

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа физики и исследований им. Ландау

Отчёт о выполнении лабораторной работы
№4.3.1
Дифракция света

Автор:
Сенокосов Арсений Олегович
Б02-012

Долгопрудный
9 февраля 2022 г.

1 Введение

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.

2 Дифракция Френеля на щели

2.1 Экспериментальная установка

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.

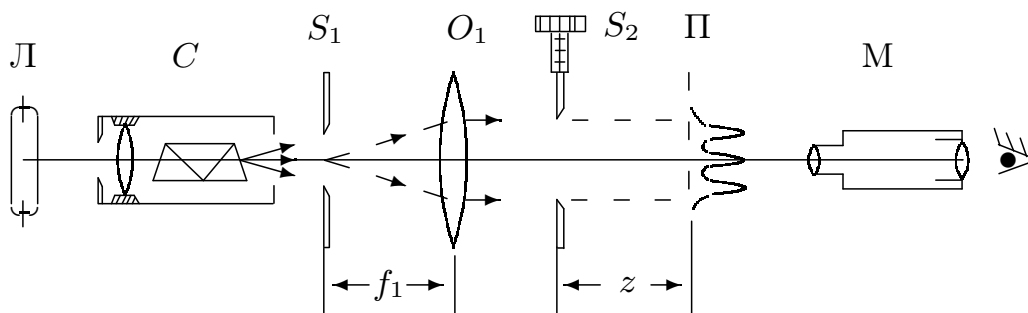


Рис. 1: Схема установки для наблюдения дифракции Френеля

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.

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

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

Дифракционная картина отсутствует вблизи щели при $p \ll 1$ ($C \gg 1$, т. е. на щель укладывается огромное число зон), а распределение интенсивности света за щелью можно приближённо

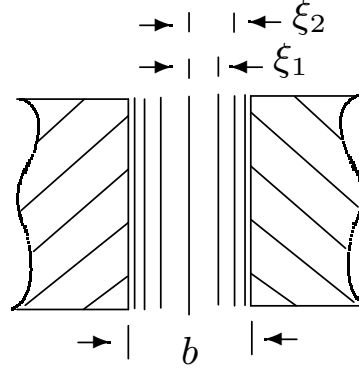


Рис. 2: Зоны Френеля

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.

2.2 Измерения и обработка результатов

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 $a_n = x_n - x_0$, где $x_0 = 458$ мм — положение нуля. Результаты занесём в таб. 1. 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.

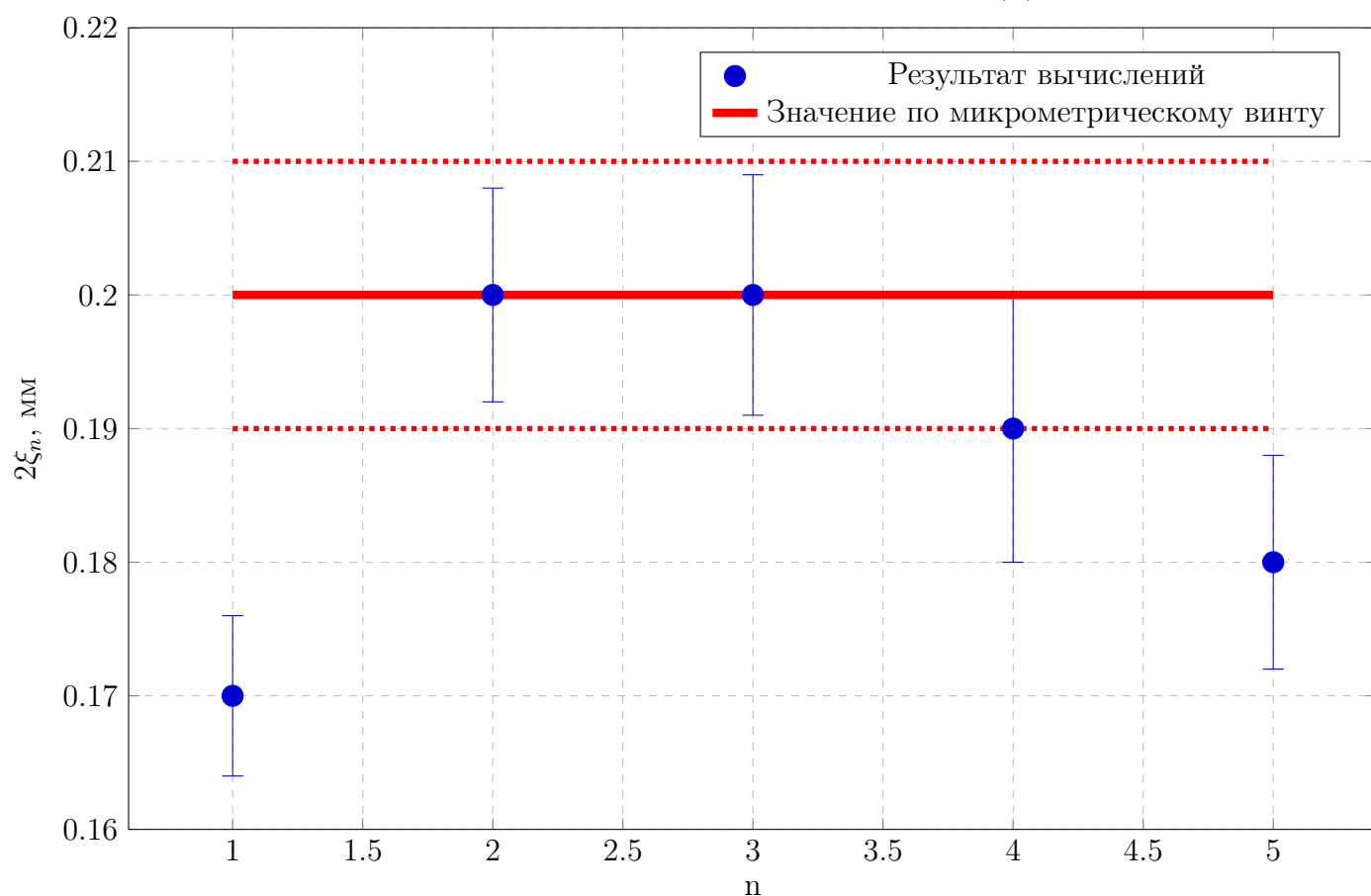
$$\xi_n = \sqrt{zn\lambda}. \quad (3)$$

x_n , мм	a_n , мм	n	$2\xi_n$, мм	$\sigma_{2\xi_n}$, мм
474	13	1	0.17	0.01
467	9	2	0.20	0.01
464	6	3	0.20	0.01
462	4	4	0.19	0.01
461	3	5	0.18	0.01

Таблица 1: Зависимость координаты микроскопа от числа n тёмных полос

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

График 1 График зависимости $2\xi_n(n)$



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 (рис. 3).

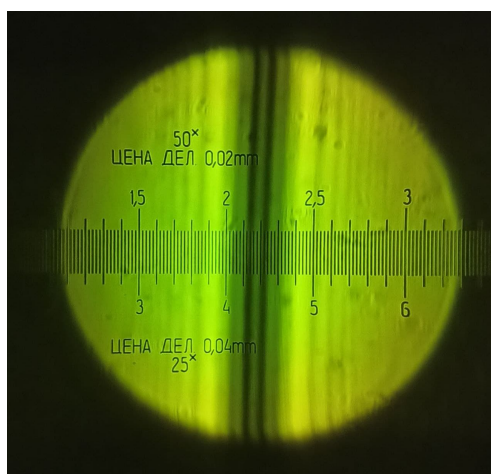


Рис. 3: Дифракция Френеля на препятствии

3 Дифракция Фраунгофера на одной щели

3.1 Экспериментальная установка

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.

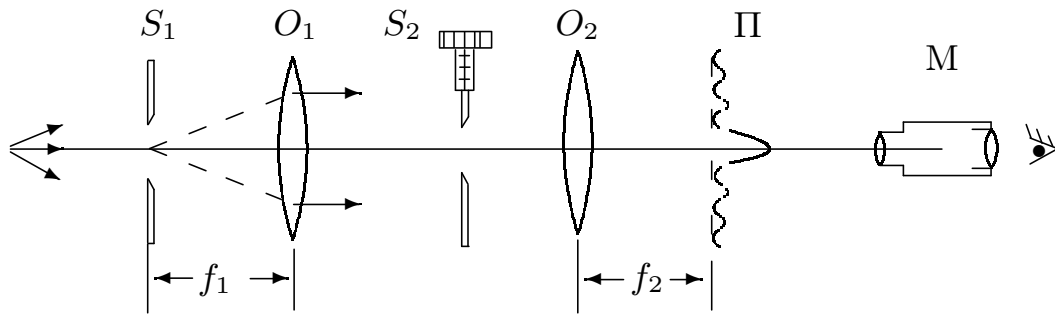


Рис. 4: Схема установки для наблюдения дифракции Фраунгофера на щели

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. 4).

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

$$x = f_2 \operatorname{tg} \theta \approx f_2 \theta \quad (4)$$

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

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

Расстояние x_m от тёмной полосы до оптической оси объектива O_2 пропорционально фокусному расстоянию f_2 . Из (4) и (5) следует

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

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

3.2 Измерения и обработка результатов

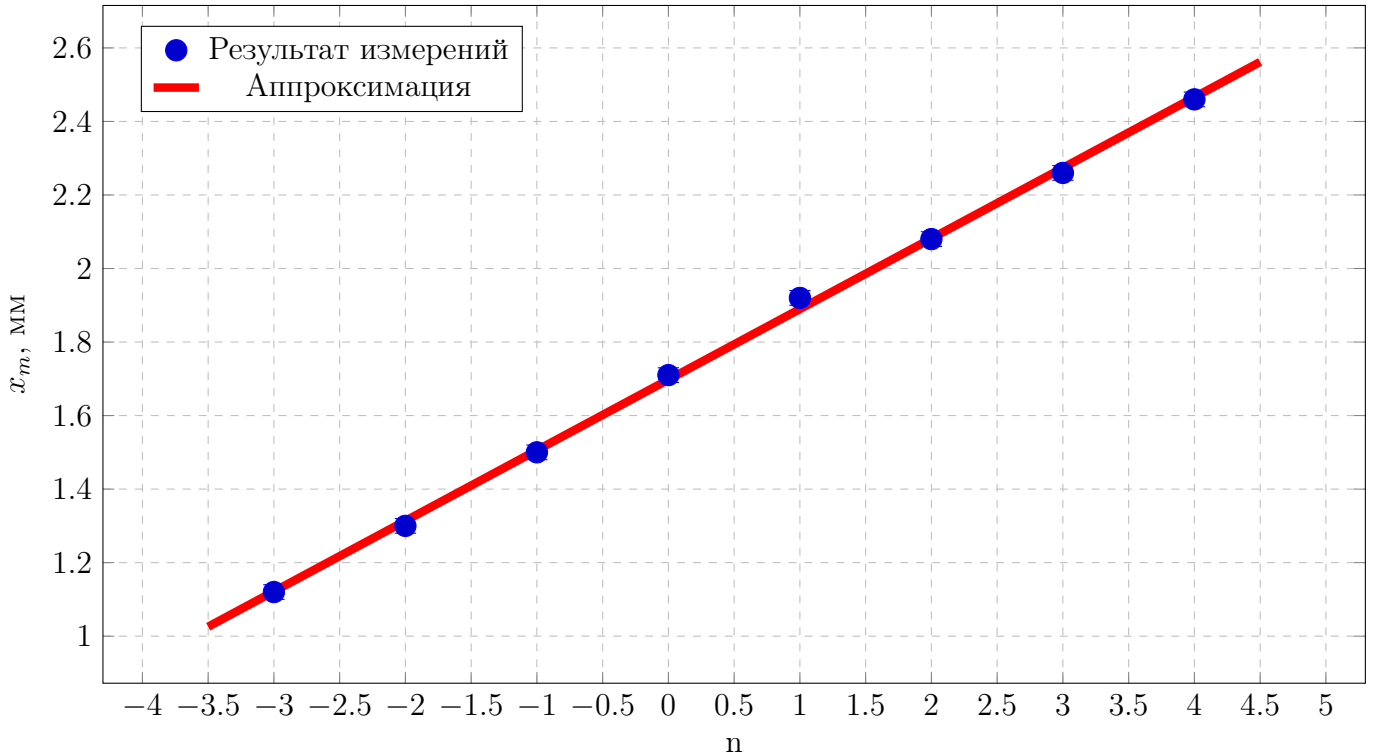
Величина щели по винту равна $b = (0.32 \pm 0.01)$ мм. Фокусное расстояние линзы $f_2 = 12.5$ см.

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.

m	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
x_m , мм	1.12	1.30	1.50	1.71	1.92	2.08	2.26	2.46

Таблица 2: Зависимость минимумов от их номера m

График 2 График зависимости координаты минимумов от их номеров



Из графика получаем, что угол наклона $\Delta X = (19.20 \pm 0.25) \cdot 10^{-2}$ мм. Из формулы (6) мы получаем, что

$$b = \frac{\lambda}{\Delta X} f_2 = (35.5 \pm 4.6) \cdot 10^{-2} \text{ мм.} \quad (7)$$

4 Дифракция Фраунгофера на двух щелях

4.1 Экспериментальная установка

Для наблюдения дифракции Фраунгофера на двух щелях в установке (рис. 4) следует заменить щель S_2 экраном Э с двумя щелями (рис. 5). При этом для оценки влияния ширины входной щели на чёткость дифракционной картины вместо входной щели S_1 следует поставить щель с микрометрическим винтом. Два дифракционных изображения входной щели, одно из 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 П (рис. 5) подобна той, что получалась при дифракции на одной щели (рис. 4), однако теперь вся картина

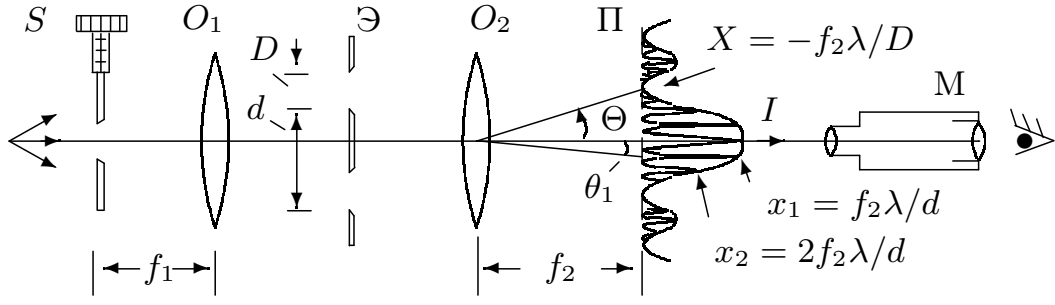


Рис. 5: Схема установки для наблюдения дифракции Фраунгофера на двух щелях

испещрена рядом дополнительных узких полос. Угловая координата θ_m интерференционного максимума m -го порядка определяется соотношением

$$\theta_m = m \frac{\lambda}{b} \quad (8)$$

где d — расстояние между щелями. Линейное расстояние δx между соседними интерференционными полосами в плоскости П равно, поэтому

$$\delta x = f_2 \frac{\lambda}{d} \quad (9)$$

На рис. 5 показано распределение интенсивности в фокальной плоскости объектива O_2 . Штриховой линией (в увеличенном масштабе) изображено распределение интенсивности при дифракции света на одиночной щели. Нетрудно оценить число n интерференционных полос, укладывающихся в области центрального дифракционного максимума. Согласно (6) полная ширина главного максимума равна $2f_2\lambda/b$, где b ширина щели, откуда

$$n = \frac{2f_2\lambda}{b} \frac{1}{\delta x} = \frac{2d}{b} \quad (10)$$

При дифракции света на двух щелях чёткая система интерференционных полос наблюдается только при достаточно узкой ширине входной щели S , которую можно рассматривать как протяжённый источник света размером b . Для наблюдения интерференции необходимо, чтобы расстояние d между щелями не превышало радиуса когерентности

$$d \ll \frac{\lambda}{b} f_1 \quad (11)$$

Здесь b — ширина входной щели S и, следовательно, b/f_1 — её угловая ширина. Таким образом, по размытию интерференционной картины можно оценить размер источника. Этот метод используется в звёздном интерферометре при измерении угловых размеров звёзд.

4.2 Измерения и обработка результатов

Получим на экране дифракционную картину и проведём измерения и вычисления:

n	$X, 10^{-2} \text{ мм}$	$\delta x, 10^{-2} \text{ мм}$	$d, 10^{-2} \text{ мм}$	$b, 10^{-2} \text{ мм}$
9	68 ± 1	7.6 ± 0.1	90.3 ± 1.8	20.1 ± 0.4

Таблица 3: Измерения

Здесь n — число полос внутри главного максимума, X — ширина главного максимума, $\delta x = X/n$ — расстояние между соседними интерференционными полосами, $d = f_2\lambda/\delta x$ — расстояние между щелями, $b = 2d/n$ — ширина щели.

Также при помощи микроскопа измерим параметры щелей d и b «напрямую». Получаем

$$d_{\text{микро}} = (0.92 \pm 0.02) \text{ мм},$$

$$b_{\text{микро}} = (0.20 \pm 0.02) \text{ мм}.$$

5 Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента

5.1 Экспериментальная установка

Установка, представленная на рис. 4, позволяет исследовать влияние дифракции на разрешающую способность оптических инструментов.

Как уже было выяснено, линзы O_1 и O_2 в отсутствие щели S_2 создают в плоскости Π изображение щели S_1 , и это изображение рассматривается в микроскоп M . Таким образом, нашу установку можно рассматривать как оптический инструмент, предназначенный для получения изображения предмета. При этом коллиматор (щель S_1 и объектив O_1) является моделью далёкого предмета, а объектив O_2 и микроскоп M составляют зрительную трубу, наведённую на этот предмет. Щель S_2 , установленная непосредственно перед объективом O_2 , позволяет изменять эффективный размер объектива и, следовательно, разрешающую способность оптической системы.

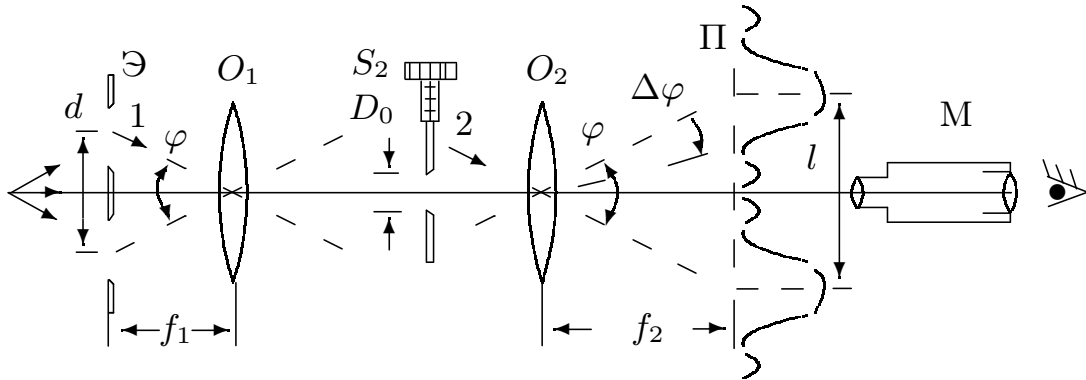


Рис. 6: Схема установки для исследования разрешающей способности оптического инструмента

Поместим вместо щели S_1 экран \mathcal{E} с двумя узкими щелями, расстояние между которыми равно d (рис. 6). Тогда расстояние l между изображениями щелей в плоскости Π равно

$$l = \varphi f_2 = d \frac{f_2}{f_1}, \quad (12)$$

а ширина каждого изображения

$$\delta x \approx \frac{\lambda}{b} f_2 \quad (13)$$

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.

Условия, при которых ещё можно различить, имеем мы дело с одной или двумя щелями, для разных наблюдателей различны. Для того чтобы исключить связанный с этим произвол, пользуются обычно критерием Рэля, который приблизительно соответствует возможностям

визуального наблюдения: изображения считаются различимыми, когда максимум одного дифракционного пятна совпадает с минимумом другого, а в условиях нашей задачи — когда полуширина дифракционного изображения δx совпадает с расстоянием l между изображениями отдельных щелей:

$$\delta x \sim l \rightarrow \frac{\lambda}{b} \sim \frac{d}{f_1}. \quad (14)$$

5.2 Измерения и обработка результатов

Для проверки справедливости критерия Рэлея сравним измеренную ширину b_0 щели S_2 , при которой изображение двух щелей сливается, но всё ещё различимо, с расчётом по формуле $\lambda f_1/d$.

$b_0, 10^{-2} \text{ мм}$	$\lambda f_1/d, 10^{-2} \text{ мм}$
27.3	6.0

Таблица 4: Измерения

6 Вывод и обсуждение результатов

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 щели 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

$$b_{\text{экс}} = (35.5 \pm 4.6) \cdot 10^{-2} \text{ мм} \quad (15)$$

вычисленное по формуле (7), совпадает в пределах погрешности с величиной, измеренной по микрометрической шкалой:

$$b_{\text{экс}} = (32.0 \pm 1.0) \cdot 10^{-2} \text{ мм}. \quad (16)$$

Это подтверждает теоретические выкладки и говорит о выполнении предложенной теории.

Дифракция Фраунгофера на двух щелях. Измеренные экспериментально ширина щели и расстояние между щелями совпадают с измеренными «напрямую».

$$d_{\text{экс}} = (0.90 \pm 0.02) \text{ мм},$$

$$b_{\text{экс}} = (0.20 \pm 0.01) \text{ мм},$$

$$d_{\text{микро}} = (0.92 \pm 0.02) \text{ мм},$$

$$b_{\text{микро}} = (0.20 \pm 0.02) \text{ мм}.$$

Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента. В результате измерений получаем, что $b_0 > \lambda f_1/d$, что означает разрешимость изображений по Рэлею, что мы и наблюдали в ходе выполнения работы.

Общие выводы. Полученные в ходе выполнения работы результаты подтверждают теоретические сведения. Все результаты с неплохой точностью сошлись с «целевыми» показателями, они совпали в пределах погрешностей. Основной вклад в них могли внести аберрации света, которые могли возникнуть из-за недостаточно точной настройки оптической системы для выполнения работы. Также свой вклад вносит неточность определения линейных размеров объектов при помощи микроскопа, особенно при определении координат дифракционных максимумов. Кроме того, неточность вносит некоторая неопределённость при установлении положения нуля зазора S_2 .