Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

Отчёт по лабораторной работы 4.3.1

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА

Выполнил студент:
Сериков Василий Романович
группа: Б03-102

Москва, 2023 г.

Аннотация

Цель работы:

Исследовать явления дифракции Френеля и Фраунгофера на одной и двух щелях.

В работе используется:

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

Теория:

А. Дифракция Френеля

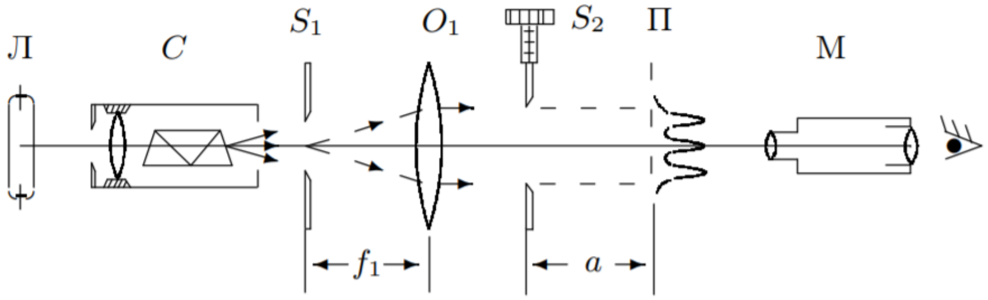

Рис. 1: Схема установки 1.

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 монохроматор C, 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 определеяется 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 соотношение

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

где a – расстояние от щели до плоскости П. Вид наблюдаемой картины определяется *числом Френеля* Ф:

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

– 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 убласти 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 набюдаться $m - 1$ 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*

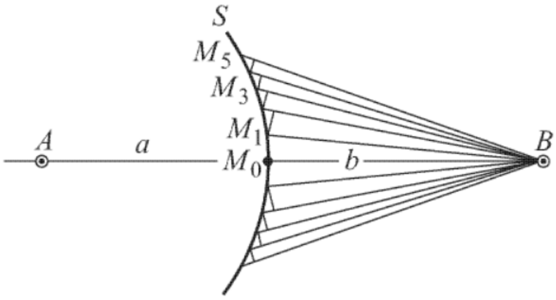

Рис. 2: Построение зон Френеля

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

$$r_i = i\sqrt{a\lambda} \tag{2}$$

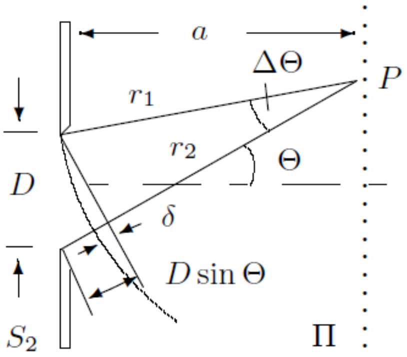

Рис. 3: К фазовым соотношениям при дифракции Фраунгофера

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

$$D \ll \sqrt{a\lambda} \tag{3}$$

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

$$\Delta = r_2 - r_1 \approx D\sin\theta \approx D \cdot \theta \tag{4}$$

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

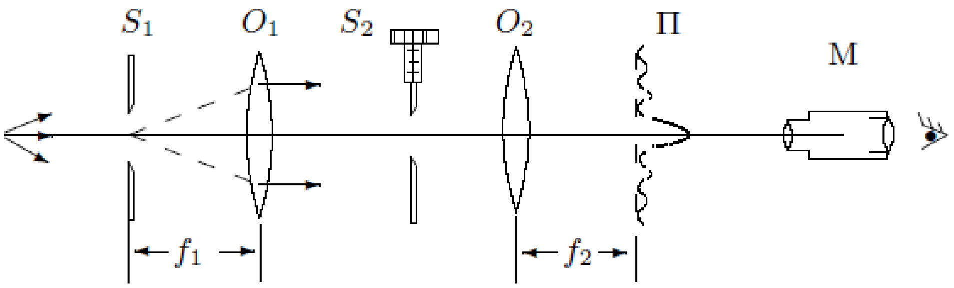

Рис. 4: Схема установки 2.

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

$$X = f_2 \tan\theta \approx f_2\theta. \tag{5}$$

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

$$\theta_m = \frac{m\lambda}{D} \tag{6}$$

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

$$X_m = f_2 m \frac{\lambda}{D} \tag{7}$$

B. 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, 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

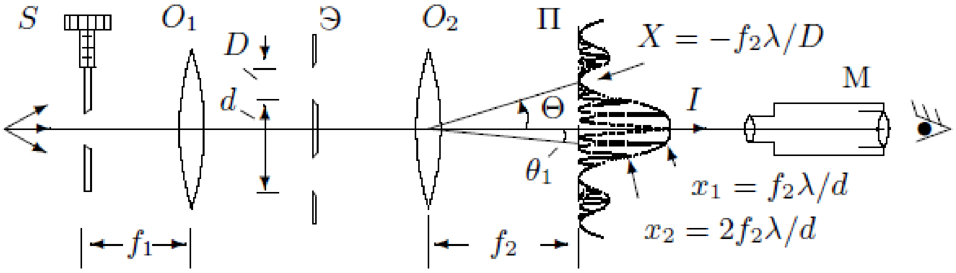

Рис. 5: Схема установки 3.

подобна той, что получалась при дифракции на одной щели, однако вся картинка испещерена рядом дополнительных узких полос, наличие которых объясняется суперпозицией световых волн через разные щели. Светлая интерферецонная полоса наблюдается в случаях, когда разность хода равна целому числу длин волн. Таким образом, угловая координата максимума порядка m равна

$$\theta_m = \frac{m\lambda}{d}, \tag{8}$$

где d – расстояние между щелями. Отсюда расстояние между соседними интерфереционными полосами в плоскости П равно

$$\delta x = f_2 \frac{\lambda}{d} \tag{9}$$

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

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

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

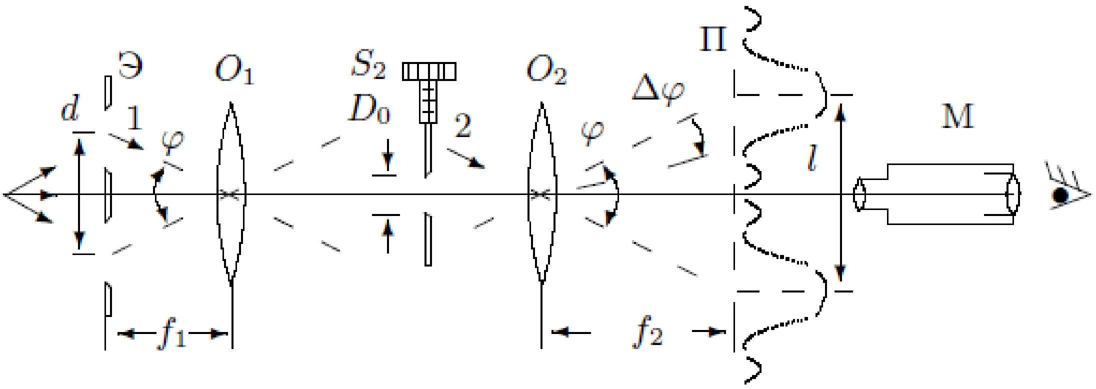

Рис. 6: Схема установки 4.

В отсутствие щели S_2 линзы O_1 и O_2 создают на плоскости П изоюражение щели S_1 и это изображение рассматриваются микроскопом М. 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 экран Э с двумя щелями с расстоянием d. Тогда на S_2 будут падать два пучка света с углом

$$\varphi = \frac{d}{f_1} \tag{11}$$

Из геометрии расстояние l между изображениями щелей в плоскости П равно

$$l = \varphi f_2 = d\frac{f_2}{f_1}. \tag{12}$$

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. Снимем зависимость координаты x микроскопа от числа n, ширину z_m m зоны Френеля вычислим по формуле (1). Полученные данные занесем в таблицу 1.

m	x, см	z_m, мкм
1	5,35	171
2	3,0	181
3	2,4	198
4	2,0	209
5	1,7	215
6	1,55	225
7	1,3	227

Таблица 1: Полученные значения положения и ширины m зон Френеля. $\sigma_x = 0.05$ см, $\sigma_{z_m} = 10$ мкм

2. Сравним значение ширины щели измеренной по шкале щели с $2z_0$.

$$D = 307 \pm 5\text{мкм} <=> 2z_0 = 320 \pm 20\text{мкм}$$

Б. Дифракция Фраунгофера на щели

3. Измерим с помощью винта поперечного перемещения микроскопа координаты x_m нескольких дифракционных минимумов (от -m до +m)

m	δx, мм
1	0,10
2	0,24
3	0,36
4	0,48
5	0,61

Таблица 2: Полученные значения положения дифракционных минимумов

4. Построим график, откладывая по горизонтали номер минимума m, а по вертикали — его координату x_m (от -m до +m). По углу наклона прямой определим среднее расстояние Δx между соседними минимумами; рассчитаем ширину щели D по формуле (7) и сравним с измеренной.

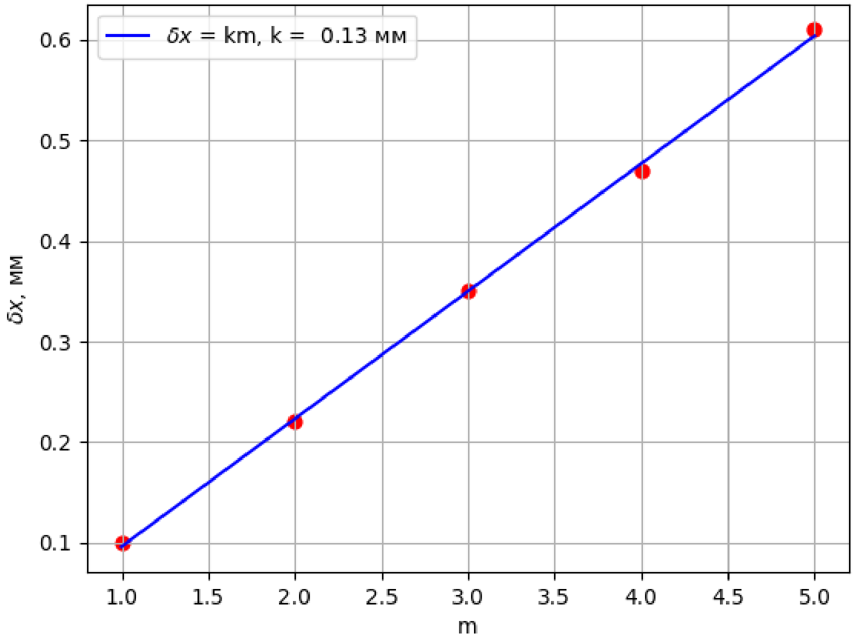

Рис. 7: График зависимости $\delta x(m)$.

$$\delta x = f_2 \frac{m\lambda}{D} <=> D = f_2 \frac{\lambda}{k} = 370 \pm 20 \text{ мкм}$$

$$D = 309 \pm 5\text{мкм, расчет по шкале щели}$$

B. Дифракция Фраунгофера для двух щелей

5. Измерим ширину центрального максимума и количество интерференционных максимумов, которые помещаются в него. Определим ширину щели с помощью формулы (9) и сравним с измеренной по микроскопу величиной.

$$\delta x = f_2 \frac{\lambda}{d} => d = f_2 \frac{\lambda}{\delta x} = 1,6 \pm 0,1\text{мм}$$

$$D = 1,28 \pm 0,02 \text{ мм, измерено по микроскопу}$$

6. Определим ширину щели S_2 с помощью формулы $\frac{b}{f_1} = \frac{\lambda}{D}$ и сравним с величиной измеренной микрометром на щели

$$b = \frac{\lambda f_1}{D} = 59 \pm 3 \text{ мкм}$$

$$b = 63 \pm 1 \text{ мкм, измерено с помощью микрометра}$$

Г. Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента

7. Проверим разрешающею способность по критерию Рэлея, для этого сравним ширину измеренную по микрометру щели с расчетом по формуле $\frac{\lambda}{b} < \frac{d}{f_1}$

$$\frac{b}{\lambda} > \frac{f_1}{d} => b > 59 \pm 3 \text{ мкм}$$

Обсуждение результатов и выводы:

	Френель	Фраунгофер 1 щель	Фраунгофер 2 щели
Расчет	D = 307±5 мкм	D = 370±20 мкм	D_1 = 1,6±1 мкм b = 59±3 мкм
Измерения	D = 320 ±20 мкм	D = 309±5 мкм	D_1 = 1,28±0,02 мкм b = 63±1 мкм

Таблица 3: Сравнительная таблица. D - ширина щели S_2, D_1 - расстояние между щелями экрана, b - ширина щели S_2

В данной работе мы исследовали 2 вида дифракции на щели: Френеля и Фраунгофера. По полученным результатам видно, что теория с практикой сходится не во всех опытах. Можно попробовать объяснить это тем, что система может быть плохо отцентрирована или некачественно сняты показания приборов. Также имеет место качество используемых измерительных приборов.