

Законы геометрической оптики

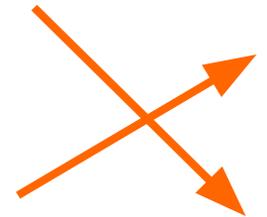
1. Закон прямолинейного распространения света

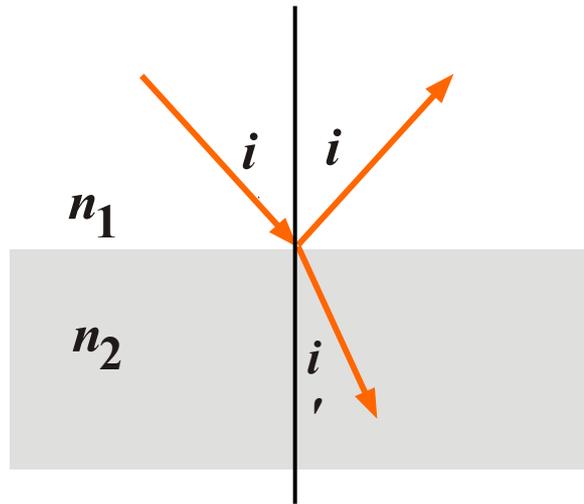
В однородной среде свет распространяется прямолинейно.



2. Закон независимости световых лучей

Лучи при пересечении не возмущают друг друга.





3. Закон отражения света

Отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения; угол отражения равен углу падения.

$$i = i'$$

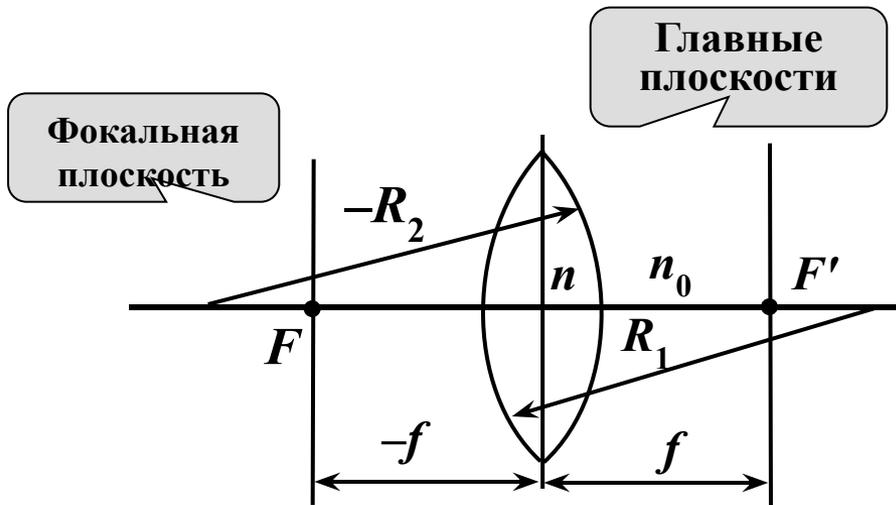
4. Закон преломления света

Преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных веществ.

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

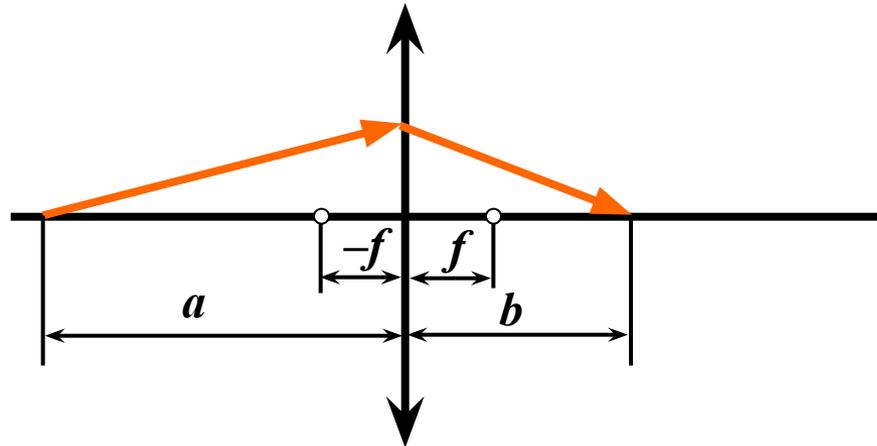
Оптические приборы

Тонкая линза



$$f' = -f = \frac{n_0}{n - n_0} \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

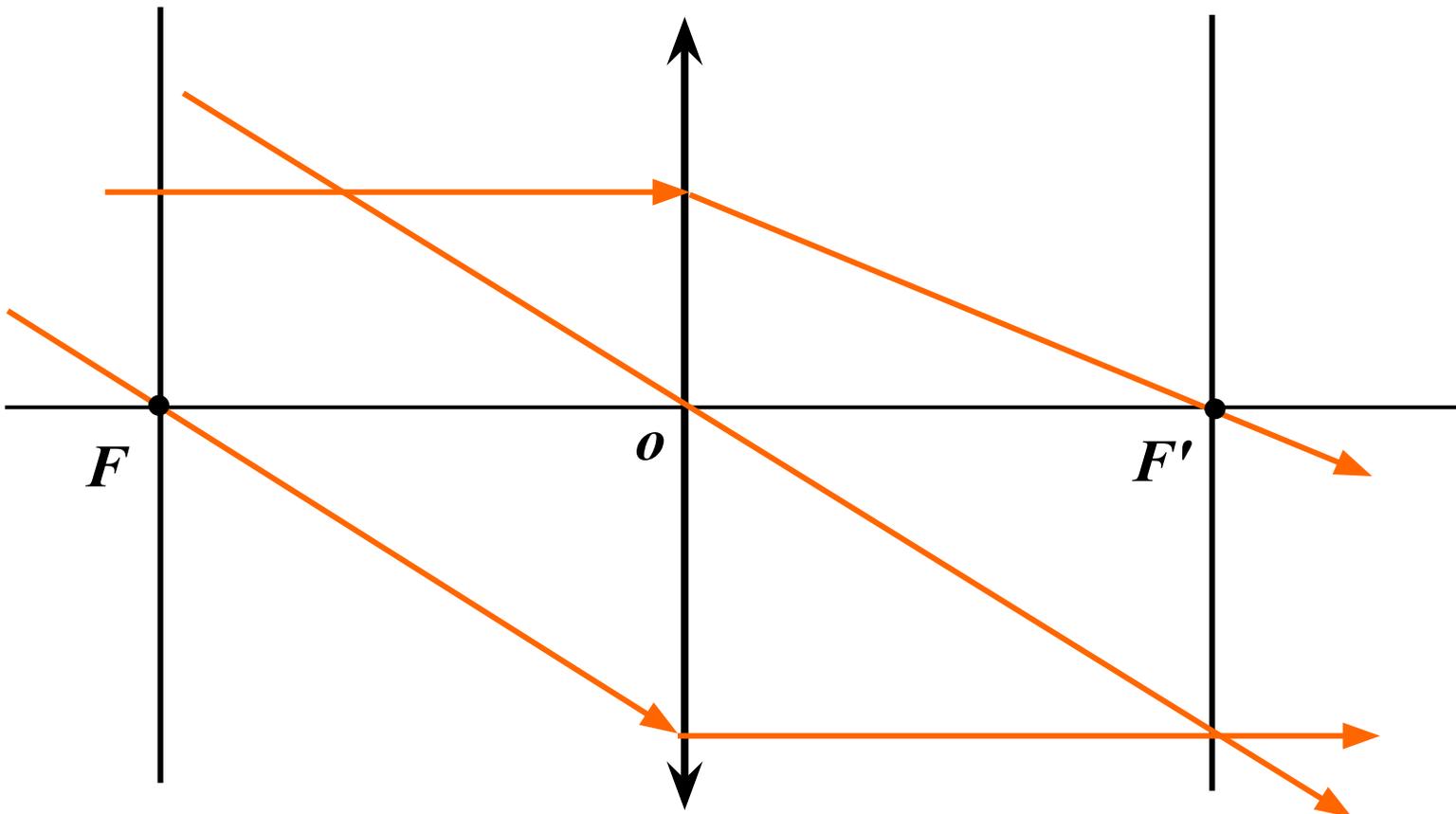
Формула тонкой линзы



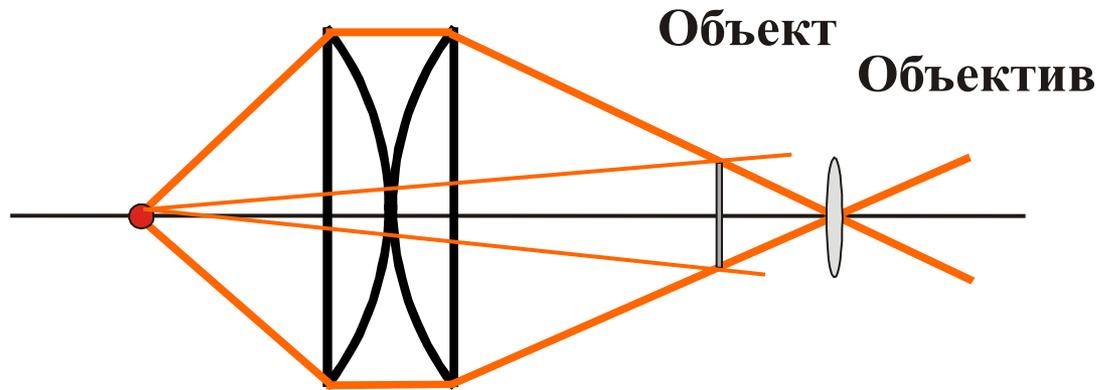
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Оптическая сила линзы $D = 1/f$, дптр

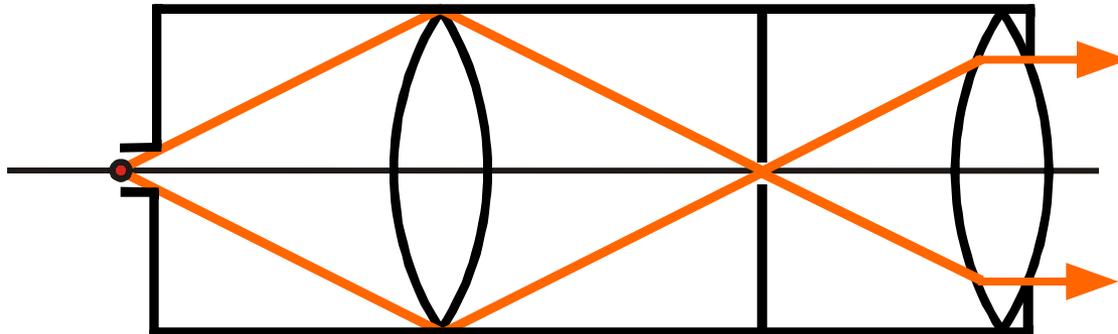
Характерные лучи тонкой собирающей линзы



Конденсер



Коллиматор



ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ И ИХ СВОЙСТВА

Уравнения Максвелла. Волновое уравнение

Плоская электромагнитная волна

Шкала электромагнитных волн. Видимый диапазон

Монохроматичность электромагнитных волн

Когерентность электромагнитных волн

Уравнения Максвелла. Волновое уравнение

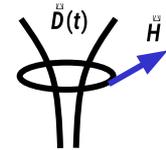
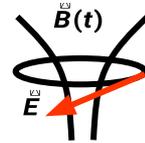
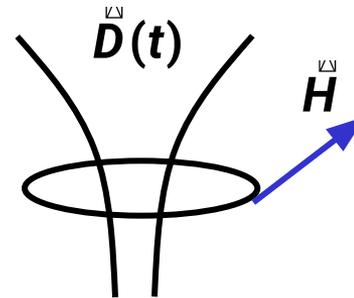
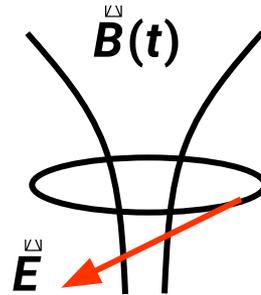
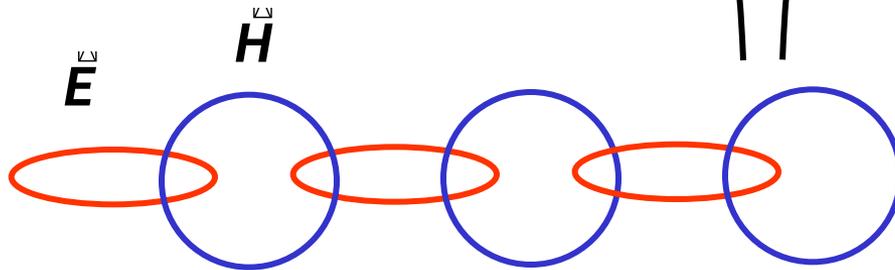
Уравнения Максвелла для однородной нейтральной ($\rho = 0$) непроводящей ($j = 0$) среды:

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0 \quad \vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$



Волновое уравнение

Воздействуем оператором rot на левую и правую часть уравнения

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t},$$

$$\text{rot rot } \vec{E} = \text{grad div } \vec{E} - \Delta \vec{E} = -\Delta \vec{E},$$

поскольку $\text{div } \vec{E} = 0$.

$$\text{rot} \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\mu\mu_0 \text{rot} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\mu\mu_0 \frac{\partial (\text{rot } \vec{H})}{\partial t} = -\mu\mu_0 \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

$$\Delta \vec{E} = \mu\mu_0 \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad v = \frac{1}{\sqrt{\mu\mu_0 \varepsilon\varepsilon_0}} - \text{фазовая скорость.}$$

$$\Delta \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\Delta \vec{H} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}$$

- волновые уравнения.

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

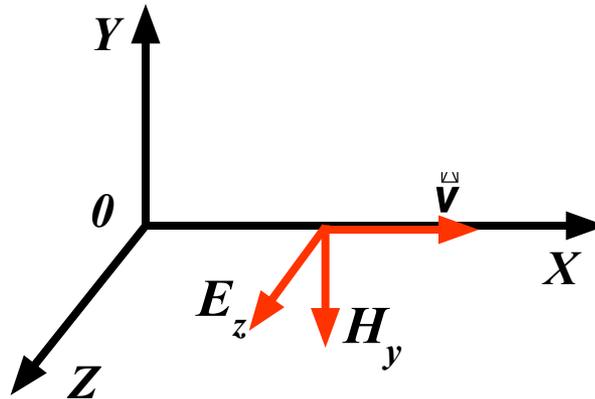
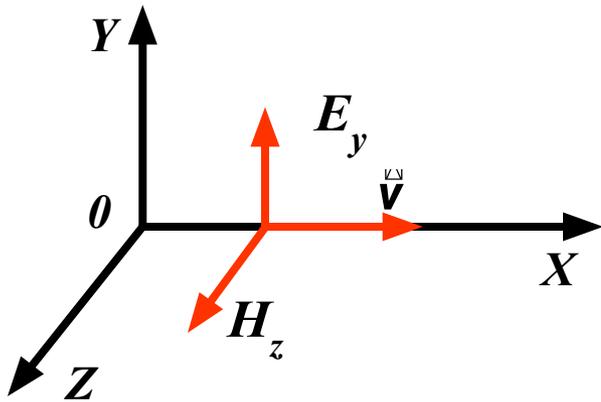
$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Оператор Лапласа

Плоская электромагнитная волна



Исследуем плоскую электромагнитную волну, распространяющуюся вдоль оси OX .

Вектора \vec{E} и \vec{H} и их компоненты по координатным осям не будут зависеть от координат y и z .

Тогда волновые уравнения примут вид

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}.$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H_y}{\partial t^2}.$$

Возможны два типа волны.

$$\Delta \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\Delta \vec{H} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}$$

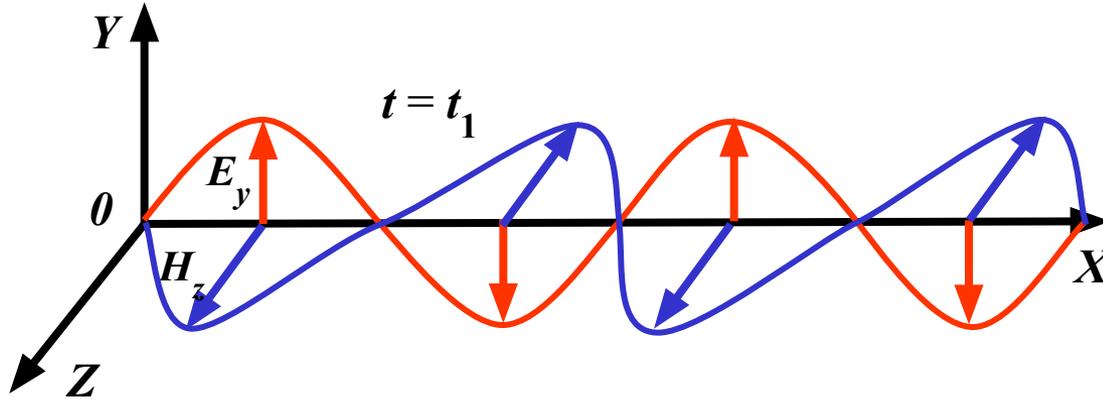
$$E_y, H_z$$

$$E_z, H_y$$

Плоская электромагнитная волна

Простейшими решениями волновых уравнений являются:

$$E_y = E_m \cos\left(\omega t - \frac{\omega x}{v}\right) \quad H_z = H_m \cos\left(\omega t - \frac{\omega x}{v}\right)$$



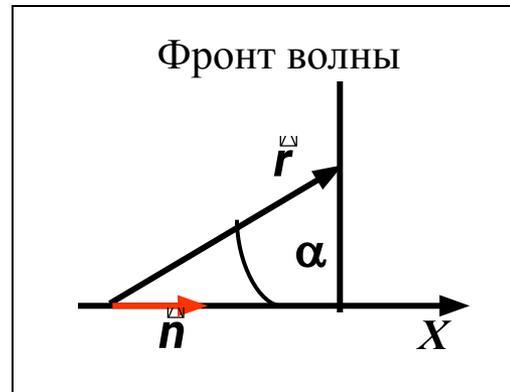
$$\frac{\omega}{v} = \frac{2\pi\nu}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ - волновое число.}$$

$$E_y = E_m \cos(\omega t - kx)$$

Введем понятие волнового вектора:

$$\vec{k} = k \vec{n} \quad kx = kr \cos\alpha = \vec{k} \vec{r}$$

$$E_y = E_m \cos(\omega t - \vec{k} \vec{r})$$



$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}.$$

Уравнение плоской волны

$$E_y = E_m \cos(\omega t - \vec{k} \vec{r})$$

Амплитуда

Фаза

Свойства электромагнитных волн

1. Электромагнитные волны **поперечны**.
2. Колебания векторов напряженности электрического и магнитного поля происходят в **одной фазе**.
3. **Амплитуды** колебаний напряженности электрического и магнитного поля **связаны** соотношением:

$$\sqrt{\epsilon\epsilon_0}E_m = \sqrt{\mu\mu_0}H_m$$

4. **Фазовая скорость** электромагнитной волны равна

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

где $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$ - фазовая скорость в вакууме.

$$c = 299792458 \text{ м/с.}$$

5. **Энергия**, переносимая электромагнитной волной через единицу поверхности за единицу времени (плотность потока энергии) равна:

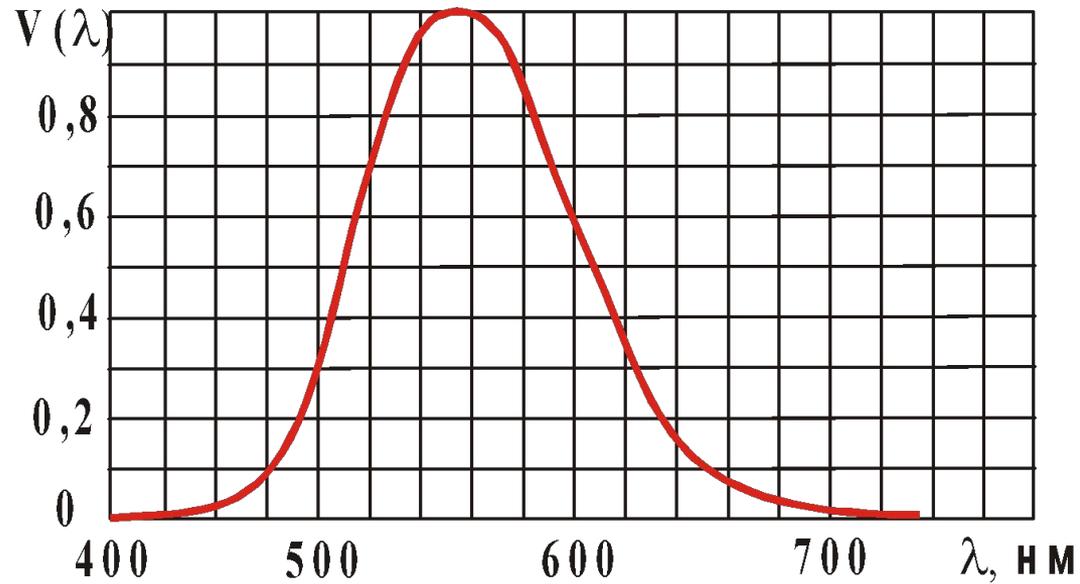
$$\vec{S} = [\vec{E}\vec{H}] \text{ - вектор Пойнтинга.}$$

$$E_y = E_m \cos(\omega t - kr)$$

$$H_z = H_m \cos(\omega t - kr)$$

Шкала электромагнитных волн

Кривая относительной спектральной чувствительности глаза



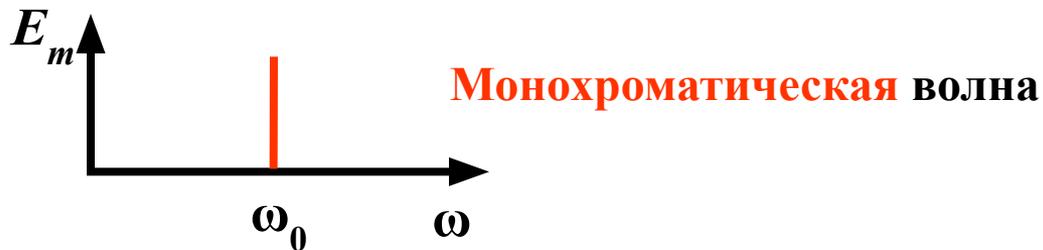
$$V(\lambda) = 1 \text{ при } \lambda=555 \text{ нм.}$$

Монохроматичность электромагнитных волн

Монохроматической называется электромагнитная волна, имеющая определенную частоту, и амплитуда которой не зависит от времени.

$$E_y = E_m \cos(\omega t - kr + \alpha)$$

α - начальная фаза



$\frac{\omega}{\Delta\omega}$ - **степень** монохроматичности.

Когерентность электромагнитных волн

Когерентность - это согласованность колебательных процессов во времени.

Когерентными называются источники, **разность фаз** излучения которых **не зависит от времени**.

1. **Временная когерентность** - согласованность колебаний в данной точке пространства с течением времени.

Время когерентности $\tau_{\text{ког}}$ - время, за которое случайное изменение фазы достигает π .

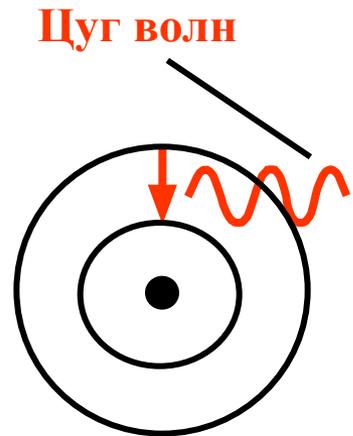
Для монохроматического излучения $\tau_{\text{ког}} = 10^{-8}$ с.

Для квазимонохроматического излучения

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{2\pi}{\Delta\omega} = \frac{\pi}{\Delta\nu}.$$

2. **Пространственная когерентность** - согласованность колебаний в разных точках пространства.

Длина когерентности $l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}$.



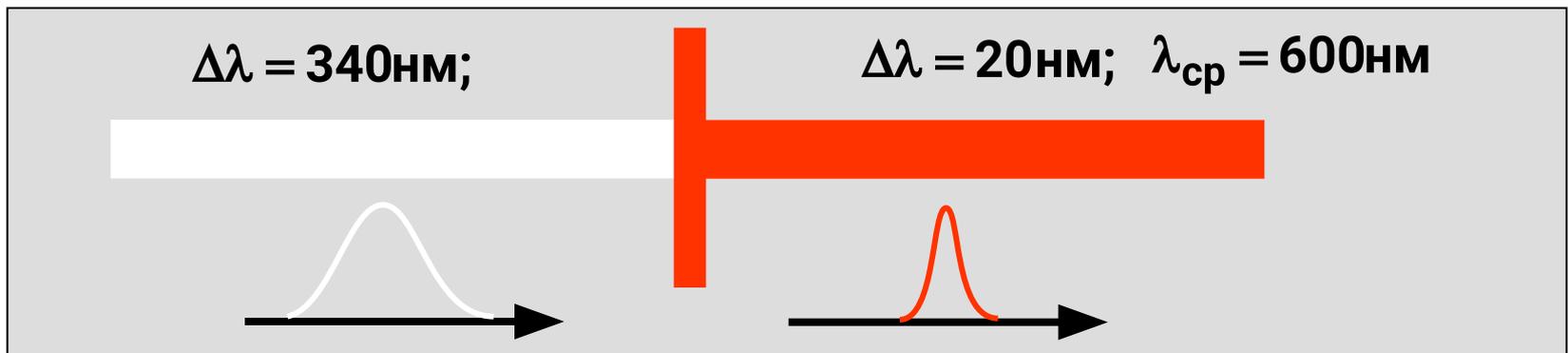
Пример 1. Определить степень монохроматичности белого света.

$$\Delta\lambda = 340\text{нм}; \quad \lambda_{\text{ср}} = 570\text{нм}$$

$$\Delta\nu = 3,45 \cdot 10^{14} \text{с}^{-1}; \quad \nu_{\text{ср}} = 5,33 \cdot 10^{14} \text{с}^{-1};$$

$$\frac{\omega_{\text{ср}}}{\Delta\omega} = \frac{\nu_{\text{ср}}}{\Delta\nu} = \frac{5,33}{3,45} = 1,55$$

Светофильтр



$$\frac{\omega_{\text{ср}}}{\Delta\omega} = \frac{\nu_{\text{ср}}}{\Delta\nu} = \frac{5}{5,0875 - 4,918} \approx 30$$

Пример 2. Определить время и длину когерентности естественного света.

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{1}{\Delta\nu} = \frac{1}{3,45 \cdot 10^{14}} \approx 2,9 \cdot 10^{-15} \text{ с}$$

$$l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}} = 3 \cdot 10^8 \times 2,9 \cdot 10^{-15} = 8,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

Пример 3. Определить длину когерентности излучения гелий-неонового лазера.

$$\tau_{\text{ког}} \approx 10^{-3} \text{ с}$$

$$l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}} = 3 \cdot 10^8 \times 1 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^5 \text{ м}$$