

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра общей и технической физики

ДИФРАКЦИЯ ФРЕНЕЛЯ НА КРУГЛОМ ОТВЕРСТИИ

*Методические указания к лабораторной работе
для студентов всех специальностей и направлений подготовки*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

УДК 535.41/42 + 535.5 (073)

ДИФРАКЦИЯ ФРЕНЕЛЯ НА КРУГЛОМ ОТВЕРСТИИ: Методические указания к лабораторной работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *А.С. Мустафаев, А.Ю. Грабовский, Е.Е. Мацкевич*. СПб, 2020. 23 с.

В методических указаниях сформулированы теория, методические указания и алгоритм выполнения работы, принципы работы измерительных устройств и экспериментальной установки.

Лабораторная работа дает возможность студентам познакомиться с теорией и практикой дифракции Френеля, изучить работу зонной пластинки и рассчитать радиусы зон Френеля. Основная задача - овладеть техникой и методикой проведения эксперимента, а также приемами обработки его результатов и оформления заключительного отчета.

В зачетной работе практикума студент должен продемонстрировать умение в устной и письменной форме, логически верно и аргументировано защищать результаты своих исследований.

Предназначены для студентов всех специальностей и направлений подготовки бакалавриата и магистратуры Санкт-Петербургского горного университета.

Научный редактор проф. *А.С. Мустафаев*

Рецензент проф. *А.А. Кудрявцев* (ИТФ РАН)

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2020

ДИФРАКЦИЯ ФРЕНЕЛЯ НА КРУГЛОМ ОТВЕРСТИИ

*Методические указания к лабораторной работе
для студентов всех специальностей и направлений подготовки*

Сост.: *А.С. Мустафаев, А.Ю. Грабовский, Е.Е. Мацкевич*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
общей и технической физики

Ответственный за выпуск *А.С. Мустафаев*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 29.06.2020. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,3. Усл.кр.-отт. 1,3. Уч.-изд.л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ 402.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить явление дифракции Френеля и работу зонной пластинки. На основании экспериментальных данных рассчитать радиусы зон Френеля и определить результат дифракции в зависимости от количества открытых зон.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Дифракция волн – это совокупность явлений, связанных с отклонением света от законов геометрической оптики. Она наблюдается, когда на пути волны встречаются резкие неоднородности. Дифракция является отличительным признаком волны любой природы. Для наблюдения дифракции световых волн размеры препятствий должны быть сравнимы по величине с длиной волны. Явление дифракции объясняется с помощью принципа Гюйгенса, согласно которому каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн дает положение волнового фронта в следующий момент времени (рис. 1).

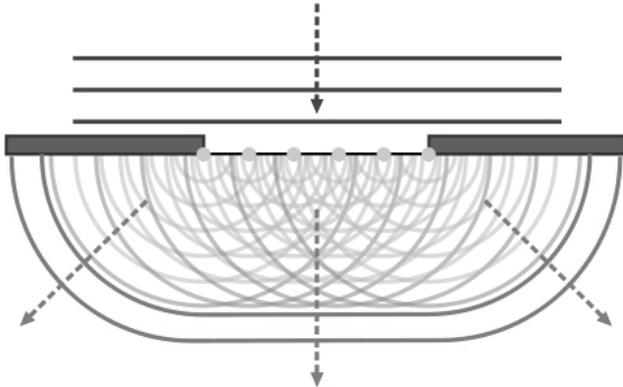


Рис. 1. Иллюстрация принципа Гюйгенса

С помощью принципа Гюйгенса можно определить направление распространения волнового фронта, но не амплитуду и интенсивность волн, распространяющихся в различных направлениях. Френель развил принцип Гюйгенса, дополнив его представлением об интерференции вторичных когерентных волн.

Таким образом, согласно принципу Гюйгенса-Френеля, каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн, которые являются когерентными, а результат их интерференции и определяет распространяющуюся в пространстве волну.

Для нахождения амплитуды светового колебания в некоторой точке пространства необходимо разбить волновую поверхность на множество малых элементов, каждый из которых служит источником вторичных волн, амплитуда которых пропорциональна величине этого элемента. Затем нужно произвести суммирование (интегрирование) амплитуд по всей волновой поверхности, что в общем случае может оказаться очень трудоемкой задачей, которая значительно упрощается в случае наличия какой-либо симметрии.

Рассмотрим сферическую волну, исходящую от точечного источника S . На рисунке 2 изображен первичный волновой фронт точечного источника S , который собственно и является сферической поверхностью. Источник световой волны S располагается на расстоянии a от точки O волновой поверхности, а точка наблюдения P - на расстоянии b от точки O .

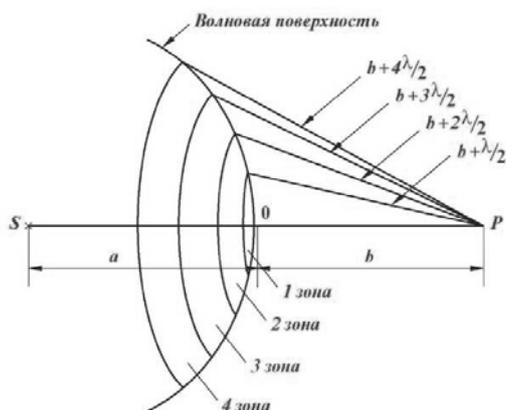


Рис. 2. Зоны Френеля

Применим принцип Гюйгенса-Френеля для нахождения амплитуды A волны в точке P . Поскольку волновая поверхность волны симметрична относительно прямой SP , разобьем эту поверхность на кольцевые зоны так, чтобы расстояния от края зоны до точки P для соседних зон различались на половину длины волны. Это означает, что оптическая разность хода волн от сходных точек соседних зон до точки наблюдения P будет отличаться на $\lambda/2$ (при этом отличие по фазе будет равно π). Известно, что площади зон Френеля для не очень больших номеров зон не зависят от номера зоны и приблизительно равны друг другу [1, 2]. Учитывая, что амплитуда волны пропорциональна площади соответствующей зоны, вторичные волны от соседних зон, находясь в противофазе, будут ослаблять друг друга. С ростом номера зоны n амплитуды колебаний E_n убывают вследствие увеличения угла между нормалью к зоне и направлением на точку P , образуя монотонную последовательность:

$$E_1 > E_2 > E_3 > \dots E_{n-1} > E_n > E_{n+1} > \dots$$

Согласно принципу суперпозиции, суммарная амплитуда световых колебаний в точке наблюдения P будет определяться алгебраической суммой вкладов всех зон Френеля. Поскольку фазы колебаний, возбуждаемых соседними зонами, отличаются на π , то при наложении этих колебаний они будут ослаблять друг друга:

$$E = E_1 - E_2 + E_3 - E_4 + \dots \quad (1)$$

Казалось бы, это выражение равно нулю, однако вследствие монотонного убывания E_n можно приближенно считать, что

$E_n = \frac{E_{n-1} + E_{n+1}}{2}$. Проведя более корректную группировку членов в

формуле (1) получим:

$$E = \frac{E_1}{2} + \left(\frac{E_1}{2} - E_2 + \frac{E_3}{2} \right) + \left(\frac{E_3}{2} - E_4 + \frac{E_5}{2} \right) + \dots ,$$

откуда видно (с учетом равенства для E_n), что выражения в скобках приблизительно равны нулю и амплитуда, создаваемая в точке P сферической волновой поверхностью равна половине амплитуды, создаваемой одной лишь центральной первой зоной:

$$E = \frac{E_1}{2}.$$

Иными словами, действие всей волновой поверхности эквивалентно половине действия (но не действию половины!) центральной зоны.

Теперь поместим на пути сферической волны непрозрачный экран с круглым отверстием, вырезанным в нем таким образом, чтобы центр отверстия находился на прямой SP . Для наблюдения дифракционной картины от отверстия поставим другой экран, параллельный плоскости отверстия и удаленный от него на расстояние b (рис. 3). Вид дифракционной картины зависит от того, сколько зон Френеля открывает отверстие.

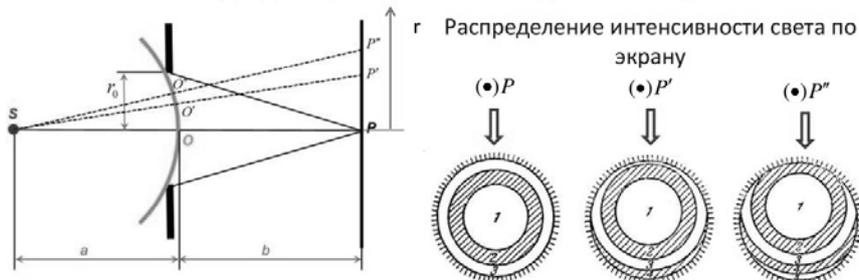


Рис. 3. Дифракция Френеля на круглом отверстии

Если число зон не очень велико, а вторичные волны от соседних зон находятся в противофазе, то при четном числе открытых зон мы будем иметь в точке P практически нулевую амплитуду, при нечетном - максимально возможную, равную приблизительно вкладу одной не скомпенсированной зоны ($E = E_1$). Учитывая, что интенсивность $I \sim E^2$ получаем, что при открытой первой зоне $I=I_1$, а при свободном распространении волны $I=I_1/4$. Таким образом, первая открытая зона Френеля дает амплитуду световой волны в два

раза большую (а интенсивность в четыре раза большую), чем в случае отсутствия каких-либо преград на пути волны.

При не целом числе зон, помещающихся в отверстии, имеем промежуточную по величине амплитуду (не нулевую, но и не максимальную). Вся дифракционная картина представляет собой систему чередующихся концентрических колец, в центре картины будет либо светлое либо темное пятно (рис. 4).

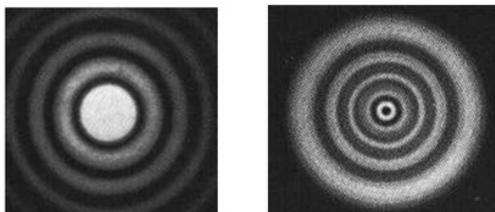


Рис. 4. Дифракционный максимум и минимум

Теперь предположим, что на пути световой волны расположена стеклянная пластинка, на которую нанесены непрозрачные кольца. Такая пластинка называется зонной, и представляет собой систему чередующихся прозрачных и непрозрачных концентрических колец, размеры которых совпадают с радиусами зон Френеля для определенных значений a , b , λ . Если поместить такую пластинку в соответствующем месте – на расстоянии a от источника S и на расстоянии b до точки наблюдения, то она будет перекрывать, например все четные зоны Френеля. В этом случае результирующая амплитуда колебаний будет равна $E = E_1 + E_3 + E_5 + \dots + E_n$, где n – нечетное число – номер последней открытой зоны (номер последнего прозрачного кольца. При не очень большом значении n имеем для амплитуды: $E = nE_1$ и интенсивности колебаний: $I = n^2 I_1$. Таким образом, амплитуда и интенсивность колебаний света, прошедшего зонную пластинку, превышают соответствующие значения для волны, испытавшей дифракцию на круглом отверстии. Из сказанного следует, что зонная пластинка, увеличивая освещенность в точке наблюдения, действует подобно собирающей линзе.

Если источник удалить в бесконечность, что соответствует предельному переходу $a \rightarrow \infty$, сферическая волновая поверхность первичного фронта волны выродится в плоскость ($R \rightarrow \infty$). Такую волну называют плоской. В данной работе изучается дифракция плоской монохроматической волны на зонной пластинке.

Рассмотрим зонную пластинку. Обозначим расстояние от точки P , которая будет являться центром интерференционной картины, до середины зонной пластинки как f_1 (см. рис. 5).

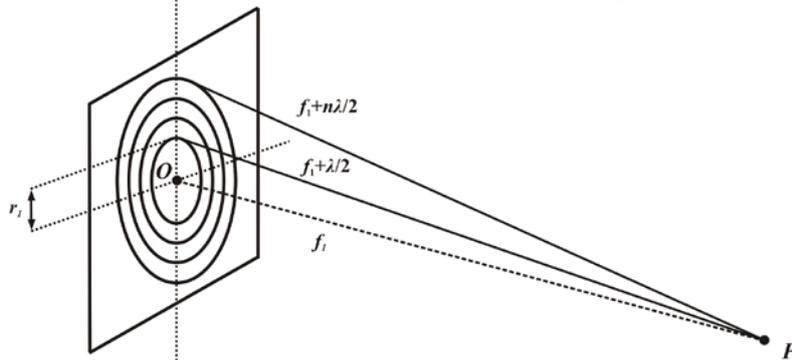


Рис. 5. Зонная пластинка

Отметим теперь на пластинке все точки, отстоящие от точки P на расстоянии $f_1 + \frac{\lambda}{2}$. Получим окружность, квадрат радиуса которой равен $r_1^2 = \left(f_1 + \frac{\lambda}{2}\right)^2 - f_1^2$; r_1 – радиус первой зоны Френеля. Теперь нарисуем на пластинке окружность, все точки которой удалены от точки P на расстояние $f_1 + 2\frac{\lambda}{2}$. Очевидно, что квадрат радиуса этой окружности (радиуса второй зоны Френеля) равен $r_2^2 = \left(f_1 + 2\frac{\lambda}{2}\right)^2 - f_1^2$. Получившееся кольцо представляет собой вторую зону Френеля. Продолжая подобные построения, для квадратов радиусов зон Френеля r_n ($n = 1, 2, 3, \dots$) можно написать:

$$r_n^2 = \left(f_1 + n \frac{\lambda}{2} \right)^2 - f_1^2 = nf_1 \lambda + n^2 \frac{\lambda^2}{4} \approx nf_1 \lambda, \quad (2)$$

где используется $nf_1 \lambda \gg n^2 \frac{\lambda^2}{4}$. Аналогичные соотношения можно записать для всех последующих зон Френеля.

Таким образом, получаем связь между радиусом r_n и расстоянием f_1 :

$$r_n = (nf_1 \lambda)^{1/2} \rightarrow f_1 = r_n^2 \frac{1}{n\lambda}. \quad (3)$$

Результат наблюдения в точке P зависит от того, четное или нечетное число зон Френеля видно из этой точки. Если это число нечетно, мы увидим светлое пятнышко, если четное, то темное.

Пусть число зон Френеля, открывающихся из точки P нечетно и на экране в точке P находится светлое пятно. В данной работе радиусы зон Френеля на зонной пластинке фиксированы, как и длина световой волны. По этим значениям определяется расстояние f_1 . Именно на таком расстоянии в точке P и будет наблюдаться светлое пятно. Будем передвигать экран по направлению к зонной пластинке. По мере продвижения, расстояния между точкой наблюдения и границами соседних зон Френеля на пластинке (оптическая разность хода лучей) перестают отличаться на величину $\frac{\lambda}{2}$ и мы перестаем видеть светлое пятно на экране. Эта разность постепенно нарастает, при некотором положении экрана становится равной $\frac{3\lambda}{2}$ (волны от соседних зон опять начинают приходить в противофазе) и мы снова видим светлое пятно. Продолжая двигать экран к пластинке, следующее светлое пятно мы увидим при оптической разности хода равной $\frac{5\lambda}{2}$, потом при $\frac{7\lambda}{2}$ и т.д.

Таким образом, при перемещении точки наблюдения P вдоль OP по направлению к зонной пластинке наблюдается периодическое чередование ярких точек с затемненными промежутками между ними. Получается, что у зонной пластинки как бы имеется последовательность фокальных точек, а f_1 – фокусное расстояние.

Появление этих фокальных точек высших порядков связано с оптической разностью хода лучей, пришедших в точку наблюдения P_m из соседних зон, равной соответственно

$$\frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \frac{7\lambda}{2}, \frac{9\lambda}{2}, \dots, \frac{m\lambda}{2}.$$

Мы видим, что каждой фокальной точке сопоставляется целое нечетное число m , которое можно рассматривать как метку фокальной точки. Например, существуют фокальные точки первого, третьего и т.д. порядков, и наоборот не существует фокальных точек второго, четвертого и т.д. порядков.

Фокусные расстояния фокальных точек произвольного порядка связаны с главным фокусом f_1 соотношением

$$f_m = f_1 / m \rightarrow (m = 1, 3, 5, 7, \dots). \quad (4)$$

Это соотношение можно получить, сделав в соотношении (2) подстановку

$$\frac{\lambda}{2} \rightarrow m \frac{\lambda}{2},$$

$$r_n = (nf_m \cdot m\lambda)^{1/2} \rightarrow f_m = r_n^2 \frac{1}{n\lambda m} = \frac{f_1}{m}.$$

Зонная пластинка, используемая в данном эксперименте, имеет 20 зон, при этом радиус первой светлой центральной зоны $r_1=0,6$ мм. Следующие радиусы определяются соотношением

$$r_n = n^{1/2} \cdot 0,6 \text{ мм}. \quad (5)$$

Напоминаем, что индекс n нумерует зоны Френеля, а индекс m – фокальные точки, связанные с тем, сколько раз величина $\frac{\lambda}{2}$ укладывается на разности хода лучей от соседних зон Френеля.

На рис. 6 рассматриваются первые несколько колец зонной пластинки, освещенной плоской волной (параллельным пучком).

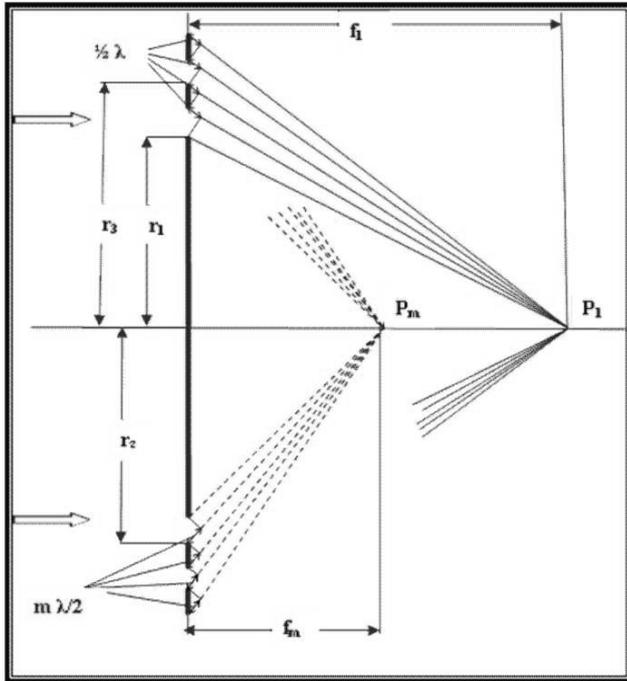


Рис. 6. Геометрия зонной пластинки

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 7. изображена экспериментальная установка данной работы.

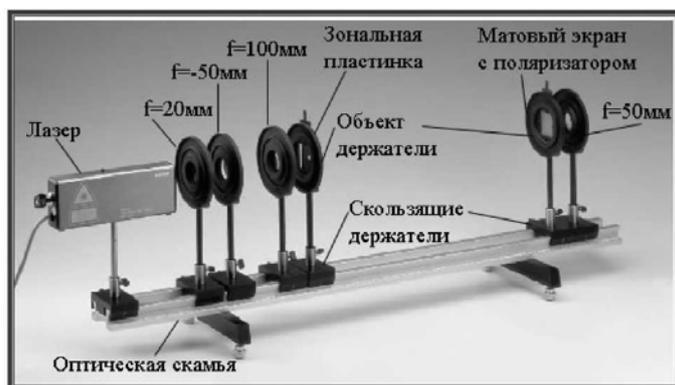


Рис. 7. Экспериментальная установка для определения фокальных точек зонной пластинки

Скользящий держатель, на котором крепится гелий-неоновый лазер, помещают в начале оптической скамьи. Лазер генерирует высоко когерентное излучение с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм. Прежде всего, лазерный пучок уширяют с помощью системы линз L_1 , L_2 и L_3 до диаметра приблизительно 5 мм (см. рис. 8).

Правильные результаты для различных фокусных расстояний зонной пластинки могут быть получены только при условии параллельности падающих лучей.

Осторожное перемещение линз L_2 и L_3 позволяет получить параллельность пучка на расстоянии в пределах нескольких метров (теоретический предел в данных условиях составляет ограничение порядка 10 метров).

Параллельность лазерного пучка может быть проконтролирована с помощью тест диафрагмы. Берется лист черного картона или плотной бумаги размером 5*5 см, в центре которого обычным канцелярским дыроколом пробивается отверстие диаметром 5 мм. Получившаяся диафрагма вставляется в объект-держатель (5*5 см), который в свою очередь с помощью скользящего держателя устанавливается и может перемещаться вдоль оптической скамьи, контролируя поперечную ширину лазерного пучка.

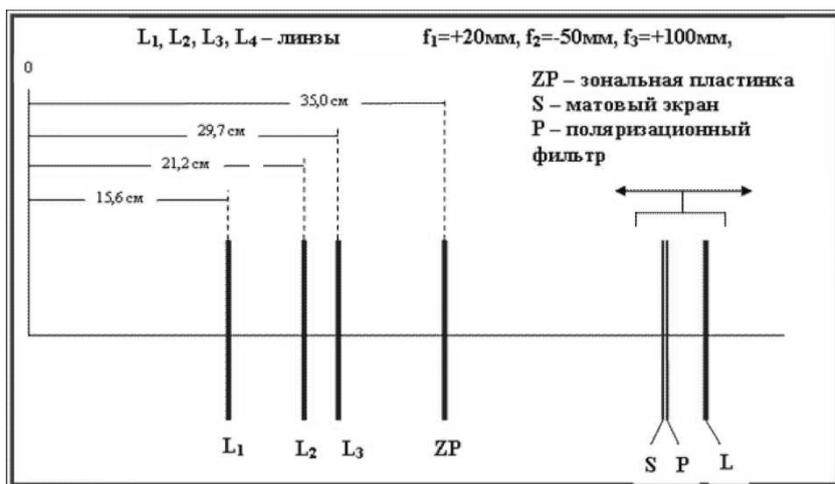


Рис. 8. Схема расположения оптических приборов

После того, как обеспечена параллельность лазерного пучка, положение линз L_1 , L_2 и L_3 фиксируется, в объект-держатель вместо тест-диафрагмы вставляется зонная пластинка, положение которой на оптической скамье определено согласно рис. 8. Изображение зонной пластинки наблюдают на экране из матового стекла, располагающегося вблизи противоположного конца оптической скамьи, глаз наблюдателя при этом располагается за экраном, фиксируя оптическое изображение в проходящем ослабленном пучке. Перед экраном располагается увеличивающая линза L , которая предназначена для более удобного наблюдения фокальных точек, выполняет функцию лупы, и при проведении измерений перемещается вместе с экраном вдоль оптической скамьи. Двигая матовый экран (совместно с линзой L) по направлению к зонной пластинке, фиксируем фокальные точки пластинки и определяем соответствующие им фокусные расстояния. Поляризационный фильтр, используемый для ослабления яркости изображения (примерно в два раза), устанавливается непосредственно вслед за экраном в том же объект-держателе.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

При выполнении работы необходимо строго соблюдать требования по технике безопасности и охране труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории.

Предостережение. Никогда не подвергайте глаза действию прямого неослабленного лазерного пучка! Это опасно для зрения!

1. Оптическая юстировка установки.

Установите оптические приборы согласно схеме на рис. 8. Вместо зонной пластинки в объект-держателе поместите тест-диафрагму и произведите тестирование светового пучка на параллельность. В процессе продвижения диафрагмы к концу оптической скамьи диаметр поперечного сечения пучка не должен превышать 5 мм. В противном случае, края диафрагмы приобретают красную окантовку. В этом случае необходимо осторожным перемещением линз L_2 и L_3 около исходных положений добиться желаемого результата.

Замечание 1. Только при параллельном пучке можно точно определить фокальные точки. Между тем процедура обеспечения параллельности носит явно случайный многофакторный характер. Это является очевидным источником случайных погрешностей в процессе определения фокальных точек. Для оценки этих погрешностей необходимо выполнить серию измерений, каждый раз независимо проводя оптическую юстировку на параллельность пучка. Полученные результаты для каждой фокальной точки усредняются по количеству проведенных серий, случайные погрешности оцениваются по стандартной методике.

Замечание 2. Можно использовать зонную пластинку в качестве тест-диафрагмы. При этом нет необходимости извлекать ее из объект-держателя и заменять на диафрагму. Медленно передвигайте вдоль оптической скамьи зонную пластинку, при этом уширенный оптической системой лазерный пучок должен иметь в сечении плоскостью стеклянной пластинки круговое световое пятно, практически не изменяющееся при движении объект-держателя. Кроме того, центр пятна от лазерного пучка должен совпадать с центром колец зонной пластинки. Диаметр пятна должен быть

равным внешнему диаметру пластинки, или слегка превосходить его.

2. Определение фокальных точек и фокусных расстояний.

Замените тест-диафрагму в объект-держателе на зонную пластинку (в случае, если вы использовали тест-диафрагму для контроля параллельности светового пучка) и установите ее в указанное на схеме рис. 8. положение на оптической скамье. Перемещайте матовый экран совместно с линзой L вдоль оптической скамьи от противоположного края по направлению к зонной пластинке, последовательно фиксируя на экране появление ярких сфокусированных точек. Линза L используется как лупа для комфортного наблюдения изображений на экране. На матовом экране наблюдайте систему концентрических колец, напоминающих кольца зонной пластинки. В центре системы колец при перемещении экрана возникает яркое сконцентрированное пятно, которое при последовательном однонаправленном смещении экрана становится ярче, достигая максимума яркости. Однако при дальнейшем смещении в том же направлении яркость пятна начинает монотонно убывать. Монотонное убывание яркости центрального пятна сменяется монотонным возрастанием и новым максимумом яркости и так далее. Каждой точке с максимальной яркостью соответствует фокальная точка некоторого порядка. Фокальная точка первого порядка (главная фокальная точка) является выделенной среди других точек - при перемещении экрана в направлении от зонной пластинки после этой точки наблюдается монотонное убывание яркости в центре экрана, т.е. фокальная точка первого порядка является крайней среди фокальных точек. Она же - самая яркая.

Напротив, двигаясь к зонной пластинке от главной фокальной точки, будем фиксировать возникающие фокальные точки 3-его, 5-ого, 7-ого и др. порядков, при этом последовательность фокальных точек находится в однозначном соответствии с последовательностью нечетных чисел. Положение каждой фокальной точки относительно оптической скамьи определяется моментом максимальной яркости в центре экрана.

Заметьте положение каждой такой точки по шкале на оптической скамье, затем измерьте расстояние от экрана до зонной пластинки, т.е. фокусное расстояние f_n . После измерения нескольких фокусных расстояний в соответствии с индивидуальным заданием (не более пяти) проведите повторное измерение, перемещая экран обратно по направлению к концу оптической скамьи. Если необходимо, проведите дополнительные серии измерений. Данные занесите в таблицу 1. Каждая серия прямых измерений фокусных расстояний должна располагаться в соответствующей строке: №1 - измеряются фокусные расстояния $f_1 - f_9$ при движении экрана по направлению к зонной пластинке; №2 - измеряются фокусные расстояния $f_9 - f_1$ при обратном перемещении экрана по направлению к концу оптической скамьи; следующие серии проводятся в точном соответствии с индивидуальным заданием.

Замечание 3. Наличие системы концентрических колец, окружающих каждую фокальную точку на экране, связано с тем обстоятельством, что зонная пластинка содержит относительно небольшое число зон Френеля ($n < 20$). При увеличении числа зон n освещенность колец будет непрерывно убывать, в то время как яркость фокальных точек резко возрастет, а размеры уменьшатся. Теоретически при $n \rightarrow \infty$ зонная пластинка занимает всю плоскость, на экране в месте расположения фокальных плоскостей кольца отсутствуют, исключая яркую центральную фокальную точку, радиус которой стремится к нулю. Практически весь световой поток, падающий на зонную пластинку, сфокусируется в последовательности фокальных точек, располагающихся на оси симметрии, которая перпендикулярна плоскости пластинки и проходит через ее центр.

Тривиальным случаем зонной пластинки с $n=1$ можно считать просто круглое отверстие. Тогда на оси симметрии, проходящей через центр отверстия и перпендикулярной плоскости отверстия, располагается последовательность фокальных точек: для точки P_1 в отверстии помещается одна зона Френеля, для точки P_3 в отверстии помещается три зоны, для точки P_5 помещается пять зон и т.д. Общая картина распределения освещенности определяется теорией Френеля, и наличие системы концентрических колец в

каждой параллельной отверстию плоскости является общеизвестным фактом. Но это пример самой несовершенной зонной пластинки. Обратное, изучая оптический эффект зонной пластинки, мы получаем возможность провести модельный эксперимент по исследованию дифракции Френеля на круглом отверстии. Характеристика «модельный» обязана тому факту, что измерения проводятся с участием зонной пластинки, но распределение интенсивности дифрагированного света качественно совпадает с распределением, создаваемым круглым отверстием радиусом равным радиусу первой зоны на пластинке. Количественно мы получаем результат: в каждой точке на оси симметрии интенсивность дифрагированного зонной пластинкой света в n^2 раз превосходит интенсивность дифрагированного круглым отверстием соответствующего радиуса ($r=r_1$).

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Прямыми измерениями в данной работе являются измерения фокусных расстояний зонной пластинки, т.е. расстояний между фокальными точками и зонной пластинкой, которые заносятся в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	f_1 , см	f_3 , см	f_5 , см	f_7 , см	f_9 , см
1					
2					
...					
n					
	$\overline{f_1} \pm \Delta f_1$	$\overline{f_3} \pm \Delta f_3$	$\overline{f_5} \pm \Delta f_5$	$\overline{f_7} \pm \Delta f_7$	$\overline{f_9} \pm \Delta f_9$

Напоминаем, что в строку №1 заносятся фокусные расстояния $f_1 - f_9$, измеряемые при движении экрана по направлению к зонной пластинке; №2 – фокусные расстояния $f_9 - f_1$, полученные при обратном перемещении экрана. Результаты измерений фокусных расстояний усредните и оцените случайную погрешность.

Окончательные результаты запишите в нижней строке таблицы 1 в виде $\bar{f}_n \pm \Delta f_n$.

С использованием соотношения (2) и усредненного значения \bar{f}_1 из таблицы 1 рассчитайте величины r_n (экспер.). Значения r_n (теор.) определите по формуле (5). Заполните таблицу 2. Сравните теоретические и экспериментальные данные.

Таблица 2

№ п/п	r_n (теор.), мм	r_n (экспер.), мм	Δr_n , мм
1			
...			
n			

Перенесите из таблицы 1 в столбец f_m (экспер.) таблицы 3 все пять экспериментально измеренных фокусных расстояний. В левый столбец занесите теоретические значения, вычисленные по формуле (4). Сравните теоретические и экспериментальные данные.

Таблица 3

№ п/п	f_m (теор.), см	f_m (экспер.), см	Δf_m , см
1			
...			
n			

По данным таблицы 3 постройте зависимость фокусного расстояния f_m (экспер.) от величины $1/m$ порядка соответствующей фокальной точки. Зависимость должна быть линейной, что соответствует теоретическому соотношению (4).

По результатам проведенных измерений вычисляется усредненные значения фокусных расстояний:

$$\bar{f}_i = \sum_{k=1}^n (f_i)_k / n,$$

где $(f_i)_k$ - результат измерения фокусного расстояния f_i ($i=1, 3, 5, 7, 9$) в k -ой серии прямых измерений. Случайная погрешность определяется соотношением

$$(\Delta f_i)_{сл} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \{\bar{f}_i - (f_i)_k\}^2}{n(n-1)}},$$

где n - количество независимо проведенных серий измерений.

Полная погрешность с учетом приборной погрешности измерительной шкалы $(\Delta f_i)_{пр}$ определяется выражением

$$\Delta f_i = (\Delta f_i)_{сл} + (\Delta f_i)_{пр},$$

Выходные результаты серий прямых измерений фокусных расстояний записываются в нижней строке таблицы 1.

Косвенными измерениями данной работы являются измерения радиусов колец зонной пластинки, которые вычисляются с использованием соотношения (2) и результатов прямого измерения f_1 . Радиус n -ого кольца, таким образом, определяется соотношением $r_n = \sqrt{n \bar{f}_1 \lambda}$ где \bar{f}_1 - результат из таблицы 1. Погрешность результата определите следующим образом:

$$\gamma_{r_n} = \frac{\Delta r_n}{r_n} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta f_1}{\bar{f}_1} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right) \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta f_1}{\bar{f}_1} \right),$$

$$\Delta r_n = \gamma_{r_n} \cdot r_n = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta f_1}{\bar{f}_1} \right) \cdot \sqrt{n \bar{f}_1 \lambda},$$

где Δf_1 и \bar{f}_1 - результат таблицы 2, $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \ll \frac{\Delta f_1}{\bar{f}_1}, \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx 0,01\%$

(обеспечивается техническими характеристиками гелий-неонового лазера).

Замечание 4. Радиусы колец зонной пластинки можно определить, используя результат измерения любого из фокусных расстояний, при этом, погрешность возрастает с порядком m фокусного расстояния:

$$r_n = \sqrt{nf_m m \lambda}.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте принцип Гюйгенса - Френеля как теоретическую основу для практических расчетов дифракции. Какую принципиальную теоретическую концепцию добавил Френель, усовершенствовав известный до него принцип Гюйгенса?

2. Рассмотрите вывод выражения для радиуса кольцевых зон Френеля и покажите приближенное равенство площадей отдельных зон для заданной точки наблюдения эффекта дифракции на оси симметрии круглого отверстия.

3. Почему зонная пластинка имеет теоретически бесконечное число фокальных точек? Какое соотношение связывает фокусные расстояния двух произвольных фокальных точек?

4. Как относятся амплитуды световых колебаний в точке наблюдения на оси симметрии напротив круглого отверстия, в которое помещается ровно три зоны Френеля, в случае наличия экрана с отверстием и при отсутствии последнего?

5. Как относятся интенсивности световых колебаний в точке наблюдения на оси симметрии напротив круглого отверстия, в которое помещается ровно три зоны Френеля, в случае наличия экрана с отверстием и при отсутствии последнего?

6. Что называют зонной пластинкой? Как ее можно усовершенствовать?

7. Зонная пластинка имеет 10 чередующихся светлых и темных колец. Какова интенсивность в первой фокальной точке? Интенсивность падающего монохроматического пучка I_∞ .

ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ОТЧЁТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчёт оформляется в печатном виде на листах формата А4 в соответствии с указанными ниже требованиями.

Помимо стандартного титульного листа в содержании отчёта должны быть раскрыты пункты, перечисленные ниже.

1. Цель работы.

2. Краткое теоретическое содержание.

- 1) Явление, изучаемое в работе.
- 2) Определения основных физических понятий, объектов, процессов и величин.
- 3) Законы и соотношения, описывающие изучаемые процессы, на основании которых, получены расчётные формулы.
- 4) Пояснения к физическим величинам и их единицы измерений.

3. Схема установки.

4. Расчётные формулы.

5. Формулы для расчёта погрешностей косвенных измерений.

6. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
(Таблицы должны иметь номер и название. Единицы измерения физических величин должны быть указаны в отдельной строке таблицы под строкой с обозначениями физических величин.)

7. Пример вычисления (для одного опыта).

- 1) Исходные данные.
- 2) Вычисления.
- 3) Окончательный результат.

8. Графический материал.

- 1) Записать аналитическое выражение функциональной зависимости, которая представлена на графике.
- 2) На осях координат указать масштаб, физические величины и единицы измерения.
- 3) На координатной плоскости должны быть нанесены экспериментальные точки.
- 4) По результатам эксперимента, представленным на координатной плоскости, провести плавную линию,

аппроксимирующую функциональную теоретическую зависимость в соответствии с методом наименьших квадратов.

9. Анализ полученного результата. Выводы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЗАЩИТЕ ОТЧЕТА

К защите допускаются студенты, подготовившие отчет в соответствии с требованиями к его содержанию в установленные сроки. После проверки преподавателем содержания отчёта, при наличии ошибок и недочетов, работа возвращается студенту на доработку. При правильном выполнении лабораторной работы, соблюдении всех требований к содержанию и оформлению отчёта, студент допускается к защите.

Для успешной защиты отчета необходимо изучить теоретический материал по теме работы, а также освоить математический аппарат, необходимый для вывода расчётных формул работы.

При подготовке к защите, помимо данного методического пособия, необходимо использовать учебники и другие учебные пособия, рекомендованные к учебному процессу кафедрой ОТФ.

Во время защиты студент должен уметь ответить на вопросы преподавателя в полном объёме теоретического и методического содержания данной лабораторной работы, уметь самостоятельно вывести необходимые расчётные формулы, выполнить анализ полученных зависимостей и прокомментировать полученные результаты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Кн. 4 Волны. Оптика / И.В. Савельев. М.: АСТ, 2006. 336 с.
2. *Ландсберг Г.С.* Оптика / Г.С. Ландсберг. М.: Физматлит, 2003. 848 с.
3. *Капуткин Д.Е.* Физика: Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ / Д.Е. Капуткин, А.Г. Шустиков. М.: МИСиС. 2007. 108 с.

4. Батури́н Б.Н. Правила электробезопасности при выполнении лабораторных работ. Учебное пособие / Б.Н. Батури́н. М.: МИСиС, 1995. 38 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Цель работы	3
Теоретическое введение.....	3
Описание экспериментальной установки	11
Порядок выполнения работы	14
Обработка результатов измерений	17
Контрольные вопросы.....	20
Требования к содержанию отчёта по лабораторной работе.....	21
Рекомендации по защите отчета	22
Библиографический список.....	22