

Раздел III. Колебания и волны.

Глава 6. Электромагнитные волны.

1. Волновые уравнения для электромагнитного поля.

Уравнение Максвелла в однородном диэлектрике имеют вид:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \bar{E} = -\mu\mu_0 \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}; & \operatorname{div} \bar{H} = 0 & \rho = 0 \\ \operatorname{rot} \bar{H} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}; & \operatorname{div} \bar{E} = 0 & \bar{j} = 0 \end{cases}$$

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \bar{E} = -\mu\mu_0 \operatorname{rot} \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = -\mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{rot} \bar{H}) = -\mu\varepsilon\mu_0\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2}$$

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \bar{E} = -\Delta \bar{E} + \operatorname{grad}(\operatorname{div} \bar{E}) \text{ (теорема из векторного анализа)}$$

так как $\operatorname{div} \bar{E} = 0$, то:

$$\Delta \bar{E} = \mu\varepsilon\mu_0\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2}$$

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

$\Delta \bar{E} = \frac{1}{V_\phi^2} \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2}$
$\Delta \bar{H} = \frac{1}{V_\phi^2} \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2}$
по аналогии с $\bar{E}$

где фазовая скорость $V_\phi = \frac{c}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$,

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

2. Плоские электромагнитные волны

Пусть плоская электромагнитная волна распространяется вдоль оси ox . Тогда $\bar{E}(x, t), \bar{H}(x, t)$ и из всех уравнений Максвелла остаются только:

$$(1) \begin{cases} \frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} \\ \frac{\partial H_z}{\partial x} = -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \end{cases} \quad \text{и} \quad (2) \begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t} \end{cases}$$

$$E_x = 0, H_x = 0$$

Рассмотрим (1) пару, ее решение будем искать в виде:

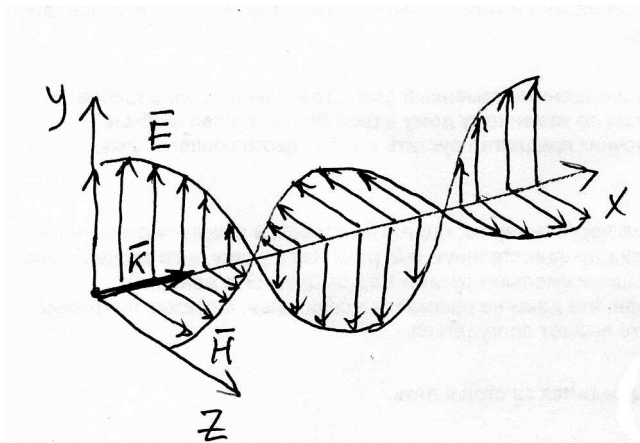
$$\begin{cases} E_y(x,t) = E_{y0} \cos(\omega t - kx) \\ H_z(x,t) = H_{z0} \cos(\omega t - kx) \end{cases} \quad k = \frac{\omega}{V_\phi}$$

Подставляем в (1) и находим связь E_{y0} и H_{z0} :

$$\sqrt{\epsilon\epsilon_0} E_{y0} = \sqrt{\mu\mu_0} H_{z0}$$

↓

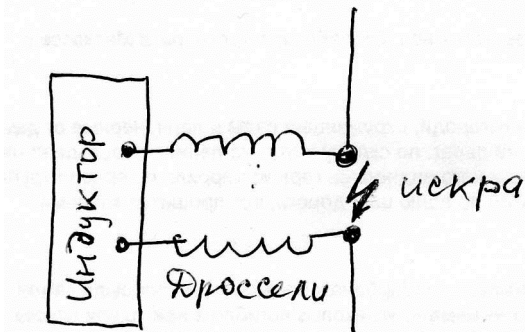
$$\sqrt{\epsilon\epsilon_0} E_y(x,t) = \sqrt{\mu\mu_0} H_z(x,t)$$



Тройка векторов
 $\vec{E}, \vec{H}, \vec{k}$ правая

($\vec{E}$ вращают к $\vec{H}$ буравчик идет по $\vec{k}$)

3. Генерация электромагнитных волн.



Генрих Герц впервые осуществил генерацию электромагнитных волн в 1888 году.

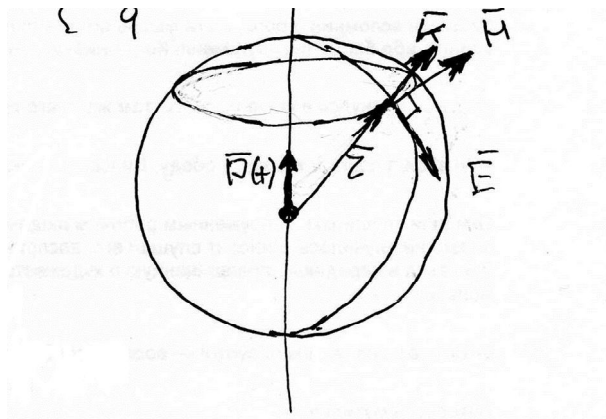
$$\lambda \sim 0,6 - 1 \text{ м}$$

С помощью металлических зеркал и асфальтовых призм (размеры $\sim$ метров) осуществил отражение и преломление электромагнитных волн $\Rightarrow$ Электромагнитные волны и свет одной природы.

А.С.Попов в 1896 году впервые осуществил передачу на расстояние 250 м слов «Генрих Герц» с помощью электромагнитных волн.

Источником электромагнитных волн являются ускоренно движущиеся заряды.

Широко распространенным излучателем является колеблющийся электрический диполь $\vec{p}(t) = \vec{p}_0 \cos(\omega t)$



Направление $\vec{E}$ и $\vec{H}$ в излучении диполя в дальней зоне ($r \gg \lambda$)

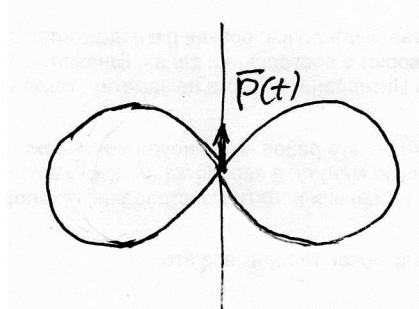
$\vec{E}$ лежит в плоскости $\vec{p}, \vec{r}$

$\vec{H} \perp$ к этой плоскости

$\vec{k} \parallel \vec{r}$

$\vec{E}, \vec{H}, \vec{k}$ - правая тройка.

Диаграмма направленности дипольного излучателя:
(интенсивность излучения в различных направлениях)



4. Энергия электромагнитных волн.

В однородном диэлектрике, плотность энергии электромагнитного поля:

$$w = w_E + w_H = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu \mu_0 H^2}{2}$$

Для плоских волн: $\sqrt{\epsilon \epsilon_0} E_y(xt) = \sqrt{\mu \mu_0} H_z(xt)$, тогда

$$w = \sqrt{\epsilon \mu \epsilon_0 \mu_0} \cdot EH = \frac{EH}{V_\phi}$$

Плотность потока энергии:

$$q = wV_\phi = EH$$

С учетом направления переноса энергии электромагнитной волной

$$\boxed{\vec{q} = [\vec{E} \times \vec{H}]} \quad - \text{ вектор Пойнтинга.}$$

Вопросы.

1. Нарисовать распределение $\vec{E}$ и $\vec{H}$ в плоской электромагнитной волне.

2. Соотношение E и H в плоской электромагнитной волне.
3. Что является источником электромагнитных волн.
4. Что такое вектор Пойнтинга.
5. Нарисовать $\vec{E}$ и $\vec{H}$ в излучении диполя.
6. Диаграмма направленности дипольного излучателя.