

Ярославский государственный педагогический
университет им. К.Д.Ушинского

Лаборатория оптики

В.К. Мухин

Лабораторная работа № 6

Дифракция Френеля на круглом отверстии

Ярославль
2013

Оглавление

<i>Литература:</i>	3
Вопросы для подготовки к работе.....	3
Теоретическое введение	3
Описание установки	7
Порядок выполнения работы	8
Задание 1. Знакомство с описанием и конструкцией экспериментальной установки.	8
Задание 2. Проверка правильности настройки экспериментальной установки.	8
Задание 3. Измерение радиуса отверстия с помощью зон Френеля.	8
Задание 4 (только для физиков). Прямое измерение отверстия.....	10
Контрольные вопросы	10

Лабораторная работа № 6

Дифракция Френеля на круглом отверстии

Цель работы: наблюдение дифракции на круглом отверстии и расчет радиуса отверстия методом зон Френеля.

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, лазер, экран с круглым отверстием, линза, микрообъектив, экран для наблюдения дифракционной картины, измерительный микроскоп.

Литература:

1. Ландсберг Г.С. Оптика.- М.: Наука, 1976.
2. Савельев И.В. Курс общей физики, т.2.- М.: Наука, 1982.
3. Поль Р.В. Оптика и атомная физика.- М.: Наука, 1966.
4. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики, т.3.- М.: Высшая школа, 1979.

Вопросы для подготовки к работе

1. Какое явление называется дифракцией света?
2. Чем отличаются случаи дифракции Френеля и дифракции Фраунгофера?
3. В чем заключается метод зон Френеля?
4. Схема установки для наблюдения дифракции Френеля?
5. Рабочая формула и измерение входящих в нее величин.

Теоретическое введение

Под дифракцией света понимают всякое отклонение от прямолинейного распространения света, связанное с нарушением законов геометрической оптики. Дифракция, в частности, приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени. Известны два случая дифракционных явлений: дифракция Френеля и дифракция Фраунгофера. Различие между ними заключается в месторасположении точки наблюдения. В случае дифракции Френеля эта точка находится на конечном расстоянии от препятствия, а в случае дифракции Фраунгофера – в бесконечности. При этом для определения типа дифракции совершенно не важно, какие волны – плоские или сферические падают на препятствие. В данной лабораторной работе изучается дифракция Френеля на круглом отверстии.

Если на пути световых волн поставить экран с отверстием, то часть световой волны, прикрытая непрозрачным экраном, не воздействует на точку наблюдения совсем, а неприкрытые области волны действуют так, как если бы экрана не было совсем.

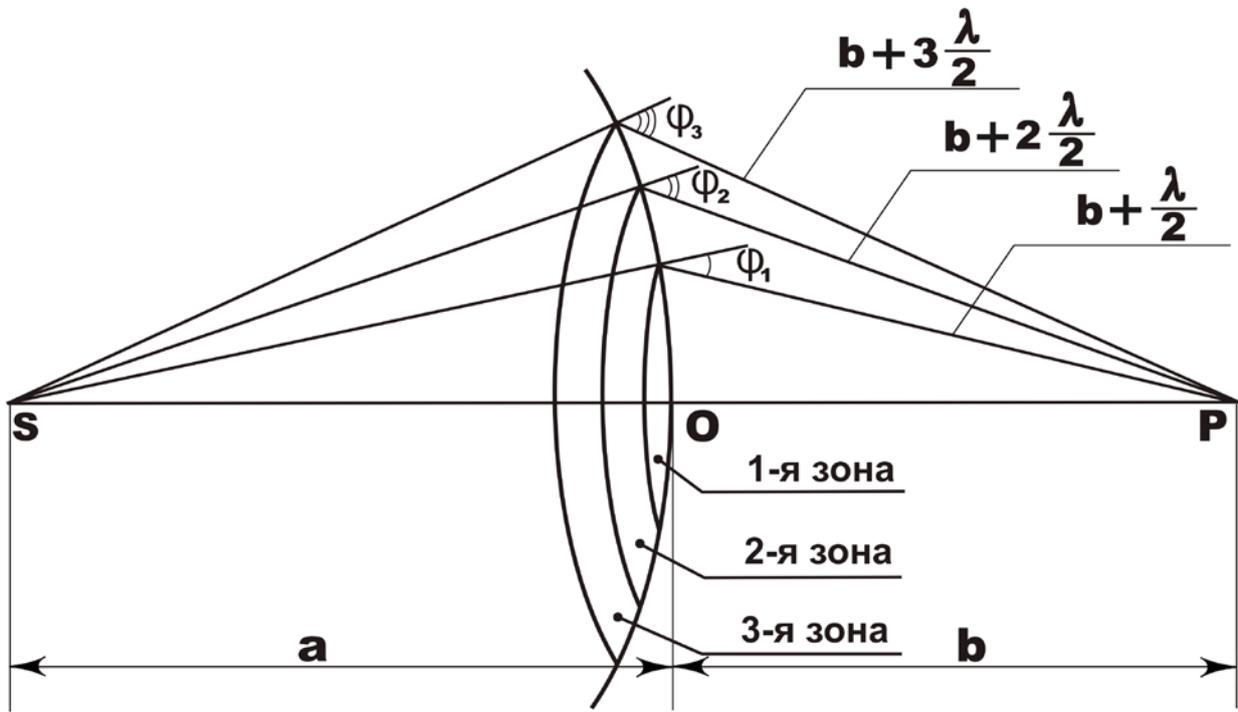


Рис. 1

Рассмотрим дифракцию Френеля на круглом отверстии (рис. 1). Пусть волна, идущая от источника монохроматического света с длиной волны λ , встречает на пути экран Д с круглым отверстием. Исследуем явления, происходящие в точке **P**, лежащей на прямой, соединяющей точку **S** (источник света) с центром **O** круглого отверстия.

Для этого воспользуемся методом зон Френеля. Выделим на волновой поверхности кольцевые зоны, построенные так, что расстояния от краев каждой зоны до точки наблюдения **P** отличаются на $\lambda/2$. Расстояние b_m от внешнего края зоны с номером m до точки **P** можно представить общей формулой:

$$b_m = b + m \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где b – расстояние от вершины волновой поверхности **O** до точки наблюдения **P**. В этом случае колебания, возбуждаемые в точке **P** двумя соседними зонами, противоположны по фазе, так как разность хода соответствующих волн равна $\lambda/2$. В результате при наложении в точке **P** колебания от соседних зон должны взаимно ослаблять друг друга.

Вычислим размеры полученных зон (рис. 2). Для m -ной зоны

$$r_m^2 = a^2 - (a - h_m)^2 = (b + m \frac{\lambda}{2})^2 - (b + h_m)^2, \quad (2)$$

где a – радиус волновой поверхности, r_m – радиус внешней границы m -ной зоны. Возведя скобки в квадрат, получим:

$$r_m^2 = 2ah_m - h_m^2 = bm + m^2 \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 - 2bh_m - h_m^2. \quad (3)$$

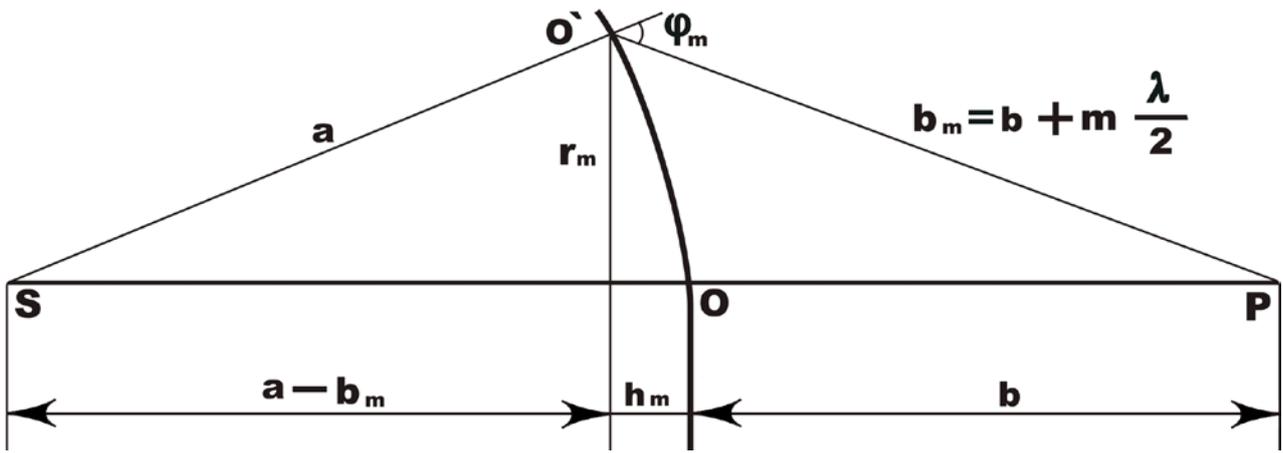


Рис. 2

Ограничиваясь рассмотрением не слишком больших m , можно ввиду малости λ пренебречь слагаемым, содержащим λ^2 . В этом приближении после преобразований имеем:

$$h_m = \frac{bm\lambda}{2(a+b)} \quad (4)$$

Площадь сферического сегмента равна

$$S = 2\pi R h,$$

где R – радиус сферы, h – высота сегмента. Следовательно,

$$S_m = 2\pi a h_m = \frac{\pi a b}{a+b} m \lambda$$

и площадь m -ной зоны Френеля

$$S_m = S_m - S_{m-1} = \frac{\pi a b \lambda}{a+b}. \quad (5)$$

Полученное нами выражение не зависит от m . Это означает, что при не слишком больших m площади всех зон Френеля примерно одинаковы.

Произведем оценку радиусов зон. Согласно (3)

$$r_m^2 = 2a h_m - h_m^2$$

При не слишком больших m высота сегмента $h_m \ll a$, поэтому можно считать, что

$$r_m^2 = 2a h_m$$

Подставляя сюда значение (4), получим радиус внешней границы m -ной зоны Френеля:

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} m\lambda. \quad (6)$$

Действие отдельных зон в точке **P** тем меньше, чем больше угол ϕ_m между нормалью к поверхности зоны и направлением **OP**, т.е. действие зон постепенно убывает от центральной зоны к периферическим.

Пусть действие центральной зоны в точке **P** выражается возбуждением колебания с амплитудой A_1 , действие соседней зоны – колебанием с амплитудой A_2 , следующей – с амплитудой A_3 и так далее. Так как действие зон убывает от центра к периферии, то можно образовать монотонно убывающую последовательность:

$$A_1 > A_2 > A_3 > A_4 > \dots$$

Фазы колебаний, возбуждаемые соседними зонами, отличаются на π , поэтому амплитуда A результирующего светового колебания в точке **P** может быть найдена алгебраически:

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + A_5 - \dots$$

Это выражение можно записать в виде:

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2}\right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2}\right) + \dots$$

Вследствие монотонного убывания A_m можно приближенно считать, что

$$A_m = \frac{A_{m-1} + A_{m+1}}{2}.$$

Выражение для амплитуды, создаваемой в точке **P** сферической волновой поверхностью, окончательно примет вид:

$$A = \frac{A_1}{2}.$$

Если сферический волновой фронт ограничен отверстием радиуса **R**, открывающим лишь небольшое число зон **m**, то в результате очевидных вычислений получим:

$$A = \frac{A_1}{2} + \frac{A_m}{2},$$

где знак плюс берется для нечетных **m** и минус – для четных.

Таким образом, если в точке наблюдения складываются амплитуды от небольшого числа зон, то в результате при нечетном **m** получается максимум освещенности, а при четном **m** – минимум.

Из (6) следует, что число зон m , укладывающихся в отверстии, связано с радиусом R отверстия следующим соотношением:

$$m = \frac{R^2(a+b)}{ab}.$$

Подсчитав число зон m (по виду дифракционной картины) и измерив расстояния a и b , можно при заданной длине световой волны λ вычислить радиус отверстия R .

Описание установки

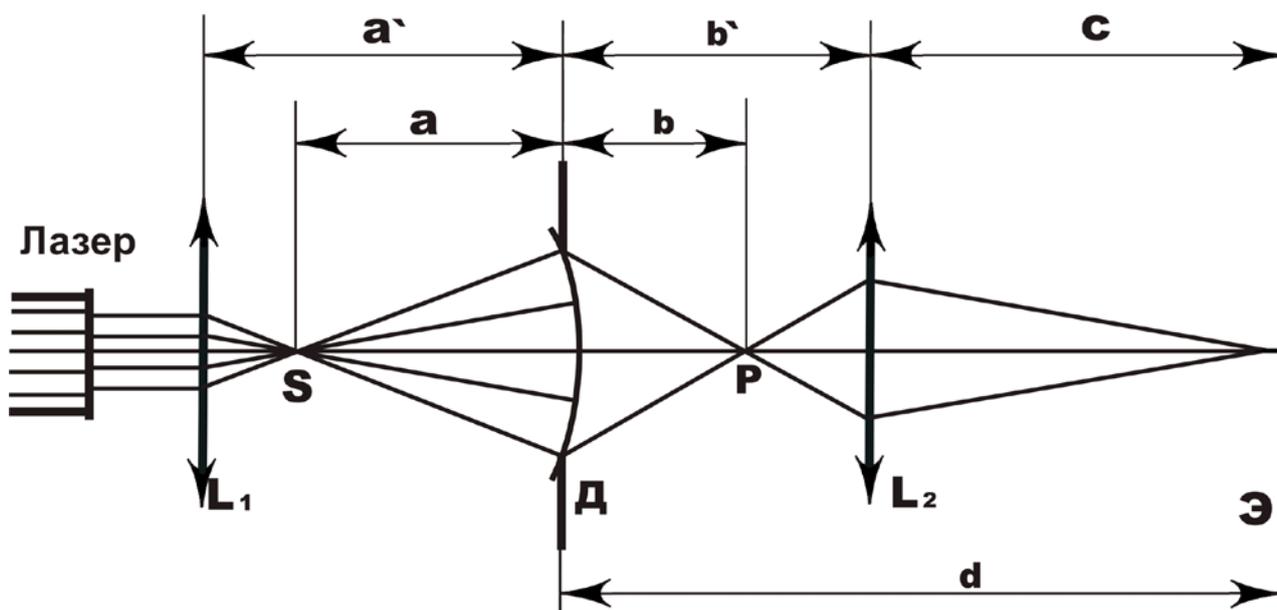


Рис. 3

Схема установки приведена на рис. 3. Параллельный пучок света от лазера попадает на линзу L_1 , которая служит для создания точечного источника света. Источником S сферических волн является фокус этой линзы. Далее свет попадает на экран $Д$ с небольшим круглым отверстием в центре, на котором и происходит дифракция. Дифракционная картина наблюдается в точке $Р$. Для удобства наблюдения применена линза L_2 (микрообъектив), с помощью которой на экране $Э$ получается увеличенное изображение картины дифракции.

Экспериментальная установка смонтирована на половине стандартной оптической скамьи ОСК-2. При настройке установки следует особое внимание обратить на соосность (совмещение оптических осей) элементов. Соосность можно считать удовлетворительной, если при перемещении по скамье микрообъектива L_2 изображение дифракционной картины не выходит из его поля зрения.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Знакомство с описанием и конструкцией экспериментальной установки.

Задание 2. Проверка правильности настройки экспериментальной установки.

Включите лазер и убедитесь, что расширенный линзой L_1 луч освещает отверстие в экране Д. Передвигая вдоль оптической скамьи микрообъектив L_2 , наблюдайте на экране Э сменяющиеся одна другую характерные дифракционные картины. Такая отдельно взятая картина представляет из себя систему из темных и светлых колец, окружающих темное или светлое центральное пятно. Количество темных и светлых колец зависит от m – числа открытых отверстий зон Френеля. Это число может быть четным или нечетным и, соответственно, центральное пятно будет темным или светлым.

Отметим, что для $m = 1$ (открыта только одна центральная зона) положение микрообъектива определяется не вполне отчетливо, поэтому измерения рекомендуется начинать с $m = 2$. Дифракционная картина при этом имеет вид темного пятна в центре при отсутствии вокруг него концентрических колец. Эту картину, во избежание ошибки, удобно получать передвигая объектив от экрана Э к экрану с отверстием Д. В этом случае первое появление темного пятна в центре будет соответствовать двум открытым зонам Френеля.

Задание 3. Измерение радиуса отверстия с помощью зон Френеля.

Для определения радиуса отверстия R используем соотношение (6), имея в виду, что $r_m = R$. Экспериментальному определению здесь подлежат (см.рис. 3):

a – расстояние от источника сферических волн до экрана с отверстием;

b – расстояние от экрана с отверстием до точки наблюдения;

m – число зон Френеля, укладывающихся в отверстии.

Для того, чтобы определить расстояние a , предварительно следует измерить расстояние a' от линзы L_1 до экрана с отверстием, а затем вычислить:

$$a = a' - f_1,$$

где f_1 – фокусное расстояние линзы L_1 (нанесено на ее оправе).

Расстояние b для соответствующего значения m определяется по формуле линзы:

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{b' - b} + \frac{1}{c},$$

где f_2 – фокусное расстояние микрообъектива L_2 ;
 b' – расстояние от экрана с отверстием до микрообъектива;
 c – расстояние от микрообъектива до экрана наблюдения Э.

Выполнив преобразования, получим:

$$b = \frac{cb' - cf_2 - b'f_2}{c - f_2}.$$

Заметим, что величины c и b' связаны соотношением:

$$c = d - b',$$

где d – расстояние от экрана с отверстием Д до экрана наблюдения Э, которое не изменяется в процессе работы и измеряется один раз.

Учитывая это, окончательно запишем:

$$b = \frac{b'(d - b') - df_2}{(d - f_2) - b'} \quad (7)$$

Измерения следует провести не менее чем для пяти значений m . Для каждого m не менее чем в три раза измерьте расстояние b и вычислите с погрешностью радиус отверстия R . Результаты запишите в таблицу 1. В соответствующей графе таблицы сделайте рисунок дифракционной картины для каждого значения m .

Таблица 1

$$\lambda = 6328 \text{ \AA}; f_1 = \dots; f_2 = \dots; a = \dots; d = \dots$$

m	Рисунок	b_1'	b_1	$R_1 \sqrt{\frac{ab}{a+b}} m \lambda$	ΔR_{cp}	ΔR_i	$(\Delta R_i)^2$	$\Delta R = \sqrt{\frac{\sum_i (\Delta R_i)^2}{n(n-1)}}$
2								
3								
4								

Используя результаты вычислений, постройте график зависимости

$$R = f(m). \quad (8)$$

Задание 4 (только для физиков). Прямое измерение отверстия.

Снимите с экспериментальной установки экран Д. С помощью измерительного микроскопа измерьте в нескольких направлениях диаметр отверстия. Вычислите его радиус R_0 . Результаты занесите в таблицу 2 (форму таблицы придумайте сами). Оцените абсолютную погрешность (т.е. учтите как случайную, так и систематическую ошибку). В одной системе координат с графиком (8) постройте прямую

$$R_0 = const .$$

Замечание. Точки на графике следует наносить с учетом вычисленных погрешностей (т.е. это уже будут не точки, а вертикальные отрезки длиной $2 \cdot \Delta R$).

Контрольные вопросы

1. Как строятся зоны Френеля?
2. Вывод рабочей формулы.
3. Сколько зон укладывается на отверстие, если в центре картины при передвижении микрообъектива от экрана Э к экрану Д впервые после темной точки появилось светлое пятно?
4. Что такое зонная пластинка и как она работает? Чем отличается амплитудная зонная пластинка от фазовой зонной пластинки?
5. Почему в задании № 2 при вычислении ΔR не имеет смысла учитывать систематическую ошибку?