

1.48 Энергия ЭМ волн. Вектор Пойнтинга

ЭМВ переносят энергию.

Плотность потока мощности в данной точке

пространства = количеству энергии, протекающему в

1 с через 1 м² плоскости XOY.

$$\boxed{\vec{S} = [\vec{E} \times \vec{H}]} \quad (1)$$

Вектор плотности потока энергии - вектор Пойнтинга.

Поток ЭМ энергии через некоторую поверхность F ввели

$$\Phi = \int_F \vec{S} \cdot d\vec{F}$$

Джон Пойнтинг - английский физик в 1884 г. и Алексей Умов в 1874 г.

Т.к. в случае плоской волны $E_x = E_z = 0$ и

$$H_y = H_z = 0, \text{ то:}$$

$$\vec{S} = -\vec{e}_z E_y H_x \quad (2)$$

Вектор \vec{S} по направлению совпадает с волновым вектором \vec{k} .

Объемная плотность энергии ЭМ поля складывается из w_E

и w_H Для вакуума:

$$w_E = \frac{E \mathcal{D}}{2} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$$

$$w_H = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 H^2}{2}$$

$$w = w_E + w_H = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu_0 H^2}{2} = \frac{1}{2} E \sqrt{\epsilon_0} \cdot E \sqrt{\epsilon_0} +$$
$$+ \frac{1}{2} H \sqrt{\mu_0} \cdot H \sqrt{\mu_0}$$

$$E \sqrt{\epsilon_0} = H \sqrt{\mu_0}$$

$$w = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} E H = \frac{1}{c} E H$$

$$\boxed{S = w c = E H} \quad (3)$$

Векторы \vec{E} и \vec{H} взаимно перпендикулярны и образуют с направлением распространения волны правовинтовую систему. Поэтому направление вектора $[\vec{E}; \vec{H}]$ совпадает с направлением переноса энергии.

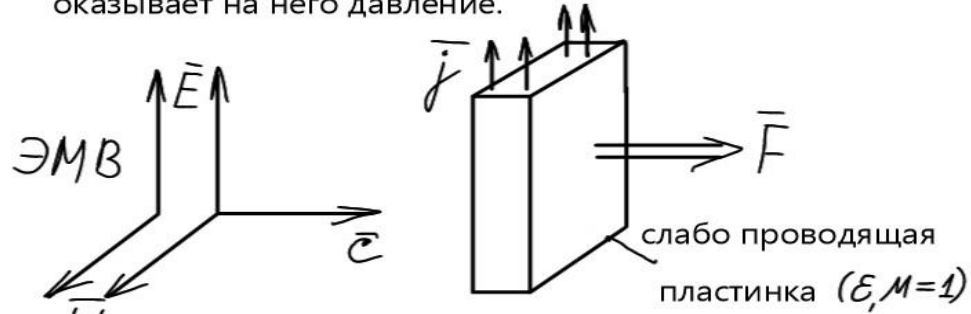
Напомню, что направление распространения энергии ЭМВ совпадает с направлением волнового вектора \vec{k} , с которым вы впервые познакомились при записи уравнения ЭМВ. Эта физическая величина определяет направление распространения волны во всех волновых процессах, начиная с механических волн (упругие волны), заканчивая квантовомеханическими процессами.

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \vec{n} \quad (4)$$

1.4 Импульс ЭМ поля.

Отражение и преломление ЭМВ

1) ЭМ волна, взаимодействуя с каким-либо веществом, сообщает ему не только энергию, но и импульс, т.е. оказывает на него давление.



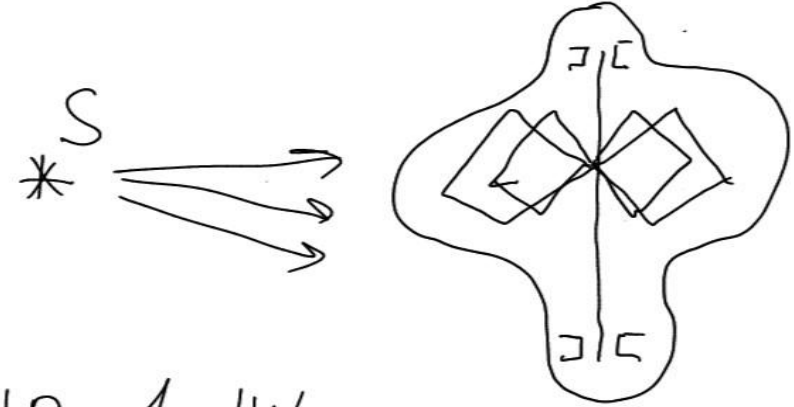
ЭМВ возбуждает в слабопроводящей пластинке ток плотностью $\vec{j} = \partial \vec{E}$, вокруг которого возникает МП. Оно начинает действовать на ток с силой Ампера, величина которой в расчёте на единицу площади и создаёт давление.

Можно показать, что ЭМВ, несущая энергию, обладает импульсом:

$$P = \frac{1}{c} W \quad (1)$$

Это согласуется с квантовомеханическими представлениями. Согласно им ЭМВ, несущая энергию, эквивалентна потоку фотонов, т.е. частиц, масса покоя которых равна "0".

Давление, которое оказывает на пластинку ЭМВ очень невелико. Оценим, с какой силой давит свет на лопасть радиометра от яркой лампы мощностью 100 Вт ?



$$dP = \frac{1}{c} dW$$

$$dP = \frac{2}{c} dW$$

$$F = \frac{dP}{dt} = \frac{2}{c} \frac{dW}{dt} = \frac{2}{3 \cdot 10^8} \cdot 10^2 = 6,7 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$$

2) К эффектам, связанным с взаимодействием ЭМВ с веществом, относятся также отражение и преломление. ЭМ волна может полностью отражаться только от очень хорошего проводника - от сверхпроводника (СП). В СП $\sigma = \infty$ и электрическое поле внутри СП всегда обращается в "0". В противном случае неограниченно возрастал бы ток. Падающая волна индуцирует на поверхности СП поверхностный ток, который в свою очередь начинает излучать ЭМП. Отражённая т.о. от поверхности СП волна будет находиться в противофазе с падающей волной и в пространстве около СП возникает система стоячих волн. Это случай полного отражения. Если проводник не идеальный, то отражение будет частичным.

Если в веществе свободных электронов нет, то это диэлектрик. В диэлектрике электроны сильно связаны с ядром и под действием ЭМ излучения могут лишь смещаться относительно ядра, совершая гармонические колебания. Любой колеблющийся электрон сам по себе излучает ЭМВ. Т.к. в диэлектрике потерь на Джоулево тепло нет, то вся энергия сохраняется в форме ЭМ излучения. Т.о., пластинка диэлектрика

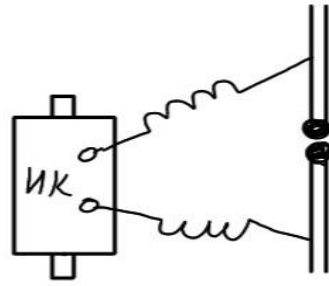
окажется прозрачной для ЭМВ. Кроме того, в диэлектрической пластинке волна распространяется с $v < c$

$$\frac{c}{v} = n \quad (3)$$

Это отношение называется показателем преломления. Для большинства твёрдых тел $n = 1,5$, т.е. скорость света в них замедляется примерно на 33%. Внутри пластинки поле является суперпозицией падающей волны и полей излучения всех свободных электронов. Каждое из полей в отдельности будет распространяться со скоростью $v = c$, но результирующее поле будет распространяться так, как если бы его скорость уменьшилась.

Впервые свойства ЭМВ исследовал Герц (1888 г.) Для получения ЭМВ он использовал изобретённый им вибратор.

ные небольшим искровым промежутком, от индукционной катушки подавалось высокое напряжение. В промежутке проскакивала искра, она закорачивала про-



На два стержня, разделённые небольшим искровым промежутком, от индукционной катушки подавалось высокое напряжение. В промежутке проскакивала искра, она закорачивала промежуток и в вибраторе возникали затухающие ЭМ колебания. За время горения искры возникало большое число колебаний, порождавших ЭМВ. Длина их составляла (0,6 - 10) м.

С помощью больших металлических зеркал и асфальтовой призмы (разм. 1 м, массой 1200 кг) Герц осуществил стоячую волну.

Располагая на пути ЭМВ решётку из параллельных медных проволок, Герц обнаружил, что интенсивность прошедших волн изменяется при вращении решётки.

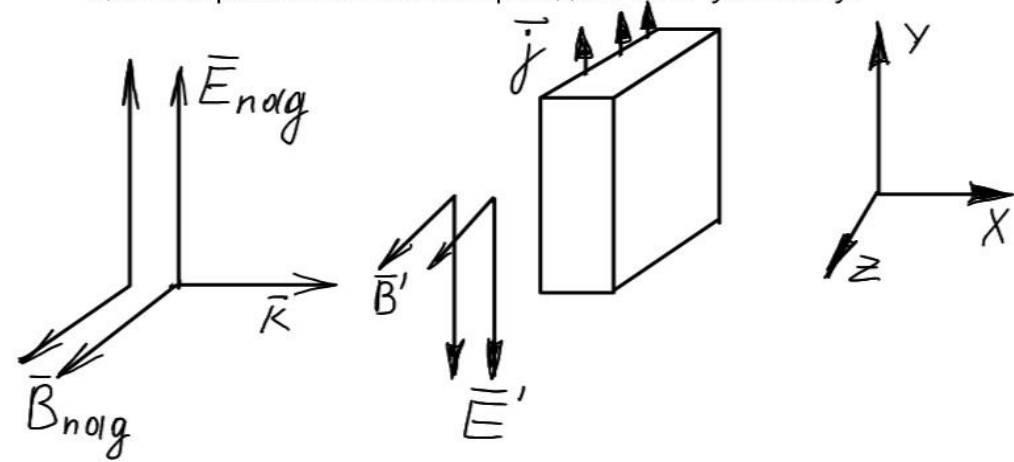
Когда проволоки в решётке были перпендикулярны \vec{E} , то волна проходила, когда они были параллельны, то волна не проходила. Т.о. была установлена поперечность ЭМВ.

Передатчик сообщения на расстояние 250м с помощью ЭМВ впервые осуществил А.С. Попов в 1886 г.

Передатчик сообщения на расстояние 250м с помощью ЭМВ впервые осуществил А.С. Попов в 1886 г.

1.50 Стоячие волны

При полном отражении бегущей волны сумма падающей и отражённой волн порождает стоячую волну.



Падающая на идеальную отражающую поверхность ЭМВ индуцирует поверхностный ток \vec{j} . Этот ток излучает поле \vec{E}' , направленное в непосредственной близости от отражающей поверхности противоположно \vec{E}_{ndg} .

$$E_{ndg} = E_m \cos(\omega t - kz) \quad (1)$$

Отражённая волна имеет вид:

$$\begin{aligned} E'_{neb.} &= -E_m \cos(\omega t + kz) \\ E'_{npob.} &= -E_m \cos(\omega t - kz) \end{aligned} \quad (2)$$

Справа сумма падающей и отражённой волн:

$$E = E_{\text{пад}} + E'_{\text{отр}} = 0$$

Слева от отражателя результирующее поле запишется в виде:

$$E = E_{\text{пад}} + \bar{E}'_{\text{отр}} = E_m [\cos(\omega t - kz) - \cos(\omega t + kz)]$$

$$\cos A - \cos B = 2 \sin \frac{(B+A)}{2} \sin \frac{(B-A)}{2}$$

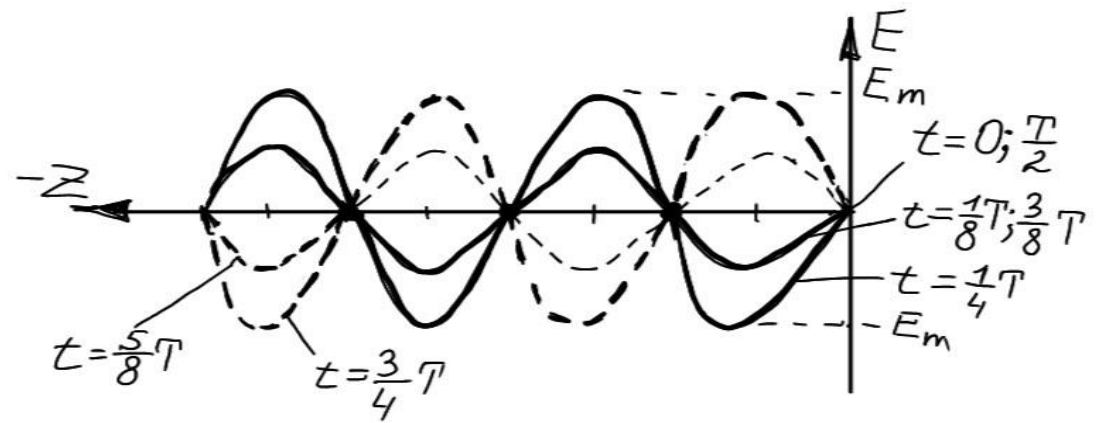
$$E = 2 E_m \sin \omega t \sin kz = A(t) \sin kz$$

Уравнение стоячей волны.

(3)

Построим график этой функции для последовательных моментов времени t .

Стоячая волна представляет собой определённую функцию - в данном случае $\sin kz$



$$E = 2 E_m \sin \omega t \sin kz = A(t) \sin kz \quad (3)$$

$$A(t) = 2 E_m \sin \omega t \quad (4)$$

$$kz_n = n\pi \Rightarrow E = 0 \text{ - узел} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Узлы располагаются в точках:

$$z_n = \frac{n\pi}{k} = \frac{n\lambda}{2} \quad (5)$$

Соседние узлы отстоят друг от друга на расстоянии равном полуволне.

Картину стоячих волн можно наблюдать визуально на струне, оттянув её и отпустив. Можно также закрепить верёвку с одного конца, а за другой держать рукой и поднимать этот конец вверх и вниз.