

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

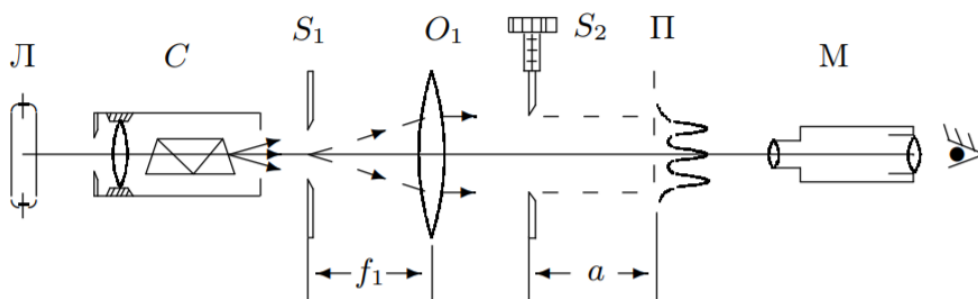


Рис. 1: Схема установки 1.

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 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*  $\Phi$ :

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

– число зон Френеля, которые укладываются в ширине щели  $D$ .  $p = \frac{1}{\Phi^2}$  называется *волновым параметром*. Дифракционной картины нет, когда  $\Pi$  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 точку наблюдения  $P$ , с хорошим приближением равна

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

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

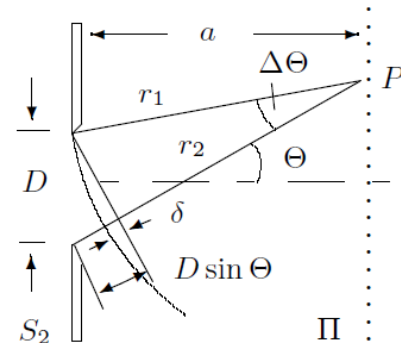
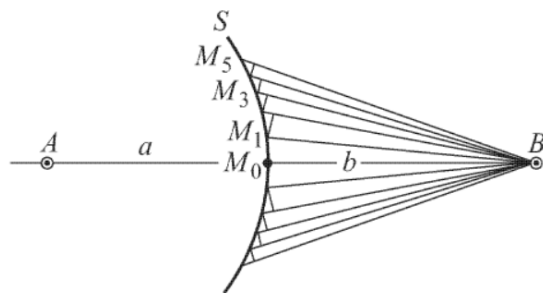


Рис. 3: К фазовым соотношениям при дифракции Фраунгофера

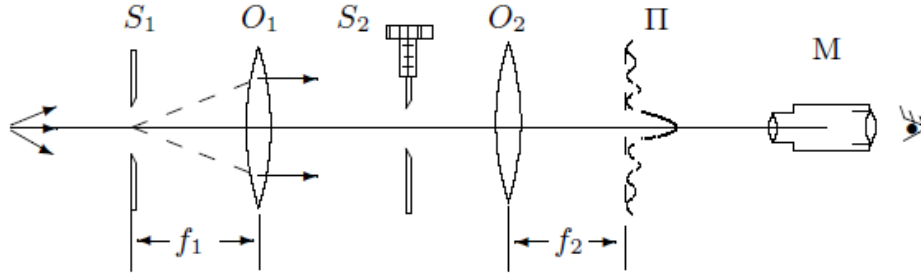


Рис. 4: Схема установки 2.

Дифракционная картина здесь наблюдается в фокальной плоскости объектива  $O_2$ . Каждому значению  $\theta$  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  $\theta_1$  такому, что в точке наблюдения разность хода пробегаем все значения от 0 до  $2\pi$ . 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, одно из

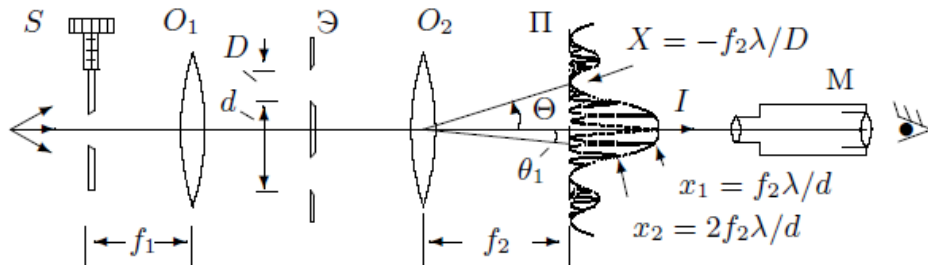


Рис. 5: Схема установки 3.

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  $\Pi$  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  $\Pi$  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*

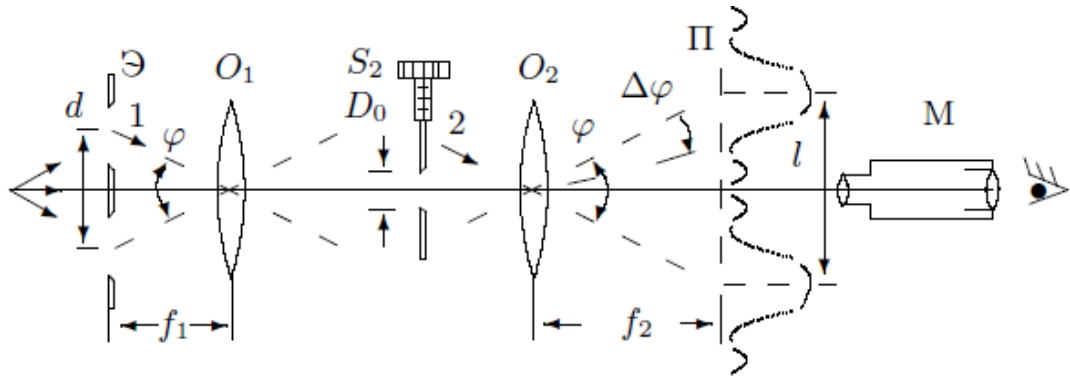


Рис. 6: Схема установки 4.

В отсутствие щели  $S_2$  линзы  $O_1$  и  $O_2$  создают на плоскости  $\Pi$  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  $\varphi_{min}$  – минимальное угловое расстояние между объектами (источниками), которые всё ещё воспринимаются как раздельные. 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  $\Pi$  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. 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  $2z_0$ .

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

#### Б. Дифракция Фраунгофера на щели

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

m	$\delta x$ , 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  $\Delta x$  между соседними минимумами; рассчитаем ширину щели  $D$  по формуле (7) и сравним с измеренной.

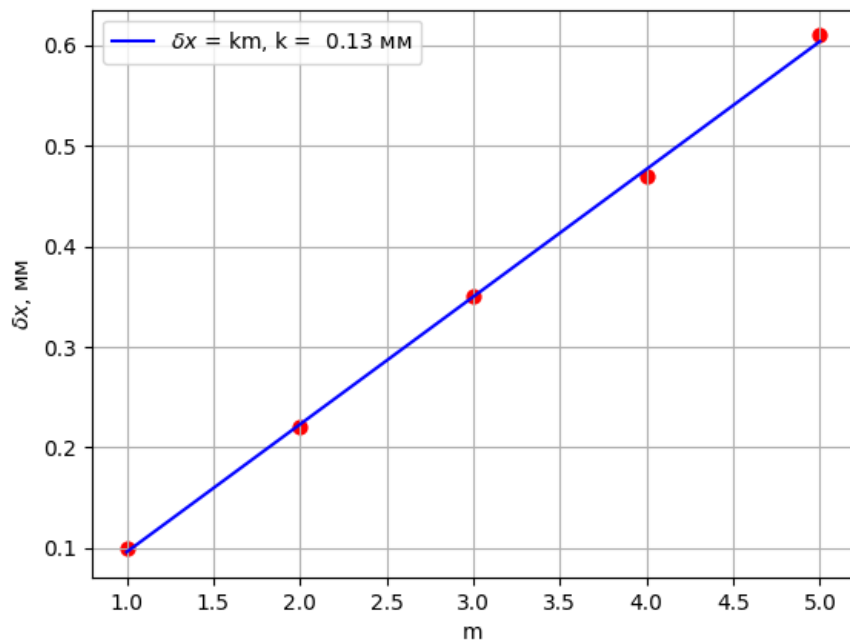


Рис. 7: График зависимости  $\delta x(m)$ .

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

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

### В. Дифракция Фраунгофера для двух щелей

- 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.

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

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

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

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

**Обсуждение результатов и выводы:**

	Френель	Фраунгофер 1 щель	Фраунгофер 2 щели
Расчет	$D = 307 \pm 5 \text{ мкм}$	$D = 370 \pm 20 \text{ мкм}$	$D_1 = 1,6 \pm 1 \text{ мкм}$ $b = 59 \pm 3 \text{ мкм}$
Измерения	$D = 320 \pm 20 \text{ мкм}$	$D = 309 \pm 5 \text{ мкм}$	$D_1 = 1,28 \pm 0,02 \text{ мкм}$ $b = 63 \pm 1 \text{ мкм}$

Таблица 3: Сравнительная таблица. D - ширина щели  
S<sub>2</sub>, D<sub>1</sub> - расстояние между щелями экрана, b - ширина  
щели S<sub>2</sub>

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.