

Лабораторная работа 4.3.1
ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА

Аксенова Светлана

11 марта 2021 г.

Цель работы: исследовать явление дифракции Френеля и Фраунгофера на щели, изучить влияние дифракции на разрешающую способность оптических приборов.

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 Дифракция Френеля на щели

Схема установки для наблюдения дифракции Френеля представлена на рис. 1. Распределение интенсивности в плоскости наблюдения Π проще всего рассчитывать с помощью зон Френеля (для щели их иногда называют зонами Шустера). При освещении щели S_2 параллельным пучком лучей 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, графически она определяется с помощью 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 $\lambda = 5461 \text{ \AA}$ - длина волны зелёной линии ртути.

Вид наблюдаемой дифракционной картины на щели шириной b определяется волновым параметром:

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

Также используют число Френеля - полное число открытых зон Френеля на всей ширине щели

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

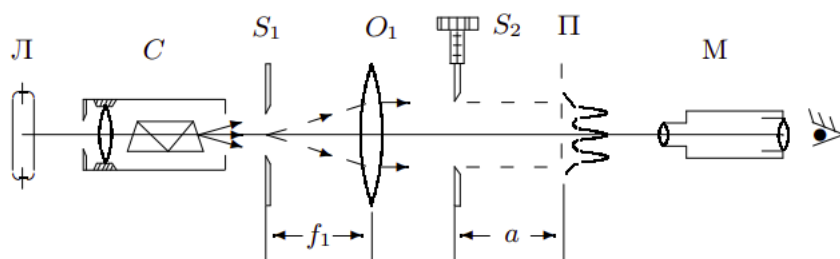


Рисунок 1 – Схема установки для наблюдения дифракции Френеля

После того, как была получена наиболее чёткая дифракционная картина, микроскоп был передвинут таким образом, чтобы на экране было изображение щели без дифракционных полос. Далее микроскоп постепенно отодвигал-

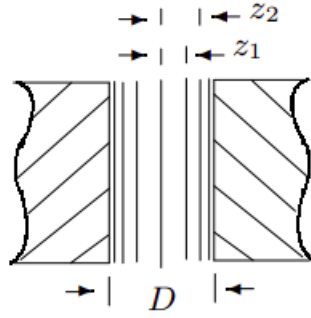


Рисунок 2 – Зоны Френеля в плоскости щели

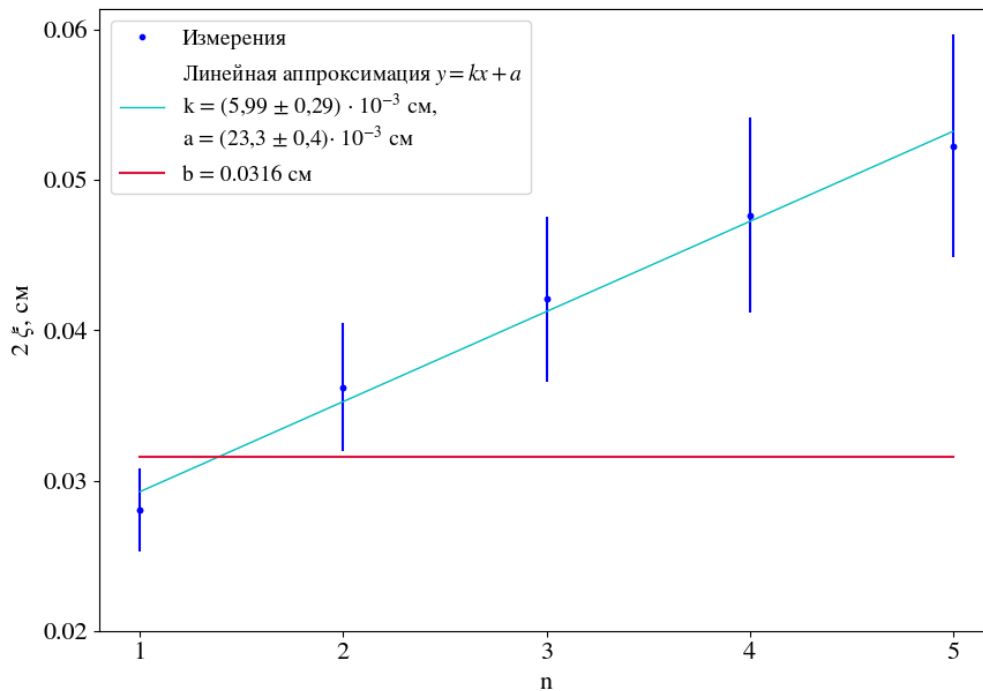


Рисунок 3 – График зависимости $2\xi_n = f(n)$

ся от щели S_2 до получения одной тёмной полосы. После этого была получена зависимость величины z - расстояния от щели до плоскости наблюдения - от числа n дифракционных полос. По формуле (1) для каждого случая была рассчитана суммарная ширина зон Френеля ξ_n и был построен график зависимости $2\xi_n = f(n)$. Видно, что эта зависимость имеет линейный характер. Коэффициент наклона графика и его погрешности были рассчитаны по методу наименьших квадратов. На этом же графике отложена измеренная с помощью микрометрического винта ширина щели b .

Было проведено качественное исследование дифракции на краю экрана. При уменьшении ширины щели S_2 увеличивалось число чёрных полос.

Для получения графика распределения интенсивности представим, что край экрана является полубесконечной плоскостью. Для точки наблюдения Р, расположенной за экраном, открыты лишь половина всех кольцевых зон Френеля.

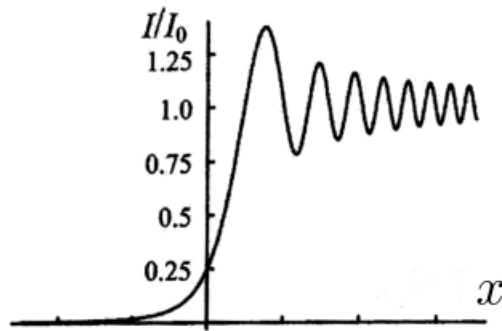


Рисунок 4 – Зависимость относительной интенсивности I/I_0 от расстояния x от точки наблюдения до границы экрана при дифракции на краю

Воспользуемся методом векторных диаграмм. При выводе формулы для светового поля в случае кругового отверстия выполнялось интегрирование по углу ϕ , и для полностью открытой области это давало множитель 2π . В рассматриваемом случае интегрирование дает множитель π , поэтому длина соответствующего вектора в два раза меньше вектора, отвечающего за открытие очередной зоны Френеля. Поэтому для дифракции на краю экрана интенсивность падающего света в точке Р будет в 4 раза меньше, чем интенсивность I_0 в случае, когда экран отсутствует.

Теперь будем следить за интенсивностью в точках, отстоящих от края экрана. Смещение точки влечёт за собой частичное открытие всех оставшихся половинок зон Френеля. При этом «быстрее всего» начинает открываться I-ая зона, поэтому интенсивность резко начинает возрастать. Когда I-ая зона полностью откроется, будет наблюдаться пик интенсивности. Затем быстрее начнёт открываться II-ая зона – интенсивность спадает до локального минимума. С уходом точки на бесконечность зависимость $I(x)$ асимптотически стремится к значению I_0 («почти все» зоны Френеля открываются). Качественный график зависимости $I(x)$ представлен на рис. 4.

При исследовании дифракции Френеля на препятствии вместо щели S_2 была поставлена вертикальная нить. В результате при удалении микроскопа от нити на её воне всегда наблюдалось чётное число тёмных дифракционных полос (светлый центр).

2 Дифракция Фраунгофера на щели

Схема установки представлена на рис. 5. Дифракция Фраунгофера возникает на значительном удалении от щели, когда ширина щели становится значительно меньше первой зоны Френеля. В результате изображение щели размывается и возникает дифракционная картина. Она наблюдается в фокальной плоскости объектива O_2 . каждому значению угла θ соответствует точка в этой плоскости, которая отстоит от оптической оси на расстоянии

$$x = f_2 \tan \theta \approx f_2 \theta \quad (4)$$

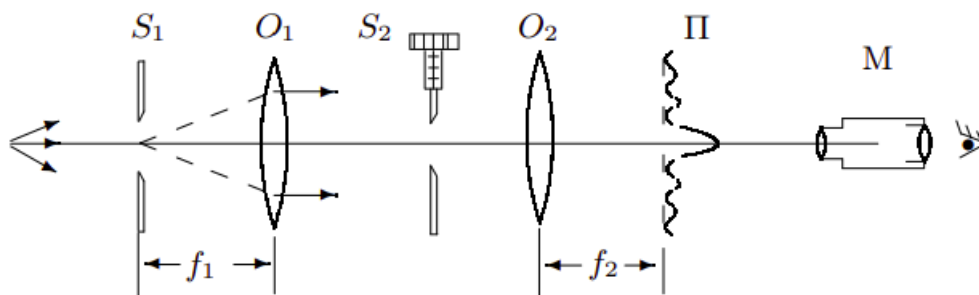


Рисунок 5 – Схема установки для наблюдения дифракции Фраунгофера на щели

В фокальной плоскости объектива наблюдается неискажённая дифракционная картина Фраунгофера, она соответствует бесконечно удалённой плоскости наблюдения.

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

$$\theta_m = m \frac{\lambda}{b}. \quad (5)$$

Тогда из формул (4) и (5) расстояние x_m от тёмной полосы до оптической оси пропорционально фокусному расстоянию f_2 :

$$x_m = m \frac{\lambda}{b} f_2 \quad (6)$$

Из (6) видно, что при малых углах минимумы эквидистантны, а расстояние δx между ними обратно пропорционально ширине b щели S_2 .

Получив контрастную дифракционную картину, были измерены координаты нескольких дифракционных минимумов X_m (от $-m$ до m), графически зависимость представлена на рис. 6. Коэффициент наклона графика был рассчитан по МНК, таким образом было определено среднее расстояние ΔX между соседними минимумами:

$$\Delta X = 18,87 \pm 0,19 \text{ мкм}. \quad (7)$$

По формуле (6) была рассчитана ширина щели b

$$b_{th} = 3617 \pm 47 \text{ мкм}. \quad (8)$$

Измеренная ширина щели

$$b_{exp} = 1630 \pm 20 \text{ мкм}. \quad (9)$$

По порядку величины полученной теоретическое значение совпадает с экспериментальным.

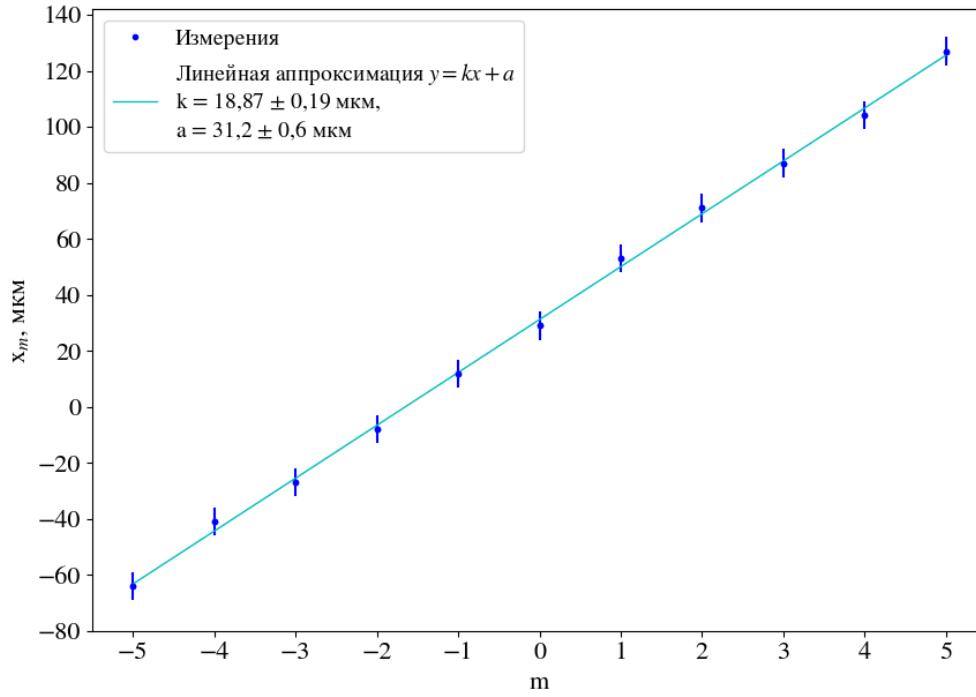


Рисунок 6 – Зависимость координаты дифракционных минимумов X_m от номера минимума m

3 Дифракция Фраунгофера на двух щелях

Схема установки представлеа на рис. 7. Необходимо вместо щели S_2 установить экран с двумя щелями. Для оценки влияния ширины входной щели на чёткость дифракционной картины используется щель S с микрометрическим винтом.

Угловая координата m -ого интерференционного максимума

$$\theta_m = m \frac{\lambda}{d}, \quad (10)$$

где d - расстояние между щелями. Линейное расстояние δx между соседними интерференционными плоскими в плоскости Π равно

$$\delta x = f_2 \frac{\lambda}{d} \quad (11)$$

Определим число интерференционных полос, которое укладывается в главном максимуме дифракционной картины

$$n = \frac{2\lambda f_2}{b} \frac{1}{\delta x} = \frac{2d}{b}. \quad (12)$$

Для наблюдения интерференции необходимо, чтобы расстояние d между щелями не превышало радиуса когерентности

$$d \leq \frac{\lambda}{b} f_1, \quad (13)$$

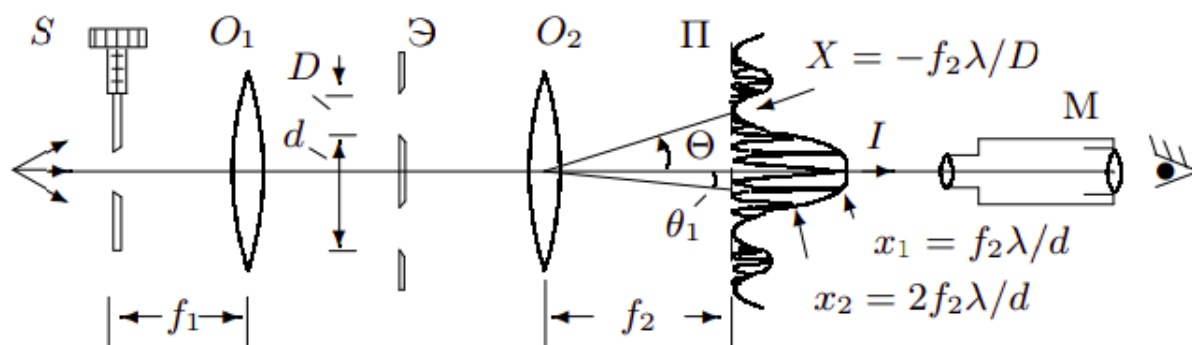


Рисунок 7 – Схема установки для наблюдения дифракция Фраунгофера на двух щелях

где b - ширина входной щели S и b/f_1 - её угловая ширина. Собрав установку, центрировкой системы и подбором ширины S была получена наибольшая чёткость дифракционной картины. С помощью микрометрического винта поперечных салазок микроскопа была измерена ширина центрального максимума

$$D = 320 \pm 20 \text{ мкм},$$

между самыми удалёнными друг от друга тёмными полосами 5 светлых промежутков. Тогда линейное расстояние между соседними интерференционными полосами

$$\delta x = 64 \pm 4 \text{ мкм}.$$

По формуле (11) расстояние d

$$d_{th} = 0,870 \pm 0,101 \text{ мм},$$

экспериментально измеренное расстояние d

$$d_{exp} = 0,891 \pm 0,001 \text{ мм}.$$

Теоретически рассчитанное значение по порядку величины совпадает с полученным экспериментально.

По формуле (12) число полос внутри главного максимума

$$n = 5,9 \pm 0,7,$$

что практически совпадает со значением, полученным экспериментально.

Далее было исследовано влияние пространственной когерентности на видность интерференционной картины. Для этого была подобрана ширина щели b_0 , при которой наступает первое исчезновение интерференционных полос

$$b_{0exp} = 772 \pm 1 \text{ мкм}.$$

Из формулы (13) величина b_0 была рассчитана косвенно

$$b_{0th} = 78,4 \pm 11,1 \text{ мкм}$$

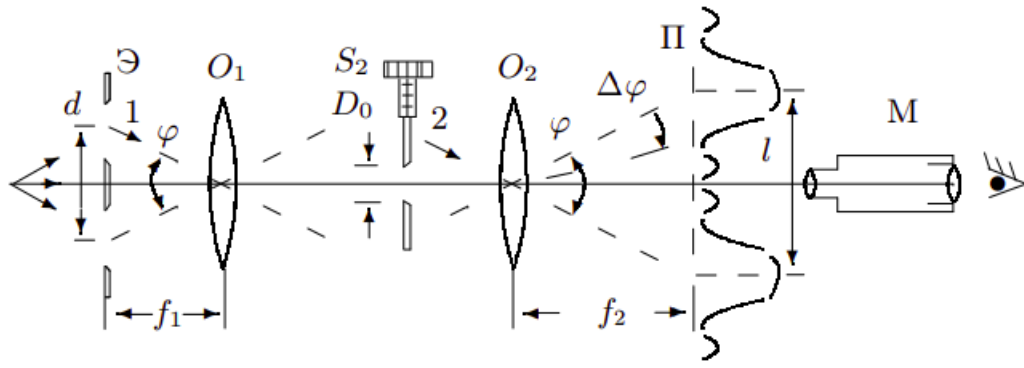


Рисунок 8 – Caption

4 Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента

Установка, представленная на рис. 8, позволяет исследовать влияние дифракции на разрешающую способность оптических инструментов. Расстояние l между изображениями щелей в плоскости Π равно

$$l = \phi f_2 = d \frac{f_2}{f_1}, \quad (14)$$

а ширина каждого изображения

$$\delta x \approx \frac{\lambda}{b} f_2 \quad (15)$$

определяется дифракцией света на щели S_2 . Когда полуширина дифракционного изображения превышает расстояние между изображениями, то по виду дифракционной картины трудно определить, представляет собой источник двойную или одиночную щель. Изображения считаются различимыми, когда максимум одного дифракционного пятна совпадает с минимумом другого, в условиях нашей задачи - когда полуширина дифракционного изображения δx совпадает с расстоянием l между изображениями отдельных щелей. Таким образом, критерий Рэлея можно записать в виде

$$\delta x \sim l \rightarrow \frac{\lambda}{b} \sim \frac{d}{f_1} \quad (16)$$

Собрав схему установки и получив чёткое, симметричное изображение двойного источника, при уменьшении ширины щели S_2 наблюдалось ухудшение качества изображения. Ширина щели подбиралась так, чтобы изображения обеих щелей почти сливались, но всё-таки ещё воспринимались отдельно.

С помощью микроскопа было измерено расстояние d между щелями

$$d = 800 \pm 20 \text{ мкм.}$$

Измеренная ширина щелей

$$b_1 = 160 \pm 20 \text{ мкм, } b_2 = 240 \pm 20 \text{ мкм.}$$

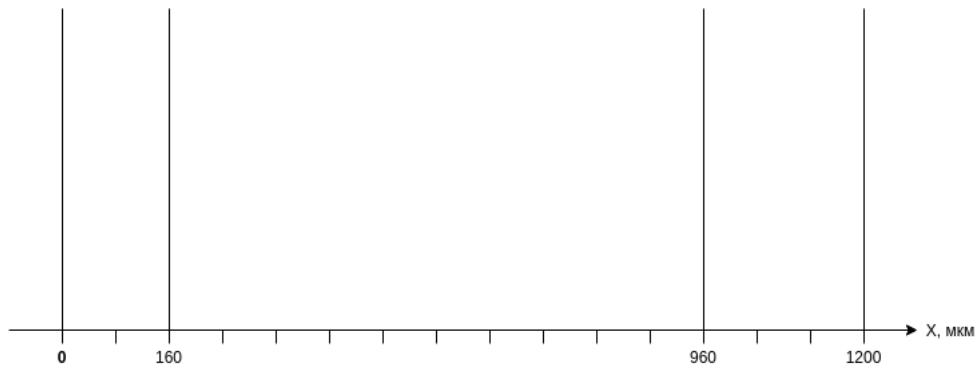


Рисунок 9 – Чертёж щели

Чертёж щели - рис. 9. Рассчитаем ширину щели b_0 , при котором изображения обеих щелей почти сливаются, но ещё воспринимаются раздельно, с помощью критерия Рэля

$$b_0 = 85 \pm 7 \text{ мкм.}$$

Экспериментальные данные отсутствуют.

5 Вывод

В результате экспериментально были исследования явления дифракции Френеля и Фраунгофера на одной щели и дифракции Фраунгофера на двух щелях, также было изучено влияние дифракции на разрешающую способность оптических приборов.

6 Список литературы

1. Лабораторный практикум по общей физике: учеб. пособие. В трёх томах. Т.2. Оптика / А. В. Максимычев, Д. А. Александров, Н. С. Берюлёв и др.; под ред. А. В. Максимычева. - М.: МФТИ, 2014. - 446 с.

7 Приложение

[Ссылка на данные и их обработку](#)