

Лабораторная работа 4.3.1 Изучение дифракции света

Иван Сладков

19 февраля 2022 г.

1 Аннотация

В данной работе проводится исследование дифракции Френеля на щели и на препятствии, дифракции Фраунгофера на щели и на двух щелях; изучается влияние дифракции на качество изображений, даваемых оптическими приборами.

2 Теоретические сведения

2.1 Дифракция Френеля на щели

Распределение интенсивности света в плоскости наблюдения (см. рис. 3) проще всего рассчитывать с помощью зон Шустера. При освещении щели S_2 параллельным пучком лучей зоны Шустера представляют собой полоски, параллельные краям щели, изображённые на рис. 1.

Суммарная ширина n зон Шустера определяется соотношением:

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

где λ – длина волны; z – расстояние между щелью и экраном.

Наблюдаемая на экране картина определяется волновым параметром:

$$p = \frac{z\lambda}{b}, \quad (2)$$

где b – толщина щели S_2 . При $p \ll 1$ дифракция отсутствует (действует приближение геометрической оптики). При $p \simeq 1$ возникает дифракция Френеля с числом тёмных полос m , тогда число зон на полуширине щели $n = m + 1$.

Также можно ввести число Френеля, как число открытых зон на всей ширине щели:

$$C = \frac{b^2}{z\lambda} = \frac{1}{p^2}. \quad (3)$$

2.2 Дифракция Фраунгофера на щели

При $C \ll 1$ наблюдается дифракция Фраунгофера с характерным распределением интенсивностей (см рис. 4).

В центре поля зрения наблюдается дифракционный максимум. При малых углах θ положение минимумов определяется соотношением:

$$\theta_m = \frac{m\lambda}{b}.$$

Тогда расстояние от тёмной полосы до оптической оси O_2 равно:

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

где f_2 – фокус объектива.

2.3 Дифракция Фраунгофера на двух щелях

Угловая координата θ_m интерференционного максимума m -го порядка определяется соотношением:

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

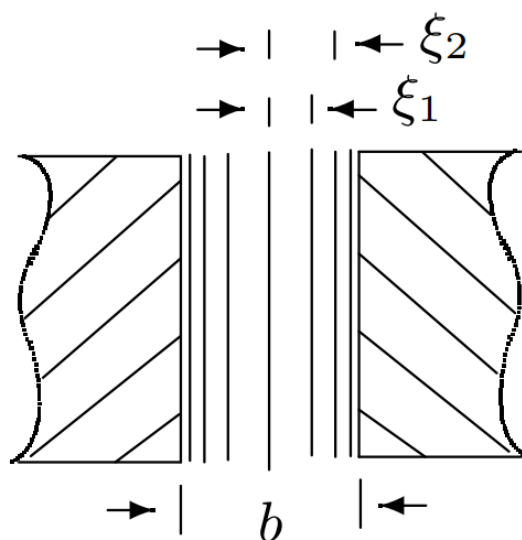


Рис. 1: Зоны Шустера, наблюдаемые при дифракции Френеля на щели

где d – расстояние между щелями. Тогда линейное расстояние между соседними интерференционными полосами равно:

$$\delta x = \frac{\lambda}{d} f_2. \quad (5)$$

Оценим число интерференционных полос в главном максимуме из соображений, что распределение интенсивностей такое же, как у одиночной щели (изображено пунктирной линией на рис. 2):

$$n = \frac{2\lambda f_2}{b} \frac{1}{\delta x} = \frac{2d}{b}. \quad (6)$$

Для наблюдения интерференции требуется выполнение условия:

$$d \leq \rho_{\text{ког}} = \frac{\lambda}{b} f_1,$$

где $\rho_{\text{ког}}$ – радиус когерентности, b/f_1 – угловая ширина входной щели S_1 .

2.4 Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента

Установку на рис. 6 можно рассматривать как оптический прибор. Для выявления его предельной разрешающей способности (ограниченной дифракцией на щели S_2) применяют критерий Рэля:

$$\frac{\lambda}{D_0} = \frac{l}{f_2} = \frac{d}{f_1}, \quad (7)$$

где D_0 – ширина щели S_0 , l – расстояние между изображениями щелей, d – расстояние между щелями.

3 Оборудование и инструментальные погрешности

Микроскоп на поперечных салазках с микрометрическим винтом: $\Delta_{\text{винта}} = 1 \mu\text{m}$; $\Delta_{\text{шкалы}} = 0.02 \text{ mm}$

Светофильтр: $\lambda = 5461 \text{ \AA}$

Щели с регулируемой шириной: $\Delta = 1 \mu\text{m}$

Оптическая скамья

Ртутная лампа

Рамка с вертикальной нитью

Двойная щель

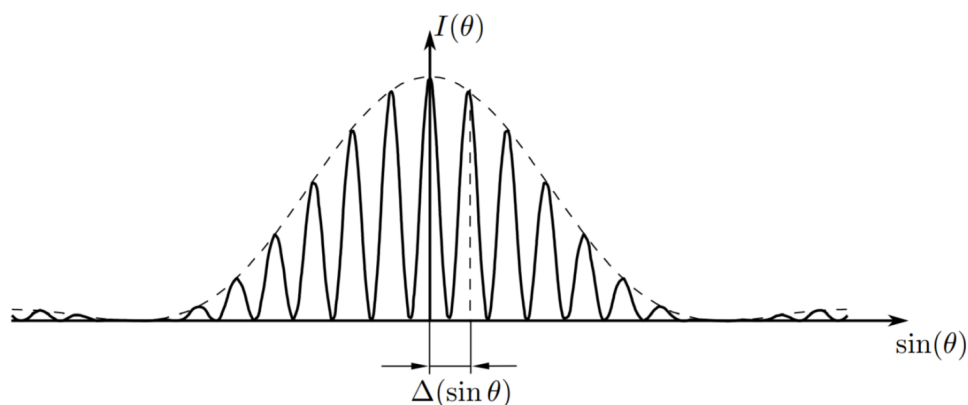


Рис. 2: Распределение интенсивностей в опыте с двумя щелями

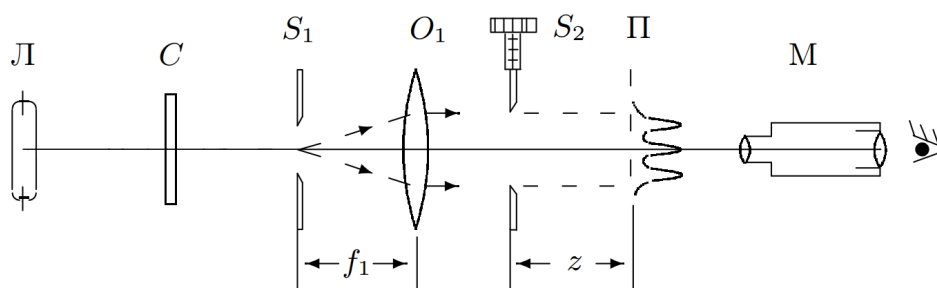


Рис. 3: Установка для наблюдения дифракции Френеля на щели

Зрительная труба

Установки, применяемые в опыте, изображены на рис. 3, 4, 5, 6. Различия между установками для исследования дифракции Френеля и Фраунгофера состоят в том, что во втором случае необходимо поставить объектив O_2 , чтобы приблизить исследуемую плоскость, на которой происходит дифракция.

4 Результаты измерений и обработка данных

Все измерения и расчёты в СИ.

4.1 Дифракция Френеля на щели и препятствии

Настройка. Найдём нуль микрометра на щели:

$$b_0 = 32 \pm 1 \text{ мкм.}$$

Ширина щели по микрометрическому винту:

$$b = 0.35 \pm 0.01 \text{ мм.}$$

Методом последовательных приближений получим по возможности контрастную картину.

Измерения. Найдём начальное положение микроскопа (без дифракции):

$$L_0 = 379 \pm 2 \text{ мм.}$$

Получим зависимость количества полос от расстояния в табл. 1: В этой таблице возьмём инструменталь-

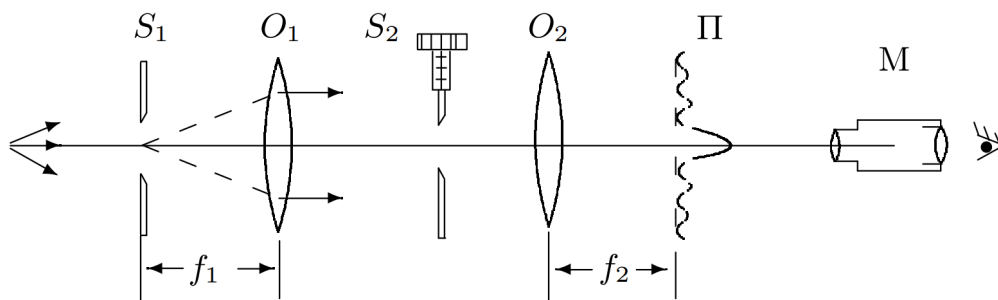


Рис. 4: Установка для наблюдения дифракции Фраунгофера на щели

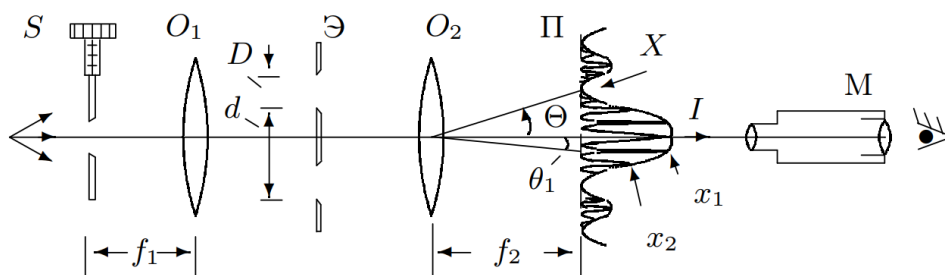


Рис. 5: Установка для наблюдения дифракции Фраунгофера на двух щелях

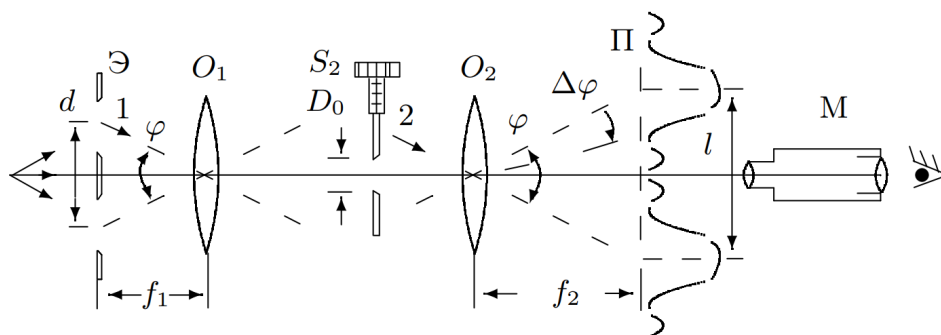


Рис. 6: Установка для исследования влияния дифракции на характеристики оптических приборов

m	L , мм	z , мм
1	409	30
2	399	20
3	394	15
4	390	11
5	388	9
6	386	7

Таблица 1: Зависимость количества тёмных полос от расстояния

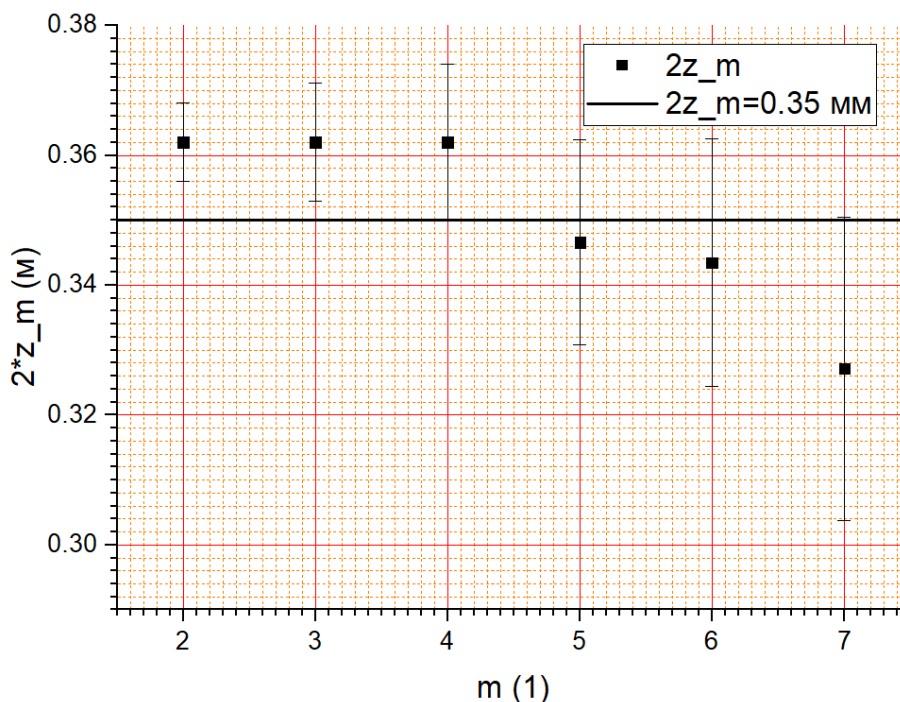


Рис. 7: Ширина зон Шустера

ную погрешность $\Delta = 2$ мм. При помощи микрометрического винта на микроскопе и шкалы на окуляре найдём ширину щели:

$$b_{\text{микроскоп}} = 0.34 \pm 0.02 \text{ мм.}$$

По микрометру на щели,

$$b_{\text{микрометр}} = 0.35 \pm 0.01 \text{ мм.}$$

Значит, люфтом можно пренебречь.

Качественные наблюдения. При уменьшении щели уменьшается количество дифракционных полос. Это согласуется с теорией и обусловлено возрастанием волнового параметра (2).

Для дифракции Френеля на препятствии в виде тонкой вертикальной нити при удалении микроскопа – чётное число тёмных полос.

Обработка данных. Сравним размер зон Шустера с шириной щели S_2 . Построим график на рис. 7.

4.2 Дифракция Фраунгофера на щели

Настройка. Фокус линзы-объектива O_2 равен 12.5 ± 0.1 см. Получена дифракционная картина Фраунгофера на всё поле зрения микроскопа.

Измерения. Снимем значения координат нескольких дифракционных минимумов в табл. 2. Погрешность X_m в этой таблице считаем равной цене деления 0.02 мм. Ширина щели в этом опыте:

$$b = 0.330 \pm 0.001 \text{ мм.}$$

n	1	2	3	4
X_m	0.4	1.12	1.28	1.72

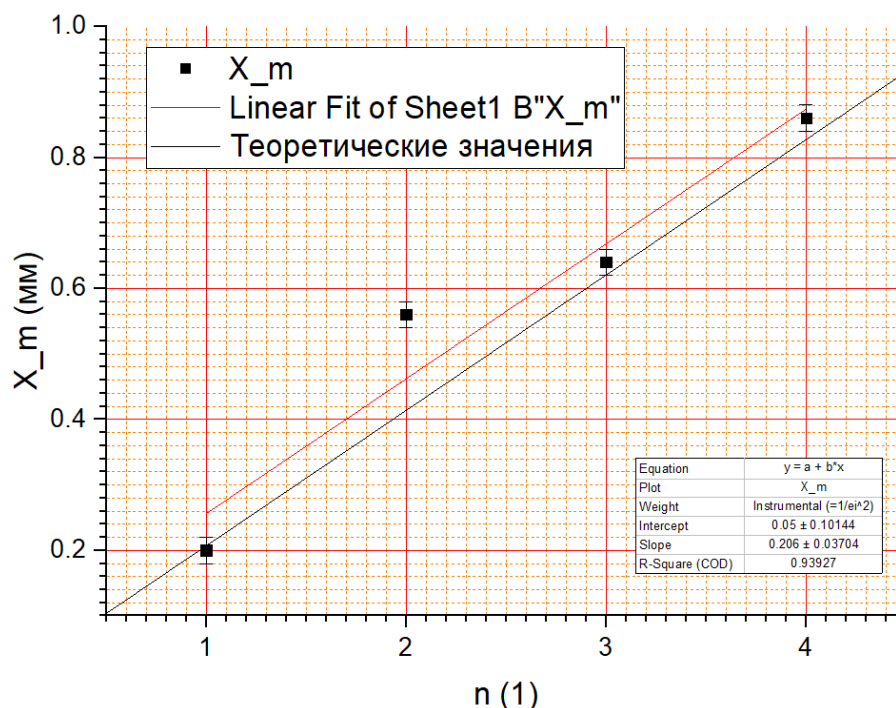
Таблица 2: $X_m(n)$ для опыта Фраунгофера

Рис. 8: Зависимость координаты минимума интенсивности от его номера

Качественные наблюдения. При смещении S_1 не происходит сдвига дифракционной картины. Это связано с тем, что картина находится в фокальной плоскости линзы O_2 , куда приходят почти параллельные лучи. При уменьшении ширины щели картина растягивается, что согласуется с формулой (4).

Обработка данных. Построим график зависимости координаты $X_m(n)$ на рис.8. Точки на графике довольно плохо сходятся к прямой, что может говорить о несовершенстве методики, или о том, что показания сняты неточно. Кроме того, точность результата уменьшается тем, что не была снята зависимость на отрицательных n . Поэтому результат

$$\Delta X_m \approx 0.21 \pm 0.04 \text{ мм}$$

имеет сомнительную точность. Расчётная X_m из (4) изображена на графике чёрной прямой, которая практически параллельна экспериментальной, как ни странно.

4.3 Дифракция Фраунгофера на двух щелях

Настройка и измерения. Получили по возможности чёткую дифракционную картину. Ширина центрального максимума при $b = 0.055 \pm 0.001$ мм равна

$$X = 2.00 \pm 0.04 \text{ мм},$$

и он включает в себя $n = 13$ светлых промежутков. Первое исчезновение интерференционных полос при

$$b_0 = 0.16 \pm 0.01 \text{ мм}.$$

Обработка результатов. Расстояние между минимумами равно:

$$\delta x \approx \frac{X}{n} = 0.154 \pm 0.003 \text{ мм}.$$

Из формулы (5):

$$d = \frac{\lambda f_2}{\delta x} = 0.45 \pm 0.01.$$

Это значение отличается от замеренного: фактическое расстояние между щелями около 0.76 ± 0.02 мм. Расхождение может быть связано с неодинаковым расстоянием между щелями.

4.4 Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента

Настройка и измерения. Найдём минимальную ширину щели S_2 , при которой изображения двух щелей ещё различимы:

$$D_0 = 0.136 \pm 0.001 \text{ мм.}$$

Геометрические размеры щелей:

$$d_1 = 0.14 \pm 0.02 \text{ мм,}$$

$$d_2 = 0.30 \pm 0.02 \text{ мм,}$$

$$d = 0.76 \pm 0.02 \text{ мм,}$$

где d – расстояние между щелями.

Обработка данных. Оценим выполнение критерия Рэлея. Из (7),

$$D_0 = \frac{\lambda f_1}{d} = 0.08 \pm 0.01 \text{ мм.} \quad (8)$$

Значительное расхождение, вероятно, связано с субъективностью оценки «щели всё ещё различимы».

4.5 Оценка погрешностей

Везде в этой лабораторной оценке погрешностей проводились по схожему принципу: при обработке нескольких значений использовалась только статистическая погрешность, так как она существенно больше инструментальной. В остальных случаях аналитический расчёт погрешности проведён в *Wolfram Mathematica*. Например, погрешность формулы (8):

$$\sqrt{\frac{\lambda^2 \left((\delta x)^2 \sigma_{f_1}^2 + f_1^2 \sigma_{\delta x}^2 \right)}{(\delta x)^4}}.$$

5 Вывод

По результатам этой работы, изучили дифракцию Френеля и Фраунгофера. Провели сравнение установок, применяемых в этих опытах. Выявили различия этих двух явлений. Провели ряд сравнений значений, полученных экспериментально с расчётными. В нескольких случаях их несовпадения могут быть вызваны субъективностью визуальной оценки.

Исследовали влияние дифракции Фраунгофера на оптические приборы. Установили связь между уменьшением диафрагмы прибора и ухудшением разрешения, связанным с дифракцией.

С помощью качественных наблюдений установили ряд различий между исследуемыми явлениями и их особенности.

Список литературы

- [1] Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Том 4 Оптика*, 2004
- [2] Кириченко Н. А. *Принципы оптики*, 2014
- [3] *Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 2. Оптика: учебное пособие* под ред. А. В. Максимычева