Конспект лекций по курсу общей физики. **Часть III**

"Оптика. Квантовые представления о свете.

Атомная физика и физика ядра"

Лекция № 2

2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

2.1 Принцип Гюйгенса-Френеля

Явление дифракции, как и явление интерференции, характерно для волнового процесса. В основу учения о распространении света Х.Гюйгенс (1690г.) положил принцип, носящий его имя: ***каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн, элементарные волны слабые, так что ощущается лишь их огибающая, которая представляет фронт волны через промежуток времени*** Δt (рис.1).

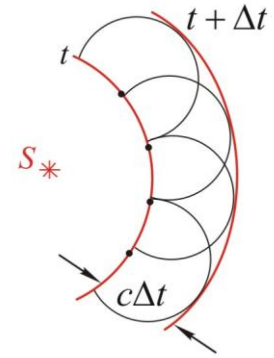

Рис.1

Французский физик О.Френель утверждает, что ***эти источники когерентны между собой, испускаемые ими вторичные волны интерферируют, если принять во внимание их амплитуду и фазу, то можно рассмотреть вопрос о интенсивности света.***

Френель произвел такой расчет, однако утонченные аналитики неодобрительно встретили работу Френеля, усмотрев явное противоречие со здравым смыслом, поскольку из расчета следует, что в центре геометрической тени непрозрачного диска должно наблюдаться светлое пятно, а в центре конической проекции небольшого круглого отверстия можно наблюдать темное пятно. Френелю предложили доказать это экспериментально, что он блестяще выполнил.

2.2. Зоны Френеля

Принцип Гюйгенса-Френеля позволят проанализировать дифракционные явления. ***Дифракцией волн называется отклонение (огибание) волн от прямолинейного распространения.***

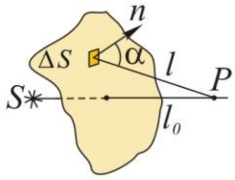

Рис.2

Колебания в точке P (рис.2) определяются суммой колебаний, приходящих от элементарных поверхностей ΔS волнового фронта. Амплитуда колебаний зависит от размера ΔS, от расстояния l и от угла между нормалью n и направления l. Фаза колебаний определяется длиной пути l, пройденного волной. Расчет интерференции сводится к интегрированию. Для упрощения расчета Френель предложил метод деления фронта волны на кольцевые зоны.

Волна падает на непрозрачный экран с отверстием. Для определения интенсивности света в точке P разобьем световую поверхность на зоны (рис.3) такого размера, чтобы расстояния от краев зоны до P отличались на $\lambda/2$, т. е. волны от соседних зон приходят в противоположных фазах и ослабляют друг друга.

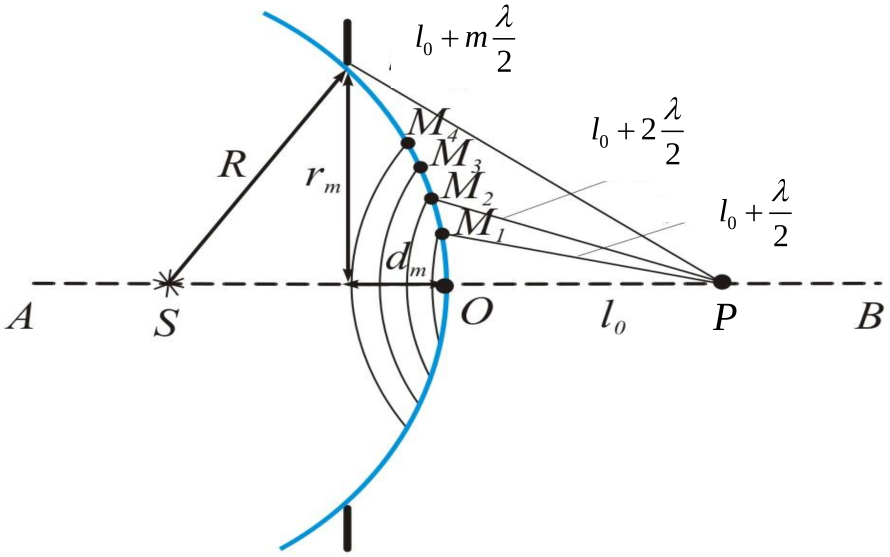

Рис.3

На рисунке: $r_1, r_2, \ldots r_m$ – радиусы зон, R – радиус кривизны фронта сферической волны, O – точка пересечения фронта с прямой AB, d_1, $d_2, \ldots d_m$ – расстояния от O до проекции границы зоны на AB. ***Центральная зона называется нулевой.***

Из рисунка 3 видно, что

$$r_m^2 = R^2 - (R - d_m)^2 = \left(l_0 + m\frac{\lambda}{2}\right)^2 - (l_0 + d_m)^2 \qquad (1)$$

Раскрывая скобки и пренебрегая малыми значениями λ^2 и d_m^2, получим

$$d_m = \frac{l_0 m}{R + l_0}\,\frac{\lambda}{2}$$

$$r_m^2 = \frac{R l_0\, m\lambda}{R + l_0} \qquad (2)$$

Следовательно, площадь нулевой зоны ($m = 1$)

$$S_0 = \pi r_1^2 = \pi \frac{R l_0 \lambda}{R + l_0} \tag{3}$$

Площадь первой кольцевой зоны ($m = 2$)

$$S_1 = S_{(0+1)} - S_0 = 2\pi \frac{R l_0 \lambda}{R + l_0} - \pi \frac{R l_0 \lambda}{R + l_0} = \pi \frac{R l_0 \lambda}{R + l_0} \tag{4}$$

Площади всех зон равны. Равенство площадей не означает равенства амплитуд, с увеличением номера зоны амплитуды колебаний монотонно убывают:

$$A_0 > A_1 > A_2 > \ldots > A_m > A_{m+1} > \ldots \tag{5}$$

Так как колебания соседних зон приходят в противофазе, амплитуда результирующего колебания

$$A_{рез} = A_0 - A_1 + A_2 - A_3 + \ldots \pm A_m \tag{6}$$

Можно считать, что разности соседних амплитуд не изменяются

$$A_0 - A_1 = A_1 - A_2, \text{ т. е. } A_1 = \frac{A_0 + A_2}{2} \text{ и}$$

$$A_{рез} = \frac{A_0}{2} + \left(\frac{A_0}{2} - A_1 + \frac{A_2}{2}\right) + \left(\frac{A_2}{2} - A_3 + \frac{A_4}{2}\right) + \left(\frac{A_4}{2} - A_5 + \ldots\right. \tag{7}$$

Все выражения в скобках равны нулю, поэтому получаем

$$A_{рез} = \frac{A_0}{2} \pm \frac{A_m}{2} \text{ или} \tag{8}$$

$$A_{рез} = \frac{A_0}{2}, \text{ при } m = \infty \tag{9}$$

Отсюда следует, при большом числе зон во фронте волны размеры отверстия в непрозрачном экране перестают сказываться на освещенности в точке P. Если бы свет распространялся прямолинейно, то размеры отверстия вообще не должны сказываться на освещенности в точке P. ***С достаточной степенью точности можно утверждать, что в свободном пространстве свет распространяется прямолинейно.***

2.3. Графическое вычисление амплитуды

При решении задач удобно пользоваться графическим методом сложения колебаний. Воспользуемся понятием ***вектора амплитуды: это вектор А, длина которого равна амплитуде, а угол β – угол, который этот вектор составляет с осью АВ, соответствующей начальной фазе колебания*** (рис.4).

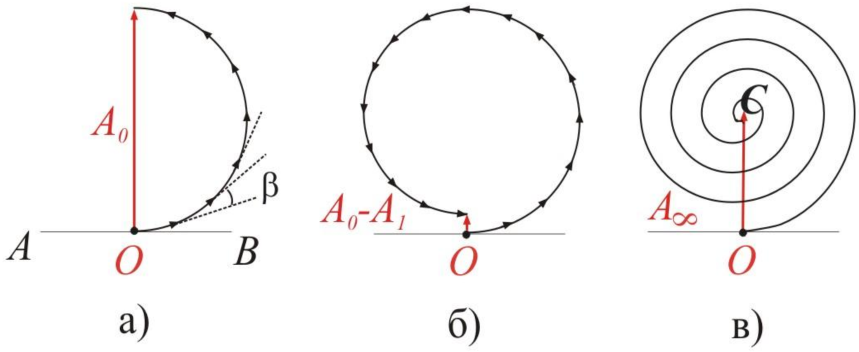

Рис.4

а) Разделим центральную зону на n кольцевых подзон. Между началом и концом зоны фаза колебаний измениться на π, поэтому при переходе от одной подзоны к другой фаза изменяется на $\beta = \dfrac{\pi}{n}$. Результирующая амплитуда в точке P при открытой центральной зоне равна A_0.

б) Результирующая амплитуда при двух открытых зонах равна

$$A_0 - A_1.$$

в) Полностью открытому волновому фронту соответствует бесконечное число зон и подзон, ломаная кривая превращается в плавную спираль с центром в точке C. Амплитуда A_∞ равна $A_0/2$, в полном соответствии с формулой (9).

2.4. Зонная пластинка

Подтверждением правильности метода зон Френеля служит опыт с зонной пластинкой рис.5. Пластинка закрывает или четные, или нечетные зоны фронта волны.

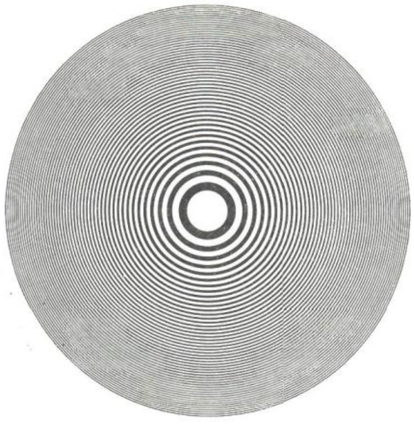

Рис.5. Зонная пластинка Френеля.

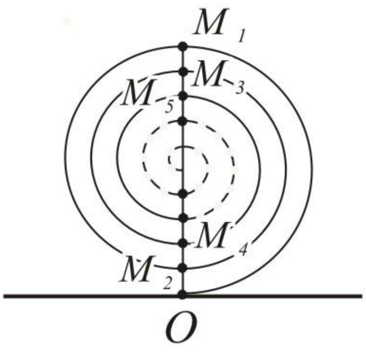

Рис.5а

В соответствии с уравнением (6), или рис.5а амплитуда прошедшей через пластинку световой волны в точке P составит сумму векторов. Если, например, закрыты четные зоны, то

$$\bar{A}_{рез} = \overline{OM}_1 + \overline{M_2M}_3 + \overline{M_4M}_5 + \dots \quad ,$$

т. к. все векторы имеют одинаковое направление. Усиление интенсивности света означает, что в точке P свет фокусируется, таким образом, зонная пластинка действует подобно собирающей линзе.

2.5. Дифракция на круглом диске. Пятно Пуассона

При полностью открытом фронте волны амплитуда результирующего колебания в точке P (рис.6)

$$A_{рез} = \frac{A_0}{2} + \left(\frac{A_0}{2} - A_1 + \frac{A_2}{2}\right) + \left(\frac{A_2}{2} - A_3 + \frac{A_4}{2}\right) + \left(\frac{A_4}{2} - \dots\right.$$

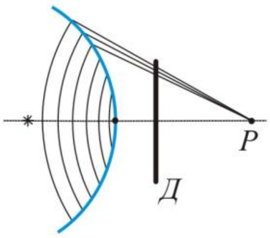

Рис.6

Если закрыто круглым диском $Д$ несколько зон, начиная с нулевой, то следующие зоны, после последней из закрытых, создают в точке P освещенность. В нашем примере (диск закрывает две зоны) амплитуда

$$A_{рез} = \frac{A_2}{2} \pm \frac{A_m}{2} \qquad (10)$$

Интенсивность пятна Пуассона слабеет с увеличением размера диска. Формула (10) показывает, что необходимость возникновения светлого пятна очевидна.