

КАЗАНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНАЯ  
АКАДЕМИЯ

Кафедра физики

Лабораторная работа 53

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА ЗОННОЙ ПЛАСТИНКЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ  
для студентов специальностей  
2903, 2906, 2907, 2908, 2910

Казань 2013

Составители: Г.В. Колпакова, В.Л. Фурер

Под редакцией Л.И. Маклакова, В.В. Алексеева

УДК 539.433

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА ЗОННОЙ ПЛАСТИНКЕ: Методические указания к лабораторным работам по физике для студентов специальностей 2903, 2906, 2907, 2908, 2910 /Казанская государственная архитектурно-строительная академия. Составители Г.В. Колпакова, В.Л. Фурер под редакцией Л.И. Маклакова, В.В. Алексеева. - Казань, 2013. 11 с.

В работе рассмотрено явление дифракции света, принцип Гюйгенса-Френеля, метод зон Френеля, описано устройство и принцип работы зонной пластинки.

Стр.11, рис.5

Рецензент: доцент кафедры молекулярной физики Казанского  
госуниверситета Пименов Г.Г.

С Казанская государственная  
архитектурно-строительная  
академия, 2013 г.

## СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ

Световые волны представляют собой электромагнитные волны с длиной волны 0,4-0,8 мкм. Волной называется процесс распространения колебаний в пространстве. В случае электромагнитных волн это процесс распространения в пространстве взаимосвязанных электрических и магнитных полей, изменяющихся по синусоидальному закону. Если электромагнитная волна распространяется вдоль оси  $x$ , то она описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{E}_0 \cos(\omega t - kx); \\ \dot{H} &= \dot{H}_0 \cos(\omega t - kx); \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\dot{E}$  и  $\dot{H}$  - значения напряженности электрического и магнитного полей в момент времени  $t$  в точке с координатой  $x$ ;  $\dot{E}_0$  и  $\dot{H}_0$  - амплитуды этих величин;  $\omega$  - циклическая частота;  $(\omega t - kx)$  - фаза волны;  $kx$  - начальная фаза в момент времени  $t = 0$ ;  $k = \frac{2\pi}{l}$  - волновое число, показывающее, какое число волн укладывается в  $2\pi$  метрах;  $l$  - длина волны, т.е. путь, пройденный волной за один период. Векторы  $\dot{E}$  и  $\dot{H}$  колеблются перпендикулярно направлению распространения (т.е. электромагнитная волна поперечная), перпендикулярно друг другу, их колебания происходят в фазе  $\dot{E}$  и  $\dot{H}$  достигают наибольших значений одновременно. Если источник волн начал возбуждать электромагнитные колебания, то через время  $t$  колебания распространятся по различным направлениям на расстояние  $r = c \cdot t$  ( $c$  - скорость волны). Поверхность, до которой доходят колебания в момент времени  $t$ , называется фронтом волны. Все точки фронта волны колеблются в одинаковой фазе.

## ДИФРАКЦИЯ СВЕТА. ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА-ФРЕНЕЛЯ.

В однородной среде свет распространяется прямолинейно. Однако, если среда содержит неоднородности (малые препятствия, отверстия, щели), то прямолинейность распространения света нарушается. Дифракцией называется явление огибания волнами препятствий. В результате дифракции свет попадает в область геометрической тени. Явление дифракции выражено четко, если длина волны сравнима с размерами препятствий. Поэтому дифракция световых волн становится заметной, если размеры преграды малы ( $\sim 5 \cdot 10^{-7}$  м). Явление дифракции может быть объяснено с помощью принципа Гюйгенса-Френеля: всякая точка, до которой дошла волна, служит источником вторичных когерентных волн, которые интерферируют между собой. Световая волна, возбуждаемая источником  $S$ , может быть представлена как результат сложения вторичных когерентных волн, излучаемых бесконечно малыми элементами волнового фронта.

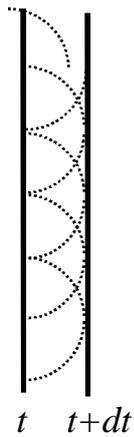


Рис. 1

Например, пусть в момент времени  $t$  известно положение фронта, например, плоской волны (рис. 1). От каждой точки исходят вторичные волны, изображённые пунктирными линиями. В изотропной среде эти вторичные волны являются сферическими. При этом принимается, что они распространяются только в направлении распространения волны. Огибающая этих вторичных волн и даёт положение фронта волны в момент времени  $(t + Dt)$ . Таким образом, расчет интенсивности света в какой-либо точке пространства сводится к расчету интерференции волн от вторичных источников.

## МЕТОД ЗОН ФРЕНЕЛЯ

При расчете интенсивности света необходимо суммировать большое число колебаний от вторичных источников. Для упрощения расчета Френель пред-

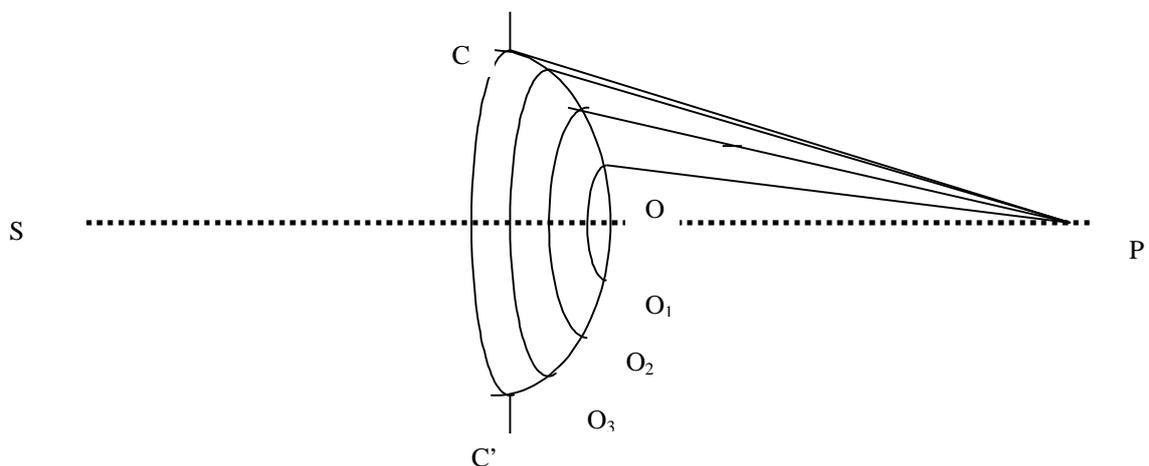


Рис. 2

ложил метод деления фронта волны на участки – зоны. Рассмотрим метод зон Френеля на примере сферической волны от источника  $S$  проходящей сквозь круглое отверстие  $CC'$  (рис. 2). Каждая точка отверстия становится источником вторичных сферических волн. Интенсивность света в точке наблюдения  $P$  можно определить на основании принципа Гюйгенса-Френеля. Разделим сферический фронт волны на участке  $CC'$  на кольцевые зоны так, чтобы расстояния от краев соседних зон до точки  $P$  отличались на половину длины волны

$$PO_1 - PO = PO_2 - PO_1 = PO_3 - PO_2 = \dots = \frac{l}{2}.$$

Тогда разность хода лучей от соответствующих точек соседних зон равна  $\frac{l}{2}$ , т.е. излучения от них будут ослаблять друг друга (условие минимума при интерференции). Поэтому амплитуда результирующих колебаний в точке  $P$  может быть записана:

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots \pm A_m \quad (2)$$

где  $A_1, A_2$  и т.д. амплитуды колебаний от соответствующих зон. В выражении (2)  $A_m$  берется со знаком «плюс», если  $m$  – нечетное, и со знаком «минус», если  $m$  – четное. Поскольку с увеличением номера зоны расстояние от зоны до точки наблюдения возрастает, амплитуды колебаний монотонно убывают

$$A_1 \gg A_2 \gg A_3 \gg \dots \gg A_{m-1} \gg A_m.$$

Вследствие монотонного убывания  $A_m$  можно приближенно считать, что

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

Перепишем выражение (2) в виде:

$$A = \frac{A_1}{2} + \left( \frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left( \frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots + \left( \frac{A_{m-2}}{2} - A_{m-1} + \frac{A_m}{2} \right) + \frac{A_m}{2} \quad (m - \text{нечетное}), \quad (3)$$

$$A = \frac{A_1}{2} + \left( \frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left( \frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots + \left( \frac{A_{m-3}}{2} - A_{m-2} + \frac{A_{m-1}}{2} \right) + \frac{A_{m-1}}{2} - A_m \quad (m - \text{четное}).$$

Выражения, заключенные в скобки, равны нулю. Амплитуды от двух соседних зон мало отличаются по величине, поэтому

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

В результате выражение (3) принимает вид:

$$A = \frac{A_1}{2} \pm \frac{A_m}{2}, \quad (4)$$

где знак «плюс», для  $m$  – нечетного, и «минус» для  $m$  – четного. Амплитуда суммарного колебания в точке  $P$  зависит от числа открытых зон  $m$ . Соотношения (2) и (4) позволяют объяснить следующие явления:

1. Прямолинейное распространение света. Если убрать экран с отверстием, то число зон становится бесконечно большим.

$$A_m \rightarrow 0 \text{ и } A = \frac{A_1}{2}.$$

Поэтому действие всей волновой поверхности эквивалентно действию центральной зоны, которая имеет небольшие размеры, и свет распространяется практически прямолинейно.

2. Дифракция от круглого непрозрачного экрана. Если круглым экраном закрыть небольшое число  $i$  первых зон, то выражение (2) можно записать

$$A = A_{i+1} - A_{i+2} + A_{i+3} - + \dots \pm A_m \quad (5)$$

или

$$A = \frac{A_{i+1}}{2} + \left( \frac{A_{i+1}}{2} - A_{i+2} + \frac{A_{i+3}}{2} \right) \quad (5)$$

Так как выражения в скобках равны нулю, то

$$A = \frac{A_{i+1}}{2}. \quad (6)$$

Следовательно, в точке Р будет виден свет. Поэтому наблюдается дифракция света.

3. Дифракционная картина на круглом отверстии и круглом экране. Более подробные расчеты показывают, что в обоих случаях на экране, расположенном в точке Р, наблюдается чередование темных и светлых колец, которое и является дифракционной картиной.

3. Дифракция на зонной пластинке. Если на пути света поставить пластинку, которая закроет все четные зоны, то результирующая амплитуда  $A$  будет равна, согласно ур. (2),

$$A = A_1 + A_3 + A_5 + \dots \pm A_{2m+1} \quad (7)$$

Видно, что в точку Р, дойдет значительно больше света, чем без зонной пластинки. Таким образом, зонная пластинка увеличивает интенсивность света, которая пропорциональна  $A^2$  и действует как собирающая линза. Работа зонной пластинки является прямым экспериментальным подтверждением правильности теории зон Френеля.

## ЗОННАЯ ПЛАСТИНКА КАК СОБИРАЮЩАЯ ЛИНЗА

Если направить на зонную пластинку монохроматический свет от источника S (рис. 4), находящегося на расстоянии  $a$  от пластинки, то на экране, расположенном на расстоянии  $b$ , световые колебания от прозрачных зон придут в одной фазе, и в точке Р будет наблюдаться яркое изображение источника.

Фокусирующее действие зонной пластинки будет иметь место и тогда, когда лучи падают под углом (например, от источника S'). Следовательно, с помощью зонной пластинки можно получить изображение протяженных источников, т.е. она работает также как собирающая линза.

Вспомним формулу линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \quad (8)$$

где  $a$  – расстояние предмета от линзы;  $b$  – расстояние от линзы до изображения предмета;  $F$  – фокусное расстояние линзы, т.е. расстояние до точки, где себе-

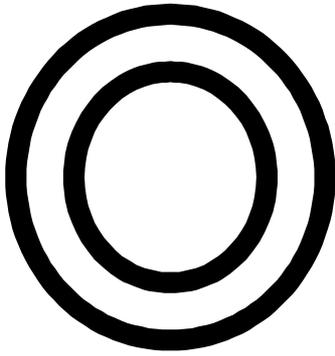


Рис. 3

рутся лучи, направленные на линзу в виде параллельного пучка света. Фокусное расстояние зонной пластинки зависит от длины волны света  $\lambda$  и радиуса  $i$ -го кольца

$$F = \frac{r_i^2}{i \cdot \lambda}.$$

(9)

Зная фокусное расстояние  $F$  и радиус  $i$ -го кольца зонной пластинки, можно найти длину волны  $\lambda$  из формулы (9)

$$\lambda = \frac{r_i^2}{i \cdot F}.$$

(10)

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Оптическая схема установки приведена на рис. 5. На оптической скамье устанавливается монохроматический источник света  $S$  (электрическая лампочка со светофильтром), экран с вырезом в форме стрелки  $D$ , зонная пластинка  $Z$ , изготовленная из фотонегатива, окуляр  $O$ . Стрелка  $D$  освещается источником монохроматического света  $S$ . Лучи, исходящие из него, попадают в зонную пластинку, которая создает изображение стрелки на некотором расстоянии. Полученное изображение рассматривается с помощью окуляра.

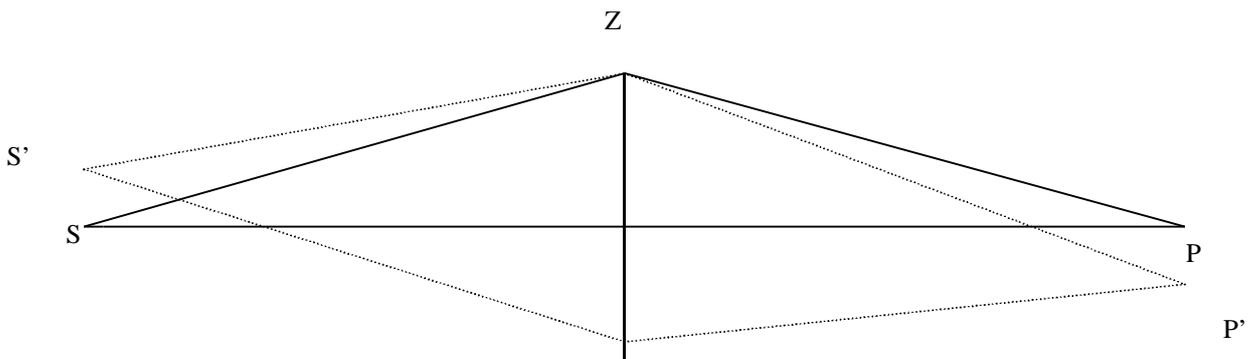


Рис. 4

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В данной работе определяется фокусное расстояние зонной пластинки и длина волны монохроматического света. Для этого:

1. Включить источник света с одним из светофильтров.

2. Перемещением зонной пластинки и окуляра добиться, чтобы в поле зрения окуляра было отчетливо видно в увеличенном масштабе резкое изображение

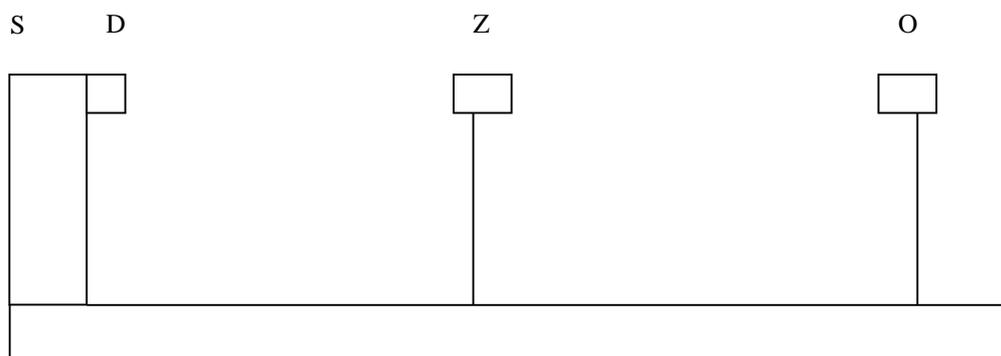


Рис. 5

стрелки.

3. Измерить с помощью линейки расстояние от стрелки до зонной пластинки  $a$  и расстояние от зонной пластинки до фокальной плоскости окуляра  $b$ . Фокальная плоскость окуляра лежит на 0,5 см позади окуляра. Фокусное расстояние вычислить по формуле (15) для всех светофильтров.
4. Определить длину световой волны по формуле, где  $\rho_3 = 0,49$  мм – радиус третьего кольца зонной пластинки для каждого светофильтра.
5. Выключить осветитель и привести рабочее место в порядок.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое волна?
2. Что называется фронтом волны?
3. Запишите уравнение световой волны. Каковы ее характеристики (амплитуда, частота, фаза, волновое число, длина волны).
4. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.
5. Что называется дифракцией волн?
6. Как происходит разбиение волнового фронта на зоны Френеля? Почему расстояния от краев соседних зон до точки наблюдения выбираются так, что отличаются на половину длины волны?
7. Чему равна амплитуда результирующей световой волны:
  - а) на пути волны стоит круглое отверстие;
  - б) в отсутствие преграды;
  - в) в отверстии стоит зонная пластинка.
8. Почему зонная пластинка усиливает свет?