Московский Физико-Технический Институт
(государственный университет)

Лабораторная работа по курсу общей физики № 4.3.1

Изучение дифракции света.

Автор:
Филиппенко Павел Б01-001

Долгопрудный, 2022

Цель работы Исследовать явления дифракции Френеля и Фраунгофера на щели, изучить влияние дифракции на разрешающую способность оптических инструментов.
Приборы и материалы Оптическая скамья, ртутная лампа, монохроматор, щели с регулируемой шириной, рамка с вертикальной нитью, двойная щель, микроскоп на поперечных салазках с микрометрическим винтом.

Описание работы

А. Дифракция Френеля

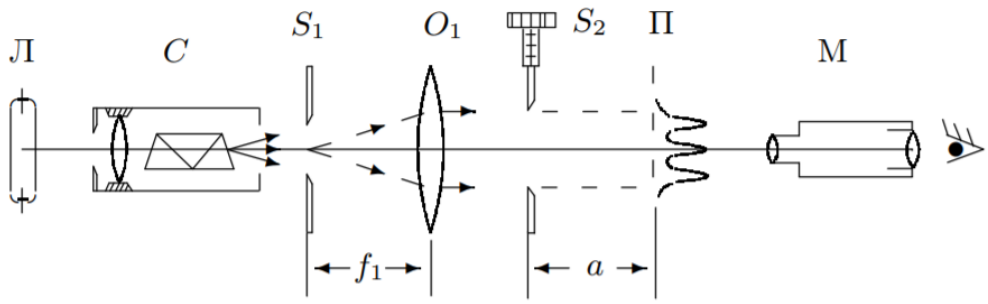

Рис. 1: Схема установки 1.

Схема установки 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. Щель S_2 освещается параллельным пучком монохроматического света с помощью коллиматора, образованного объективом O_1 и щелью S_1, находящейся в его фокусе. На S_1 сфокусированно изображение спектральной линии, выделенной из спектра ртутной лампы Л при помощи монохроматор C, в котором используется призма прямого зрения.
Распределение интенсивности света в плоскости П рассчитаем с помощью зон Френеля. При освещении S_2 параллельным пучком лучей (плоская зона) зоны Френеля представляют собой плоскости, параллельные краям щели. Результирующая амплитуда в точке наблюдения определеяется суперпозицией колебаний от тех зон Френеля, которые не перекрыты створками щели. Графическое определение результирующей амплитуды производится с помощью векторной диаграммы – спирали Корню. Суммарная ширина m зон Френеля z_m определяется соотношение

$$z_m = \sqrt{am\lambda}, \tag{1}$$

где a – расстояние от щели до плоскости П. Вид наблюдаемой картины определяется *числом Френеля* Φ:

$$\Phi^2 = \frac{D}{\sqrt{a\lambda}}$$

– число зон Френеля, которые укладываются в ширине щели D. $p = \frac{1}{\Phi^2}$ называется *волновым параметром.* Дифракционной картины нет, когда П совпадает с плоскостью щели. При малом удалении от щели $\Phi \gg 1$ и картина наблюдается в узкой ублаcти на границе света и тени у краёв экрана. При последующих удалениях две группы дифракционных полос перемещаются независимо и каждая образует картину дифракции Френеля на экране. Распределение интенсивности может быть найдено с помощью спирали Корню. При дальнейшем увеличении a две системы полос сближаются и накладываются друг на друга, распределение интенсивности определяется числом зон Френеля в полуширине щели. Если их m, то будет набюдаться $m-1$ тёмная полоса.

Б. Дифракция Фраунгофера на щели

Для выкладок ниже нам потребуется знать *принцип Гюйгенса-Френеля.* Он формулируется следующим образом:
Каждый элемент волнового фронта можно рассматривать как центр вторичного возмущения, порождающего вторичные сферические волны, а результирующее световое поле в каждой точке пространства будет определяться интерференцией этих волн.
Теперь рассмотрим первое применение этого принципа, получившее название *метод зон Френеля*

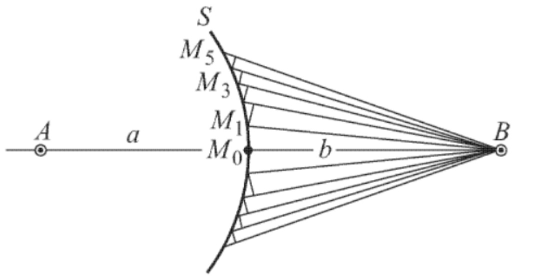

Рис. 2: Построение зон Френеля

Для этого рассмотрим действие световой волны действующей из точки A в какой-то точке B. В этом случае можно, взяв точку M_0 в качестве центра (см. рис. 1), построить ряд концентрических сфер, радиусы которых начинаются с b и увеличиваются каждый раз на половину длины волны $\frac{\lambda}{2}$. При пересечении с плоским фронтом волны F эти сферы дадут концентрические окружности. Таким образом, на фронте волны появятся кольцевые зоны (зоны Френеля) с радиусами r_1, r_2 и т. д.

Из геометрических соображений посчитав, можно получить, что

$$r_i = i\sqrt{a\lambda} \tag{2}$$

Картина дифракции упрощается, когда ширина щели становится значительно меньше ширины первой зоны Френеля, т.е. если

$$D \ll \sqrt{a\lambda} \tag{3}$$

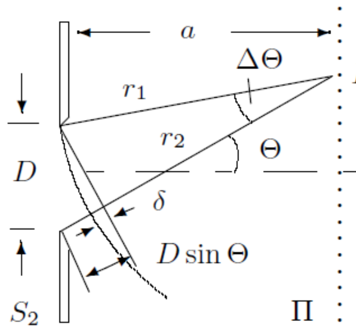

Рис. 3: К фазовым соотношениям при дифракции Фраунгофера

Это условие всегда выполняется при достаточно большом a. В этом случае говорят, что *дифракция Фраунгофера.* Дифракционную картину в этом случае называются *дифракцией Фраунгофера.* При выполнении пункта (2) у нас упрощаются фазовые соотношения, что поясняет рис. 2, в итоге с хорошим приближением можно считать, что разность хода между крайними лучами, приходящими от щели в точке наблюдения P, с хорошим приближением равна

$$\Delta = r_2 - r_1 \approx D\sin\theta \approx D\cdot\theta \tag{4}$$

Здесь предполагается, что θ достаточно мал. Дифракцию Фраунгофера можно наблюдать на установке Рис. 1, но для удобства к подобной установке добавляется объектив O_2.

Дифракционная картина здесь наблюдается в фокальной плоскости объектива O_2. Каждому значению θ соответствует в этой плоскости точка, отстоящая от оптической оси на расстоянии

$$X = f_2\tan\theta \approx f_2\theta. \tag{5}$$

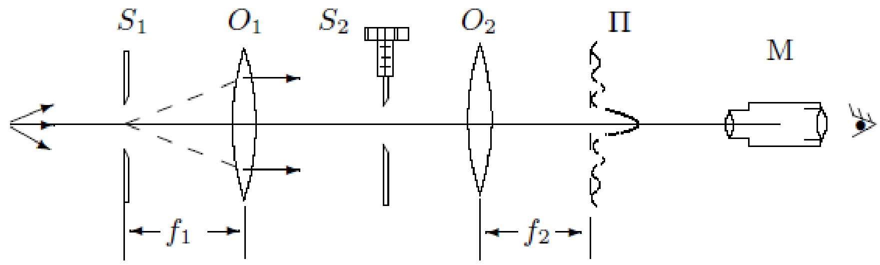

Рис. 4: Схема установки 2.

Объектив не вносит разности хода между интерферирующими лучам, поэтому в его фокальной плоскости наблюдается неискажённая дифракционная картина. При $\theta = 0$ разность хода между лучами нулевая, поэтому в центре поля зрения дифракционный максимум. Первый минимум соответствует θ_1 такому, что в точке наблюдения разность хода пробегаем все значения от 0 до 2π. Аналогично рассуждая, для m-й полосы

$$\theta_m = \frac{m\lambda}{D} \tag{6}$$

Расстояние X_m тёмной полосы от оптической оси из (5) и (6)

$$X_m = f_2 m \frac{\lambda}{D} \tag{7}$$

B. Дифракция Фраунгофера для двух щелей

Для наблюдения дифракции Фраунгофера на двух щелях S_2 заменим экраном Э с двумя щелями. При этом для оценки влияния ширины входной щели на чёткость вместо S_1 поставим щель с микрометрическим винтом. Два дифракционных изображения входной щели,

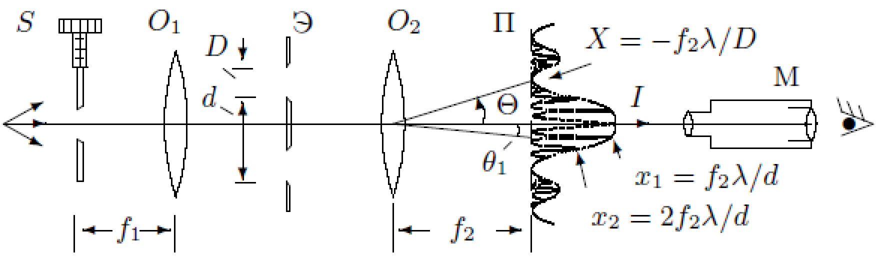

Рис. 5: Схема установки 3.

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 подобна той, что получалась при дифракции на одной щели, однако вся картинка испещерена рядом дополнительных узких полос, наличие которых объясняется суперпозицией световых волн через разные щели. Светлая интерфереционная полоса наблюдается в случаях, когда разность хода равна целому числу длин волн. Таким образом, угловая координата максимума порядка m равна

$$\theta_m = \frac{m\lambda}{d}, \tag{8}$$

где d – расстояние между щелями. Отсюда расстояние между соседними интерфереционными полосами в плоскости П равно

$$\delta x = f_2 \frac{\lambda}{d} \tag{9}$$

Число интерференционных полос укладывающихся в области центрального максимума равна отношению ширины главного максимума $\frac{2\lambda f_2}{D}$ к расстоянию между соседними полосами:

$$n = \frac{2\lambda f_2}{D}\frac{1}{\delta f} = \frac{2d}{D}. \tag{10}$$

При дифракции света на двух щелях чёткая система интерференционных полос наблюдается только при достаточно узкой ширине входной щели S. При увеличении ширины картинка пропадает и появляется вновь, но полосы при этом сильно размыты и видны плохо.

Г. Влияние дифракции на разрешающую способность оптического инструмента

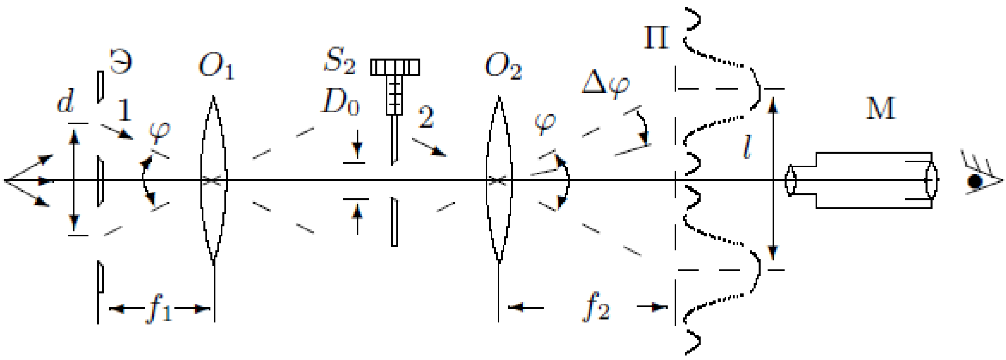

Рис. 6: Схема установки 4.

В отсутствие щели S_2 линзы O_1 и O_2 создают на плоскости П изоюражение щели S_1 и это изображение рассматриваются микроскопом М. Таким образом, установку можно рассматривать как оптический инструмент, предназначенные для получения изображения предмета. Если перед O_2 расположить S_2, то изображение объекта будет искажено из-за дифракции. Чем меньше ширина щели, тем сильнее искажение. Качественной характеристикой этого искажения может служить φ_{min} — минимальное угловое расстояние между объектами (источниками), которые всё ещё воспринимаются как раздельные. Поместим вместо S_1 экран Э с двумя щелями с расстоянием d. Тогда на S_2 будут падать два пучка света с углом

$$\varphi = \frac{d}{f_1} \tag{11}$$

Из геометрии расстояние l между изображениями щелей в плоскости П равно

$$l = \varphi f_2 = d\frac{f_2}{f_1}. \tag{12}$$

Ширина $\Delta\varphi$ определяется дифракцией на S_2. Условия, при которых изображения различимы разные для разных наблюдателей, поэтому используют *критерий Рэлея – максимум одного дифракционного пятна должен совпадать с минимумом другого*. В наших условиях это значит, что угловая полуширина $\frac{\lambda}{D}$ равна угловому расстоянию $\frac{l}{f_2}$.