

Работа 4.3.1

Изучение дифракции света

Малиновский Владимир

galqiwi@galqiwi.ru

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.

Описание работы

А. Дифракция Френеля

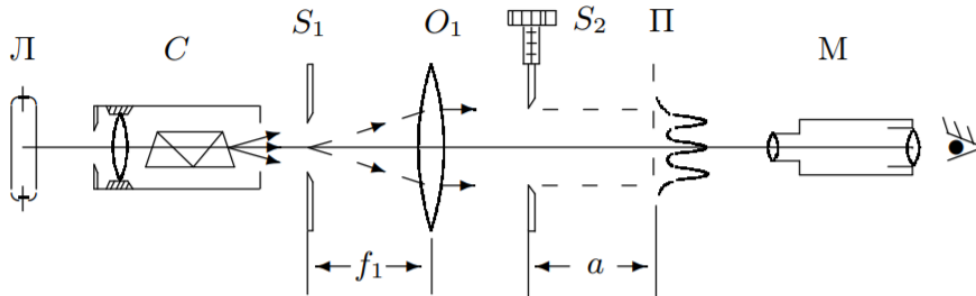


Рис. 1: Схема установки 1.

Схема установки представлена на Рис. 1. Световые лучи освещают щель S_2 и испытывают на ней дифракцию. Дифракционная картина рассматривается с помощью микроскопа M , сфокусированного на некоторую плоскость наблюдения Π . 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 L при помощи монохроматора C , в котором используется призма прямого зрения.

Распределение интенсивности света в плоскости Π 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 Π . 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 Π 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

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

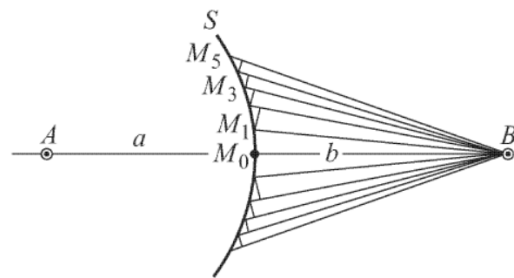


Рис. 2: Построение зон Френеля

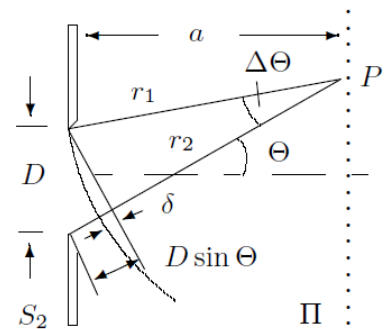


Рис. 3: К фазовым соотношениям при дифракции Фраунгофера

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

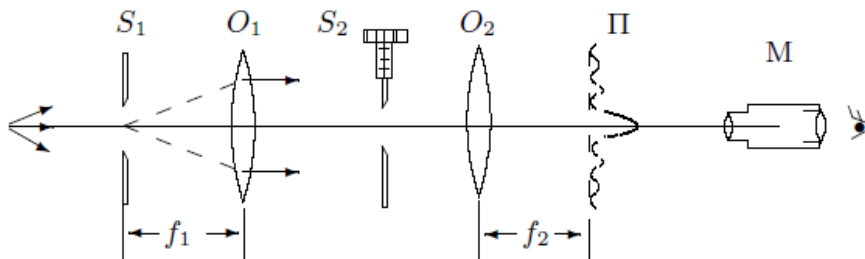


Рис. 4: Схема установки 2.

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

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

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 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)

$$X_m = f_2 m \frac{\lambda}{D} \quad (7)$$

Ход работы

Дифракция Френеля

1-4

Соберем установку на рис. 1. Для этого включим ртутную лампу и поставим после нее фильтр с щелью. После щели нужно будет поставить линзу так, чтобы щель была в фокусе. Для этого воспользуемся зрительной трубой, настроенной на бесконечность. Поскольку, если линза находится в нужном месте, из нее выходит пучок параллельных лучей, зрительная труба, настроенная на бесконечность, должна показать четкое изображение щели. После установки линзы поместим щель S_2 и микроскоп после неё. На этом сборка установки завершена.

5

Найдем нуль микрометрического винта щели S_2 . Для этого посмотрим сквозь щель на лампу накаливания и начнем поворачивать винт из нулевого положения до тех пор, пока свет от лампы не станет виден. При этом положение винта будет нулем.

$d, \text{ мкм}$	20	17	18
------------------	----	----	----

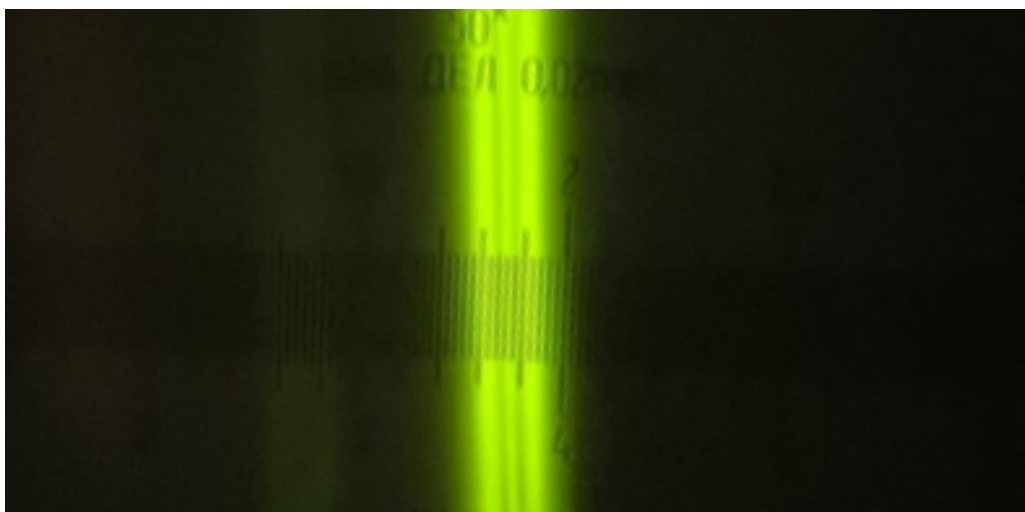
$$\Delta d = 0.5, \text{ мкм}$$

$$\langle d \rangle = 18.3 \pm 1.0, \text{ мкм}$$

(Погрешность d была посчитана как корень суммы квадратов статистической и приборной).

6-9

Поставив микроскоп за щелью, получим дифракционную картину. Заметим, что количество полос должно увеличиваться по мере отодвигания микроскопа от щели.

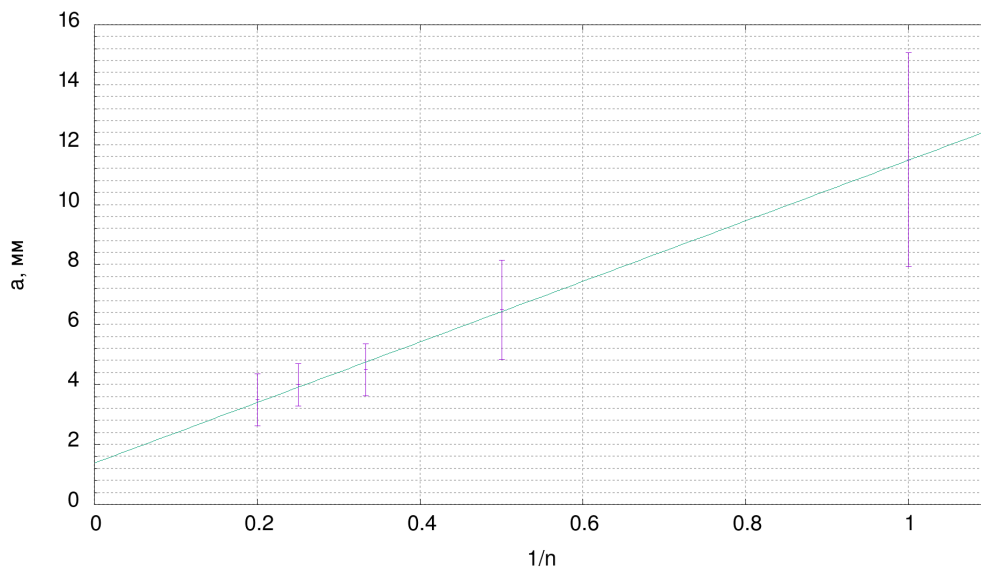


Измерим положение микроскопа x , при котором видно n полос и найдем расстояние a до плоскости наблюдения, которое равно смещению относительно положения $x_0 = 540.0 \pm 0.5 \text{ мм}$

n	$x_{\min}, \text{ мм}$	$x_{\max}, \text{ мм}$	$x, \text{ мм}$	$\Delta x, \text{ мм}$	$a, \text{ мм}$	$\Delta a, \text{ мм}$
1.0	525.0	532.0	529	4	12	4
2.0	532.0	535.0	533.5	1.6	6.5	1.7
3.0	535.0	536.0	535.5	0.7	4.5	0.9
4.0	536.0	536.0	536.0	0.5	4.0	0.7
5.0	536.0	537.0	536.5	0.7	3.5	0.9

$$\Delta n = 0, \Delta x_{\min} = 0.5 \text{ мм}, \Delta x_{\max} = 0.5 \text{ мм}$$

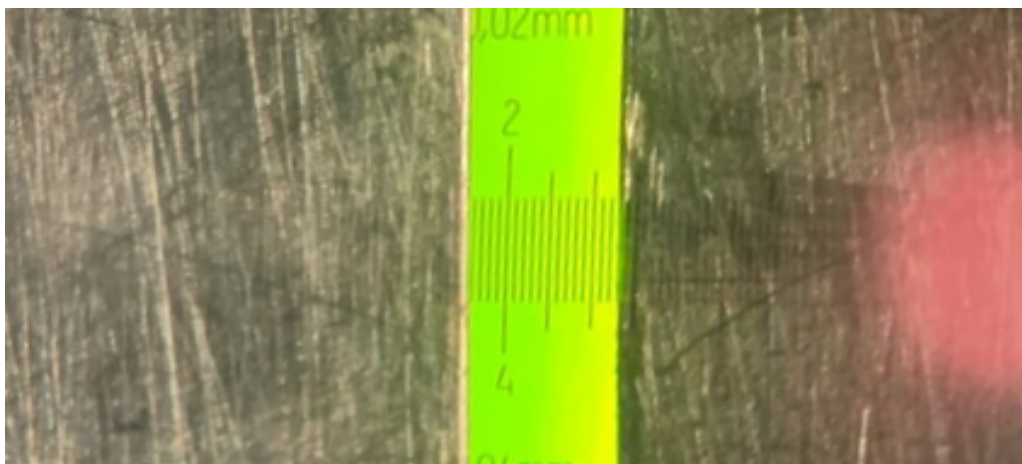
Поскольку суммарная ширина зон френеля не меняется и равна D , из формулы (1) следует, что зависимость между a и $1/t$ должна быть линейной, что и видно из следующего графика



Заметим, что вертикальный сдвиг линейной зависимости равен 1.3 мм и находится в пределах погрешности.

10-11

Независимо змерим ширину щели с помощью микроскопа и микрометра.



Иллюстрация, не является измерением.

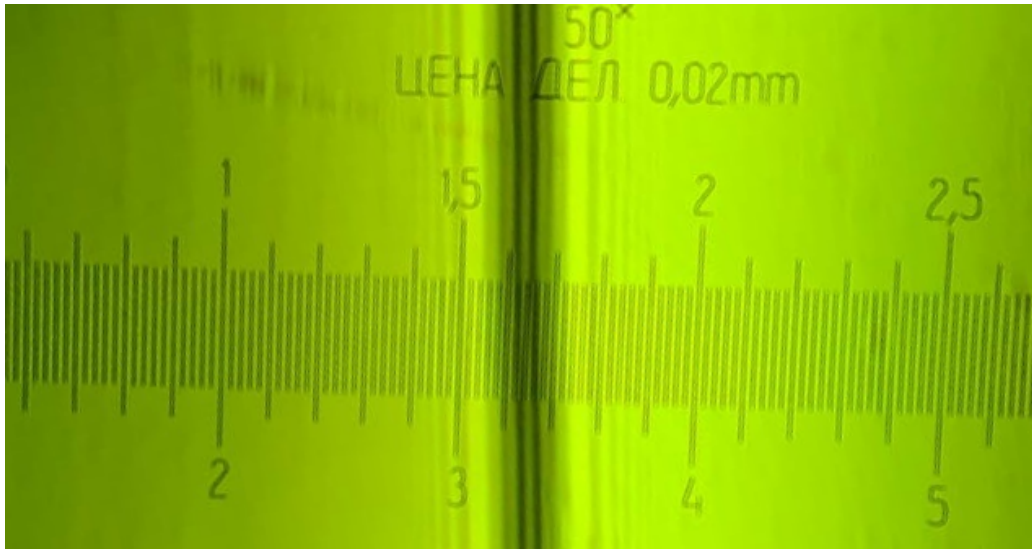
В результате получилось

$$d_{\text{мех}} = (258 - 18) \pm 1.1 \text{ мкм} = 240 \pm 1.1 \text{ мкм}$$

$$d_{\text{опт}} = 240 \pm 10 \text{ мкм}$$

12

Для исследования дифракции Френеля на препятствии, поставим в место щели S_2 тонкую вертикальную нить и настроим микроскоп на ее резкое изображение



При удалении от нити всегда наблюдается четное число темных дифракционных полос.

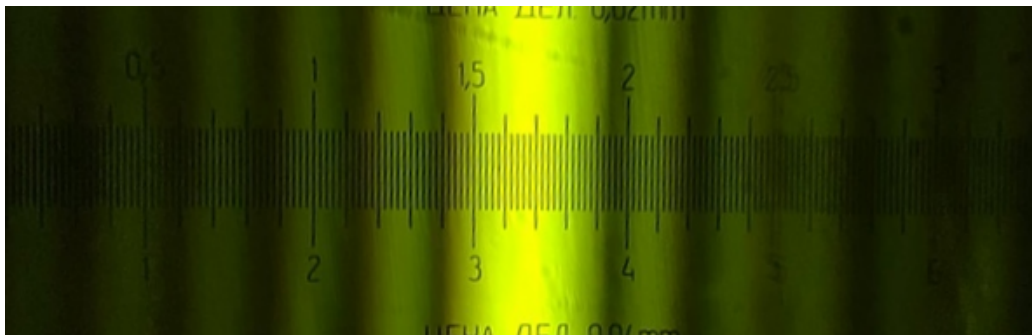
0.1 Дифракция Фраунгофера на щели

1-3

Для того, чтобы наблюдать дифракцию Френеля, нужно поставить еще одну линзу O_2 после щели, чтобы в ее фокальной плоскости появилась картина из параллельных лучей. После этого достаточно настроить микроскоп на эту фокальную плоскость, сняв щель S_2 со скамьи и получив четкое изображение щели S_1 в окуляре.

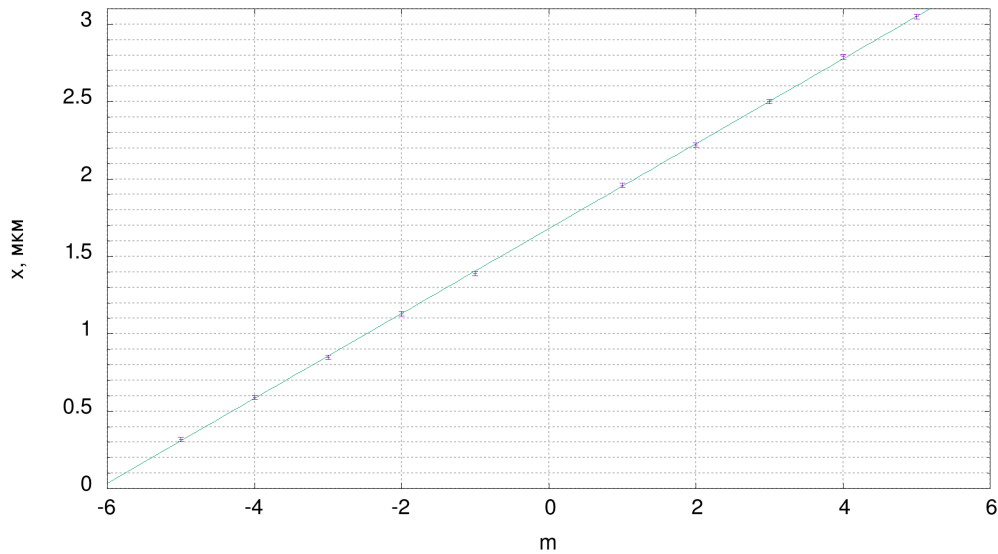
4-7

Пронаблюдаем дифракционную картину



m	x_{min}, MM	x_{max}, MM	x, MM
-5.0	0.26	0.38	0.320
-4.0	0.54	0.64	0.590
-3.0	0.80	0.90	0.850
-2.0	1.08	1.18	1.130
-1.0	1.36	1.42	1.390
1.0	1.94	1.98	1.960
2.0	2.16	2.28	2.220
3.0	2.48	2.52	2.500
4.0	2.72	2.86	2.790
5.0	3.00	3.10	3.050

$$\Delta m = 0, \Delta x_{min} = 0.01 \text{ мм}, \Delta x_{max} = 0.01 \text{ мм}, \Delta x = 0.014 \text{ мм}$$



Измерение проводились при ширине щели

$$D = (17.0 \pm 0.5) \times 20 \text{ мкм} = 340 \pm 10 \text{ мкм}.$$

И фокусном расстоянии линзы

$$f = 160 \text{ мм}$$

Если $A = (274.0 \pm 0.9) \text{ мкм}$ – угол наклона графика, то

$$\lambda = D \frac{A}{f} = 582 \pm 19 \text{ нм}$$

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.