

Интерференция. Интерференционная схема Юнга.

Частота видимого света $\sim 10^{14}$ Гц. Оптические приборы и органы зрения, обладая значительной инерционностью, усредняют эти колебания во времени. При этом на рецепторы глаза оказывает воздействие напряженность электрического поля (световой вектор), а не напряженность магнитного. Глаз регистрирует интенсивность света, пропорциональную энергии электромагнитной волны $I \sim \langle E^2 \rangle$ (угловые скобки означают усреднение по времени).

Монохроматические волны – волны постоянной частоты, неограниченные в пространстве. Бесконечная синусоидальная волна является идеализированной моделью реальных световых волн. Излучение естественных источников имеет сплошной спектр и волны, полученные, например, из солнечного света с помощью светофильтра, квазимонохроматичны. Дело не столько в этом, сколько в том, что сам процесс излучения дискретен.

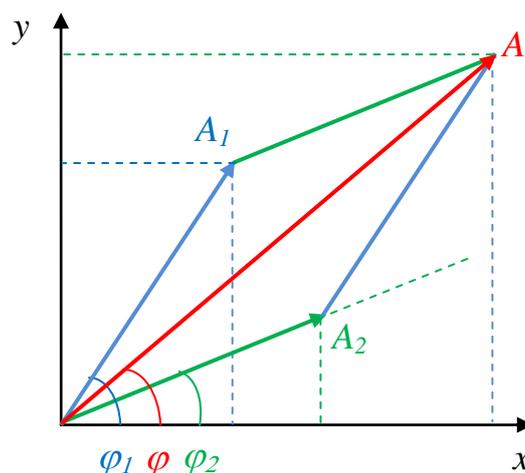
Пусть в некоторой области пространства перекрываются две плоские монохроматические волны, световые векторы которых колеблются вдоль одного направления

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t - kx_1 + \phi_{01}), \quad E_2 = A_2 \cos(\omega t - kx_2 + \phi_{02}).$$

Амплитуда A , циклическая частота ω , волновой вектор k и начальная фаза ϕ_0 полностью определяют световую волну.

В согласии с принципом суперпозиции для напряженности результирующего колебания справедливо $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Для интенсивности, квадратичной по напряженности, принцип суперпозиции не выполняется.

Произведем расчет интенсивности с помощью векторной диаграммы, Рис. 8. Отложим из начала декартовой системы координат векторы, длины которых равняются амплитуде каждого из колебаний, а угол между вектором и осью абсцисс равен фазе колебания ϕ .



Применяя теорема косинусов, запишем амплитуду результирующего колебания в следующем виде

Рис. 1

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\Delta\varphi - \pi),$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = k(x_2 - x_1) + \Delta\phi_0,$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз складываемых колебаний, а $\Delta\phi = \phi_{01} - \phi_{02}$ – разность начальных фаз.

Переходя к интенсивности, получаем, что

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \langle \cos \Delta\varphi \rangle,$$

последнее слагаемое в этой формуле назовем интерференционным членом.

Атом, находящийся в возбужденном состоянии, излучает электромагнитную волну в течение короткого времени $\tau \sim 10^{-8} \text{ с}$. Излучение представляет собой “обрывок” синусоиды, вне конечного промежутка времени амплитуда колебаний равна нулю. Такую световую волну называют волновым цугом и, строго говоря, она не является монохроматической.

Излучение атома носит вероятностный характер. Поэтому начальные фазы волновых цугов, последовательно излученных атомами, определяются случайным образом и не зависят друг от друга.

Излучение естественных источников является суперпозицией колоссально-го числа цугов, излучаемых различными атомами независимо друг от друга. Начальные фазы волновых цугов случайны, поэтому значение косинуса, входящего в интерференционный член, равномерно заполняют значения между ± 1 . Среднее же значение равно нулю. Для двух естественных источников, их называют некогерентными (несогласованными), интенсивность просто суммируется $I = I_1 + I_2$. Именно этот результат мы наблюдаем в повседневных опытах.

Когерентными называются источники, разность фаз которых не изменяется в течение времени в каждой точке пространства. Очевидно, что когерентными могут быть только монохроматические волны.

В области перекрытия световых волн, излученных двумя когерентными источниками, возникнет устойчивая во времени картина. Значение косинуса, вхо-

дящего в интерференционный член, изменяется в области перекрытия от -1 до +1, а предельные значения результирующей интенсивности определяются выражением

$$I = I_1 + I_2 \pm 2\sqrt{I_1 I_2}.$$

Устойчивая картина усиления или ослабления интенсивности в различных точках пространства называют интерференционной, а само явление интерференцией. *Интерференция* – пространственное перераспределение энергии при наложении двух или более когерентных волн.

Интерференционную картину можно получить и от естественных источников света. Для этого используется прием, заключающийся в том, что излучение первичного источника делится при помощи различных оптических систем на несколько вторичных. Излучение же вторичных источников является когерентным.

Пусть разделенные световые волны распространяются в оптически однородных средах с абсолютными показателями преломления n_1 и n_2 . Волновые числа волн определяются выражением $k = 2\pi n/\lambda$, а разность начальных фаз $\Delta\phi_0 = 0$.

Прошедшие различный путь волны в области перекрытия будут иметь разность фаз

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_2 x_2 - n_1 x_1).$$

Если $n x$ – оптическая длина пути, тогда $\Delta = n_2 x_2 - n_1 x_1$ – оптическая разность хода двух волн. Тогда разность фаз $\Delta\varphi = 2\pi\Delta/\lambda$.

Интерференционный максимум наблюдается в тех точках пространства, в которых в оптическую разность хода укладывается целое число длин волн

$$\Delta = \pm m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Если же в оптическую разность хода укладывается нечетное количество половолн,

$$\Delta = \pm(2m + 1)\lambda/2, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

то наблюдается интерференционный минимум.

Первым делить излучение источника предложил Юнг. В его опыте пучок монохроматического света от источника S направляется на непрозрачный экран A

с узкой щелью, Рис. 9. Эта щель играет роль первичного источника, свет от которого падет на экран B с двумя щелями S_1 и S_2 , расстоянием между которыми d . Все три щели параллельны друг другу. Излучение вторичных когерентных источников попадает на экран \mathcal{E} , на котором образуется система чередующихся светлых и темных интерференционных полос.

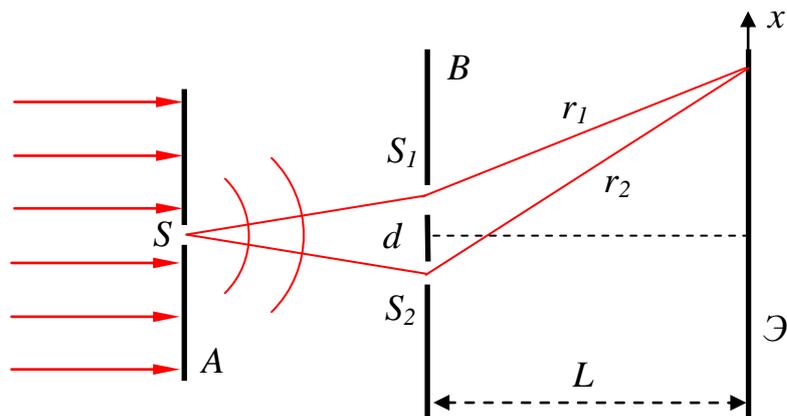


Рис. 2

Расстояния от первой и второй щели до точки наблюдения с координатой x определим из прямоугольных треугольников

$$r_1^2 = L^2 + (x - d/2)^2, \quad r_2^2 = L^2 + (x + d/2)^2,$$

тогда $r_2^2 - r_1^2 = 2dx$. С другой стороны, поскольку $L \gg d$, и $r_2 + r_1 \approx 2L$,

$$r_2^2 - r_1^2 = (r_2 + r_1)(r_2 - r_1) \approx 2L(r_2 - r_1).$$

Оптическую разность хода волн, испущенных источниками S_1 и S_2 , можно представить как

$$\Delta = r_2 - r_1 \approx xd/L.$$

Интерференционный максимум реализуется там, где в оптической разности хода волн укладывается целое число длин волн, тогда

$$x_{\max} = \pm mL\lambda/d, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Интерференционный минимум реализуется там, где в оптической разности хода волн укладывается нечетное число длин полуволн, тогда

$$x_{\min} = \pm (m + 1/2)L\lambda/d, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Определим ширину интерференционной полосы как расстояние между соседними минимумами

$$\Delta x = x_{\min}(m+1) - x_{\min}(m) = \lambda L/d.$$

Если интенсивность источников совпадает, $I_1 = I_2 = I_0$, то интенсивность на экране изменяется по закону квадрата косинуса

$$I = 2I_0(1 + \cos \Delta\varphi) = 4I_0 \cos^2(\pi dx/\lambda L).$$

На экране в результате интерференции образуется система светлых и темных полос. Если свет не монохроматический, а, например, белый, то полосы окрасятся радужно. Исключение составляет центральный (нулевой максимум), он останется белым. Положение других максимумов зависит от длины волны.

Реальные световые волны имеют спектр конечной ширины, их можно считать когерентными только в течение некоторого времени – времени когерентности. *Время когерентности* – максимальное время отставания одной волны по отношению к другой, при котором они остаются когерентными. Если первоначально волны были в фазе, а через некоторое время разность фаз станет равна π , то волны окажутся в противофазе и будут не когерентны. Через время когерентности гармоническое колебание ”забывает” свою первоначальную фазу.

Длина когерентности – расстояние, которое проходит световая волна за время когерентности. Очевидно, если оптическая разность хода двух световых волн превысит длину когерентности, то интерферировать они не будут.

Согласно определению, время когерентности $\tau = \pi/\Delta\omega$, а, следовательно, $\tau \sim 1/\Delta\nu$. Поскольку $\lambda\nu = c$, то $\Delta\nu = -c\lambda^{-2}\Delta\lambda$. Тогда оценка длины когерентности имеет вид $l = c\tau \sim \lambda^2/\Delta\lambda$.

Оценим длину когерентности световых волн разных источников. Солнечный свет занимает весь оптический диапазон от 400 нм до 700 нм, поэтому $\Delta\lambda=300$ нм, для зеленого цвета, находящегося в средней части диапазона, $\lambda=550$ нм, тогда длина когерентности $\sim 10^{-3}$ мм. Используя узкополосный светофильтр с шириной пропускания $\Delta\lambda=10$ нм, можно увеличить длину когерентности до $\sim 10^{-2}$ мм. Эти оценки показывают, что получить интерференционную картину

для таких источников весьма непросто. Другое дело, монохромное в высокой степени лазерное излучение. Для ширины полосы излучений лазера 10^{-3} нм, длина когерентности составляет ~ 300 мм.