунгофера. Эта картина соответствует бесконечно удалённой плоскости наблюдения.

В центре поля зрения наблюдается дифракционный максимум (светлая полоса). При малых углах θ положение минимумов (тёмных полос) определяется, соотношением

$$\theta_m = m \frac{\lambda}{b} \quad (3)$$

Расстояние x_m от тёмной полосы до оптической оси объектива O_2 пропорционально фокусному расстоянию f_2 . Из (2) и (3) следует

$$x_m = m \frac{\lambda}{b} f_2 \quad (4)$$

Видно, что при малых углах минимумы эквидистантны, а расстояния δx между минимумами обратно пропорциональны ширине b щели S_2

2.2 Измерения и обработка результатов

Величина щели по винту равна $b = 0,312 - 0,052 = 0,26 \pm 0,03$ мм. Фокусное расстояние линзы $f_2 = 13,8$ см.

Измерим с помощью винта поперечного перемещения микроскопа координаты X_m нескольких дифракционных минимумов. Здесь x_m — измерения, которые затем умножаем на $\alpha = 0,02$ мм — цену деления винта, т.е. $X_m = \alpha x_m$. Результаты занесем в табл. 2 и построим график зависимости минимумов от их номеров.

Из графика получаем, что угол наклона $a = (52,0 \pm 1,2) \cdot 10^{-4}$ мм. Это и есть расстояние ΔX между соседними максимумами. Из формулы (4) мы получаем, что

$$a = \frac{X_m}{m} = \frac{\lambda}{b_s} f_2 \Rightarrow b_s = 2 \cdot \frac{\lambda}{a} f_2 = 0,289 \pm 0,007 \text{ мм.}$$

Таким образом, наши значения для b и b_s близки.

Таблица 2: Зависимость минимумов от их номера m

x_m	X_m , мм	m
2.1	0.042	0
2.35	0.047	1
2.6	0.052	2
2.85	0.057	3
3.15	0.063	4

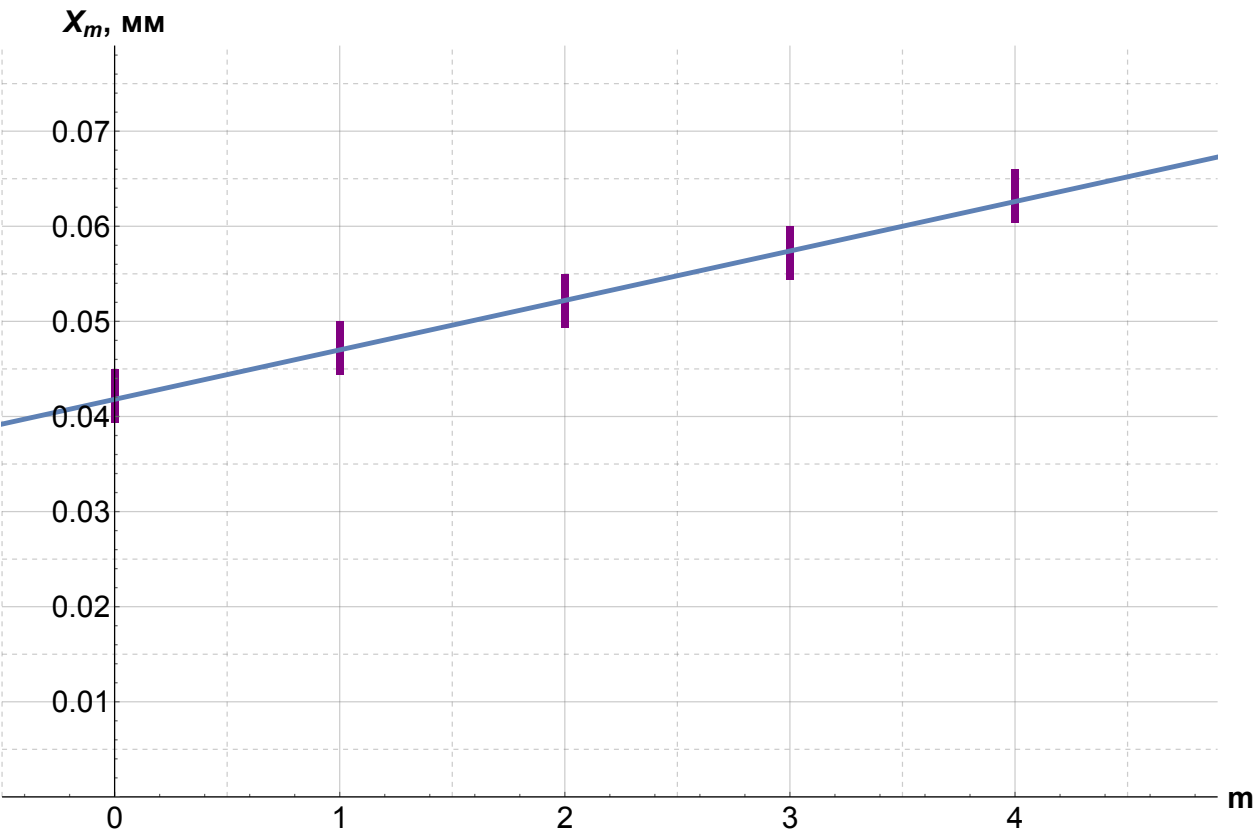


Рис. 5: График зависимость X_m минимумов от их номера m

Таблица 3: Расчет аппроксимированной прямой $y = ax + b$

	Estimate	Standard Error
a	0.0052	0.00011547
b	0.0418	0.000282843

3. Дифракция Фраунгофера на двух щелях

3.1 Экспериментальная установка

Для наблюдения дифракции Фраунгофера на двух щелях в установке (рис. 3) следует заменить щель S_2 экраном Э с двумя щелями (рис. 4). При этом для оценки влияния ширины

входной щели на чёткость дифракционной картины вместо входной щели S_1 следует поставить щель с микрометрическим винтом. Два дифракционных изображения входной щели, одно из которых образовано лучами, прошедшими через левую, а другое — через правую щели, накладываются друг на друга.

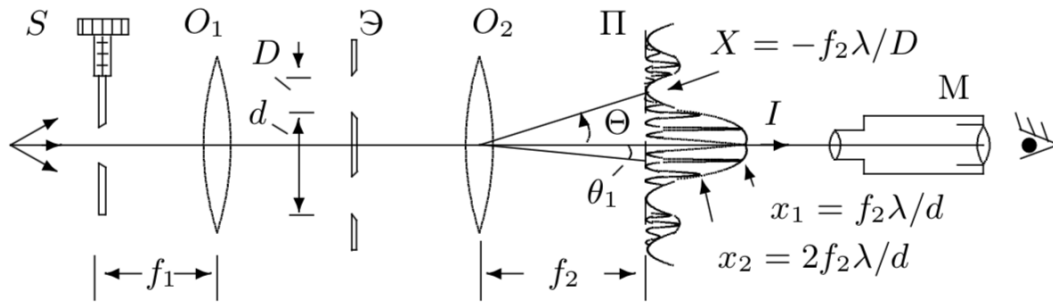


Рис. 6: Экспериментальная установка С

Если входная щель достаточно узка, то дифракционная картина в плоскости П (рис. 4) подобна той, что получалась при дифракции на одной щели (рис. 3), однако теперь вся картина испещрена рядом дополнительных узких полос. Угловая координата θ_m интерференционного максимума m -го порядка определяется соотношением

$$\theta_m = m \frac{\lambda}{b}$$

где d — расстояние между щелями. Линейное расстояние δx между соседними интерференционными полосами в плоскости П равно, поэтому

$$\delta x = f_2 \frac{\lambda}{d} \quad (5)$$

На рис. 4 показано распределение интенсивности в фокальной плоскости объектива O_2 . Штриховой линией (в увеличенном масштабе) изображено распределение интенсивности при дифракции света на одиночной щели. Нетрудно оценить число n интерференционных полос, укладывающихся в области центрального дифракционного максимума. Согласно (4) полная ширина главного максимума равна $2f_2\lambda/b$, где b ширина щели, отсюда

$$n = \frac{2f_2\lambda}{b} \frac{1}{\delta x} = \frac{2d}{b} \quad (6)$$

При дифракции света на двух щелях чёткая система интерференционных полос наблюдается только при достаточно узкой ширине входной щели S , которую можно рассматривать как протяжённый источник света размером b . Для наблюдения интерференции необходимо, чтобы расстояние d между щелями не превышало радиуса когерентности

$$d \ll \frac{\lambda}{b} f_1$$

Здесь b — ширина входной щели S и, следовательно, b/f_1 — её угловая ширина. Таким образом, по размытию интерференционной картины можно оценить размер источника. Этот метод используется в звёздном интерферометре при измерении угловых размеров звёзд.

3.2 Измерения и обработка результатов

Получим на экране дифракционную картину и проведем измерения. Получим для 1 и 2 максимума слева и справа соответственно координаты на винте x_m , а затем получим $X_m = \alpha x_m$ аналогично предыдущему пункту.

Таблица 4: Измерения максимумов на двух щелях

m	-2	-1	1	2
x_m	1,55	1,6	2,3	2,4
X_m , мм	0,031	0,032	0,046	0,048

Ширина главных максимумов $\delta x = 3(x_1 - x_{-1}) = 0,042$ мм, где 3 — число наблюдаемых светлых полос. Из формулы (5) получаем расстояние между щелями

$$d = f_2 \frac{\lambda}{\delta x} = 0,134 \pm 0,006 \text{ мм}$$

Это примерно сходится с измеренной непосредственно $b_0 \approx 0,100$. Так как эта же ширина равна $\frac{2f_2\lambda}{b} \Rightarrow$

$$b = \frac{2f_2\lambda}{d} = 0,089 \pm 0,004 \text{ мм}$$

Из формулы (6) мы получаем $n = \frac{2 \cdot 0,134}{0,089} \approx 3,01 \pm 0,08$, что сходится с наблюдениями.

4. Вывод

Мы 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.