ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Световая волна:

- ***оптический диапазон длин волн;***
- ***показатель преломления среды;***

2. Интерференция света.

3. Когерентность.

Световая волна

Свет электромагнитная волна. Свет – совокупность частиц (квантов)

Оптический диапазон длин волн

Совокупность явлений, в основе которых лежит волновая природа света, изучается в разделе физики, который называется *волновая оптика*.

Оптический диапазон длин волн обычно подразделяют на:

- ультрафиолетовое излучение - λ =0,01 ÷ 0,40 мкм;
- видимое излучение (свет) - λ =0,40 ÷ 0,76 мкм;
- инфракрасное излучение - =0,76 мкм 1 мкм;

В электромагнитной волне колеблются векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$.

Многие действия света вызываются колебаниями вектора $\vec{E}$.

Поэтому обычно говорят о световом векторе, подразумевая под ним вектор напряженности электрического поля.

Соответственно, уравнение световой волны будет выглядеть так:

$$E = A\cos(\omega t - kr + \varphi)$$

Световая волна

Оптический диапазон длин волн

$$E = A\cos(\omega t - kr + \varphi)$$

A - модуль амплитуды светового вектора;
r - расстояние, отсчитываемое вдоль направления распространения световой волны.

Для плоской волны, распространяющейся в непоглощающей среде, $A = const$, для сферической волны A убывает как $1/r$.

Показатель преломления.

Отношение скорости световой волны в вакууме к фазовой скорости v в некоторой среде называется *абсолютным показателем преломления* этой среды и обозначается буквой : n. $n = c/v$

Скорость распространения волн в *однородной нейтральной непроводящей* среде связана со свойствами среды соотношением:

$$v = 1/\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0} = c/\sqrt{\varepsilon\mu}$$

В немагнитной среде $\mu = 1$, поэтому $v = c/\sqrt{\varepsilon}$.

Световая волна

Показатель преломления.

$v = c/\sqrt{\varepsilon}$. Отсюда следует, что $n = \sqrt{\varepsilon}$.

Это выражение справедливо для большинства прозрачных веществ. Формула $n = \sqrt{\varepsilon}$ связывает оптические свойства вещества с его электрическими свойствами.

В быстропеременных электрических полях значение ε оказывается зависимым от частоты колебаний волн.

Следовательно, от частоты зависит и показатель преломления среды. Этим объясняется явление *дисперсии* света.

Показатель преломления характеризует *оптическую плотность* среды.

Среда с большим n оптически более плотная, чем среда с меньшим n.

В веществе длина световой волны отличается от ее длины в вакууме.

Фазовая скорость световой волны в веществе $v = c/n$, длина волны связана с частотой колебаний f выражением $\lambda = v/f = c/(fn)$.

В итоге $\lambda = \lambda_0/n$.

Фотометрические величины и единицы

Световой поток Ф – энергия световой волны, проходящая через некоторую поверхность в 1с.

Сила света. Источник , размерами которого можно пренебречь – точечный. Сила света $I = d\Phi/d\Omega$ (поток излучения источника Φ, приходящийся на единицу телесного угла Ω. Для изотропного источника $I = \Phi/4\pi$ [I] - ***кд*** (кандела)

Световой поток (поток энергии) измеряется в люменах 1 лм = 1 кд*1 ср. Опытным путем установлено, что 1 лм образованному излучением λ = 0.555 мкм соответствует поток энергии 1,46 мВт. 1,46 мВт/лм – механический эквивалент света

Освещенность $E = d\Phi_{пад}/dS$ [E] – лк (люкс) 1 лк = 1 лм/1м^2

Светимость $M = d\Phi_{исп}/dS$ [M] – люмен на квадратный метр

Яркость характеризует излучение (отражение) света в данном направлении $L = d\Phi_{исп}/d\Omega*dS*cos*\upsilon$

Источник Ламберта L – const. $M = \pi L$

Интерференция световых волн

Принцип Гюйгенса – каждая точка, до которой доходит волновое движение, служит центром вторичных волн, которые в однородной и изотропной среде будут сферическими.

Допустим, что в некоторой области перекрываются две волны.

В области перекрытия наблюдается сложение (суперпозиция) волн и после выхода из этой области каждая волна распространяется так, как если бы никакого перекрытия не было.

Результаты таких сложений определяются тем, являются волны когерентными или нет.

Когерентными являются волны с одинаковыми частотами и неизменной во времени разностью начальных фаз.

Сложение когерентных волн называется интерференцией.

При интерференции в каждой точке области перекрытия волн устанавливается гармонический колебательный процесс с постоянной амплитудой, различной в разных точках.

При перекрытии некогерентных волн возникают негармонические колебательные процессы с нерегулярно изменяющимися амплитудами.

Интерференция световых волн

Реальные источники световых волн обеспечить когерентное излучение не могут.

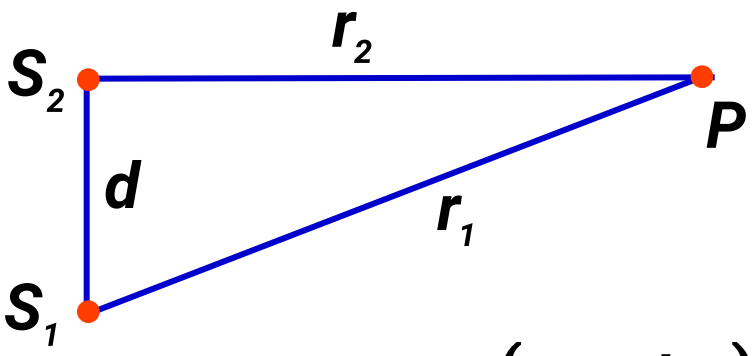
Однако, используя специальные приемы, когерентные волны можно получить и от обычных источников.

Для этого волну от одного источника света разделяют на две части, а затем их накладывают друг на друга.

Рассмотрим интерференцию волн от двух точечных когерентных источников S_1 и S_2.

Допустим, что точка наблюдения P удалена от этих источников на расстояния r_1 и r_2, значительно превышающие расстояние d между источниками: $r_1 >> d$, $r_2 >> d$.

В таких условиях направления колебаний, создаваемых волнами в точке P, практически совпадают и сложение колебаний можно проводить в скалярной форме.



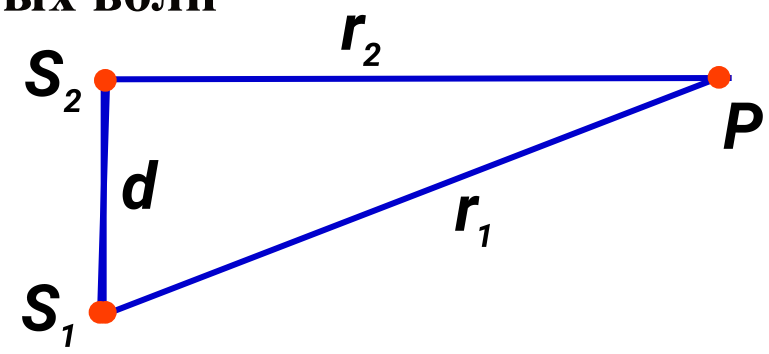
Уравнения этих колебаний имеют вид:

$$\xi_1 = A_1 \cos(\omega t - k r_1)$$

$$\xi_2 = A_2 \cos(\omega t - k r_2)$$

Интерференция световых волн

$$\xi_1 = A_1 \cos(\omega t - kr_1)$$
$$\xi_2 = A_2 \cos(\omega t - kr_2)$$



Если сопоставить эти уравнения с уравнениями гармонических колебаний, то видно, что произведения kr_1 и kr_2 исполняют роль начальных фаз:

$$kr_1 = \frac{2\pi}{\lambda} r_1 = \varphi_1 , \qquad kr_2 = \frac{2\pi}{\lambda} r_2 = \varphi_2$$

При сложении двух одинаково направленных гармонических колебаний с равными частотами возникает гармоническое колебание, описываемое уравнением:

$$\xi = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

где φ_0 - начальная фаза результирующего колебания,

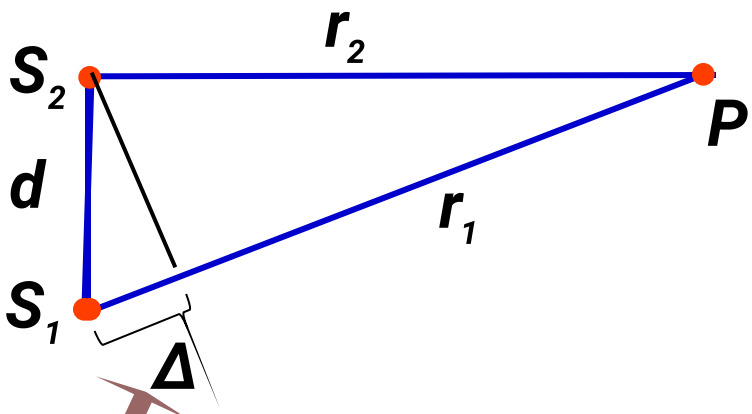
A - амплитуда результирующего колебания

Интерференция световых волн

$$\xi = A\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$tg\varphi_0 = \frac{A_1 \sin(\varphi_1) + A_2 \sin(\varphi_2)}{A_1\cos(\varphi_1) + A_2 \cos(\varphi_2)}$$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$



Записав разность фаз через произведения kr_1 и kr_2, получим:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$$

Отсюда следует, что амплитуда результирующего колебания зависит от расположения точки наблюдения относительно источников.

В полученном выражении $(r_2 - r_1) = \Delta$ - разность хода волн.

Интерференция световых волн

Рассмотрим два предельных случая:

1. Пусть выполняется следующее условие:

$$\frac{2\pi}{\lambda}\Delta = 2m\pi\,, \quad \Delta = 2m\frac{\lambda}{2} \text{ где } m = 0, 1, 2, 3, \ldots \quad \cos 2m\pi = +1$$

Из выражения для амплитуды при этом следует:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \qquad \mathbf{A} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2} = A_1 + A_2$$

Итак, амплитуда результирующего колебания равна сумме амплитуд колебаний, созданных интерферирующими волнами.

Такие точки называются *максимумами интерференции*.

Таким образом условие максимумов: $\Delta = 2m\frac{\lambda}{2}$

Таким образом, максимумы интерференции наблюдаются в точках, для которых разность хода волн от источников равна ***целому*** числу волн или ***четному*** числу полуволн.

При такой разности хода волны имеют одинаковые фазы, следовательно, амплитуды складываются.

Интерференция световых волн

2. Пусть теперь выполняется такое условие: $\frac{2\pi}{\lambda}\Delta = (2m+1)\pi$,

$\Delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$ где $m = 0, 1, 2, 3, \ldots$ $\cos(2m+1)\pi = -1$

Из выражения для амплитуды при этом следует:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2} = A_1 - A_2$$

Если $A_1 = A_2$, то $A = 0$, результирующее колебание отсутствует.

Такие точки называются *минимумами интерференции*.

Условие минимумов: $\Delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$

Таким образом, минимумы интерференции наблюдаются в точках, для которых разность хода волн от источников равна *нечетному числу полуволн.*

При такой разности хода волны имеют противоположные фазы, и поэтому частично или полностью гасят друг друга.

Интерференция световых волн

Вспомним, что интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды: $I = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}E_m^2$

Поэтому для волн, приходящих в точку наблюдения, имеем:

$$I_1 \sim A_1^2, \qquad I_2 \sim A_2^2.$$

Суммарная интенсивность этих волн: $I = I_1 + I_2 \sim A_1^2 + A_2^2$

Интенсивность волн в области максимумов:

$$I_{max} \sim A_{max}^2 = (A_1 + A_2)^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2$$

Следовательно, $I_{max} > I_1 + I_2$.

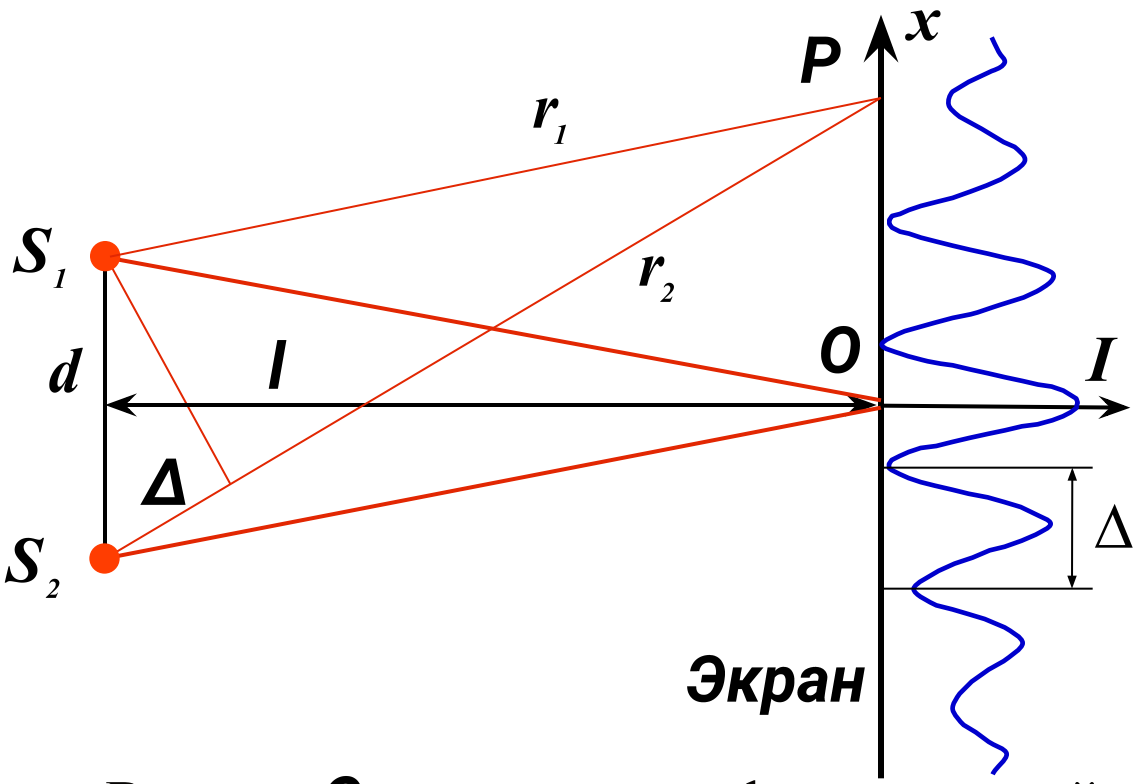
Интенсивность в областях максимумов больше суммы интенсивностей приходящих в эти области волн.

Соответственно, *интенсивность в областях минимумов меньше суммы интенсивностей приходящих в эти области волн.*

Эти результаты не противоречат закону сохранения энергии. *При интерференции в зоне перекрытия волн происходит пространственное перераспределение энергии. Часть энергии из области минимумов энергии перемещается в области максимумов.*

Интерференция световых волн

Интерференционная картина



S_1, S_2 - когерентные источники;

d - расстояние между источниками;

P - точка наблюдения;

r_1, r_2 - расстояние от источников до точки P;

$\Delta = (r_2 - r_1)$ – - разность хода волн;

В точке O - центр интерференционной картины;

Δx - ширина интерференционной полосы, $\Delta x = \lambda \cdot l / d$;

l - расстояние от источников до экрана;

$I(x)$ - распределение интенсивности свечения по экрану.

Когерентность.

Необходимое условием интерференции волн – их когерентность.

Условию когерентности удовлетворяют монохроматические волны.

Однако монохроматическая волна, описываемая выражением $\xi_1 = A_1 \cos(\omega t - kr_1 + \varphi_0)$, представляет собой абстракцию

Вывод: рассмотренный процесс интерференции идеализирован.

Волны, излучаемые любыми независимыми источниками света, не могут быть монохроматическими и когерентными.

Причина немонохроматичности, следовательно, некогерентности световых волн лежит в природе происхождения этих волн.

Излучают атомы. Время излучения - порядка 10^{-8} с. Разность фаз между излучением атомов непостоянна, процесс излучения случаен. Итак, волны испускаемые атомами, лишь около 10^{-8} с имеют приблизительно постоянные амплитуду и фазы колебаний.

Когерентность.

Интерференционную картину от естественного источника световой волны получить невозможно?

Однако интерференционные картины все-таки наблюдаются.

Для их существования необходимо выполнение ряда условий. Рассмотрим их.

Понятия и определения.

Прерывистое излучение света атомами в виде отдельных коротких импульсов называется *волновым цугом*.

Немонохроматический свет можно представить в виде совокупности сменяющих друг друга независимых гармонических цугов.

Средняя продолжительность одного цуга называется *временем когерентности* $\tau_{ког}$.

Когерентность существует только в пределах одного цуга, время когерентности не может превышать продолжительности излучения $\tau_{изл}$ одного цуга, т.е. $\tau_{ког} < \tau_{изл}$

Когерентность.

Обнаружить четкую интерференционную картину можно только тогда, когда время разрешения прибора меньше времени когерентности накладываемых световых волн.

За время когерентности волна распространяется в вакууме на расстояние $l_{ког}$, равное $c\tau_{ког}$.

Расстояние $l_{ког} = c\tau_{ког}$ - *длина когерентности* (длина цуга).

Длина когерентности есть расстояние, при прохождении которого световая волна утрачивает когерентность.

Следовательно, для получения интерференционной картины *разность хода световых волн должна быть меньше длины когерентности для используемого источника света*: $\Delta < l_{ког}$

Длина когерентности световой волны связана со *степенью монохроматичности* света, равной отношению $\lambda/\Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$- конечный интервал длин волн, интерференция которых наблюдается.

Эта связь выражается соотношением: $l_{ког} \approx \lambda^2/\Delta\lambda$

Когерентность.

Таким образом, для получения интерференционной картины от реального источника излучения необходимо иметь излучение с малым значением $\Delta\lambda$

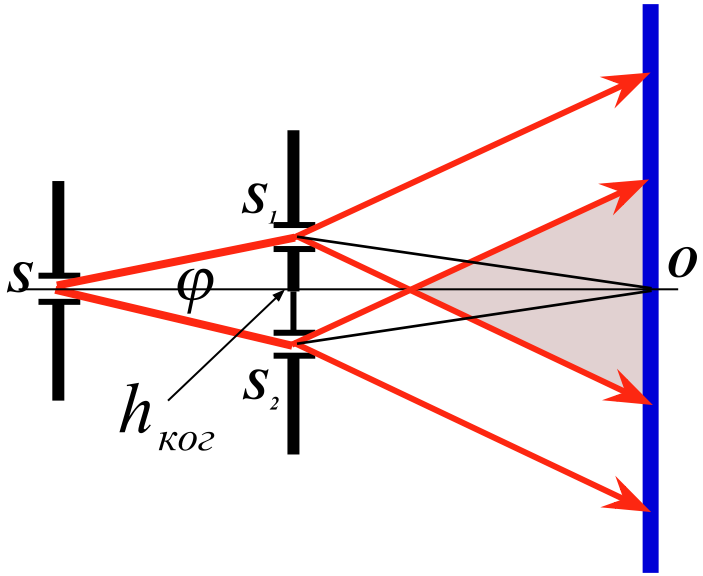
Это условие есть способ увеличения длины когерентности.
Солнечный свет - $l_{ког} \approx 5\lambda$. Лазеры - $l_{ког}$ порядка сотен метров.

Вероятность возбуждения интерференционных колебаний, кроме временны**х** параметров волн характеризуется также *пространственной когерентностью*.

Эта характеристика связана с геометрическими размерами конкретной системы разделения световой волны и описывается так называемой *шириной когерентности* $h_{ког}$.

Под шириной когерентности понимается расстояние между точками перпендикулярной к направлению распространения волны поверхности, в пределах которого волны когерентны.

Связь λ с $h_{ког}$: $h_{ког} \approx \lambda/\varphi$, где φ- угловая ширина источника относительно интересующего нас места (например, места разделения световой волны).



Общие выводы.

Для получения устойчивой интерференционной картины от обычных источников света необходимо исходную световую волну разделить на две части, которые дадут интерференционную картину при соблюдении двух условий:

1. Разность хода световых волн должна быть меньше длины когерентности: $\Delta < l_{ког}$. Длина когерентности зависит от монохроматичности волн и времени когерентности, поэтому это условие называется *временной когерентностью* волн

2. Ширина когерентности $h_{ког}$ должна превышать расстояние между некоторыми характерными световыми лучами в месте расщепления исходной волны (на рисунке интерференции это расстояние d между источниками излучения S_1 и S_2).