

Дифракция света (4.3.1)

Мотыгуллин Булат

11 апреля 2025 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. Введение

1.1. Дифракция Френеля на щели

Схема установки для наблюдения дифракции Френеля на щели 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.

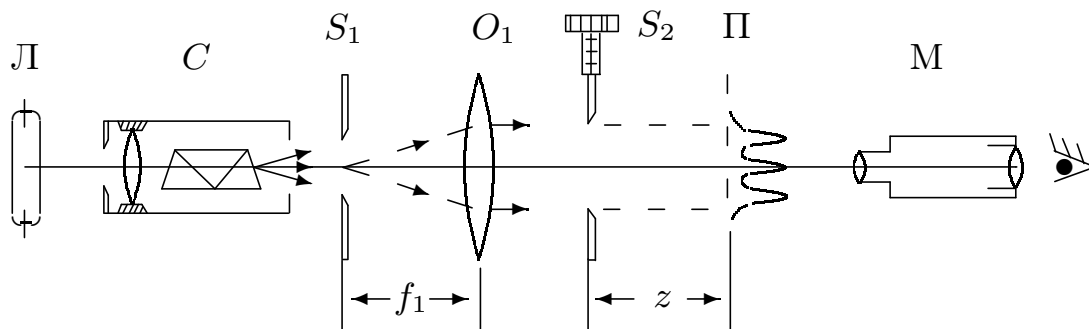


Рис. 1: Схема установки для наблюдения дифракции Френеля

Щель S_2 освещается параллельным пучком монохроматического света с помощью коллиматора, образованного объективом O_1 , и щелью S_1 , находящейся в его фокусе. На щель S_1 сфокусировано изображение спектральной линии, выделенной из спектра ртутной лампы Л при помощи простого монохроматора С, в котором используется призма прямого зрения. Распределение интенсивности света в плоскости наблюдения П проще всего рассчитывать с помощью зон Френеля (для щели их иногда называют зонами Шустера). При освещении щели S_2 параллельным пучком лучей (плоская волна) зоны Френеля представляют собой полосы, параллельные краям щели (рис. 2). 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 n зон Френеля (Шустера) определяется соотношением:

$$\xi_n = \sqrt{zn\lambda} \quad (1)$$

где z — расстояние от щели до плоскости наблюдения (рис. 1), а λ — длина волны.

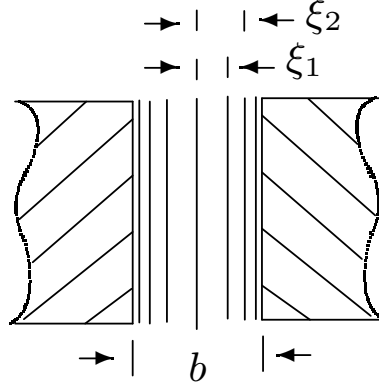


Рис. 2: Зоны Френеля

Вид наблюдаемой дифракционной картины на щели шириной b определяется волновым параметром p или числом Френеля C (число открытых полных зон):

$$p = \frac{\sqrt{z\lambda}}{b}, \quad C = \frac{1}{p^2}$$

Дифракционная картина отсутствует вблизи щели при $p \ll 1$ ($C \gg 1$, т. е. на щели укладывается огромное число зон), а распределение интенсивности света за щелью можно приближённо получить с помощью законов геометрической оптики. Дифракционная картина в этом случае наблюдается только в узкой области на границе света и тени у краёв экрана.

При небольшом удалении от щели (или изменении ширины щели S_2) эти две группы дифракционных полос перемещаются практически независимо друг от друга. Каждая из этих групп образует картину дифракции Френеля на краю экрана. Распределение интенсивности при дифракции света на краю экрана может быть найдено с помощью спирали Корню.

При дальнейшем увеличении расстояния z (или уменьшении ширины щели S_2) обе системы дифракционных полос постепенно сближаются и, наконец, при $C \gtrsim 1$ накладываются друг на друга. Распределение интенсивности в плоскости наблюдения в этом случае определяется числом зон Френеля, укладывающихся на полуширине щели $b/2$. Если это число равно n , то в поле зрения наблюдается $m = n - 1$ тёмных полос. Таким образом, по виду дифракционной картины можно оценить число зон Френеля на полуширине щели.

1.2. Дифракция Фраунгофера на одной щели

На значительном удалении от щели, когда выполнено условие $C \ll 1$ (то есть ширина щели становится значительно меньше ширины первой зоны Френеля, $b \ll \sqrt{\lambda z}$), изображение щели размывается и возникает дифракционная картина, называемая дифракцией Фраунгофера.

Дифракцию Френеля и Фраунгофера можно наблюдать на одной и той же установке (рис. 1). Однако при обычных размерах установки дифракция Фраунгофера возникает только при очень узких щелях.

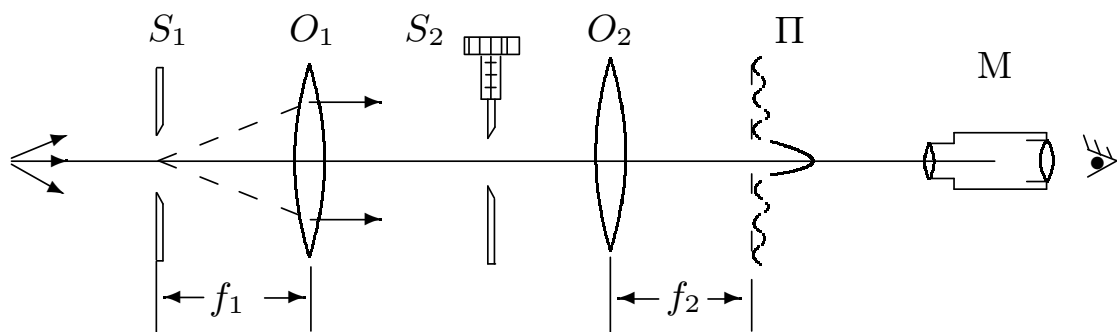


Рис. 3: Схема установки для наблюдения дифракции Фраунгофера на щели

Например, при $z \approx 20 - 40$ см и $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-5}$ см получаем $b \ll 0,3$ мм. Поскольку работать с такими тонкими щелями неудобно, для наблюдения дифракции Фраунгофера к схеме, изображённой на рис. 1, добавляется объектив O_2 (рис. 3).

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

$$x = f_2 \operatorname{tg} \theta \approx f_2 \theta \quad (2)$$

Поскольку объектив не вносит дополнительной разности хода между интерферирующими лучами (таутохронизм), в его фокальной плоскости наблюдается неискаженная дифракционная картина Фраунгофера. Эта картина соответствует бесконечно удалённой плоскости наблюдения.

В центре поля зрения наблюдается дифракционный максимум (светлая полоса). При малых углах θ положение минимумов (тёмных полос) определяется, соотношением

$$\theta_m = m \frac{\lambda}{b} \quad (3)$$

Расстояние x_m от тёмной полосы до оптической оси объектива O_2 пропорционально фокусному расстоянию f_2 . Из (2) и (3) следует

$$x_m = m \frac{\lambda}{b} f_2 \quad (4)$$

Видно, что при малых углах минимумы эквидистантны, а расстояния δx между минимумами обратно пропорциональны ширине b щели S_2 .

2. Ход работы

2.1. Дифракция Френеля на щели

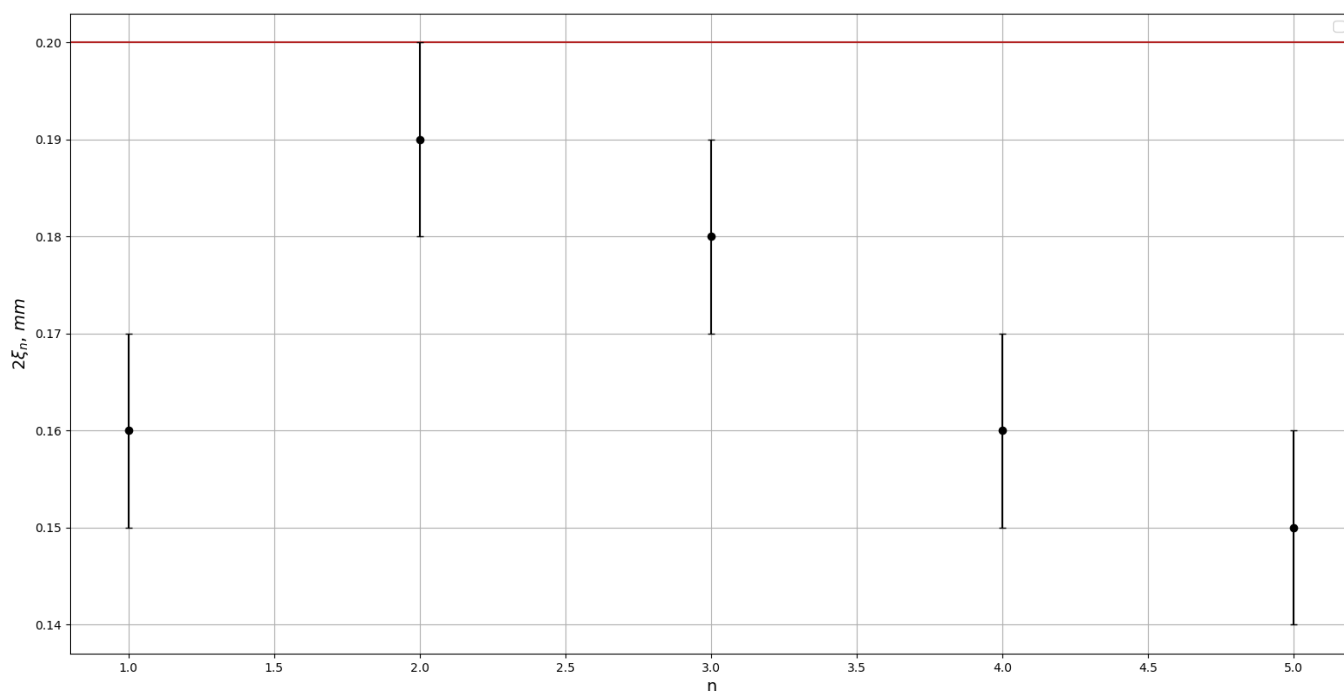
Измерим первоначальную длину щели: $b = (0.20 \pm 0.01)$ мм. Будем приближать микроскоп к щели, по мере этого снимем зависимость координаты микроскопа от числа $n - 1$ тёмных полос по формуле $z_n = x_n - x_0$, где $x_0 = 548$ мм — положение нуля. Результаты занесём в таб. ???. В таблицу также занесём результат вычисления величины $2\xi_n$ по формуле (1). При этом длина волны зелёного света $\lambda = 5461 \cdot 10^{-10}$ м.

$$\xi_n = \sqrt{zn\lambda}.$$

x_n , мм	z_n , мм	n	$2\xi_n$, мм	$\sigma_{2\xi_n}$, мм
536	12	1	0.16	0.01
540	8	2	0.19	0.01
543	5	3	0.18	0.01
545	3	4	0.16	0.01
546	2	5	0.15	0.01

Таблица 1: Зависимость координаты микроскопа от числа n тёмных полос

По полученным данным также построим график зависимости $2\xi_n$ от n .



Рассмотрим дифракцию Френеля на препятствии. Поставим вместо щели S_2 рамку с тонкой вертикальной нитью. При удалении микроскопа можем наблюдать дифракционную картину с характерной светлой полосой на середине препятствия.

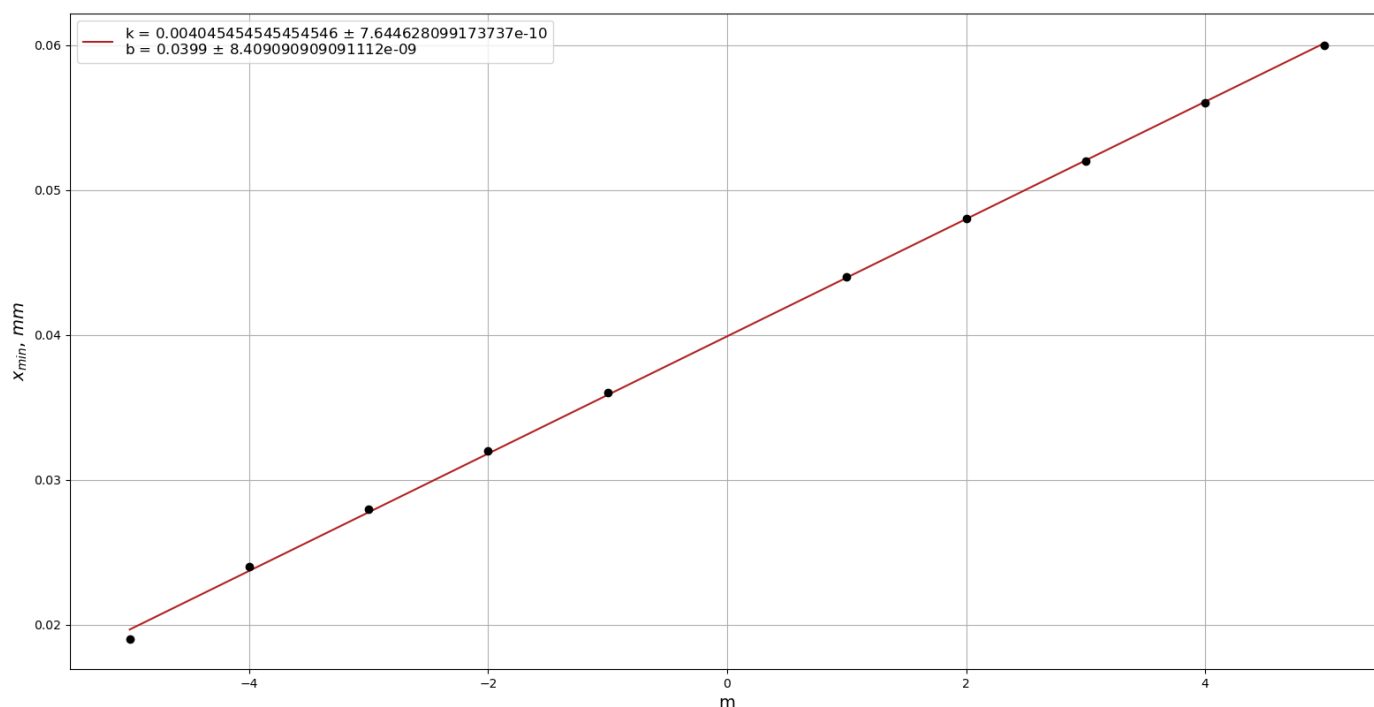
2.2. Дифракция Фраунгофера на одной щели

Величина щели по винту равна $b = (0.25 \pm 0.05)$ мм. Фокусное расстояние линзы $f_2 = 16.0$ см.

Измерим с помощью винта поперечного перемещения микроскопа координаты x_m нескольких дифракционных минимумов. Результаты занесём в таб 2 и построим график зависимости минимумов от их номеров.

Таблица 2: Зависимость минимумов от их номера m

m	-5	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4	5
x_m , мм	0.019	0.024	0.028	0.032	0.036	0.044	0.048	0.052	0.056	0.060



Из графика получаем, что коэффициент наклона $k = (40.5 \pm 0.02) \cdot 10^{-4}$ мм. Из формулы (4) мы получаем, что

$$b = \frac{\lambda}{k} f_2 = (21,6 \pm 0,01) \cdot 10^{-2} \text{ мм.} \quad (5)$$

3. 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.

Дифракция Френеля. По результатам измерений и проведённых вычислений можно утверждать, что полученная ширина щели примерно одинакова и совпадает с результатом, измеренным микрометрическим винтом в пределах погрешности. Некоторые отличия результата от цели можно связать с неточностью определения «сдвига» микроскопа и нуля микрометрического винта. (см. График 1)

Кроме того, при дифракции на препятствии при удалении микроскопа от нити на её фоне всегда наблюдали чётное число тёмных дифракционных полос и светлый центр.

Дифракция Фраунгофера на одной щели. Значение для ширины щели

$$b_{\text{theor}} = (25.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-2} \text{ мм}$$

вычисленное по формуле (5),:

$$b_{\text{exp}} = (21.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-2} \text{ мм.}$$

Это подтверждает теоретические выкладки и говорит о выполнении предложенной теории.