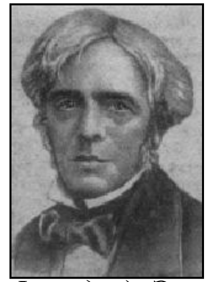
СВЕТ КАК ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА.

Доказательство электромагнитной природы света.

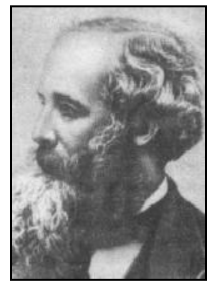
Впервые связь между светом и магнетизмом была исследована **Фарадеем** в 1845 году. Пропуская поляризованный пучок света через свинцовое стекло, помещенное между полюсами электромагнита, он наблюдал *поворот плоскости поляризации* на значительный угол.

В 1860-е гг. **Максвелл** составил дифференциальные уравнения для напряженностей электрического и магнитного векторов, решениями которых являлись *электромагнитные волны*. Скорость распространения волн оказалась комбинацией размерных констант, вычисления которых дали значение, совпавшее с измерениями скорости света в опытах Физо и Фуко.

Экспериментальное подтверждение теории Максвелла было получено **Герцем** в опытах с разряжающейся лейденской банкой. Превратив ее в первое подобие *антенны*, Герц получил электромагнитные колебания с $\lambda = 50$см и серией опытов доказал тождественность их свойств световым колебаниям (отражение, преломление, интерференция, дифракция,



Майкл Фарадей (1791-1867) - В 1833 году сформулировал законы *электролиза* (*законы Фарадея*), ввел понятия подвижность, анод, катод, ионы, электролиты, электроды. В 1845 году открыл *диамагнетизм*, а в 1847 - *парамагнетизм*. Обнаружил (1845) явление *вращения плоскости поляризации света в магнитном поле (эффект Фарадея*). Это было первым экспериментальным доказательством связи между магнетизмом и светом. В 1846 году в своем мемуаре впервые высказал идею об *электромагнитной природе света.*



Джеймс Клерк Максвелл (1831-1879) Наиболее весомый вклад Максвелл сделал в молекулярную физику и электродинамику. В кинетической теории газов установил в 1859 году статистический закон, описывающий распределение молекул газа по скоростям (*распределение Максвелла*). В 1867 году первым показал статистическую природу второго начала термодинамики. Самым большим научным достижением Максвелла является *теория электромагнитного поля*, которую он сформулировал в виде системы уравнений, предсказав существование в свободном пространстве *электромагнитных волн* и их распространение со скоростью света. Последнее дало основание считать свет одним из видов электромагнитного излучения.

Генрих Рудольф Герц (1857-1894) - В 1887 году предложил удачную конструкцию генератора электромагнитных колебаний (*вибратор Герца*) и метод их обнаружения с помощью резонанса (*резонатор Герца*), впервые разработав теорию излучения электромагнитных волн. Экспериментально доказал существование предсказанных Максвеллом *электромагнитных волн*, наблюдал их *отражение, преломление, интерференцию* и *поляризацию*. Установил, что скорость их распространения равна скорости света.

УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В интегральной форме:

$$\oint_L (\mathbf{E}, d\mathbf{l}) = -\int_S \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, d\mathbf{S} \right)$$

$$\oint_L (\mathbf{H}, d\mathbf{l}) = \int_S \left(\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, d\mathbf{S} \right)$$

$$\oint_S (\mathbf{D}, d\mathbf{S}) = \int_V \rho \, dV$$

$$\oint_S (\mathbf{B}, d\mathbf{S}) = 0$$

В дифференциальной форме:

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

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

ВОЛНОВОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН. СКОРОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Уравнения Максвелла для однородной нейтральной непроводящей среды с проницаемостями ε и μ $(\rho = 0, j = 0)$:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\varepsilon}{c}\frac{\partial \overline{E}}{\partial t} &= \mathrm{rot}\,\overline{H} \\ \frac{\mu}{c}\frac{\partial \overline{H}}{\partial t} &= -\,\mathrm{rot}\,\overline{E} \end{aligned}\right\} \quad \frac{\varepsilon}{c}\frac{\partial^2 \overline{E}}{\partial t^2} =$$

$$= \mathrm{rot}\,\frac{\partial \overline{H}}{\partial t} = -\frac{c}{\mu}\,\mathrm{rot}\,\mathrm{rot}\,\overline{E} =$$

$$= -\frac{c}{\mu}\left(\mathrm{grad}\,\mathrm{div}\,\overline{E} - \nabla^2\,\overline{E}\right)$$

Волновые уравнения для векторов **E** и **H:**

$$\begin{cases} \dfrac{\varepsilon\mu}{c^2}\dfrac{\partial^2 \overline{E}}{\partial t^2} = \nabla^2\,\overline{E} \\ \dfrac{\varepsilon\mu}{c^2}\dfrac{\partial^2 \overline{H}}{\partial t^2} = \nabla^2\,\overline{H} \end{cases}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}\;; \qquad v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

$$c = 3\cdot 10^8 \quad /$$

ПЛОСКИЕ И СФЕРИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ.

Волна называется *сферической*, если ее волновые поверхности представляют собой сферы

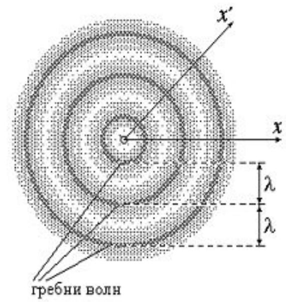


Рис.1.1 Сферическая волна

В однородной среде колебание вдоль всех параллельных лучей распространяется с одинаковой фазовой скоростью v . Все волновые поверхности такой волны являются плоскостями. Такая волна называется *плоской*.

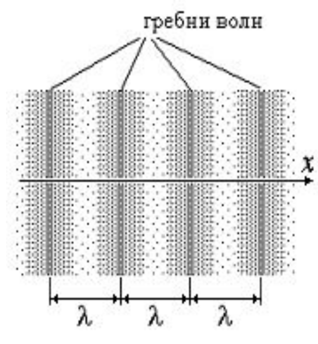


Рис.1.2 Плоская волна

УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

$$E(z,t) = E_1(ct - z) + E_2(ct + z)$$

$$E(z,t) = E_0\cos(k\cdot(ct - z)) =$$

$$= E_0\cos(\omega t - kz)$$

$$\frac{\partial^2 (rE)}{\partial r^2} - \frac{1}{c^2}\cdot\frac{\partial^2 (rE)}{\partial t^2} = 0$$

$$E(r,t) = \frac{E_1(ct - z)}{r} + \frac{E_2(ct + z)}{r}$$

$$E(r,t) = \frac{E_0}{r}\cos(\omega t - \bar{k}\cdot\bar{r})$$

k - *волновой вектор*, задающий направление распространения волны

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

λ – *длина волны*

СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Поперечность электромагнитной волны – вектора **E** и **H** перпендикулярны направлению распространения волны

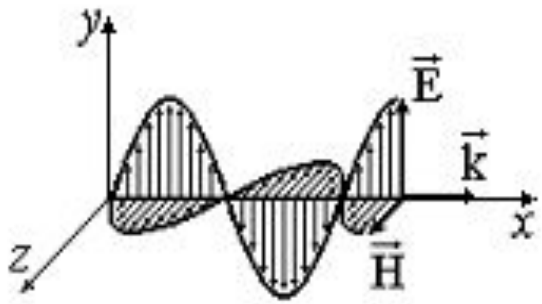


Рис. 1.3 Распространение электромагнитной волны

Взаимная ортогональность векторов **E, H** и **k,** образующих правовинтовую систему.

Связь мгновенных значений **E** и **H:**

$$E = E_0 \cdot \exp\left(i(\omega t - \bar{k}\cdot\bar{r})\right)$$

$$\operatorname{rot}\bar{E} = \begin{vmatrix} \bar{\imath} & \bar{\jmath} & \bar{\kappa} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = -i \begin{vmatrix} \bar{\imath} & \bar{\jmath} & \bar{\kappa} \\ k_x & k_y & k_z \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix}$$

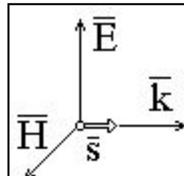
$$\operatorname{rot}\bar{E} = -i(\bar{k}\times\bar{E}); \quad \frac{\partial\bar{H}}{\partial t} = i\omega\bar{H}$$

$$H = H_0 \cdot \exp\left(i(\omega t - \bar{k}\cdot\bar{r})\right)$$

$$\frac{\partial\bar{H}}{\partial t} = -i\omega\bar{H}; \quad \operatorname{rot}\bar{E} = -i(\bar{k}\times\bar{E})$$

$$-\frac{\mu}{c}\frac{\partial\bar{H}}{\partial t} = \operatorname{rot}\bar{E}$$

$$(\bar{k}\times\bar{E}) = \frac{\mu\omega}{c}\bar{H}$$



$$\begin{cases} \frac{\mu\omega}{c}\bar{H} = (\bar{k}\times\bar{E}) \\ -\frac{\varepsilon\omega}{c}\bar{E} = (\bar{k}\times\bar{H}) \end{cases}$$

$$\bar{k} = \frac{\omega}{v}\bar{s} \qquad k^2 = \frac{\omega^2\varepsilon\mu}{c^2}$$

Связь между модулями векторов **E** и **H** в гармонической волне: $E = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}}\, H$

Вектор Пойнтинга.

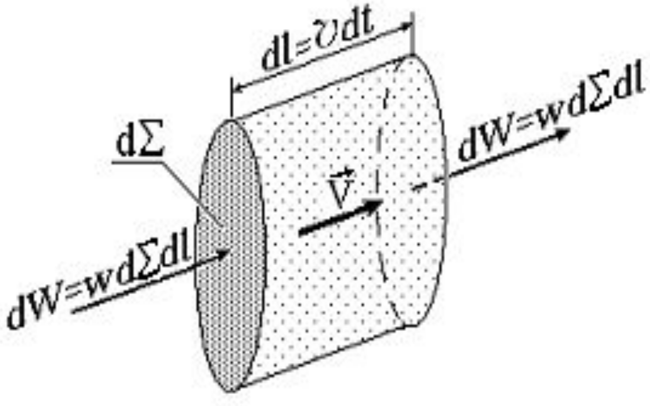


Рис. 1.4. К выводу вектора Пойнтинга

Плотность энергии электромагнитного поля:

$$\omega = \omega_э + \omega_м = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{EH}{\upsilon}$$

Поток энергии (поток лучистой энергии) - отношение энергии волны *dW*, передаваемой через площадку за малый промежуток времени, к этому промежутку времени.

Плотность потока энергии (интенсивность волны) – отношение потока энергии через площадку к ее площади.

$$I = \omega\,\upsilon$$

$$I \sim A^2$$

A – амплитуда волны

Вектор Пойнтинга – вектор, численно равный интенсивности электромагнитной волны и направленный вдоль луча, т.е. вдоль направления переноса энергии.

$$\mathbf{S} = \omega\upsilon = [\mathbf{E}, \mathbf{H}]$$