

## ПЛАН ЛЕКЦИИ

### 1. Световая волна:

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

### 2. Интерференция света.

### 3. Когерентность.

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                      -      $\lambda = 0,01 \div 0,40$  мкм;
- видимое излучение (свет)                              -      $\lambda = 0,40 \div 0,76$  мкм;
- инфракрасное излучение                              -      $= 0,76$  мкм      $1 \div \infty$  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:

$$v = 1/\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0} = c/\sqrt{\epsilon\mu}$$

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

## Световая волна

### Показатель преломления.

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

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

В быстропеременных электрических полях значение  $\epsilon$  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  $\Phi$**  – 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  $\Phi$ , приходящийся на единицу телесного угла  $\Omega$ ). Для изотропного источника  $I = \Phi/4\pi$  [I] - кд (кандела)

Световой поток (поток энергии) измеряется в люменах  $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}$ . Опытным путем установлено, что  $1 \text{ лм}$  образованному излучением  $\lambda = 0.555 \text{ мкм}$  соответствует поток энергии  $1,46 \text{ мВт}$ .  $1,46 \text{ мВт/лм}$  – механический эквивалент света

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

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

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

Источник Ламберта  $L = \text{const}$ .  $M = \pi L$

## 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 ли 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.

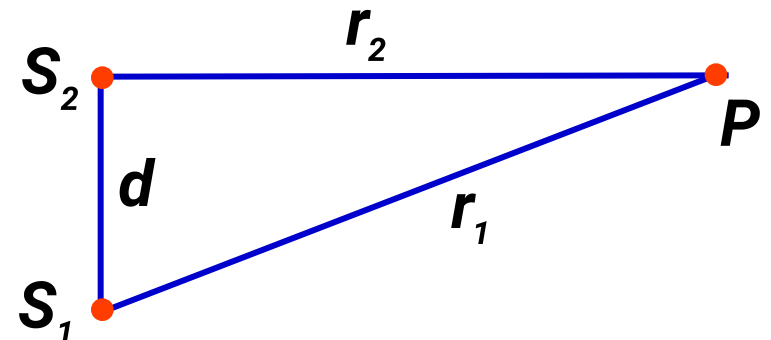
*Для этого волну от одного источника света разделяют на две части, а затем их накладывают друг на друга.*

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:  $r_1 \gg d$ ,  $r_2 \gg d$ .

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:



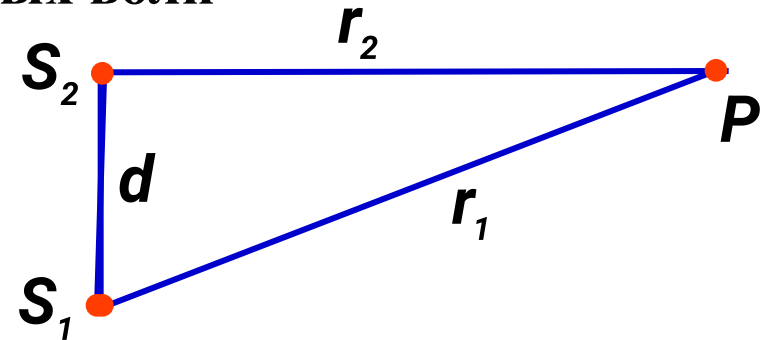
$$\xi_1 = A_1 \cos(\omega t - kr_1)$$

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

## 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:

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

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

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

где  $\varphi_0$  - начальная фаза результирующего колебания,

$A$  - амплитуда результирующего колебания



## Интерференция световых волн

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

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

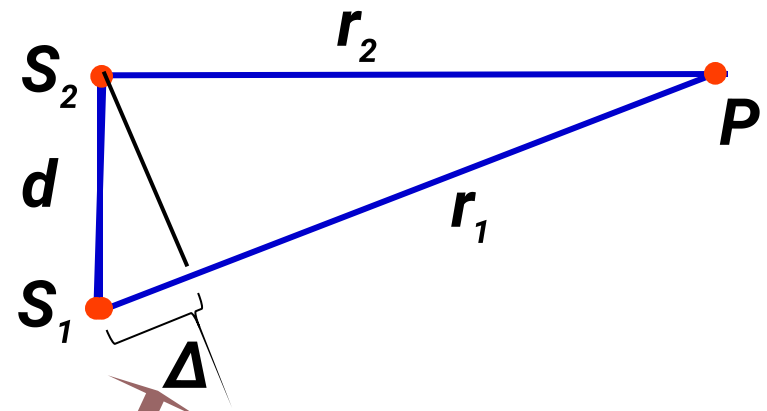
$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Записав разность фаз через произведения  $kr_1$  и  $kr_2$ , получим:

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

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:

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

Из выражения для амплитуды при этом следует:

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

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:  $\frac{2\pi}{\lambda} \Delta = (2m + 1)\pi$ ,

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

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:

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_m^2$$

Поэтому для волн, приходящих в точку наблюдения, имеем:

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

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,  $I_{\max} > I_1 + I_2$ .

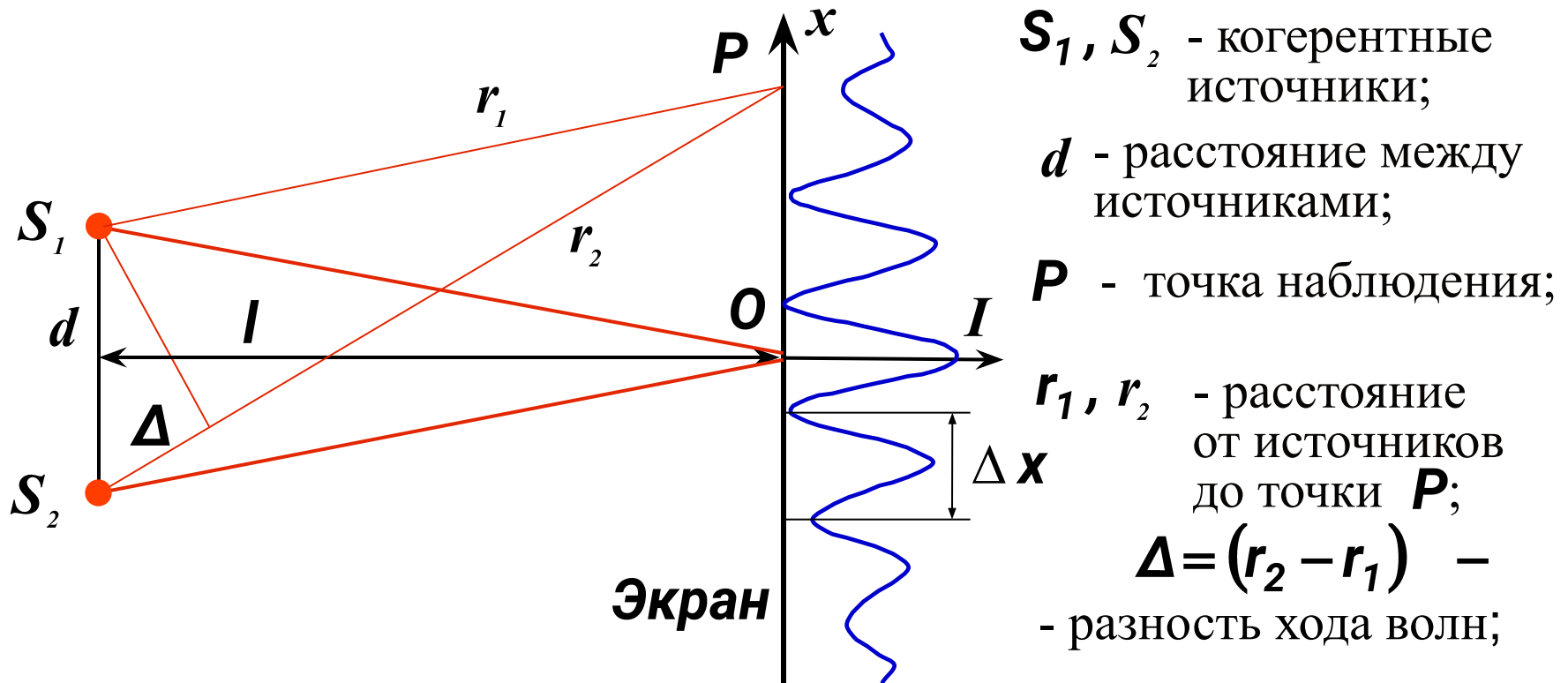
*Интенсивность в областях максимумов больше суммы интенсивностей приходящих в эти области волн.*

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



В точке  $O$  - центр интерференционной картины;

$\Delta x$  - 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*  $\tau_{\text{ког}}$ .

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

## *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  $l_{\text{ког}}$ , равное  $c\tau_{\text{ког}}$ .

Расстояние  $l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}$  - *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*:  $\Delta < l_{\text{ког}}$

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:  $l_{\text{ког}} \approx \lambda^2 / \Delta\lambda$



## ***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.

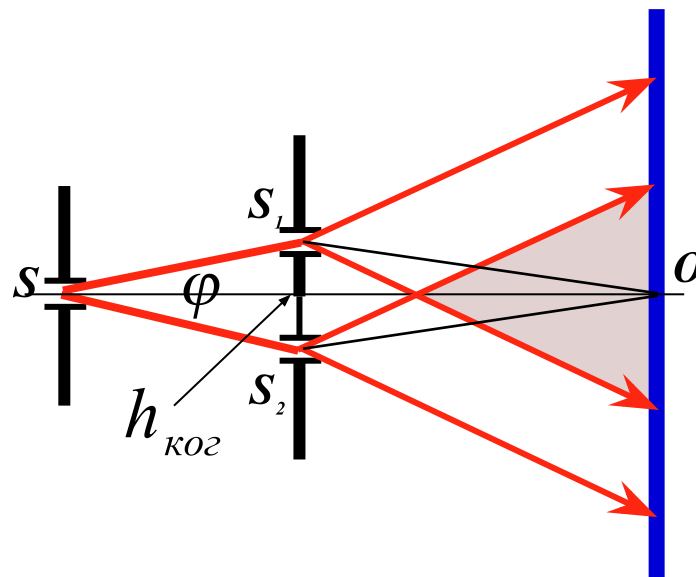
Солнечный свет -  $l_{\text{ког}} \approx 5\lambda$ . Лазеры -  $l_{\text{ког}}$  порядка сотен метров.

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

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

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

Связь  $\lambda$  с  $h_{\text{ког}}$ :  $h_{\text{ког}} \approx \lambda/\varphi$ , где  $\varphi$ - 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:  $\Delta < l_{\text{ког}}$ . Длина когерентности зависит от монохроматичности волн и времени когерентности, поэтому это условие называется *временной когерентностью* волн
2. Ширина когерентности  $h_{\text{ког}}$  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  $S_2$ ).