
Московский Физико-Технический Институт
(государственный университет)

Лабораторная работа по курсу общей физики № 4.3.1

Изучение дифракции света.

Автор:

Филиппенко Павел Б01-001



Долгопрудный, 2022

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

Приборы и материалы Оптическая скамья, ртутная лампа, монохроматор, щели с регулируемой шириной, рамка с вертикальной нитью, двойная щель, микроскоп на поперечных салазках с микрометрическим винтом.

Описание работы

А. Дифракция Френеля

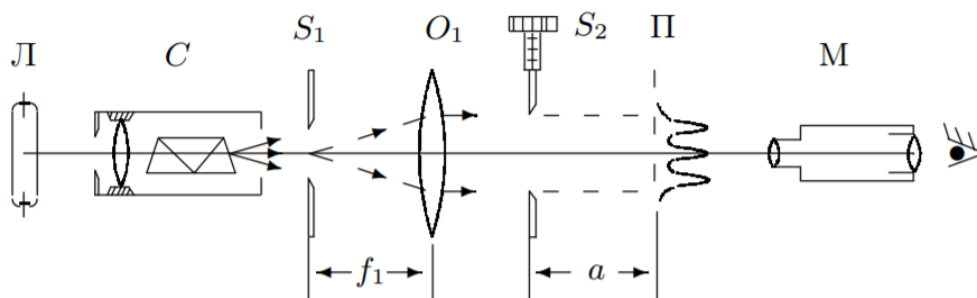


Рис. 1: Схема установки 1.

Схема установки 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. Щель S_2 освещается параллельным пучком монохроматического света с помощью коллиматора, образованного объективом O_1 и щелью S_1 , находящейся в его фокусе. На S_1 сфокусированно изображение спектральной линии, выделенной из спектра ртутной лампы Л при помощи монохроматора С, в котором используется призма прямого зрения.

Распределение интенсивности света в плоскости П рассчитаем с помощью зон Френеля. При освещении S_2 параллельным пучком лучей (плоская зона) зоны Френеля представляют собой плоскости, параллельные краям щели. 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 П. Вид наблюдаемой картины определяется числом Френеля Φ :

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

– число зон Френеля, которые укладываются в ширине щели D . $p = \frac{1}{\Phi^2}$ называется *волновым параметром*. Дифракционной картины нет, когда П совпадает с плоскостью щели. При малом удалении от щели $\Phi \gg 1$ и картина наблюдается в узкой области на границе света и тени у краёв экрана. При последующих удалениях две группы дифракционных полос перемещаются независимо и каждая образует картину дифракции Френеля на экране. Распределение интенсивности может быть найдено с помощью спирали Корню. При дальнейшем увеличении a две системы полос сближаются и накладываются друг на друга,

распределение интенсивности определяется числом зон Френеля в полуширине щели. Если их m , то будет наблюдаться $m - 1$ тёмная полоса.

Б. Дифракция Фраунгофера на щели

Для выкладок ниже нам потребуется знать принцип Гюйгенса-Френеля. Он формулируется следующим образом:

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.

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 .

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

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

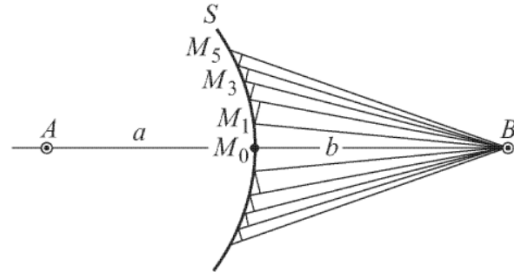


Рис. 2: Построение зон Френеля

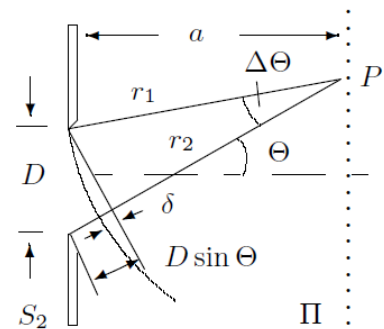


Рис. 3: К фазовым соотношениям при дифракции Фраунгофера

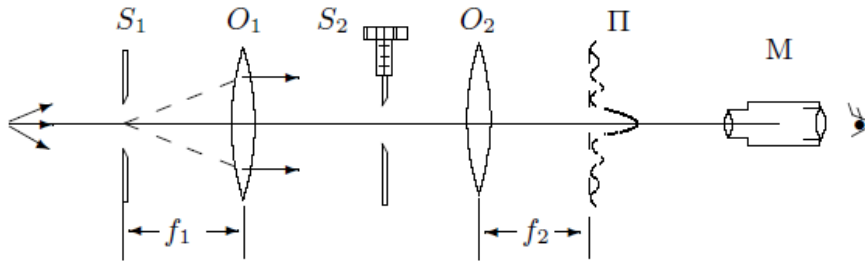


Рис. 4: Схема установки 2.

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 Э с двумя щелями. При этом для оценки влияния ширины входной щели на чёткость вместо S_1 поставим щель с микрометрическим винтом. Два дифракционных изображения входной щели,

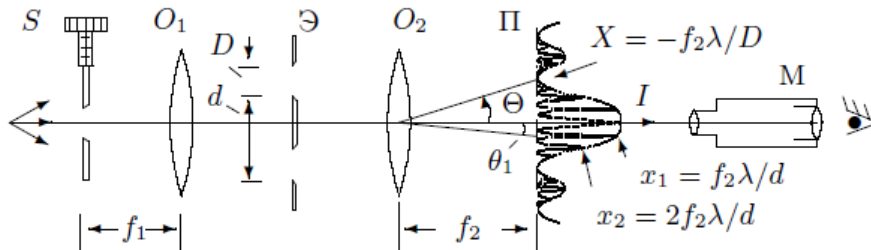


Рис. 5: Схема установки 3.

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 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 П 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:

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

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

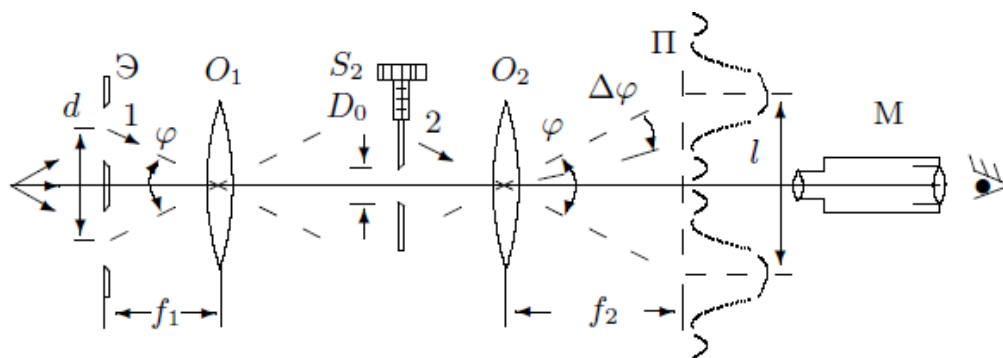


Рис. 6: Схема установки 4.

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 отдельные. Поместим вместо S_1 экран \mathcal{E} 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 Π равно

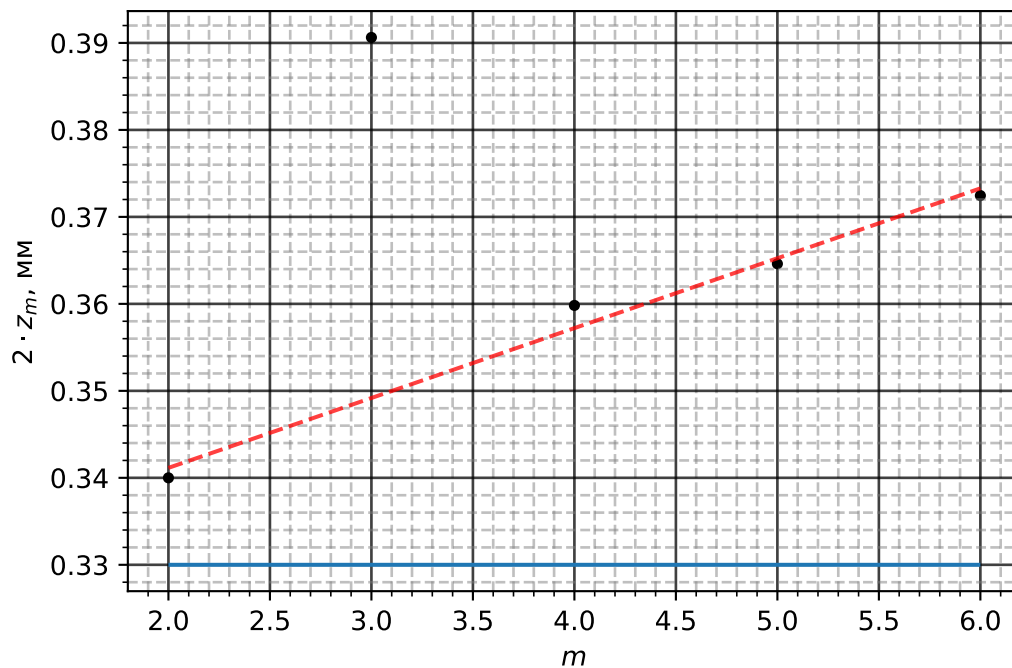
$$l = \varphi f_2 = d \frac{f_2}{f_1}. \quad (12)$$

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

Рабочая длина волны $\lambda = 578$ нм

Рис. 7: $2z_m = f(m)$

Добившись наиболее четкого изображения щели, запишем начальное положение микроскопа $x_0 = 41.6$ см. Постепенно отодвигая микроскоп от щели S_2 , заметим по шкале положение микроскопа, при котором на фоне щели видна одна темная полоса. Смещение микроскопа от первоначального положения (от резкого изображения щели) даёт величину $a = x - x_0$ – расстояние от щели до плоскости наблюдения. Приближая микроскоп к щели, снимем зависимость координаты микроскопа от числа n наблюдаемых тёмных полос (при этом количество открытых зон Френеля $m = n + 1$). Результаты измерений приведены в таблице 1.

n	m	x , см	a , см	$2 \cdot z_m$, мм
1	2	44,1	2,5	0,34
2	3	43,8	2,2	0,39
3	4	43	1,4	0,36
4	5	42,75	1,15	0,36
5	6	42,6	1	0,37

Таблица 1: Изучение дифракции Френеля

Измерим ширину D щели S_2 , используя микрометрический винт поперечных салазок микроскопа.

$$D = (0.33 \pm 0.01) \text{ мм}$$

Результат совпадает с показаниями микрометрического винта щели S_2 . Сравним размер зон Френеля с измеренной шириной D щели S_2 . Для этого построим график зависимости $2z_m = f(m)$ и отложим на нем величину, равную D рис 7.

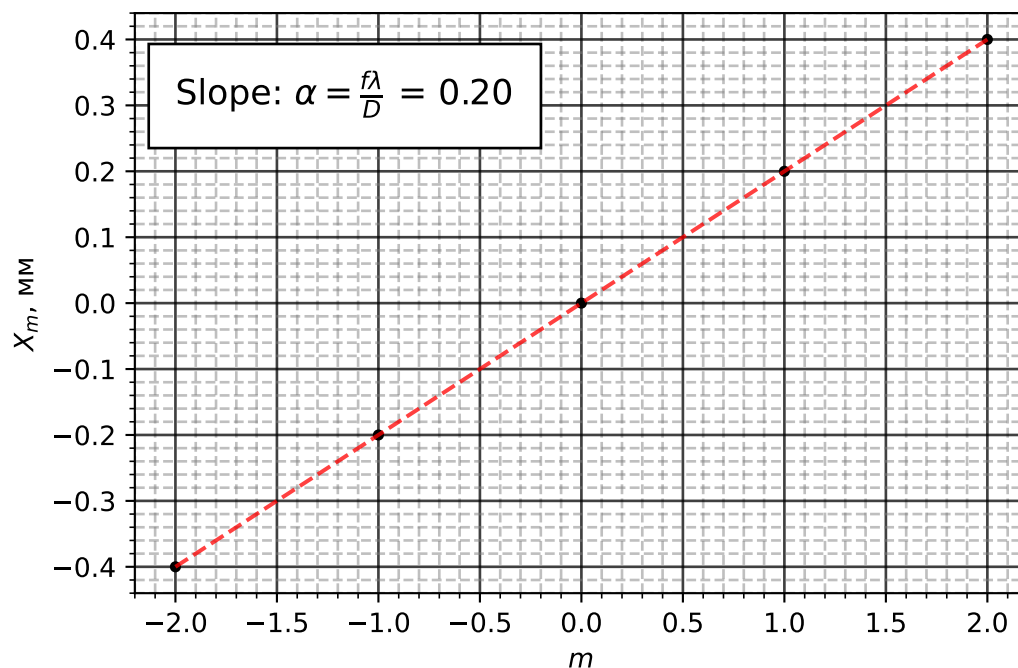


Рис. 8

Б. Дифракция Фраунгофера на щели

Измерим с помощью винта поперечного перемещения микроскопа координаты X_m нескольких дифракционных минимумов. Найдём ширину щели.

m	-2	-1	0	1	2
X_m , мм	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4

Таблица 2

$$D = (0.33 \pm 0.01) \text{ мм}$$

Построим график, откладывая по горизонтали номер минимума m , а по вертикали – его координату X_m . По углу наклона прямой определим среднее расстояние между соседними минимумами; рассчитаем ширину щели D по формуле

$$D = \frac{fm\lambda}{X_m}$$

Таким образом, $\Delta X = 0.2 \text{ мм}$, $D = 0.36 \text{ мм}$

В. Дифракция Фраунгофера на двух щелях

В установке для дифракции Фраунгофера для одной щели заменяем щель S_2 экраном Э с двумя щелями. В итоге получаем характерное распределение максимумов и минимумов.

Определим расстояние между темными полосками внутри центрального максимума. Посчитаем число светлых промежутков между ними. Измерим ширину центрального максимума. $X = (0.44 \pm 0.01) \text{ мм}$, между ними $n = 6 \pm 1$ светлых промежутков.

Погрешность для X взялась из половины цены деления, а для n она появилась в связи с тем, что картина полос размыта в области низкой видности. Далее определим расстояние δx между минимумами по формуле $\delta x = \frac{\lambda}{n} = (73 \pm 10)$ мкм. Далее мы можем получить расстояние между щелями $d = \frac{\lambda f_2}{\delta x} = (1.0 \pm 0.2)$ мм.

Г. Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента

Если перед O_2 расположить S_2 , то изображение объекта будет искажено из-за дифракции. Качественной характеристикой этого искажения может служить φ_{min} — минимальное угловое между объектами (источниками).

Поставить между линзами щель S_2 и уменьшая ее ширину наблюдать ухудшение изображения. Подобрать ширину S_2 так, чтобы изображения почти сливались.

$$b_0 = (0,093 \pm 0,005)\text{мм}$$

Поставить двойную щель и измерить расстояние между щелями и толщину самих щелей.

$$d_0 = (0,93 \pm 0,05)\text{мм}$$

$$D1 = (0,18 \pm 0,01)\text{мм}$$

$$D2 = (0,36 \pm 0,01)\text{мм}$$

Вывод

В ходе работы было изучено явление дифракции света - дифракция Френеля на щели и на препятствии, дифракция Фраунгофера на одной и двух щелях.

- При исследовании явления дифракции Френеля на щели убедились, что ширина зон Френеля примерно равна ширине щели
- При исследовании явления дифракции Фраунгофера на щели получили значение ширины щели, примерно равно измеренному непосредственно с помощью регулятора ширины щели.
- При исследовании явления дифракции Фраунгофера на двух щелях было получено значение расстояния между щелями, примерно равное измеренному с помощью микроскопа.