

# Лабораторная работа 4.3.1

## Изучение дифракции света

Гарина Ольга Б04-901

11 марта 2021 г.

**Цель работы:** исследовать явления дифракции Френеля и Фраунгофера на щели, изучить 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.

## 1 Дифракция Френеля на щели

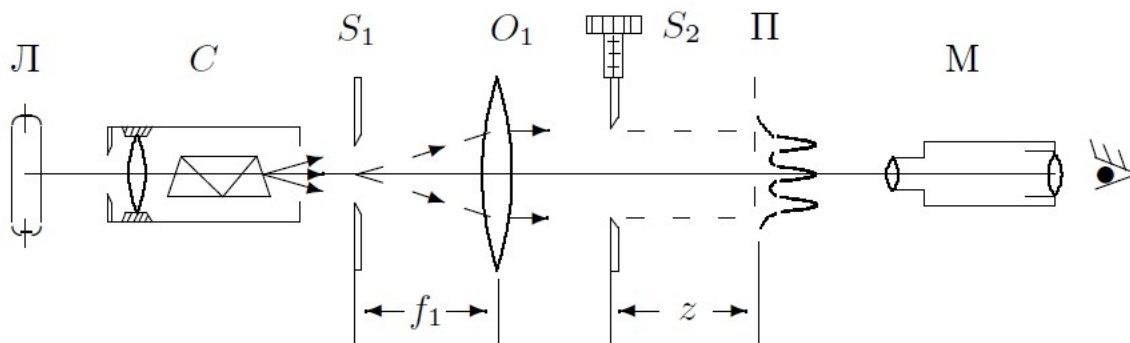


Рисунок 1 – Схема установки для изучения дифракции Френеля

В первой части работы предлагается изучить дифракцию Френеля на щели для этого

1. Соберём схему согласно рис. 1. Включим ртутную лампу и настроим оптическую систему согласно описанию. Установим щель  $S_1$ , затем сзади неё поместим линзу  $O_1$  на расстоянии, близком к фокусному, чтобы расходящиеся лучи, проходя через линзу, собирались в параллельные. Запишем фокусное расстояние  $F_1 = 10,2$  см.
2. Сфокусируем микроскоп на щель  $S_2$ . Перемещая микроскоп вдоль оптической оси, найдём в окуляре резкое изображение щели. При небольшом удалении микроскопа от щели на ярком фоне изображения щели появляются тёмные полосы, число которых растёт с увеличением расстояния. Снимем зависимость количества тёмных полос от  $z$  – расстояния от щели  $S_2$  до плоскости наблюдения. Сначала отметим положения  $z_0$ , в которых наблюдается чёткая дифракционная картина. Найдём расстояния  $z$ . Экспериментальные данные представлены в таблице 1.

число полос $m$	5	4	3	2	1
координаты микроскопа $x$ , см	45,5	45,6	45,7	46	46,6

Таблица 1 – Результаты первого эксперимента

Для получения результата вычтем из каждого  $x$  43 см – начальное положение. И по формуле (1) получим график (рис. 2)

$$\xi = \sqrt{z\lambda m}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны для зеленого цвета –  $5461 \text{ \AA}$

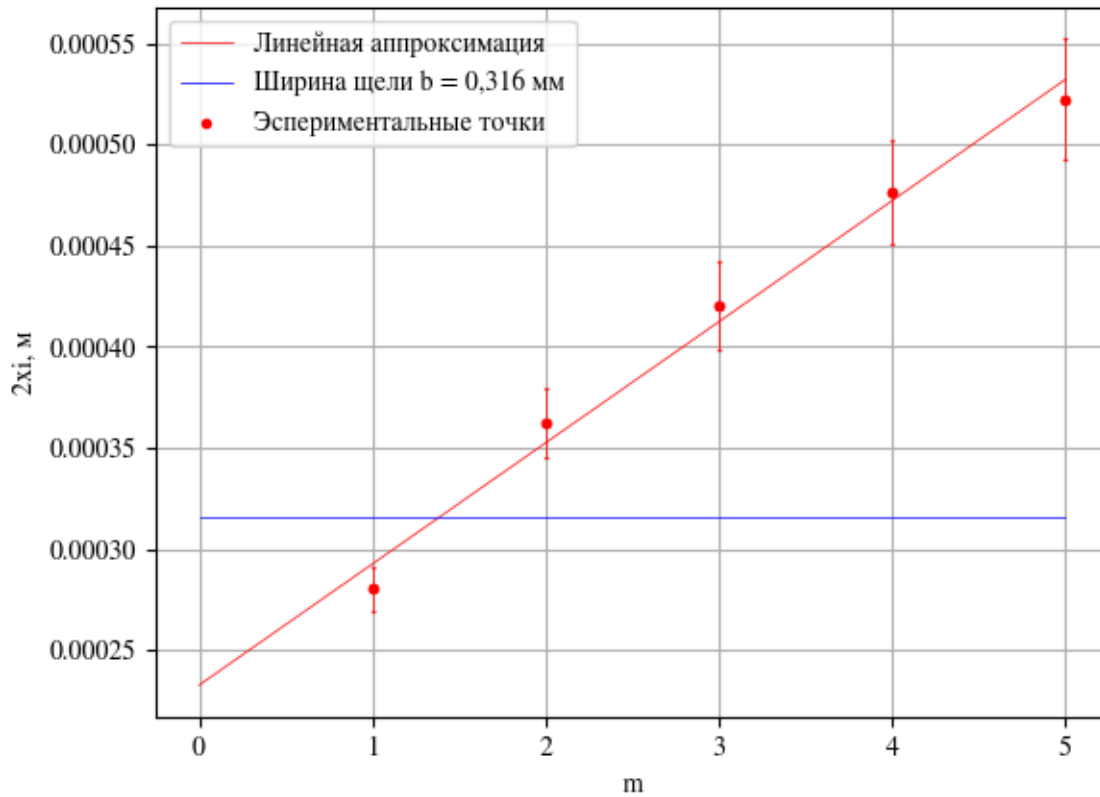


Рисунок 2 – График зависимости  $2\xi$  от количества дифракционных полос

Методом наименьших квадратов были получены следующие значения для коэффициента наклона прямой

$$k = 60 \pm 3 \text{ мкм}$$

На графике также отмечена прямая  $b = 316 \text{ мкм}$  – измеренная ширина щели.

Рассмотрим явление дифракции на краю экрана. Представим, что край экрана является полубесконечной плоскостью. Для точки наблюдения  $P$ , расположенной за экраном, открыты лишь половина всех кольцевых зон Френеля. Воспользуемся методом векторных диаграмм. Формула для поля при дифракции Френеля на круговом отверстии выглядит следующим образом

$$g = A_0 \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \int_0^r e^{i\frac{k}{2z}\rho^2} 2\pi\rho d\rho, \quad (2)$$

при этом интегрирование по углу  $\phi$  дает  $2\pi$ , а в случае края экрана –  $\pi$ . Длина соответствующего вектора в два раза меньше вектора, отвечающего за открытие очередной зоны Френеля. И поэтому для дифракции на краю экрана интенсивность падающего света в точке  $P$  будет в 4 раза меньше, чем интенсивность  $I_0$  в случае, когда экран отсутствует.

Смещение точки влечёт за собой частичное открытие всех оставшихся половинок зон Френеля. При этом "быстрее всего" начинает открываться I-ая зона, поэтому интенсивность резко начинает возрастать. Когда I-ая зона полностью откроется, будет наблюдаться пик интенсивности. Затем быстрее начнёт открываться II-ая зона – интенсивность спадает до локального минимума. С уходом точки на бесконечность зависимость  $I(x)$  асимптотически стремится к значению  $I_0$  ("почти все" зоны Френеля открываются).

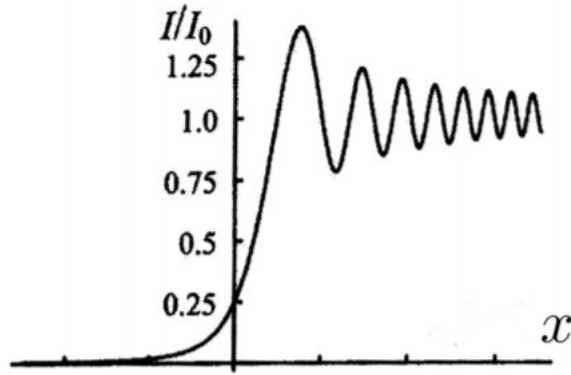


Рисунок 3 – Зависимость относительной интенсивности  $I/I_0$  от расстояния  $x$  от точки наблюдения до границы экрана при дифракции на краю

Рассмотрим метод векторных диаграмм и спираль Корню. Для этого рассмотрим малый вектор, длина которого равна  $d\xi$ , а угол наклона к оси  $\eta$  равен подынтегральной функции. Результирующее колебание есть сумма всех малых векторов. Для удобства будем рассматривать только верхнюю половину щели. По мере рассмотрения вклада от всё более удалённых полос вектор результирующего колебания будет описывать некоторую спираль. Найдём значение  $\xi_1$ , при котором набег фазы будет равен  $\pi$ . Для этого необходимо подынтегральную функцию в (2) приравнять к  $\pi$ .

$$\xi_1 = \sqrt{\lambda z}.$$

Величина  $\xi_1$  определяет ширину двух I-ых зон Шустера в нижней и верхней полуплоскости. Каждый последующий набег фазы на величину  $\pi$  определяет очередной полувиток спирали. Каждая открытая зона соответствует локальным минимумам или максимумам амплитуды световой волны в точке наблюдения. Поэтому при исследовании дифракционной картины можно наблюдать полосы с максимумами и минимумами интенсивности. Зона Шустера с номером  $m$  определяется формулой (1).

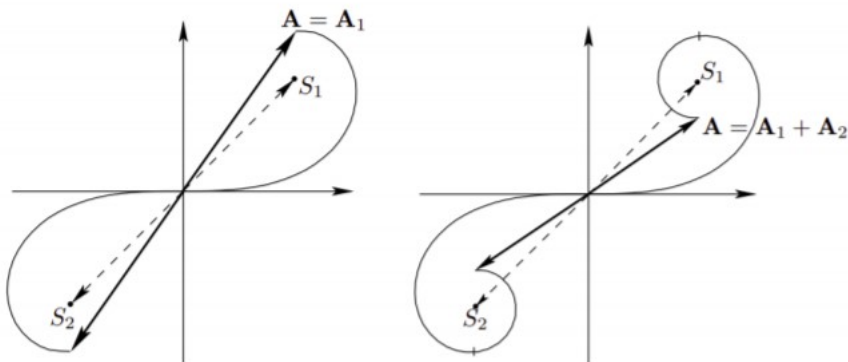


Рисунок 4 – Спираль Корню

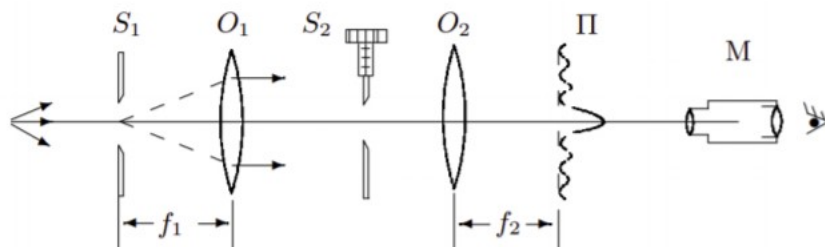


Рисунок 5 – Схема установки для наблюдения дифракции Фраунгофера на щели

## 2 Дифракция Фраунгофера на щели

В отличие от установки для исследования дифракции Френеля, в установке по исследованию дифракции Фраунгофера появляется объектив  $O_2$  для работы с более широкими щелями. Этот объектив не вносит дополнительной разности хода лучей, поэтому в фокальной плоскости линзы  $O_2$  наблюдается неискаженная дифракционная картина.

Снимем зависимость положения минимума дифракционной картины Фраунгофера на щели от номера минимума  $m$ . Наблюдаемое число минимумов равно 10 – расположим их в отрезок от -5 до 5. Экспериментальные данные представлены в таблице 2.

$m$	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
$x$ , мкм	-64	-41	-27	-8	12	29	53	71	87	104	127

Таблица 2 – Результаты второго эксперимента

Ширина щели в данном эксперименте составила

$$b = 1630 \pm 20 \text{ мкм.}$$

По данным таблицы 2 был построен график на рис. 6. Коэффициент наклона данного графика, полученный с помощью МНК равен

$$k = 18.87 \pm 0.19 \text{ мкм.}$$

Это значение  $k$  равно расстоянию между соседними максимумами

$$\Delta X = 18.87 \pm 0.19 \text{ мкм.}$$

По формуле (3) можно рассчитать значение ширины щели.

$$b = \frac{\lambda}{\Delta X} f_2, \quad (3)$$

где  $f_2$  – фокусное расстояние линзы 2, равное 12,5 см. В данном эксперименте было получено следующее значение ширины щели

$$b = 3617 \pm 38 \text{ мкм,}$$

что по порядку величины согласуется со значением, измеренным в ходе лабораторной работы.

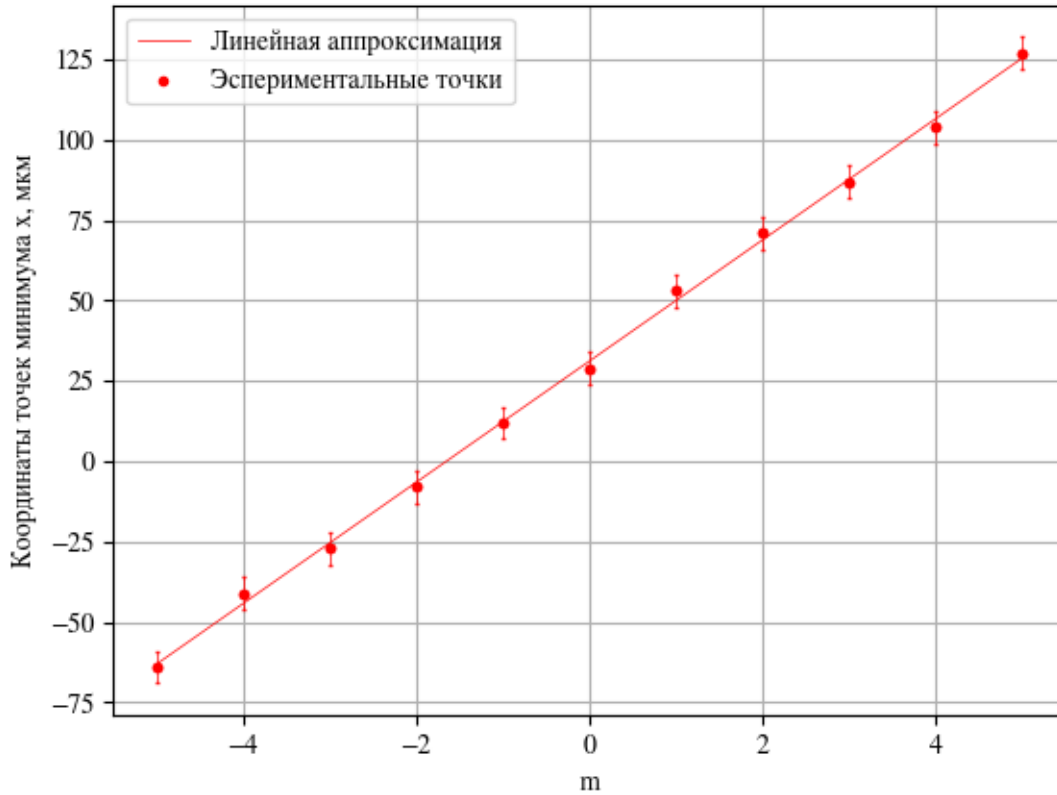


Рисунок 6 – Зависимость координаты минимума от номера минимума дифракционной картины

### 3 Дифракция Фраунгофера на двух щелях

Для наблюдения дифракции Фраунгофера на двух щелях в установке следует заменить щель S2 экраном Э с двумя щелями. При этом для оценки влияния ширины входной щели на чёткость дифракционной картины вместо входной щели S<sub>1</sub> 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. Если входная щель достаточно узка, то дифракционная картина в плоскости П (рис. 6) подобна той, что получалась при дифракции на одной щели, однако теперь вся картина испещрена рядом дополнительных узких полос. Наличие этих полос объясняется суперпозицией световых волн, приходящих в плоскость наблюдения через разные щели экрана Э. В центре главного дифракционного максимума располагается светлая полоса, так как при  $\theta = 0$  разность хода между этими волнами равна нулю (все лучи, приходящие в фокус объектива O<sub>2</sub>, синфазны). Светлая интерференционная полоса наблюдается и во всех тех случаях, когда указанная разность хода равна целому числу длин волн. Таким образом, угловая координата  $\theta_m$  интерференционного максимума m-го порядка определяется соотношением

$$d \cdot \theta_m = m\lambda, \quad (4)$$

где d – расстояние между щелями.

Линейное расстояние  $\delta x$  между соседними интерференционными полосами в плоскости П равно

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

Число  $n$  интерференционных полос, укладывающихся в области центрального дифракционного максимума равно

$$n = \frac{2d}{D}, \quad (6)$$

где  $D$  – ширина щели.

При дифракции свет  $a$  на двух щелях чёткая система интерференционных полос наблюдается только при достаточно узкой ширине входной щели  $S$ . При увеличении её ширины интерференционная картина периодически пропадает и появляется вновь, но полосы при этом оказываются сильно размытыми и видны плохо. Это явление объясняется наложением интерференционных картин от разных элементов широкой щели  $S$ . Первое размытие интерференционных полос возникает при условии

$$\frac{b}{f_1} = \frac{\lambda}{d}. \quad (7)$$

В ходе эксперимента с помощью окулярной шкалы были получены следующие значения:

Расстояние между дальними минимумами –  $320 \pm 20$  мкм, между ними 5 светлых полос, а ширина щели  $890 \pm 20$  мкм. Расстояние между щелями  $800 \pm 20$  мкм.

$$\delta x = \frac{320}{5} = 64 \pm 4 \text{ мкм.}$$

Из формулы (5) получается значение величины  $d$

$$d = \frac{\lambda f_2}{\delta x} = 870 \pm 67 \text{ мкм.}$$

Число полос внутри главного максимума по формуле (6)

$$n = 1.96 \pm 0.16$$

Рассчитанное число полос отличается от экспериментально полученного, но по порядку величины совпадает с ним.

По формуле (7) рассчитаем ширину щели  $b$ , при которой размывается интерференционная картина.

$$b = \frac{\lambda f_1}{d} = 78 \pm 6 \text{ мкм.}$$

Экспериментально было получено значение 772 мкм, что отличается на порядок от рассчитанного.

#### 4 Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента

Для проведения эксперимента нужно, не меняя, положения линз и микроскопа вместо щели  $S$  поставить двойную щель и, перемещая её вдоль оси, получить в поле зрения микроскопа чёткое, симметричное изображение двойного источника. Поставить между линзами щель  $S_2$  и, уменьшая её ширину, наблюдать за ухудшением качества изображения. Подобрать ширину щели  $S_2$  так, чтобы изображения обеих щелей почти сливались, но всё-таки ещё воспринимались раздельно. Записать показания микрометрического винта щели  $S_2$  (ширину  $D_0$ ). Поставить двойную щель перед микроскопом и измерить с помощью микрометрического винта поперечных салазок микроскопа расстояние  $d$  между щелями и ширину каждой щели  $D$ .

Расстояние между щелями  $800 \pm 20$  мкм. Ширина левой щели  $160 \pm 20$  мкм, правой –  $240 \pm 20$  мкм.

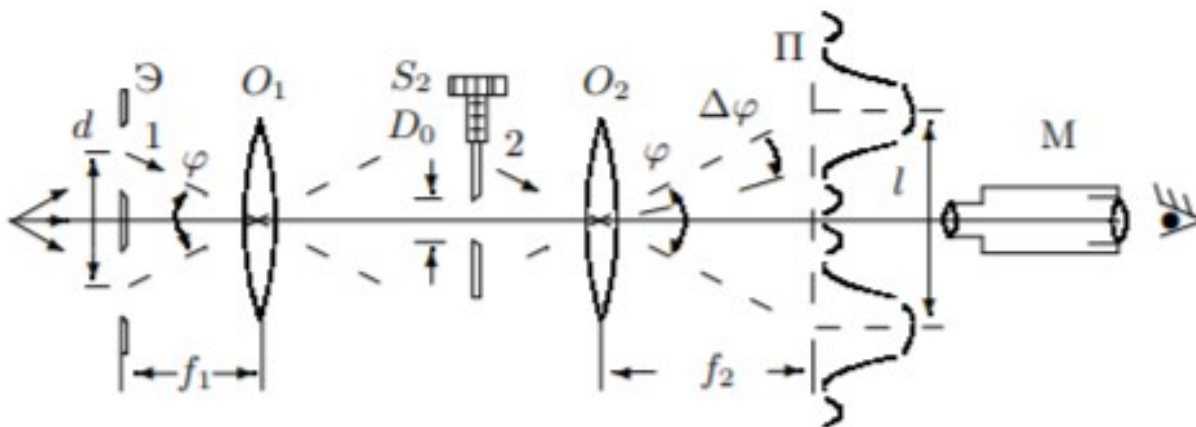


Рисунок 7 – Схема установки для исследования разрешающей способности оптического инструмента

Параллельные лучи 1 и 2, проходящие через центры линз, определяют положения изображений двойной щели. Согласно законам геометрической оптики расстояние  $l$  между изображениями щелей в плоскости  $\Pi$  равно

$$l = d \frac{f_2}{f_1}. \quad (8)$$

Когда полуширина дифракционного изображения превышает расстояние между изображениями, то по виду дифракционной картины трудно определить, представляет собой источник двойную или одиночную щель. Предельные условия, при которых ещё можно различить, имеем мы дело с одной или двумя щелями, для разных наблюдателей различны. Для того чтобы исключить связанный с этим произвол, пользуются обычно критерием Рэлея, который приблизительно соответствует возможностям визуального наблюдения: изображения считаются различимыми, когда максимум одного дифракционного пятна совпадает с минимумом другого.

$$\frac{\lambda}{D_0} = \frac{l}{f_2} = \frac{d}{f_1} \quad (9)$$

По формуле (9)

$$D_0 = \frac{\lambda f_1}{d} = 85.3 \pm 2.2 \text{ мкм.}$$

Экспериментальные данные отсутствуют.

## 5 Вывод

В ходе лабораторной работы удалось наблюдать дифракции Френеля и Фраунгофера на щели и дифракцию Фраунгофера на двух щелях; сравнить рассчитанные значения с измеренными во время экспериментов.



## 6 Литература

1. Лабораторный практикум по общей физике: учеб. пособие. В трёх томах. Т. 2. Оптика / А.В. Максимычев, Д.А. Александров, Н.С. Берюлёва и др.; под ред. А.В. Максимычева. М.: МФТИ, 2014. 446 с.