

Работа 4.12

Определение длины волны при помощи зонной пластинки

Оборудование: клистронный генератор, приемник электромагнитных волн, гальванометр, выпрямитель ВУП-1, оптическая скамья, ртутная лампа, измерительный микроскоп, зонные пластинки, настольная лампа.

Введение

Для того чтобы объяснить принцип действия зонной пластинки, рассмотрим распространение волны от точечного источника S (рис. 4.26) через круглое отверстие в непрозрачном экране AB .

Обозначим расстояние от источника S до экрана через a и расстояние от экрана до точки наблюдения P через b . Светящуюся поверхность, (отверстие в экране), делим на кольцевые зоны (зоны Френеля) с центром в точке M_0 . Внешний радиус первой зоны $r_1 = M_0M_1$ выбирается так, чтобы длина пути SM_1P отличалась от длины $SM_0 + M_0P$ на $\lambda/2$, т. е.

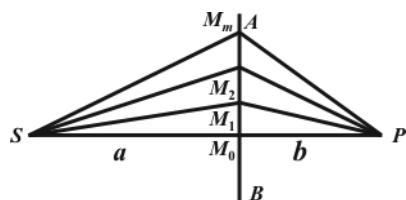


Рис. 4.26

$$SM_1 + M_1P = SM_0 + M_0P + \frac{\lambda}{2}.$$

Внешний радиус второй зоны $r_2 = M_0M_2$ выбирается таким, чтобы выполнялось условие

$$SM_2 + M_2P = SM_0 + M_0P + 2\frac{\lambda}{2}.$$

Аналогично для $r_m = M_0M_m$ должно выполняться условие

$$SM_m + M_mP = SM_0 + M_0P + m\frac{\lambda}{2}.$$

При этих условиях радиус зон Френеля определяется по формуле

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m\lambda},$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$ — номер зоны.

Таким образом, радиус зон Френеля зависит от длины волны λ , расстояний a и b от источника излучения до экрана и от экрана до точки наблюдения соответственно.

Радиус первой зоны ($m = 1$)

$$r_1 = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} \lambda .$$

Если подставить значение r_1 в выражение для r_m , то получим

$$r_m = r_1 \sqrt{m} .$$

Легко показать, что площадь поверхности зоны Френеля не зависит от ее номера, это значит, площади поверхностей всех зон одинаковы. Поэтому амплитуды колебаний, которые исходят от отдельных зон и доходят до точки P , зависят только от расстояний до этих зон и от углов, под которыми видны поверхности зон из точки P . При увеличении номера зоны эти расстояния и соответствующие углы увеличиваются, поэтому амплитуды колебаний монотонно убывают:

а)

б)



Рис. 4.27

$$A_1 > A_2 > A_3 > \dots > A_m .$$

Поскольку расстояния от двух соседних зон до точки P отличаются на $\lambda/2$, то колебания, которые приходят в точку P от этих зон, имеют противоположные фазы. Поэтому результирующая амплитуда колебаний в точке P будет

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots \pm A_m ,$$

где знак «+» перед A_m соответствует нечетным, а «-» — четным номерам зон.

При малых m величина A_m практически не отличается от A_1 , поэтому при нечетных m амплитуда колебаний в точке P будет приблизительно равная A_1 , а при четных — нулю. Если в отверстии, вмещающем несколько зон Френеля, закрыть, например, все четные зоны и оставить открытыми нечетные зоны, то амплитуда результирующих колебаний должна быть значительно большей, чем

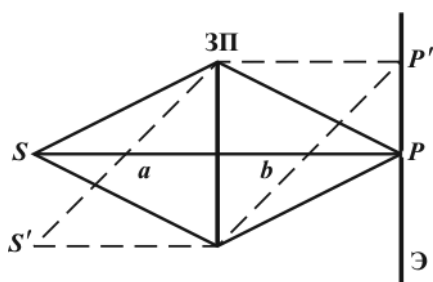


Рис. 4.28

при полностью открытом отверстии. То же самое будет, если закрыть все нечетные зоны.

Экран, состоящий из прозрачных и непрозрачных колец, которые последовательно чередуются и соответствуют зонам Френеля, называется *зонной пластинкой*. На рисунке 4.27 показаны зонные пластинки: а — открыты четные зоны, б — открыты нечетные зоны.

Если зонную пластинку $ЗП$ разместить на расстоянии a от источника S монохроматических волн, то на экране \mathcal{E} (рис. 4.28), находящемся на расстоянии b от пластинки, в точке P получим ее изображение. Это означает, что зонная пластинка, подобно линзе, обладает фокусирующим действием. Фокусирующее

действие зонной пластинки имеет место и тогда, когда лучи падают на нее под небольшим углом (например, от источника S'). Следовательно, при помощи зонной пластинки можно получить изображение протяженных источников или предметов.

Для того чтобы наиболее полно наблюдать аналогию между зонной пластинкой и линзой, будем считать, что длина волны λ , число зон m и их радиусы r_m являются известными. Найдем значения a и b , для которых волны, проходящие через прозрачные кольца пластинки, усиливают друг друга. Согласно формуле

$$\frac{m\lambda}{r_m^2} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$$

будем иметь

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}.$$

Полученный результат означает, что a и b связаны между собой формулой, аналогичной формуле линзы, где величина $\frac{r_m^2}{m\lambda}$ играет роль фокусного расстояния.

Действительно, если $a = \infty$, то $b = F$, т. е. параллельные лучи собираются в фокусе. Характерной особенностью зонной пластинки по сравнению с линзой является то, что ее фокусное расстояние обратно пропорционально длине волны ($F \approx 1/\lambda$), а это означает, что имеет место значительная хроматическая aberrация.

Другая особенность зонной пластинки заключается в том, что она дает не одно, а несколько изображений источника. Это вызвано тем, что фокусирующее действие зонной пластинки имеет место и тогда, когда разность хода между лучами от прозрачных зон равна 3λ , 5λ , ..., $(2n+1)\lambda$, т. е. если в каждой светлой зоне будет по 3, 5, и т. д. зон Френеля.

Таким образом, для каждой длины волны зонная пластинка имеет несколько фокусов. Это обстоятельство аналогично наличию максимумов разных порядков у дифракционных решеток.

У п р а ж н е н и е 1. *Определение длины волны сантиметровых электромагнитных волн.*

Описание установки и метода. В качестве источника электромагнитных волн используется клистронный ВЧ-генератор с рупорной антенной, которая установлена на оптической скамье. На этой же скамье установлен приемник с рупорной антенной, которая припаяна к концу волновода. На другом конце волновода установлена детекторная секция, внутри которой находится кремниевый детектор. Индикатором служит зеркальный гальванометр.

Для того чтобы источник и приемник электромагнитных волн были по своим свойствам близки к точечным, на рупорах их антенн закреплены металлические экраны с круглыми отверстиями диаметром 2 см.

Между генератором и приемником с помощью специального приспособления устанавливается экран из листового алюминия с круглыми отверстиями, которые соответствуют одной, двум или трем открытым зонам Френеля.

Порядок выполнения упражнения

1. Включите клистронный генератор и дайте ему прогреться.
2. Между источником и приемником расположите экран с наименьшим отверстием (открыта первая зона Френеля)
3. Перемещением экрана вдоль оптической скамьи найдите такое его положение, при котором отклонение светового показателя гальванометра будет максимальным. Сравните это показание с показанием гальванометра при отсутствии экрана. Измерьте соответствующие значения a и b .
4. Снимите первый экран и установите другой с большим отверстием (открыты две зоны Френеля). При необходимости измените a и b так, чтобы показания гальванометра были минимальными.
5. Проведите аналогичные измерения с экраном, у которого открыты три зоны Френеля и с экраном, где первая зона и третья открыты, а вторая закрыта.
6. Измерьте радиусы зон Френеля, соответствующие им значения a и b и определите длину волны по формуле

$$\lambda = \frac{r_m^2(a+b)}{tab}$$

7. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу:

| № п/п | a , м | b , м | r , м | m | λ , м |
|-------|---------|---------|---------|-----|---------------|
|-------|---------|---------|---------|-----|---------------|

8. Сравните показания гальванометра в опытах с разными экранами и дайте объяснение полученному результату.

Упражнение 2. *Определение длины волны света при помощи зонной пластинки.*

Описание установки и метода. Оптическая схема установки показана на рисунке 4.29.

Непрозрачный экран с крестообразной щелью освещается с помощью конденсора O_1 ртутной лампой S . Лучи света, проходя через щель, попадают на

зонную пластинку ЗП, которая дает изображение этой щели в некоторой плоскости. Это изображение наблюдается при помощи окуляра микроскопа O_2 .

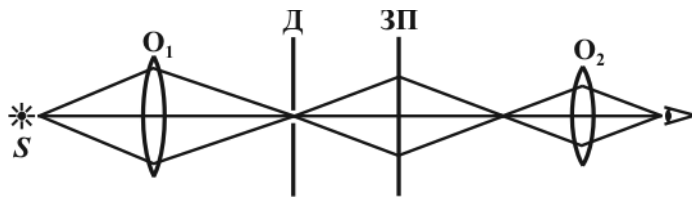


Рис. 4.29

В качестве зонной пластинки используется уменьшенная фотография чертежа зонной пластинки с прозрачными четными зонами.

Для измерения радиусов колец зонной пластинки на столике измерительного микроскопа закреплена такая же зонная пластинка, что и на установке. Зонная пластинка освещается светом, отраженным от зеркала. На столике микроскопа закреплена также прозрачная шкала с ценой деления 0,1 мм, которая используется при определении увеличения микроскопа.

Порядок выполнения упражнения

1. При помощи измерительного микроскопа измерьте внешние радиусы первых 4 — 5 светлых колец зонной пластинки, пронумеруйте их соответствующими четными номерами. Для этого наблюдайте в окуляр микроскопа изображение светлых колец зонной пластинки и, вращением барабана винтового микрометра окуляра, наведите перекрестие сначала на левую, а потом на правую границу диаметра соответствующего кольца. Запишите показания барабана n_1 , n_2 и найдите их разность $\Delta n = n_2 - n_1$.

Перемещением предметного столика с помощью двух винтов добейтесь появления в поле зрения микроскопа прозрачной шкалы. Поворачивая окулярный микрометр, разместите его так, чтобы при вращении барабана перекрестие двигалось вдоль этой шкалы. Совместите перекрестие с изображением одного из штрихов прозрачной шкалы и сделайте отсчет по измерительному барабану n'_1 . Вращением измерительного барабана переместите перекрестие на самое большое число делений (10 — 20) прозрачной шкалы и снова сделайте отсчет n'_2 . При этом учитывайте мертвый ход барабана (подводите перекрестие с одной стороны). Разность отсчетов $\Delta n = n'_2 - n'_1$ дает число делений окуляр-микрометра, которые расположились в определенном числе делений прозрачной шкалы. Цена деления барабана винтового окуляр-микрометра (E) определяется по формуле

$$E = \frac{Nz}{\Delta n_z},$$

где N — число делений прозрачной шкалы, z — цена делений этой шкалы ($z = 0,1$ мм), Δn_z — разность отсчетов окулярного микрометра.

При известной цене деления E окулярного микрометра диаметры колец найдите по формуле

$$D = E \Delta n.$$

Повторите измерения несколько раз и вычислите радиусы колец.

2. Определите фокусное расстояние зонной пластины для желтой линии ($\lambda = 578$ нм) спектра ртути. Для этого включите ртутную лампу и перемещением зонной пластины и окуляра добейтесь, чтобы в поле зрения окуляра было видно изображение желтого креста в увеличенном масштабе. Измерив с помощью линейки расстояние от экрана с крестообразной щелью до зонной пластинки и от зонной пластинки до фокальной плоскости окуляра, определите фокусное расстояние зонной пластины по формуле

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}.$$

Используйте результаты измерений радиусов зон Френеля и вычислите фокусное расстояние зонной пластинки для этой линии по формуле

$$F = \frac{r_m^2}{m\lambda}.$$

3. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу:

| № п/п | n_1 | n_2 | Δn | n_1 | n_2 | Δn | N | Z | E | $D, \text{ м}$ | $\lambda, \text{ м}$ | $r_m, \text{ м}$ | m | $F, \text{ м}$ |
|-------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-----|-----|-----|----------------|----------------------|------------------|-----|----------------|
|-------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-----|-----|-----|----------------|----------------------|------------------|-----|----------------|

ЗАДАНИЕ ДЛЯ УИР

С помощью зонной пластины определите длину волны зеленой, синей и фиолетовой линий спектра ртути.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой физической величине — амплитуде волны или ее интенсивности — пропорционально отклонение светового показателя гальванометра, используемого в упражнении 1 в качестве индикатора?

2. Если в экране с круглым отверстием закрыть четные зоны и оставить открытыми нечетные, то площадь поверхности отверстия уменьшится, а амплитуда колебаний увеличится. Не противоречит ли это закону сохранения энергии? Почему?

3. Можно ли наблюдать дифракцию света на отверстии диаметром несколько сантиметров?

4. Как изменится освещенность, если экран с круглым отверстием, у которого вторая зона Френеля закрыта, а первая и третья — открыты?

5. Что общего и различного в зонной пластинке и линзе?
6. Объясните принцип образования зон Френеля и проведите расчет радиусов зон.
7. Докажите прямолинейность распространения света на основе метода зон Френеля.
8. Что представляет собой фазовая зонная пластинка?
9. Обладает ли зонная пластинка хроматической абберацией?
10. Как будет изменяться освещенность в точке наблюдения при увеличении отверстия в экране?