

Работу выполнили
Самохин Валентин,
Юрченко Петр
676 гр.

под руководством
Нухова А. К.

Маршрут VIII № 5

27 марта 2018 г.,

Лабораторная работа № 4.3.1: Изучение дифракции света

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.

Теоретическая справка. Дифракцией, в самом широком смысле слова, называют отклонения в распространении волн от законов геометрической оптики. Частный случай дифракции - огибание волной препятствия и её проникновение в область геометрической тени.

Основными параметрами, существенно определяющими характер дифракционных явлений, являются длина волны λ , размер отверстия b и расстояние до плоскости наблюдения z . Как показывает дальнейший анализ, характер дифракционных явлений определяется значением волнового параметра

$$\frac{\sqrt{\lambda z}}{b}.$$

- $p \ll 1$: геометрическая оптика
- $p \gg 1$: дифракция Фраунгофера
- $p \sim 1$: дифракция Френеля

Примеры тонких экранов (транспарантов)

1. Амплитудная синусоидальная решётка - тонкая пластинка, амплитудная прозрачность которой меняется от точки к точке по закону

$$t(x) = \beta(1 + m \cos \Omega x),$$

где $m = \text{const}$ - глубина модуляции, $\Omega = \frac{2\pi}{d}$ - пространственная частота решетки с периодом d .

2. Дифракционная решетка - непрозрачный экран с рядом параллельных равноотстоящих щелей, d - период решётки, b - ширина щелей.

Если амплитудная прозрачность транспаранта не меняется от точки к точке, а изменяется только набег фазы $\varphi(x, y)$, то такой транспарант называется фазовым.

3. Фазовая синусоидальная решетка

$$t(x) = \exp^{im \cos \Omega x} \approx 1 + im \cos \Omega x$$

4. Тонкая линза

$$t(x, y) = \exp^{-i \frac{k}{2f} (x^2 + y^2)}$$

Принцип Гюйгенса - Френеля Согласно принципу Гюйгенса, каждую точку, куда пришла волна, можно рассматривать как источник вторичной волны. То есть можно представить себе, что волна возбуждает колебания некоторого фиктивного источника (осциллятора), который и переизлучает вторичную волну. Частота ω этой переизлучённой волны совпадает с частотой исходной монохроматической волны. Френель дополнил принцип Гюйгенса, предложив рассматривать световое колебание в любой точке наблюдения в области $z > 0$ как результат интерференции этих вторичных волн.

Дифракция Френеля

На круглом отверстии. При дифракции Френеля на круглом отверстии интенсивность в точке P , находящейся на оси отверстия на расстоянии z от него, равна

$$I = 2I_0(1 - \cos(\frac{k}{2z}r^2)).$$

Минимумы(четные) и максимумы(нечетные) достигаются при значения радиуса отверстия

$$r_m = \sqrt{m\lambda z}$$

Пластина, делающая синфазными вклады dA от каждого ее участка, есть тонкая линза с фокусным расстоянием $f = z$.

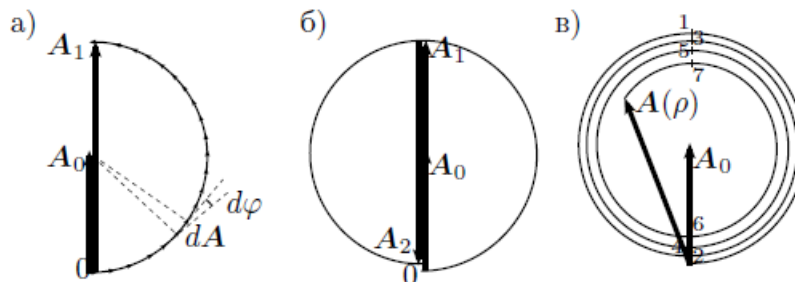
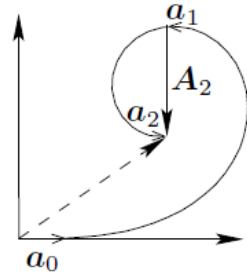
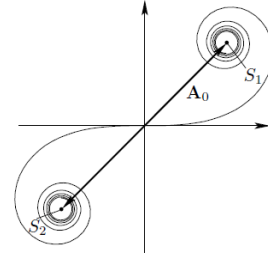


Рис. 1: Метод векторных диаграмм



Две зоны Шустера



Спираль Корню

Пятно Пуассона. Амплитуда в центре геометрической тени малого препятствия (шарика или диска) остаётся почти такой же, как если бы это препятствие отсутствовало.

На щели В данном случае вместо кольцевых зон Френеля мы имеем зоны в виде полос (их называют зонами Шустера). Вклад от каждой следующей зоны Шустера в колебание в точке наблюдения находится в противофазе (разность фаз π) с вкладом от предыдущей зоны.

Продолжая дальше построение векторной диаграммы, придём к спирали Корню.

m -я зона Шустера — это полоса, внешний край которой отстоит от точки наблюдения на расстояние $z + m\lambda/2$ и на расстояние $\xi_m = \sqrt{m\lambda z}$.

Дифракция Фраунгофера

На щели.

$$g(\theta) \propto \frac{\sin(\frac{kb}{2} \sin \theta)}{\frac{kb}{2} \sin \theta}$$

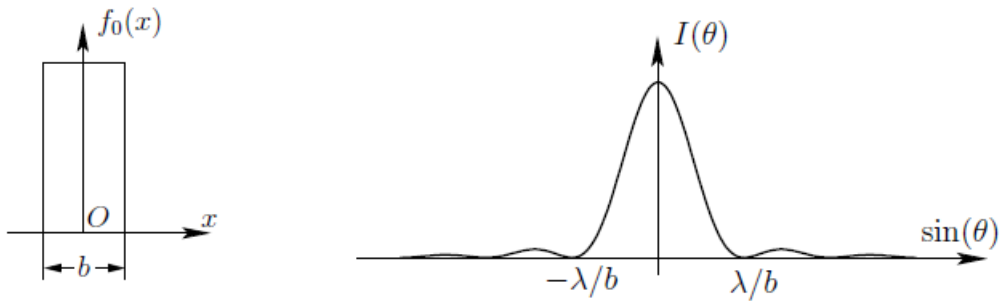


Рис. 2: Поле и угловое распределение интенсивности при дифракции на щели

На двух щелях.

$$I(\theta) = |g(\theta)|^2 \cdot (1 + \cos(kd \sin \theta))^2$$

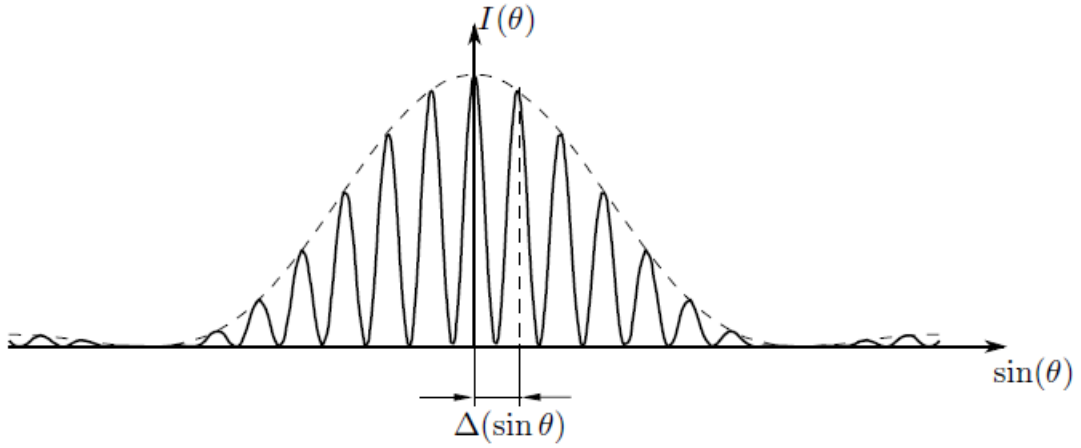


Рис. 3: Дифракция Фраунгофера на двух щелях

На решетке.

$$g_N(\theta) = g(\theta) \sum_{n=0}^{N-1} \exp^{im\alpha}.$$

$$|g_N(\theta)| = |g(\theta)| \cdot \left| \frac{\sin \frac{Nkd \sin \theta}{2}}{\sin \frac{kd \sin \theta}{2}} \right|.$$

Характерной особенностью решётки является наличие узких максимумов, в которые идёт подавляющая доля общего потока энергии. Их положения определяются условием

$$d \sin \theta_m = m\lambda$$

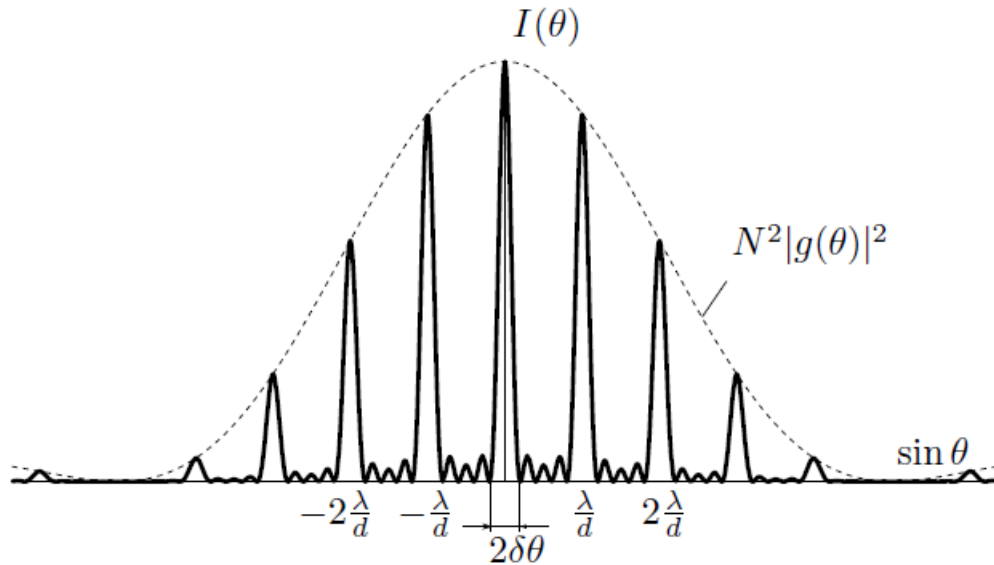


Рис. 4: Дифракция Фраунгофера на решетке

На круглом отверстии. При дифракции плоской волны на круглом отверстии в непрозрачном экране на удаленной плоскости наблюдения образуется картина дифракции: центральное яркое дифракционное пятно (пятно Эйри) окружено чередующимися светлыми и темными кольцами. Угловая полуширина пятна Эйри определяется условием

$$\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

Установки

Дифракция Френеля на щели. Схема установки для наблюдения дифракции Френеля 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.

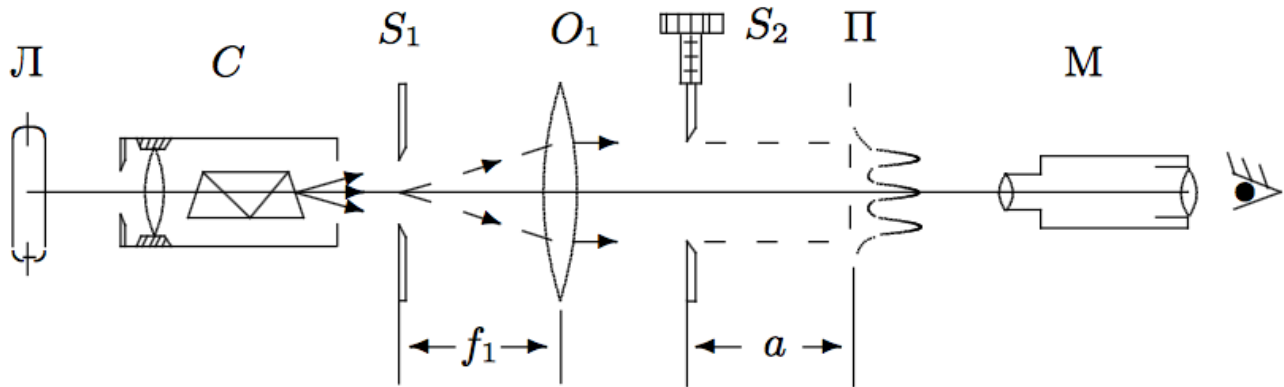


Рис. 5: Схема установки для наблюдения дифракции Френеля

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. 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 ξ_n определяется соотношением:

$$\xi_n = \sqrt{an\lambda},$$

где a — расстояние от щели до плоскости наблюдения (рис. 5), а λ — длина волны.

Дифракция Фраунгофера на щели. Картина дифракции резко упрощается, когда ширина щели становится значительно меньше ширины первой зоны Френеля.

Это условие всегда выполняется при достаточно большом расстоянии a от щели до плоскости наблюдения. Дифракционную картину, наблюдаемую в этом случае, принято называть дифракцией Фраунгофера. Исследование такой дифракционной картины заметно облегчается, потому что упрощаются фазовые соотношения.

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. Например, при $a \approx 20 - 40 \text{ см}$ и $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ получаем $D \ll 0.3 \text{ см}$. Поскольку работать с такими тонкими щелями неудобно, для наблюдения дифракции Фраунгофера к схеме, изображённой на рис. 1 добавляется объектив O_2 (рис. 6).

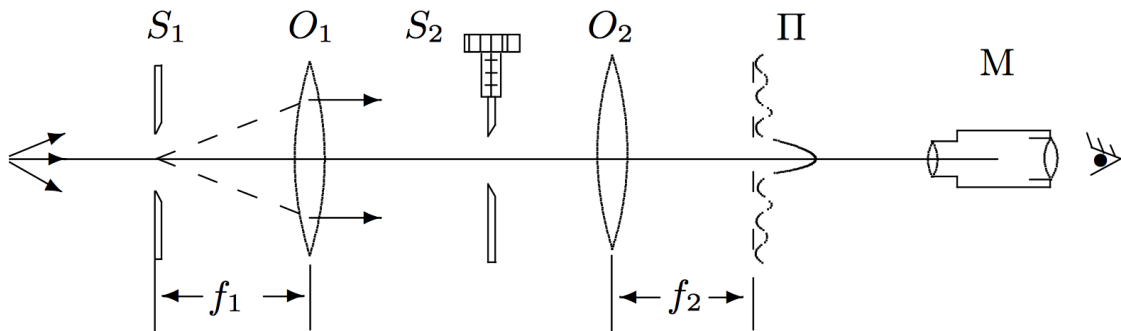


Рис. 6: Схема установки для наблюдения дифракции Фраунгофера на щели

Дифракционная картина наблюдается здесь в фокальной плоскости объектива O_2 .

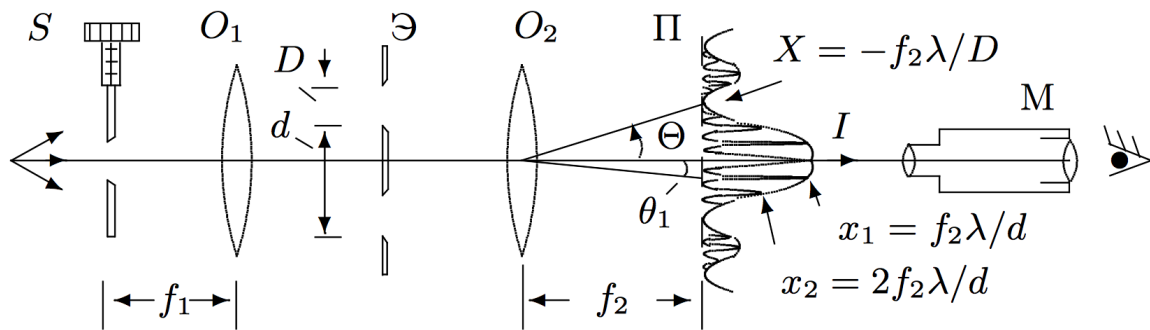


Рис. 7: Схема установки для наблюдения дифракции Фраунгофера на двух щелях

Дифракция Фраунгофера на двух щелях. Для наблюдения дифракции Фраунгофера на двух щелях в установке (рис. 6) следует заменить щель S_2 экраном Э с двумя щелями (рис. 7). 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 образо-

вано лучами, прошедшими через левую, а другое — через правую щели, накладываются друг на друга.

Если входная щель достаточно узка, то дифракционная картина в плоскости Π (рис. 6) подобна той, что получалась при дифракции на одной щели (рис. 7), однако теперь вся картина испещрена рядом дополнительных узких полос. Наличие этих полос объясняется суперпозицией световых волн, приходящих в плоскость наблюдения через разные щели экрана \mathcal{E} .

Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента.

Установка, представленная на рис. 8, 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. Если перед объективом O_2 зрительной трубы расположить щель S_2 , то изображение объекта будет искажено дифракцией на щели S_2 . Чем меньше ширина D_0 этой щели, тем сильнее искажение. Качественной характеристикой этих искажений может служить минимальное угловое расстояние φ_{min} между объектами (источниками), которые ещё воспринимаются как отдельные.

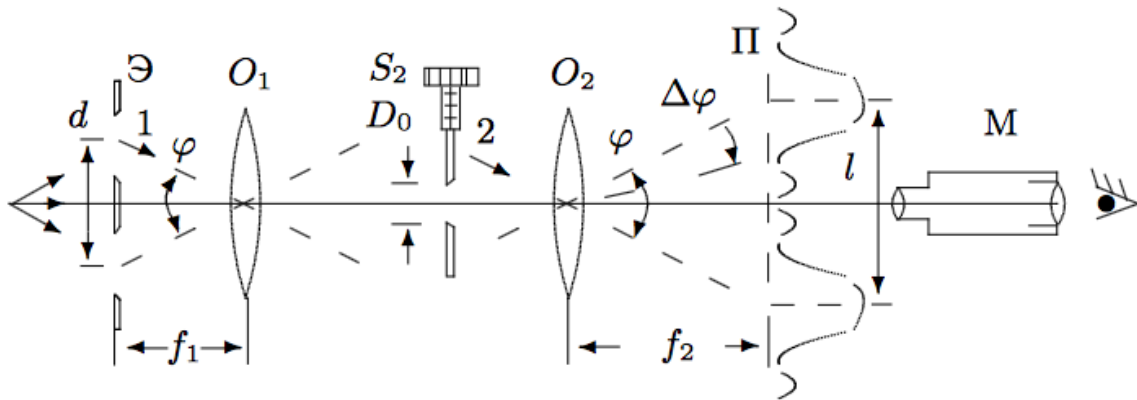


Рис. 8: Схема установки для исследования разрешающей способности оптического инструмента