

СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРЫ: новые грани света

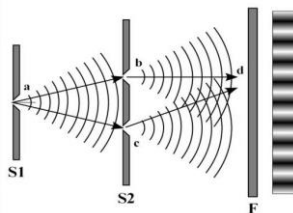
Лекция 2.

СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ

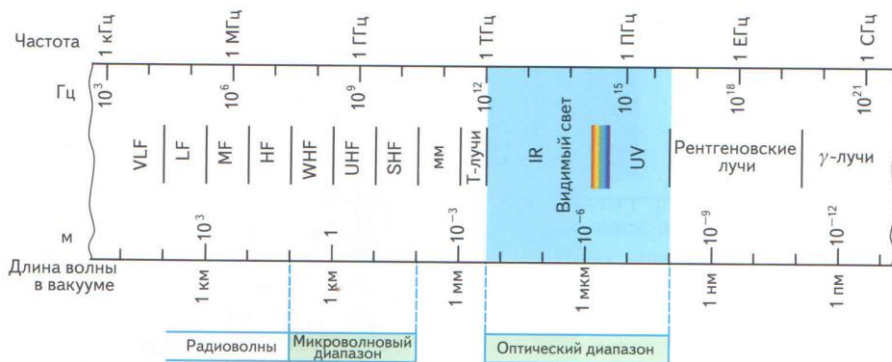
Сведения из электромагнитной теории. Волновое решение уравнений Максвелла. Плоские и сферические волны. Поляризация. Энергия, мощность, интенсивность электромагнитного поля. Гауссов пучок - форма направленного распространения световой волны.

Некоторые выводы :

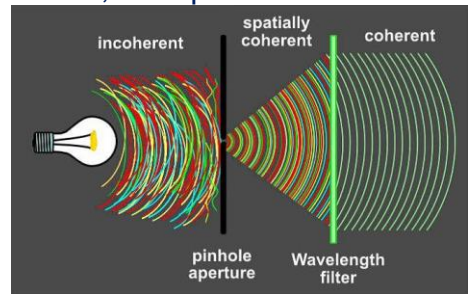
1. Свет обладает волновыми свойствами.



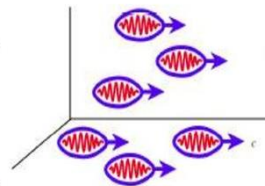
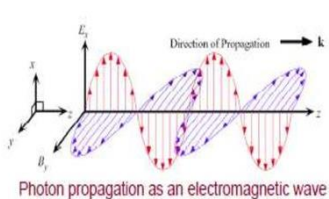
2. Свет - это электромагнитные волны оптического диапазона.



3. Свет (как волна) может проявлять свойства монохроматичности, временной и пространственной когерентности, поляризованности.



4. Свет – это и волна, и поток фотонов - квантов



Поперечная волна векторов \vec{E} и \vec{H}
 Поляризация: линейная или эллиптическая
 Направление распространения

Масса покоя
 Скорость
 Энергия
 Импульс

$$0$$

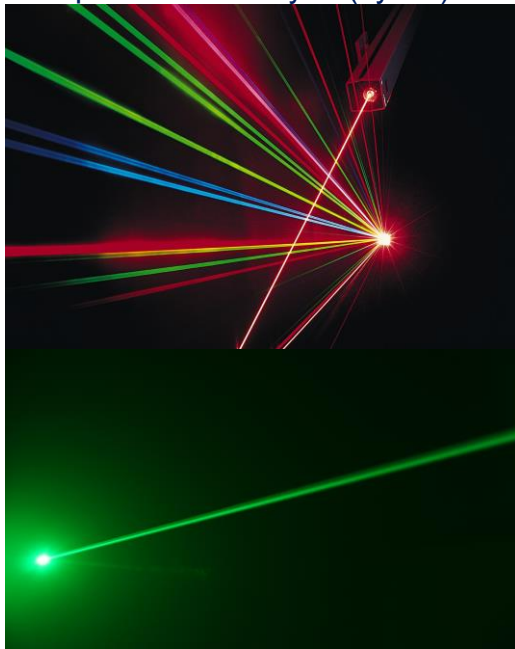
$$c$$

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$$

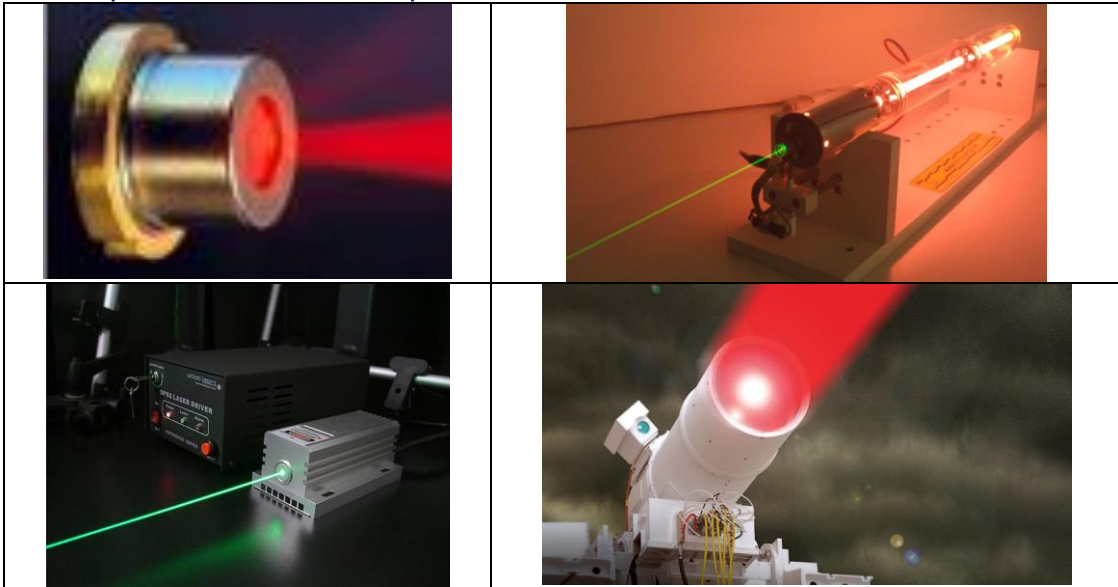
$$p = \varepsilon/c$$

Вопросы:

1. Может ли свет существовать в виде интенсивного, направленного, монохроматического, когерентного, поляризованного луча (пучка)?



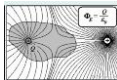
2. Как создать источник направленного когерентного монохроматического поляризованного света высокой интенсивности?



3. Может быть, в природе существуют подобные источники естественного происхождения?

Уравнения Максвелла

Закон Гаусса для электрического поля



Закон Гаусса для магнитного поля

Закон электромагнитной индукции Фарадея



Теорема о циркуляции магнитного поля (закон Ампера)

Материальные уравнения

При приложении поля к среде возникает поляризация и намагниченность

$$\left[\vec{E} \right] = \text{В/м} \quad \left[\vec{D} \right] = \text{Кл/м}^2$$

$$\left[\vec{H} \right] = \text{А/м} \quad \left[\vec{B} \right] = \text{Тл} \quad \text{Тл} = \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho$$

$$\text{div} \vec{B} = 0$$

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

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

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

- электрический заряд является источником электрической индукции

- не существует магнитных зарядов

- изменение магнитной индукции порождает вихревое электрическое поле

- электрический ток и изменение электрической индукции порождают вихревое магнитное поле

ϵ_0 , μ_0 - электрическая и магнитная постоянные

$c = 299792458 \text{ м/с}$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 1,256 \dots \times 10^{-6} \text{ Гн/м}$$

$$\epsilon_0 = 1 / (\mu_0 c^2) = 8,85 \dots \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

Электрический и магнитный векторы напряженности, электрический и магнитный векторы индукции, напряженности, вектор электрической поляризации, вектор намагниченности, плотность тока, электрическая и магнитная постоянные, скорость света

Волновое решение уравнений Максвелла.

Вакуум, газы, жидкости, стекла (в первом приближении однородны и изотропны – усреднение по большому числу молекул или атомов внутри λ)

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

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

ε, μ - относительные электрическая и магнитная

проницаемости

Если среда без потерь, то есть проводимость $\sigma = 0$, и отсутствуют свободные заряды $\rho = 0$, тогда **уравнения Максвелла** принимают вид:

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0 \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{A}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \vec{\nabla} \cdot \vec{E};$$

$$\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}; \quad \operatorname{rot} \vec{E} = \vec{\nabla} \times \vec{E};$$

$$\operatorname{grad} \varphi = \vec{\nabla} \varphi$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$$

- волновые уравнения

Случай гармонических волн

$$E(z, t) = E_0^+ e^{i(\omega t - kz)} + E_0^- e^{i(\omega t + kz)}$$

$$H(z, t) = \frac{1}{\eta \eta_0} \left[E_0^+ e^{i(\omega t - kz)} - E_0^- e^{i(\omega t + kz)} \right]$$

$$v_\phi = \frac{dz}{dt} = \mp \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu \mu_0 \varepsilon \varepsilon_0}} \quad \text{- фазовая}$$

скорость

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = 2\pi \frac{v_\phi}{\omega} \quad \text{- длина волны}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \quad \text{- скорость света}$$

в вакууме

В материальной немагнитной среде:

$$v_\phi = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon \varepsilon_0}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} = \frac{c}{n}$$

$$n = \sqrt{\varepsilon} \quad \text{- показатель преломления}$$

Поток мощности э.-м. волн

$$I = \frac{|E_0|^2}{2\eta \eta_0}$$

Плотность энергии э.м. волн

$$\overline{w} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2} |E_0|^2$$

Плоские и сферические волны.

Обычно переходят к комплексным амплитудам:

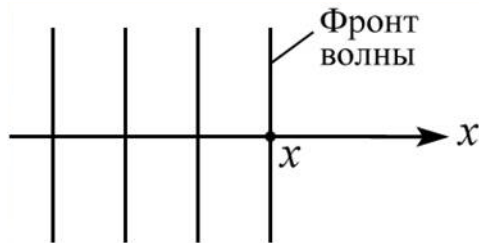
$$\vec{E}(x, y, z; t) = \text{Re} \left\{ \vec{E}(x, y, z) e^{i\omega t} \right\}$$

Получают уравнение для комплексной амплитуды:
уравнение Гельмгольца.

Решение (скалярное) для плоской волны:

$$E(\vec{r}) = E_0 e^{-ik\vec{r}} =$$

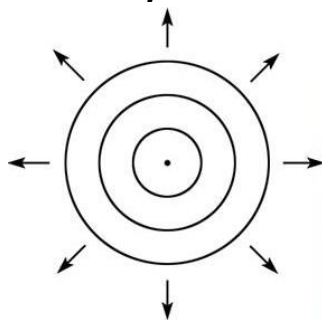
$$E_0 \exp \left[-i(k_x x + k_y y + k_z z) \right]$$



$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0, \quad k = \frac{\omega}{v_\phi}$$

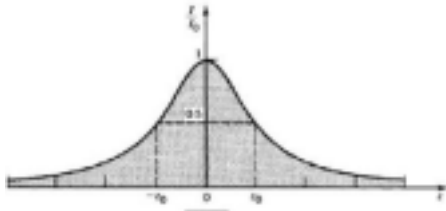
Для сферической волны:

$$E(\vec{r}) = \frac{E_1}{r} \exp(i k \vec{r})$$



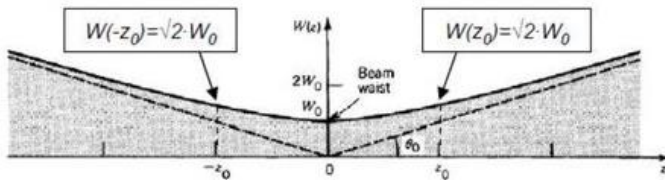
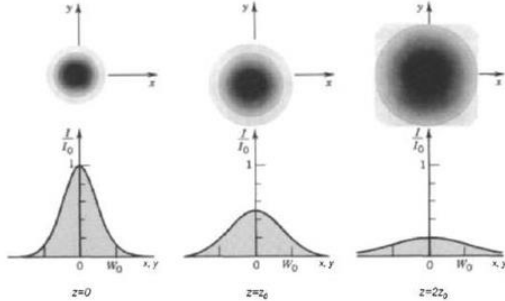
Гауссов пучок - форма направленного распространения световой волны

Волновое уравнение также может иметь решения в виде пучков. Наиболее интересен случай **Гауссова пучка**.



$$I(0,0,z) = I_0 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 = \frac{I_0}{1 + (z/z_0)^2}$$

$$I(r,z) = I_0(z) \exp[-2r^2/w^2(z)] \quad z_0 \equiv z_R = \pi w_0^2 / \lambda - \text{рэлеевская длина}$$

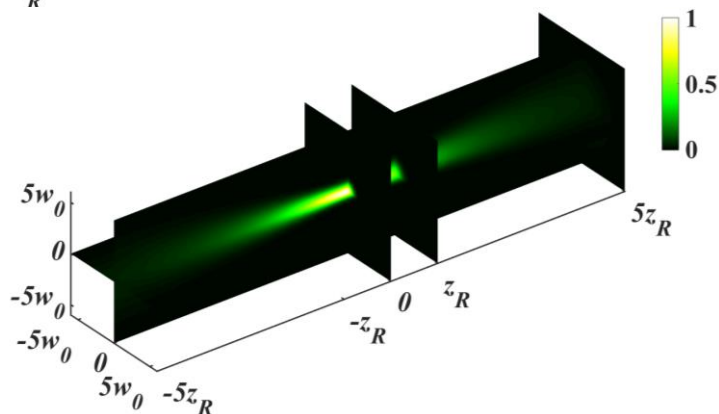
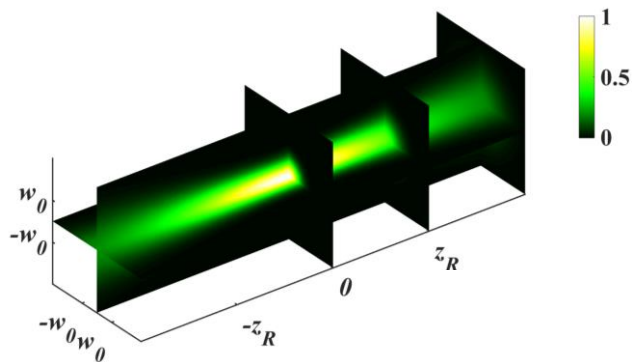


Угол расходимости:

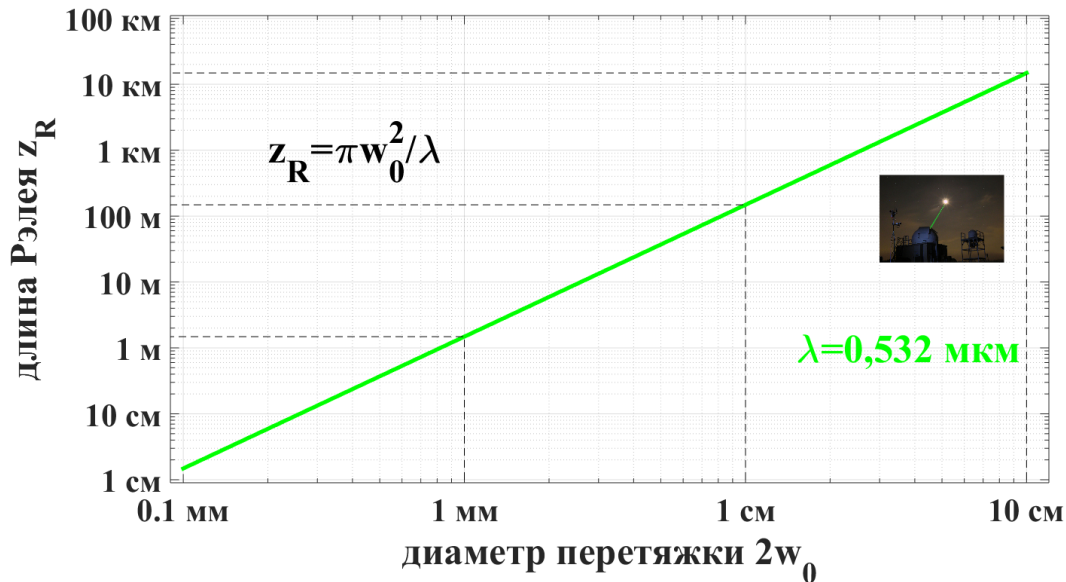
$$\theta_0 = \frac{w_0}{z_0} = \frac{\lambda}{\pi w_0}$$

Асимптота при $z \gg z_0$

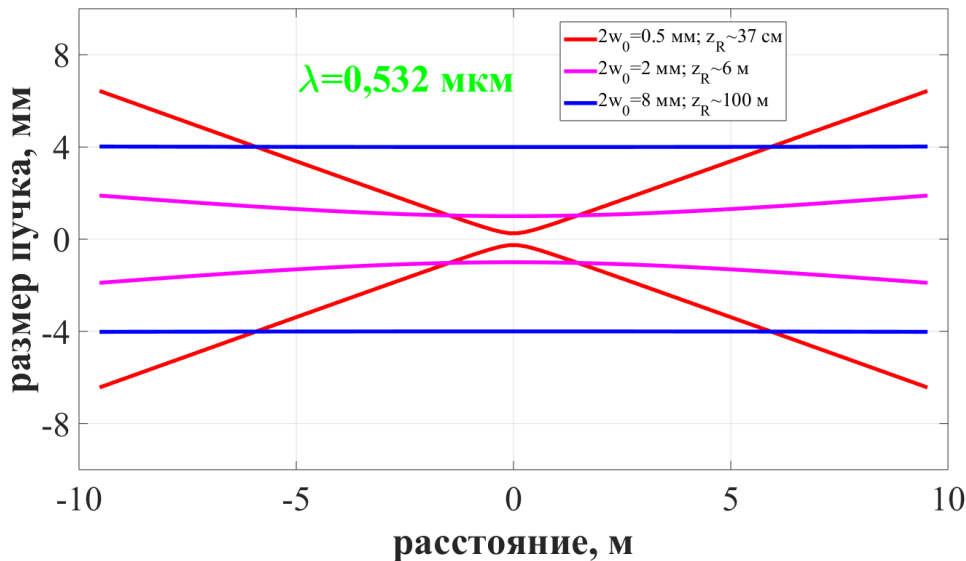
*Профиль интенсивности гауссова пучка вблизи
перетяжки с диаметром ... по уровню
интенсивности $1/e^2$*



Зависимость длины Рэлея от диаметра перетяжки
(по уровню интенсивности $1/e^2$) для гауссова пучка
излучения с длиной волны 0,532 мкм



Изменение диаметра гауссова пучка (по уровню интенсивности $1/e^2$) с расстоянием от центра пучка при различных значениях диаметра перетяжки (0.5 мм, 2 мм, 8мм)



Изменение диаметра гауссова пучка (по уровню интенсивности $1/e^2$) с расстоянием от центра пучка при различных значениях диаметра перетяжки (0.5 мм, 2 мм, 8 мм)

