

Лабораторная работа 4.3.1

Дифракция света

Осипчук Лидия Б13-301

4 апреля 2025 г.

Цель работы: изучить особенности дифракционных явлений Френеля и Фраунгофера при прохождении света через щель, а также исследовать, как дифракция влияет на разрешающую способность оптических приборов.

Оборудование: оптическая скамья, источник света (ртутная лампа), монохроматор, регулируемые щели, рамка с натянутой вертикальной нитью, двойная щель, микроскоп с микрометрическим винтом на поперечных салазках, зрительная труба.

1. Теоретические основы

1.1. Дифракция Френеля на щели

На рис. ?? показана экспериментальная установка для исследования дифракции Френеля. Пучок световых лучей падает на щель S_2 , где происходит дифракция света. Возникающую дифракционную картину наблюдают при помощи микроскопа М, который фокусируется на плоскость наблюдения П.

Для освещения щели S_2 используется параллельный пучок монохроматического света, формируемый коллиматором. Коллиматор состоит из объектива O_1 и щели S_1 , расположенной в его фокальной плоскости. Изображение спектральной линии, выделенной монохроматором С из спектра ртутной лампы Л, проецируется на щель S_1 . Монохроматор использует призму прямого зрения. Для анализа распределения интенсивности света в плоскости наблюдения П удобно применять метод зон Френеля (в случае щели также известных как зоны Шустера). Когда щель S_2 освещается плоской волной (параллельным пучком лучей), зоны Френеля формируются в виде полосок, параллельных краям щели, как показано на рис. ?. В точке наблюдения результирующая амплитуда формируется как суперпозиция колебаний от незакрытых створками щели зон Френеля. Для графического определения результирующей амплитуды применяется векторная диаграмма, известная как спираль Корню. Общая ширина n зон Френеля (Шустера) выражается формулой:

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

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

Характер наблюдаемой дифракционной картины при щели шириной b зависит от волнового параметра p и числа Френеля C (которое показывает количество открытых полных зон):

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

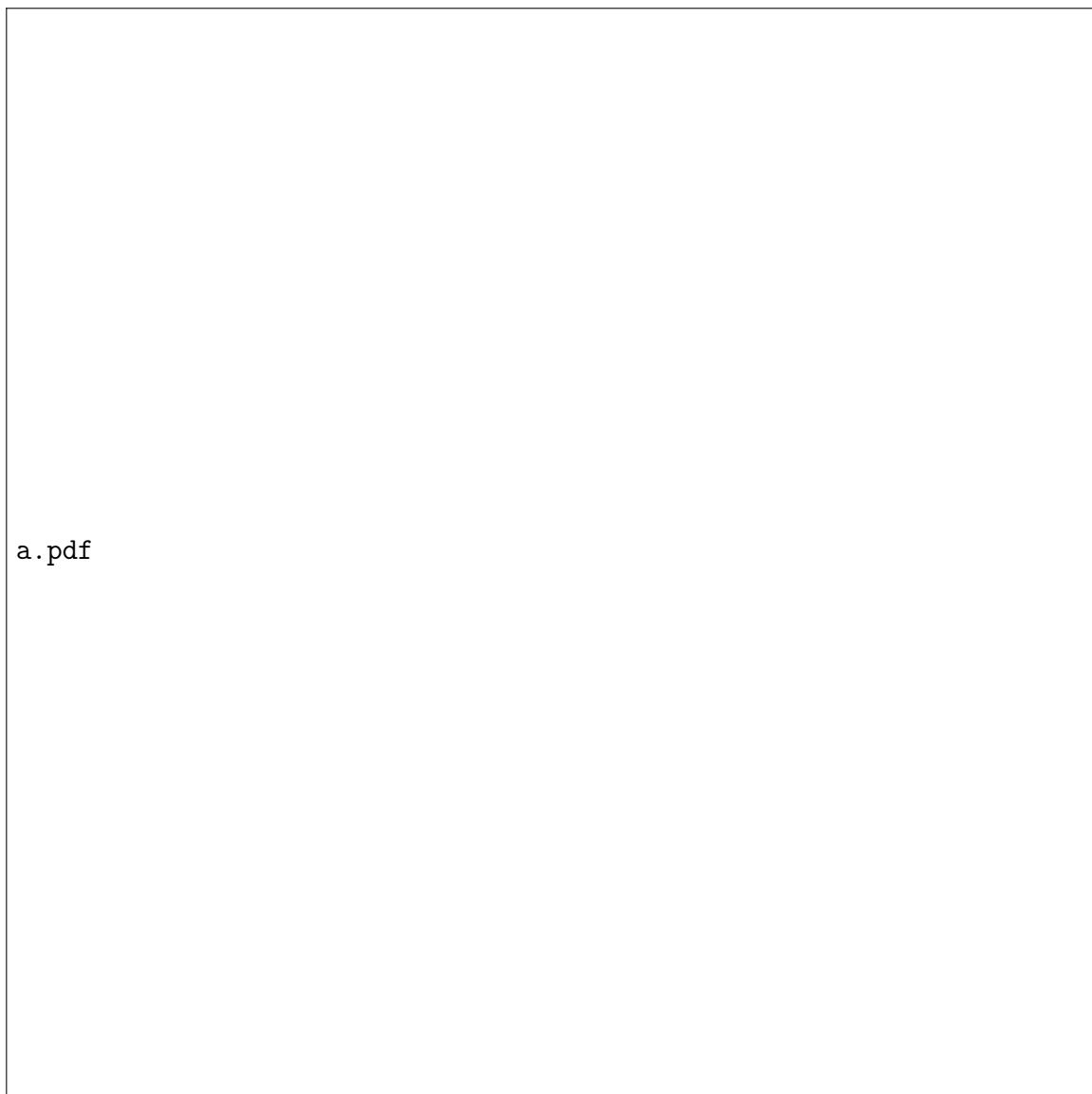


Рис. 1: Схема установки для наблюдения дифракции Френеля

Рис. 2: Зоны Френеля

Когда наблюдение ведется в непосредственной близости от щели, при условии $p \ll 1$ (что соответствует $C \gg 1$, когда на щели размещается большое количество зон), дифракционные эффекты практически не проявляются. В этом случае распределение света за щелью можно описать, используя законы геометрической оптики, а дифракционные явления заметны лишь в узкой области на границе геометрической тени у краев экрана.

При небольшом увеличении расстояния от щели (или соответствующем изменении ширины щели S_2) формируются две группы дифракционных полос, которые движутся почти независимо. Эти группы представляют собой картины дифракции Френеля на краях экрана. Для расчета распределения интенсивности света при дифракции на краю экрана эффективно используется метод спирали Корню.

С дальнейшим ростом расстояния z (или уменьшением ширины щели S_2) происходит постепенное сближение обеих систем дифракционных полос, и при достижении условия $C \gtrsim 1$ они начинают перекрываться. В этой ситуации распределение интенсивности в плоскости наблюдения зависит от количества зон Френеля, уместяющихся на половине ширины щели $b/2$. Если на полуширине щели размещается n зон, то в наблюдаемой картине будет видно $m = n - 1$ темных полос. Это позволяет

по наблюдаемой дифракционной картине определить количество зон Френеля на полуширине щели.

1.2. Дифракция Фраунгофера на одной щели

Когда наблюдение проводится на большом расстоянии от щели и выполняется условие $C \ll 1$ (что означает, что ширина щели существенно меньше ширины первой зоны Френеля, $b \ll \sqrt{\lambda z}$), происходит размытие изображения щели и формируется особый тип дифракционной картины — дифракция Фраунгофера.

Хотя теоретически можно наблюдать оба типа дифракции (Френеля и Фраунгофера) на одной экспериментальной установке (рис. ??), практически при стандартных размерах лабораторного оборудования дифракция Фраунгофера наблюдается только при использовании очень узких щелей.



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

К примеру, при расстояниях $z \approx 20 - 40$ см и длине волны $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-5}$ см требуется щель шириной $b \ll 0,3$ мм. Из-за сложности работы с такими узкими щелями, для практического наблюдения дифракции Фраунгофера экспериментальную установку, показанную на рис. ??, дополняют объективом O_2 (см. рис. ??).

В этой модифицированной установке дифракционная картина формируется в фокальной плоскости объектива O_2 . В данной плоскости каждому углу дифракции θ соответствует определенная точка,

находящаяся на расстоянии от оптической оси:

$$x = f_2 \operatorname{tg} \theta \approx f_2 \theta$$

Важное свойство объектива заключается в том, что он не создает дополнительной разности хода между интерферирующими лучами (свойство таутохронизма), благодаря чему в его фокальной плоскости формируется неискаженная дифракционная картина Фраунгофера, эквивалентная наблюдению на бесконечно большом расстоянии.

В центральной части поля зрения виден главный дифракционный максимум (яркая светлая полоса). Для малых углов дифракции θ положение минимумов интенсивности (темных полос) можно рассчитать по формуле:

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

Линейное расстояние x_m между темной полосой и оптической осью объектива O_2 прямо пропорционально фокусному расстоянию f_2 . Комбинируя уравнения (??) и (??), получаем:

$$x_m = m \frac{\lambda}{b} f_2$$

Из этого выражения следует важная особенность дифракции Фраунгофера: при малых углах дифракции минимумы располагаются на равных расстояниях друг от друга (эквидистантны), а интервал δx между соседними минимумами обратно пропорционален ширине b щели S_2 .

2. Экспериментальная часть

2.1. Исследование дифракции Френеля на щели

Начнем с измерения исходной ширины щели: $b = (0.20 \pm 0.01)$ мм. Постепенно перемещая микроскоп в направлении щели, будем регистрировать зависимость положения микроскопа от количества наблюдаемых $n - 1$ темных полос. Расстояние рассчитываем по формуле $z_n = x_n - x_0$, где $x_0 = 548$ мм — точка отсчета. Полученные данные фиксируем в таблице ??. Дополнительно рассчитаем значения $2\xi_n$ согласно формуле (??), используя длину волны зеленого 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 темных полос

На основе экспериментальных данных построим график зависимости величины $2\xi_n$ от номера зоны n .

Дополнительно исследуем явление дифракции Френеля на препятствии. Для этого заменим щель S_2 на рамку с натянутой тонкой вертикальной нитью. Отодвигая микроскоп от препятствия, наблюдаем формирование дифракционной картины, в которой отчетливо видна характерная светлая полоса в центре геометрической тени от нити.

1.png

2.2. Исследование дифракции Фраунгофера на одной щели

Установим ширину щели с помощью микрометрического винта: $b = (0.25 \pm 0.05)$ мм. Используемая линза имеет фокусное расстояние $f_2 = 16.0$ см.

Используя винт поперечного перемещения микроскопа, определим координаты x_m различных дифракционных минимумов. Полученные результаты запишем в таблицу ?? и визуализируем зависимость положения минимумов от их порядкового номера на графике.

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

2.png

Анализируя построенный график, определяем угловой коэффициент наклона прямой: $k = (40.5 \pm 0.02) \cdot 10^{-4}$ мм. Используя формулу (??), вычисляем ширину щели:

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

3. Заключение

В ходе работы нами были исследованы два фундаментальных типа дифракционных явлений: дифракция Френеля и дифракция Фраунгофера при различных параметрах щели. Проведены как качественные наблюдения этих явлений, так и количественная проверка соответствующих теоретических соотношений.

Результаты исследования дифракции Френеля. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что измеренная ширина щели демонстрирует хорошую согласованность и находится в пределах погрешности измерений, выполненных микрометрическим винтом. Наблюдаемые незначительные отклонения от ожидаемых значений могут быть объяснены погрешностями при определении положения микроскопа и начальной точки отсчета микрометрического винта (см. График 1).

Интересно отметить, что при исследовании дифракции на тонком препятствии (нити) с увеличением расстояния между микроскопом и нитью стабильно наблюдалось четное количество темных дифракционных полос и характерный светлый максимум в центре.

Результаты исследования дифракции Фраунгофера. Сравнивая теоретическое значение ширины щели

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

с экспериментально определенным значением по формуле (??):

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

можно констатировать удовлетворительное соответствие между теорией и экспериментом, что подтверждает корректность используемой теоретической модели.