Методические указания

Д.В. Креопалов, Е.В. Онуфриева

Лабораторная работа О-103

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ ФРЕНЕЛЯ НА КРУГЛОМ ОТВЕРСТИИ И КРУГЛОМ ДИСКЕ

2023 год

Исследование дифракции Френеля на круглом отверстии и круглом диске

Цель лабораторной работы

Цель работы заключается в изучении явления дифракции света на простейших объектах и в изучении метода Френеля для её количественного описания.

2. Задачи лабораторной работы

Задачи работы: получение дифракционной картины на круглом отверстии и круглом диске, измерение их основных параметров и оценка числа зон Френеля.

3. Экспериментальное оборудование, приборы и принадлежности

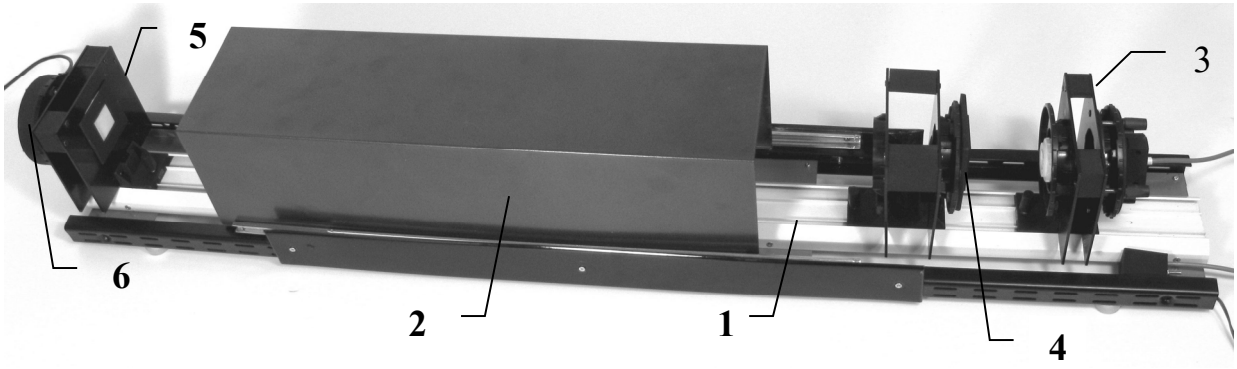


Рис.1

Лабораторная установка (рис.1) включает оптическую скамью 1 с светозащитным сдвигающимся кожухом 2, подвижные рейтера, источник света - полупроводниковый лазер с оптической насадкой (линзой) для увеличения размеров светового пучка 3, блок 4 со сменными пластинами с отверстиями (дисками) и поляроидом, экран 5 для визуализации дифракционной картины.

К приборам и принадлежностям относятся также компьютер с необходимым программным обеспечением, а также веб- камера 6, предназначенная для фиксации дифракционной картины на экране.

4. Теоретическая часть

Дифракцией света называется совокупность явлений, которые наблюдаются при распространении света в среде с резкими

неоднородностями (например, при прохождении через малые отверстия, вблизи границ непрозрачных тел и т.п.) и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики. Дифракция, в частности, приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени.

Различают два вида дифракции света – дифракцию Френеля и дифракцию Фраунгофера Критерии наличия дифракции определённого вида или её отсутствия выражаются следующими соотношениями:

$\frac{b^2}{l\lambda} << 1$ – дифракция Фраунгофера,

$\frac{b^2}{l\lambda} \approx 1$ – дифракция Френеля,

$\frac{b^2}{l\lambda} >> 1$ – геометрическая оптика,

где λ – длина волны света, b – характерный размер препятствия, l – расстояние от препятствия до экрана.

Проникновение световых волн в область геометрической тени может быть объяснено с помощью принципа Гюйгенса, который устанавливает способ построения фронта волны в момент времени $t + \Delta t$ по известному положению фронта в момент времени t. Согласно принципу Гюйгенса каждая точка, до которой доходит волновое движение, служит центром вторичных волн; огибающая этих волн даёт положение фронта волны в следующий момент времени. Пусть на плоскую преграду с отверстием падает параллельный ей фронт волны (рис.2).

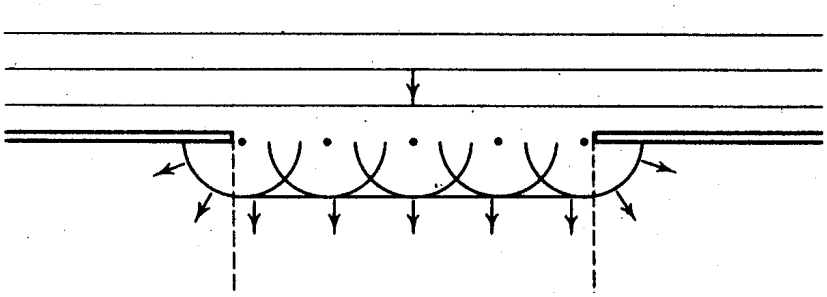


Рис. 2

По Гюйгенсу каждая точка выделяемого отверстием участка волнового фронта служит центром вторичных волн, которые в однородной среде будут сферическими. Построив огибающую вторичных волн, можно убедиться в том, что за отверстием волна проникает в область геометрической тени, огибая края преграды. На рис. 2 границы этой области показаны пунктиром.

Однако принцип Гюйгенса не даёт сведений об амплитуде, а следовательно и об интенсивности волн, распространяющихся в различных направлениях. Френель дополнил принцип Гюйгенса представлением об интерференции вторичных волн. Учёт амплитуд и фаз вторичных волн

позволяет найти амплитуду результирующей волны в любой точке пространства. Удобно рассматривать вторичные источники, расположенные на одной волновой поверхности, так как фаза первичной волны на волновой поверхности одна и та же. Развитый таким образом принцип Гюйгенса получил название принципа Гюйгенса-Френеля.

Вычисления амплитуды результирующей волны, в общем случае, является очень трудной задачей. Однако, как показал Френель, в случаях, отличающихся симметрией, эта задача может быть решена простым алгебраическим или геометрическим суммированием.

Чтобы понять суть метода, разработанного Френелем, определим амплитуду светового колебания, возбуждаемого в точке P сферической волной, распространяющейся в однородной изотропной среде из точечного источника S (рис. 3).

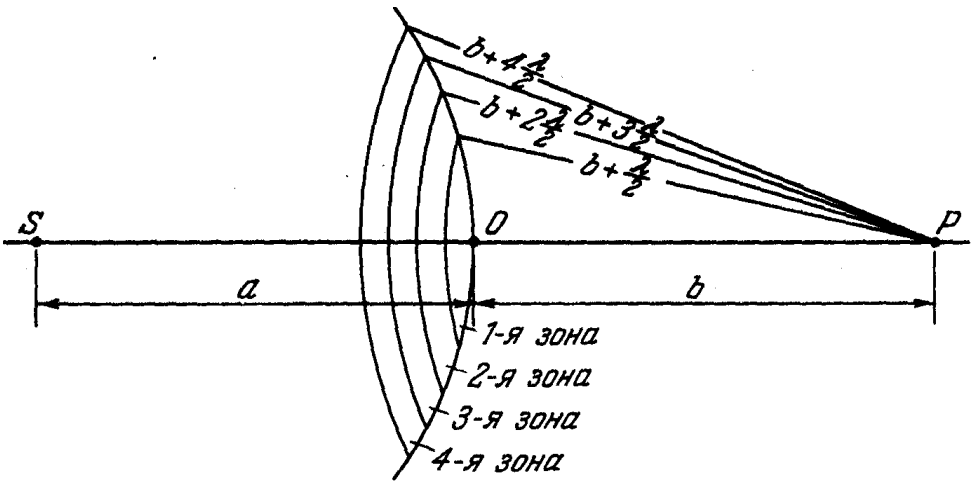


Рис. 3

Рассмотрим волновую поверхность, проходящую через некоторую точку O. Используя симметрию дифрагирующей волновой поверхности относительно прямой SP, разобьём её на кольцевые зоны, построенные так, что расстояния от краёв каждой зоны до точки P отличаются на половину длины волны, т.е. на $\lambda/2$ (см. рис. 3). Вследствие этого результирующие колебания, приходящие в точку P от двух соседних зон находятся в противофазе (отличаться по фазе на π). Обладающие таким свойством зоны носят название «зон Френеля». Вклад соседних зон в амплитуду полного светового колебания в точке P будет отличаться знаком, поэтому амплитуда полного светового колебания в точке P может быть выражена в виде

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + A_5 - A_6 + \ldots, \qquad (1)$$

Здесь A_i – модуль вклада i-й зоны Френеля в полную амплитуды.

Из рис. 3 видно, что расстояние b_m от внешнего края m-ой зоны до точки P равно

$$b_m = b + m \cdot \frac{\lambda}{2} \tag{2}$$

Из (2) следует, что расстояние b_m медленно растёт при увеличении m. Также медленно растёт и угол между нормалью к поверхности m-ой зоны и направлением на точку P. По этим причинам амплитуда A_m колебания, возбуждаемого m-ой зоной в точке P, монотонно убывает с ростом m. Этот факт позволяет существенно упростить выражение (1).

Представим (1) в следующем виде:

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

Вследствие медленного монотонного убывания A_m все выражения в скобках будут равны нулю и формула для A примет вид

$$A = A_1/2, \tag{3}$$

где A – амплитуда полного светового колебания в точке P, A_1 – амплитуда светового колебания, создаваемого центральной (первой) зоной Френеля.

Таким образом, амплитуда, создаваемая в некоторой точке P всей сферической волновой поверхностью, равна половине амплитуды, создаваемой одной лишь центральной зоной. Если на пути волны поставить непрозрачный экран с отверстием, оставляющим открытой только центральную зону Френеля, то амплитуда в точке P окажется равной A_1, т.е. в два раза превзойдёт амплитуду (3). Поскольку интенсивность волны пропорциональна квадрату её амплитуды, то интенсивность света создаваемая, одной центральной зоной Френеля будет в четыре раза больше, чем в отсутствие преград между точками S и P.

Чтобы получить формулу для радиуса внешней границы m-ой зоны r_m, рассмотрим рис.4.

Применяя теорему Пифагора к двум прямоугольным треугольникам, изображённым на рис., получим систему двух уравнений (4) и (5) относительно r_m и h_m:

$$r_m^2 = a^2 - (a - h_m)^2 \tag{4}$$

$$r_m^2 = \left(b + m \cdot \frac{\lambda}{2} \right)^2 - (b + h_m)^2 \tag{5}$$

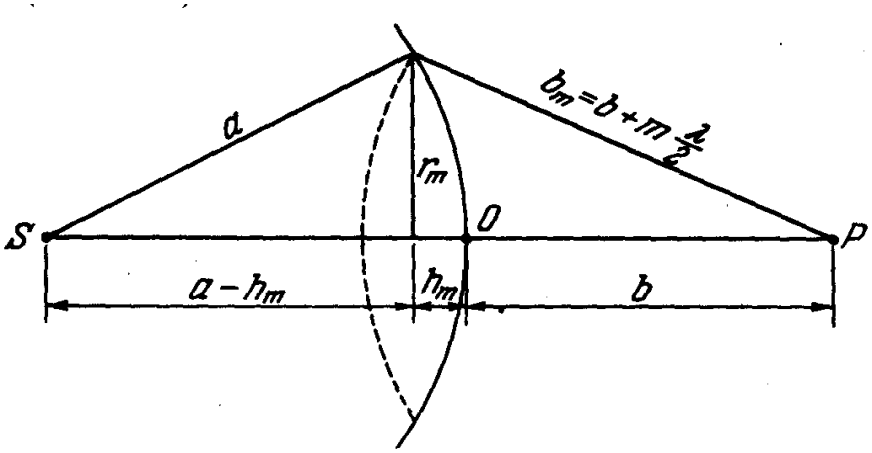


Рис. 4.

Приравнивая правые части уравнений (4) и (5), получим

$$h_m = \frac{b_m\lambda + m^2(\lambda/2)^2}{2(a+b)} \tag{6}$$

Ограничившись рассмотрением не слишком больших m и ввиду малости λ, можно пренебречь вторым слагаемым в числителе (6). В этом приближении формула (6) примет вид

$$h_m = \frac{b_m\lambda}{2(a+b)} \tag{7}$$

Подставив (7) в (4), получим

$$r_m^2 = \frac{ab_m\lambda}{a+b} - \frac{b_m{}^2\lambda^2}{4(a+b)^2}. \tag{8}$$

Приближение, обоснованное выше для (6), позволяет пренебречь вторым членом в правой части (8). Окончательно получаем

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b}\cdot m\lambda}. \tag{9}$$

Формула (9) была получена для дифракции сферической волны расходящейся из точки S при наблюдении результата интерференции вторичных волн в точке P. В этом случае точки S и P расположены с разных сторон рассматриваемой волновой поверхности.

Рассмотрим дифракцию плоской волны. Волновые поверхности в этом случае являются плоскостями, перпендикулярными направлению распространения волны. Рассмотрим поле вторичных источников,

расположенных на плоскости Э1 (рис. 5). Интерференцию вторичных волн будем рассматривать в точке *P*, находящейся в плоскости Э2.

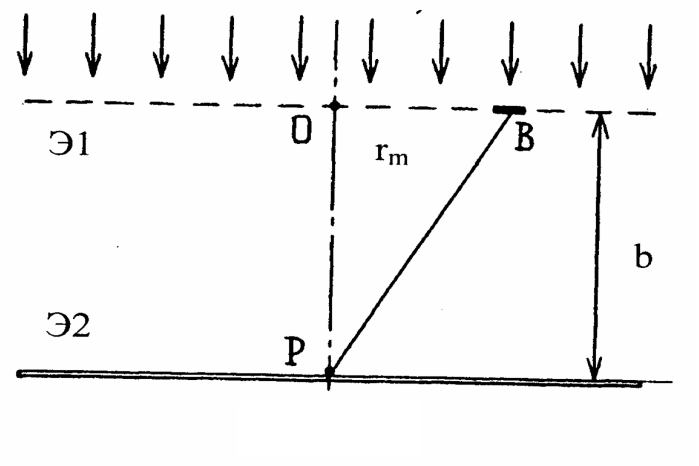


Рис. 5

Так как плоскую волну формально можно рассматривать как сферическую волну бесконечно большого радиуса, формулу для радиуса внешней границы *m*-ой зоны Френеля r_m получается из формулы (9) в пределе $a \to \infty$. Таким образом, для дифракции плоской волны получим

$$r_{\text{m}} = \sqrt{b \cdot m\lambda} \qquad (10)$$

Рассмотрим дифракцию сферической волны, сходящейся в точке *S* (рис. 6).

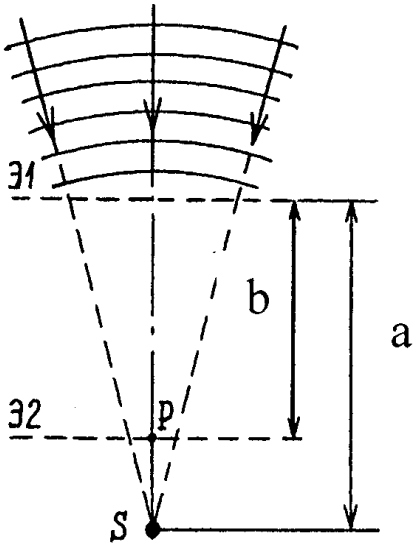


Рис.6

Интерференцию вторичных волн будем рассматривать в точке *P*, находящейся в плоскости Э2. Рассмотрим источники вторичных волн, расположенные на волновой поверхности вблизи плоскости Э1. Точки *S* и *P* расположены с одной стороны дифрагирующей поверхности.

Проведя вывод, аналогичный выводу формулы (9), получим для радиуса внешней границы m-ой зоны r_m следующее выражение:

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{|a-b|} \cdot m\lambda}. \qquad (11)$$

Формулы (9), (10) и (11) можно записать в виде одной общей формулы:

$$r_{\mathrm{m}} = \sqrt{L \cdot m\lambda}. \qquad (12)$$

В формуле (12) необходимо считать для дифракции расходящейся сферической волны

$$L = \frac{ab}{a+b}, \qquad (13)$$

для дифракции плоской волны

$$L = b, \qquad (14)$$

для дифракции сходящейся сферической волны

$$L = \frac{ab}{|a-b|} \qquad (15)$$

Дифракция на круглом отверстии

Пусть на пути световой волны расположен непрозрачный экран с круглым отверстием радиуса R. Допустим, отверстие расположено так, что на нём размещается ровно m первых зон Френеля, построенных для точки наблюдения P. Тогда радиус R удовлетворяет соотношению

$$R = \sqrt{L \cdot m\lambda}. \qquad (16)$$

Из (16) следует, что число открытых отверстием зон Френеля равно

$$m = \frac{R^2}{L\lambda} \qquad (17)$$

Применяя для амплитуды A светового колебания в точке P, метод вывода формулы (3) при конечном значении m, получим

$$A = \frac{A_1}{2} \pm \frac{A_m}{2}, \qquad (18)$$

где знак плюс берётся для нечётных m, минус – для чётных. Для малых m амплитуда A_m мало отличается от A_1. Следовательно при нечётных m амплитуда в точке P приближённо равна A_1, при чётных m – нулю.

Допустим, что в точке P находится максимум освещённости. Тогда при непрерывном удалении от точки P по экрану Э2 будет достигнуто геометрическое место точек в виде окружности, для которых выполнится условие минимума освещённости и т.д. Таким образом, дифракционная картина от круглого отверстия будет иметь вид чередующихся светлых и тёмных концентрических колец. В центре картины будет либо светлое (при нечётных m) – (рис.7а), либо тёмное (при чётных m) пятно (рис.7б).

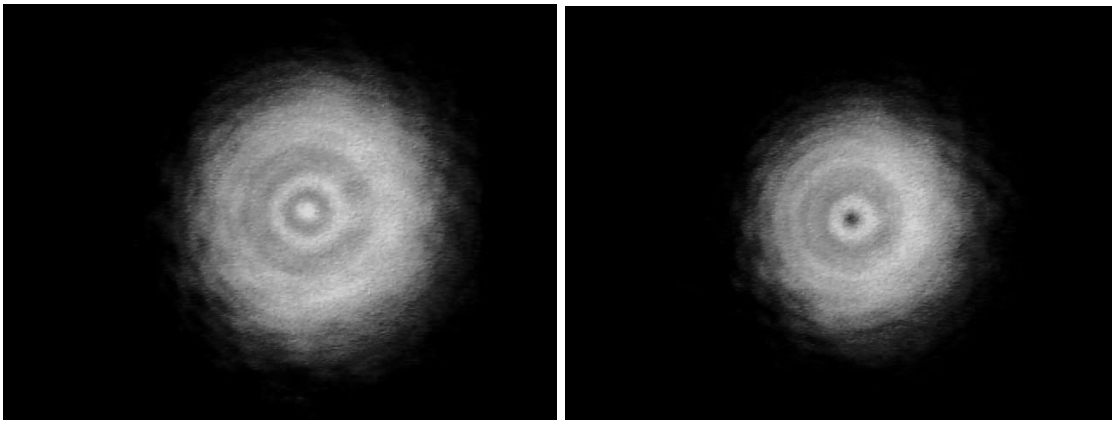


Рис. 7 *а*) *б*)

Дифракция на круглом диске

Пусть между источником света S и точкой наблюдения P находится непрозрачный круглый диск радиуса R. Пусть диск расположен так, что на нём размещается ровно m первых зон Френеля, построенных для точки наблюдения P. Поэтому амплитуда полного светового колебания в точке P может быть выражена через амплитуды колебаний отдельных зон, незакрытых диском, в виде

$$A = A_{m+1} - A_{m+2} + A_{m+3} - A_{m+4} + A_{m+5} - A_{m+6} + \ldots\ldots \qquad (19)$$

Формула (19) аналогична формуле (1). Поэтому после преобразований, подобных преобразованиям формулы (1), получим аналогичное выражение для (19) в следующем виде

$$A = A_{m+1}/2 \qquad (20)$$

При небольшом числе закрытых зон амплитуда A_{m+1} мало отличается от амплитуды A_1. Поэтому интенсивность света в точке P будет почти такая же, как при отсутствии преграды между источником S и точкой P.

Поскольку в точке P находится максимум освещённости, то при непрерывном удалении от точки P по экрану Э2 будет достигнуто геометрическое место точек в виде окружности, для которых выполнится

условие минимума освещённости и т.д. Таким образом, дифракционная картина от круглого диска будет иметь вид чередующихся светлых и тёмных концентрических колец. В центре картины помещается светлое пятно (рис.8).

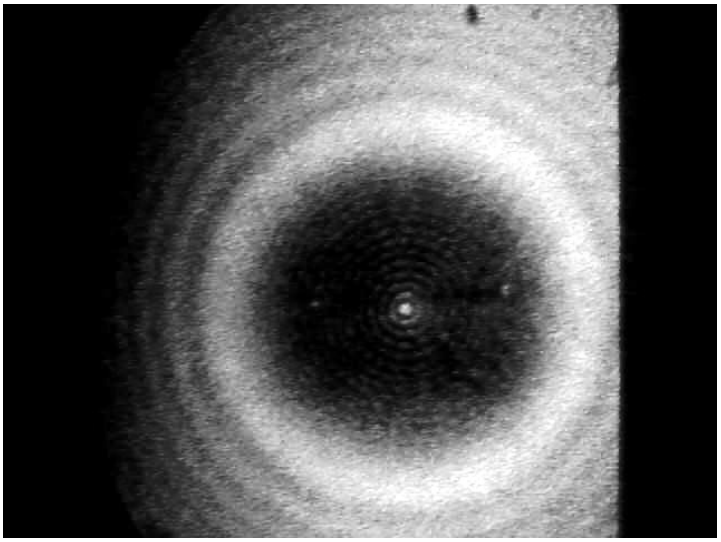


Рис.8

5. Описание лабораторной установки

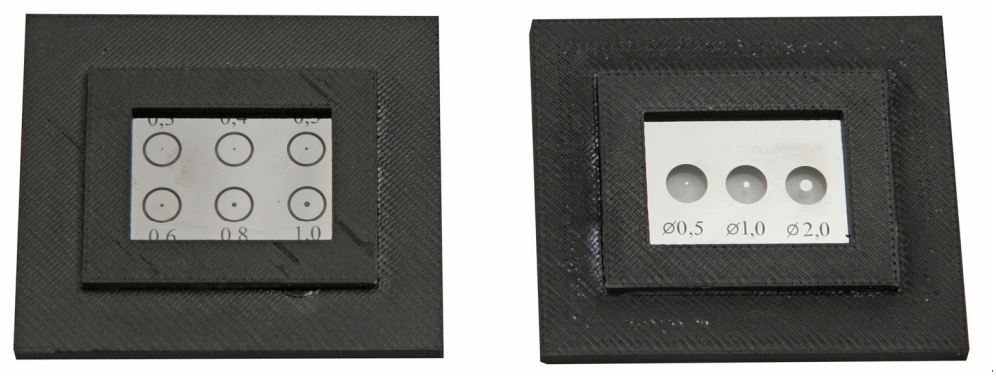


Рис.9 *а*) *б*)

Сменные пластины (рис.9), устанавливаемые в блок (рис.1-4 и рис.9), содержат ряд круглых отверстий (рис.9а) с фиксированными диаметрами, либо ряд непрозрачных дисков (рис.9б). При освещении пучком света от источника на экране, установленном на фиксированном расстоянии от пластин, возникает соответствующая дифракционная картина (рис.10).

Пучок света, излучаемый полупроводниковым лазером, имеет весьма малую расходимость и в первом приближении может считаться параллельным пучком. Проходя через собирающую линзу с фокусным расстоянием $f = 50 \pm 5мм$, он собирается в «точку» (геометрическое приближение), а затем расходится как сферическая волна. Таким образом, можно считать, что точечный источник, находящийся в фокусе линзы, излучает сферическую волну. Положение этого точечного источника

относительно отверстий можно найти как разность расстояния от линзы до пластины с отверстиями и фокусного расстояния линзы:

$$a = \ell - f \tag{21}$$

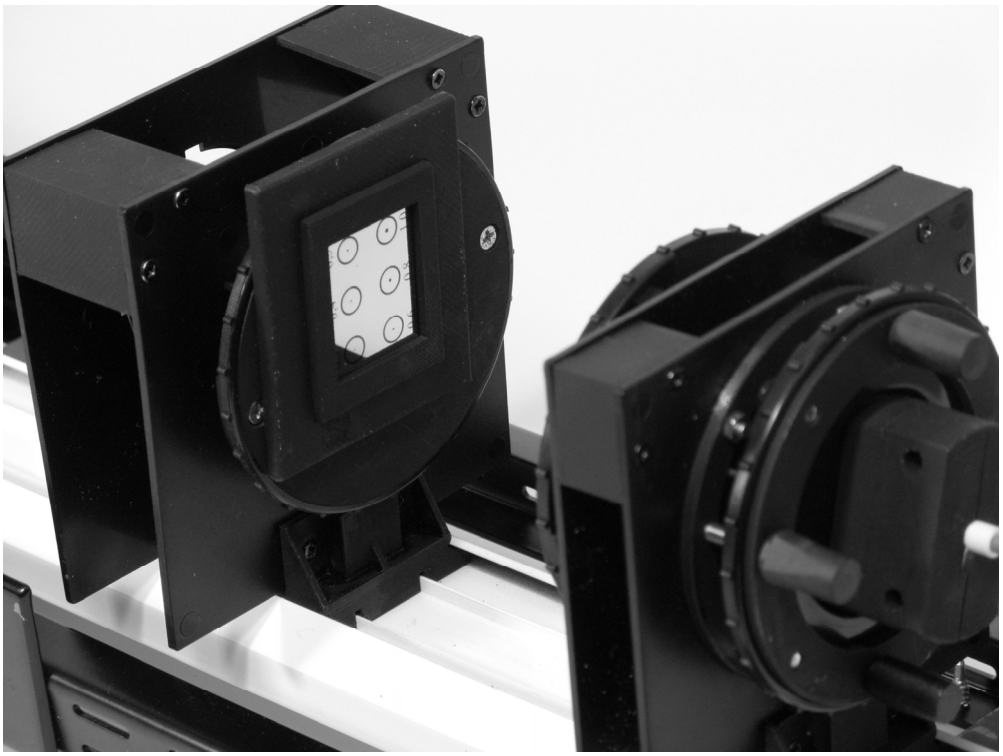


Рис.10



Рис.11

6. Порядок проведения лабораторной работы

1. После включения компьютера запустите программу «Практикум по физике». Выберите сценарий соответствующего эксперимента в меню, появившемся на экране (Alt+C) .
2. Соберите оптическую схему в соответствии с рис. 1, установив в оптический блок пластину с отверстиями. Лазер и блок «экран – видеокамера – поляроид» должны располагаться на концах скамьи, а пластина с отверстиями — на отметке «30 см». (Шкала скамьи начинается со стороны лазера.)
3. Включите источник света и проведите предварительную юстировку. Для этого снимите пластину с отверстиями, линзу и поляроид с соответствующих оптических блоков. Вращая юстировочные винты на оправке лазера, установите луч в центр экрана. Вкручивая юстировочный винт по резьбе, обратите внимание, что диаметрально противоположный винт при этом не должен касаться упорного кольца оправки.
4. Установите линзу на оптический блок осветителя и, сдвигая ее вверх-вниз и вправо-влево, установите освещенное пятно в центр экрана.
5. Установите пластину с отверстиями так, чтобы в луч проходил в одно из отверстий (например, диаметром 0.6 мм), и получите в центре экрана дифракционную картину. Вращая юстировочные винты, проведите более точную настройку, так чтобы дифракционная картина располагалась в наиболее освещенной части пятна. Перед установкой пластины с отверстиями рекомендуется придвинуть стойку источника света к стойке с пластиной на расстояние 6 – 9 см.
6. Отрегулируйте интенсивность падающего на экран излучения, вращая поляризатор, установите его перед экраном. Излучение осветителя в данной установке достаточно яркое, и если его не ослабить, то регистрируемое камерой изображение будет «пересвеченным», и детали дифракционной картины будут неразличимы.
7. Заполните Таблицу 1, внеся в нее расстояние между отверстием и экраном ($\boldsymbol{b}$) и радиус выбранного отверстия ($\boldsymbol{R}$).
8. Установите стойку осветителя в положение, максимально удаленное от пластины с отверстиями. С помощью формулы (17) оцените число открытых отверстием зон Френеля для данного положения отверстия.
9. Перемещая источник лазерного излучения с линзой к оптическому блоку с пластиной, зафиксируйте ряд его положений, при которых на видимой с помощью веб-камеры на экране дифракционной картине наблюдаются ярко выраженные максимумы и минимумы в центре

картины. Расстояния между линзой и отверстием для соответствующих положений источника запишите в Таблицу 2.

10. Повторите измерения для отверстия с другим диаметром, заполнив при этом новые Таблицы 1 и 2.
11. Установите в оптический блок пластину с дисками и проведите наблюдение полученной дифракционной картины.

7. Обработка результатов измерений

1. Воспользовавшись формулами (17), (13), (21), определите номер зоны Френеля для каждого максимума (минимума) в центре пятна. Длина волны излучения источника $\lambda = 0{,}635$ мкм (красный цвет).

Таблица 1

b, мм (расстояние между отверстием и экраном)	***R = d/2***, мм, (d - диаметр отверстия, указанный на пластине)

Таблица 2

№ точки	максимум (↑) или минимум (↓)	***ℓ***, мм	***a=l-f***, мм	***L=ab/(a+b)***, мм	***m***
1.					
2.					
3.					

8. Указания по технике безопасности

1. Перед выполнением работы получите инструктаж у лаборанта.
2. Запрещается трогать руками оптические поверхности линзы, источника и экран. Все перемещения вдоль оптической скамьи следует производить, двигая приборы за основания стоек.
3. Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории "Физика".

9. Контрольные вопросы.

1. Дайте определение дифракции.
2. Дайте определение волновой поверхности, луча, волнового фронта.
3. Какие волны называются плоскими, сферическими?
4. Сформулируйте принцип Гюйгенса.
5. Каким положением Френель дополнил принцип Гюйгенса? Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля. Для решения каких задач он используется? В чем его удобство?
6. Почему на общей огибающей вторичных волн всегда наблюдается интерференционный максимум?
7. Что такое зоны Френеля? Чему равны их радиусы? Расскажите о методе зон Френеля. Для решения каких задач он используется?