

Дифракция и дисперсия: возможные аналогии

Отвлечемся на некоторое время от задачи о распространении радиоимпульса в плазме и перейдем совсем к другому вопросу – *дифракции электромагнитных волн*. Мы увидим, что формулы (13) – (15) удивительным образом совпадают с соответствующими дифракционными формулами, хотя речь идет о разных физических явлениях. Взгляните на рисунок 3, где показан результат прохождения света через отверстие в непрозрачном экране. Мы не будем рассказывать подробно, как возникает дифракция, т.е. отклонение от первоначального направления распространения света. Заметим только, что на краях отверстия в точках 1 и 2 возникают краевые волны (они показаны условно в виде концентрических окружностей). В результате интерференции (взаимодействия) краевых волн друг с другом и с первичной волной возникает сложное распределение интенсивности в поперечном сечении пучка света (заштрихованные области). Точный расчет показывает, что на больших расстояниях $x \gg x_{\text{дифр}}$ первичный пучок параллельных лучей расширяется в пределах угла

$$\alpha_{\text{дифр}} = \frac{\lambda}{y_0}, \quad (16)$$

где λ – длина световой волны, y_0 – ширина отверстия в экране. Ширина пучка (расстояние между наклонными прямыми) равна

$$y(x) = \frac{x\lambda}{y_0}. \quad (17)$$

Дифракция является следствием волновой природы света, поэтому угол дифракции $\alpha_{\text{дифр}}$ пропорционален длине волны λ . На близких расстояниях $x \ll x_{\text{дифр}}$ расширение пучка происходит очень незначительно, что и отмечено начальными участками горизонтальных прямых, проведенных жирными линиями. Результаты точного расчета распределения интенсивности в поперечном направлении показаны штриховкой. Граничное значение $x_{\text{дифр}}$, начиная с которого в полной мере проявляются дифракционные явления, определяется из условия пересечения горизонтальных прямых с наклонными линиями $y_{1,2}(x) = \pm x\lambda/y_0$:

$$x_{\text{дифр}} = \frac{y_0^2}{\lambda}. \quad (18)$$

Область $x \ll x_{\text{дифр}}$ называют ближней зоной, а область $x \gg x_{\text{дифр}}$ – дальней зоной.

Вернемся снова к радиоимпульсу в плазме. Даже беглого взгляда на рисунок 2 и 3 достаточно, чтобы увидеть, что расплывание импульса в плазме за счет *дисперсии* и расширение пучка света вследствие *дифракции* происходят аналогичным образом. Это подтверждается сравнением формул (13) и (17), а также (14) и (16), (15) и (18). Видно, что величина $2\pi(dv_r/d\omega)|_{\omega_0}$ в плазменных формулах играет роль длины волны λ в дифракционных формулах, а исходная пространственная протяженность импульса τ_0 соответствует ширине отверстия y_0 . Таким образом, можно ввести «дисперсионную длину волны»:

$$\lambda_{\text{дисп}} = 2\pi(dv_r/d\omega)|_{\omega_0}.$$

Подчеркнем, что это чисто формальная аналогия: описывая деформацию радиоимпульса в плазме, можно пользоваться дифракционными формулами, если произвести в них замену

$$\lambda \rightarrow \lambda_{\text{дисп}}, \quad y_0 \rightarrow \tau_0. \quad (19)$$

Линза времени

Формулы соответствия (19) описывают пространственно-временную аналогию между процессами дифракции и дисперсии. Но дело не только в формальном сходстве. Эти соотношения наводят на мысль, что если в каком-нибудь оптическом приборе происходят пространственные преобразования пучков света, то, используя дисперсию, можно повторить те же преобразования с радиоимпульсами в плазме, но *не в пространстве, а во времени*. Иными словами, формулы (19) указывают на возможность создания «временных оптических приборов».

Покажем, как это делается, на

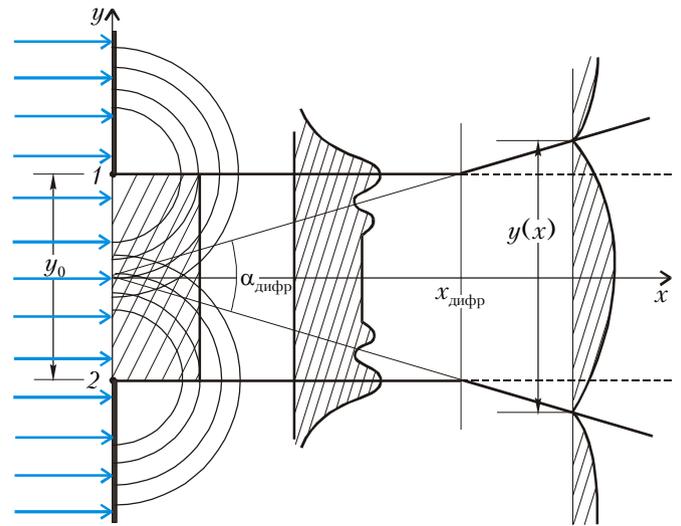


Рис.3. Дифракция света на отверстии в непрозрачном экране

примере простого оптического устройства – собирающей линзы (рис.4). Пучок параллельных лучей преломляется в линзе таким образом, что все лучи пересекаются в одной точке F – фокусе линзы. Такой ход лучей без учета дифракции света, или, как говорят, в приближении *геометрической оптики*. Однако мы уже знаем, что ограниченные размеры отверстия в экране приводят к дифракционному разбросу лучей на угол $\alpha_{\text{дифр}} = \lambda/y_0$. Поперечное сечение пучка лучей в фокусе линзы с учетом дифракции равно

$$y_{\text{фок}} = F\alpha_{\text{дифр}} = F\frac{\lambda}{y_0}. \quad (20)$$

Действие линзы (фокусировка) окажется эффективной, если $y_{\text{фок}} \ll y_0$, или

$$F \ll \frac{y_0^2}{\lambda}. \quad (21)$$

Из сравнения (21) с (18) следует, что линза хорошо работает только в ближней зоне, где $F \ll x_{\text{дифр}}$.

Не представляет труда определить, как возрастет интенсивность света в фокусе, считая, что потеря энергии в линзе не происходит. Поскольку интенсивность света равна энергии, приходящейся на единицу площади, коэффициент усиления интенсивности с учетом дифракции $Q_{\text{дифр}}$ будет равен отношению площадей поперечного сечения пучка света на входе в линзу и в ее фокальной плоскости, которые, в свою очередь, пропорциональны квадрату попереч-