ЕЛЕКТРОМАГНИТНА ТЕОРИЯ НА СВЕТЛИНАТА

1. Електромагнитна природа на светлината.

1.1. Уравнения на Максуел
За среда без токове на проводимост и без некомпенсирани свободни заряди:

$$rot\vec{H} = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \qquad div\vec{D} = 0 \qquad \vec{j} = \sigma.\vec{E}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0.\varepsilon_r.\vec{E}$$

$$rot\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \qquad div\vec{B} = 0 \qquad \vec{B} = \mu_0.\mu_r.\vec{H}$$

Вълнови уравнения за електричното и магнитно поле на ЕМВ:

$$\left|\begin{array}{l} \nabla^2\vec{E} - \dfrac{1}{v^2}.\dfrac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = 0 \\ \\ \nabla^2\vec{H} - \dfrac{1}{v^2}.\dfrac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2} = 0 \end{array}\right.$$

където $\varepsilon_0.\mu_0 = \dfrac{1}{c^2}$; $\varepsilon_0.\mu_0.\varepsilon_r.\mu_r = \dfrac{1}{v^2}$

$n = \dfrac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon_r.\mu_r}$ - абсолютен показател на пречупване.

<u>Решения</u> на вълновите уравнения - Вълновите уравнения имат решения, които описват електромагнитна вълна (ЕМВ), която се разпространява с определена скорост: $v = \dfrac{c}{\sqrt{\varepsilon_r.\mu_r}}$. Следователно, те имат решения, във вид на бягаща вълна, разпространяваща със скорост v. Тези решениа са следните:

$$\left|\begin{array}{l} E = E_0.\cos(\omega t - \vec{k}.\vec{r} + \alpha) \\ \\ H = H_0.\cos(\omega t - \vec{k}.\vec{r} + \alpha) \end{array}\right.$$

- Векторите $\vec{E},\vec{H},\vec{k}$ образуват дясно-винтова ортогонална система.

- Тези вълни са напречни: $\vec{E},\vec{H} \perp \vec{k}$
- $\vec{E} \perp \vec{H}$
- $n = \sqrt{\varepsilon.\mu}$

1.2. Видове бягащи вълни

а) Плоска вълна

- вълновата повърхност е плоска равнина;
- E_0, H_0, α не зависят от r и t, т.е. в цялото пространство, във всеки момент време са еднакви.

б) Сферична вълна

- вълновата повърхност е сферична равнина;
- амплитудите E_0, H_0 са обратно пропорционални на разстоянието до центъра

1.3. Плоска монохроматична вълна

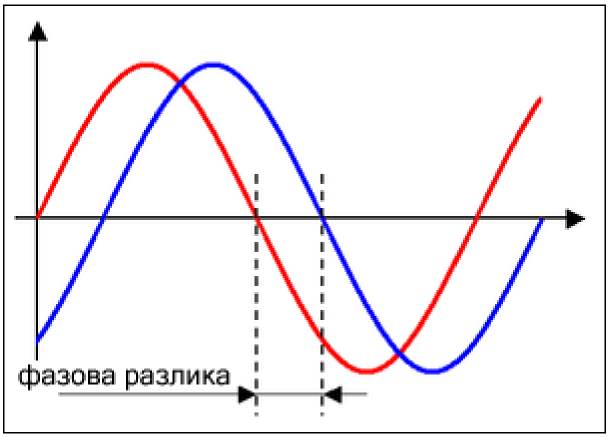
$$\boxed{E = E_0.\cos(\omega t - \vec{k}.\vec{r} + \alpha)}$$

- Силно идеализирана –трябва да е безкрайно дълга и да се разпространява безкрайно дълго време.
- Всяка реална ЕМВ може да се представи като суперпозиция от такива прости вълни.
- Поради линейността на ур. на Максуел, сумата от кои да е решения, също е решение.

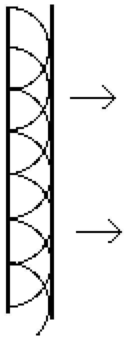
Основни понятия:

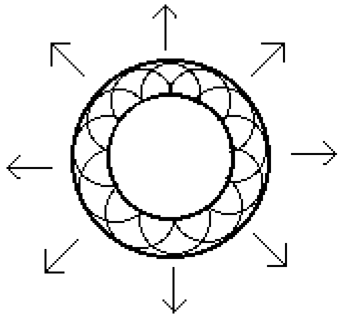
- ***амплитуда*** (E_0);
- ***начална фаза*** (α);
- ***фаза на вълната*** (φ) – аргумента на cos;

Синята и червената вълни са с еднакви честоти, но имат фазово отместване.



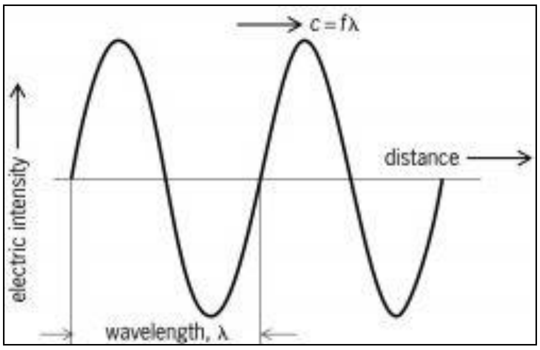
- ***вълнова повърхност, вълнов фронт или фазова повърхност*** (повърхност с постоянна фаза (φ = const)) –определя в пространството равнина, перпендикулярна на вълновия вектор;

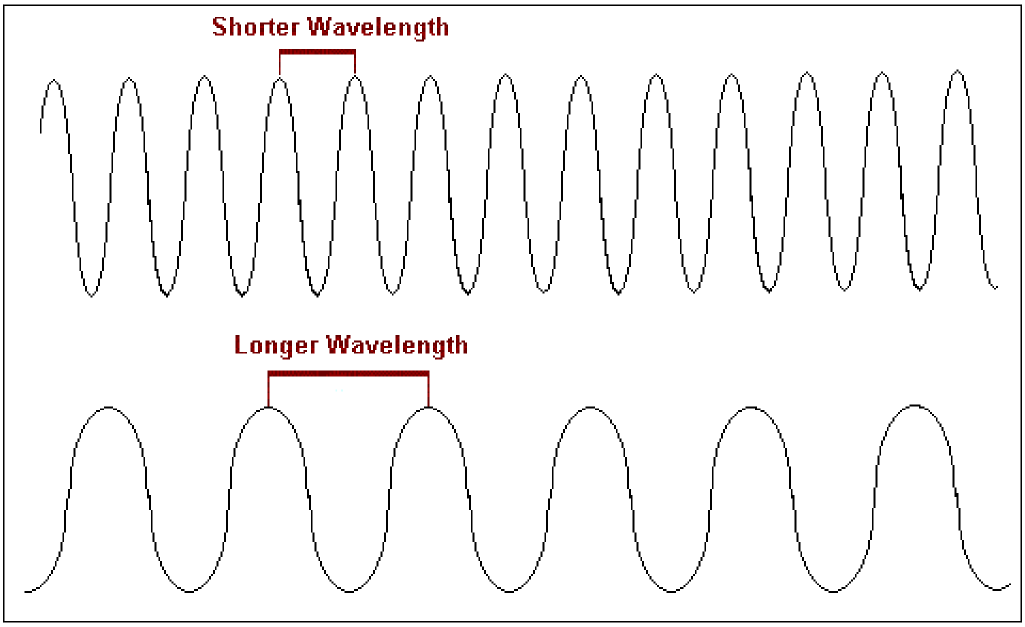




а) Плоска вълна б) Сферична вълна

- ***дължина на вълната*** (λ) – разстоянието между две най-близки (съседни) точки, за които трептенията са във фаза (фазовата им разлика е 2π) за даден момент време (t = const). Разстоянието, на което се премества вълновия фронт за време T;



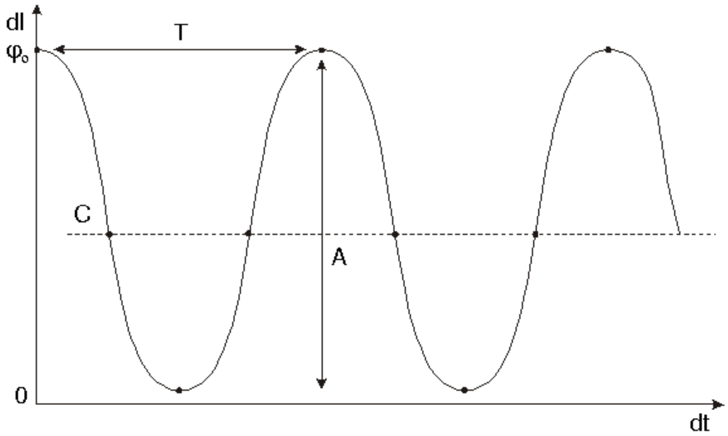


- ***вълново число*** ($\vec{k}$) – определя посоката на разпространение на ЕМВ; показва колко дължини на вълните се нанасят в отрязък 2π;

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = k.(x_2 - x_1) = 2\pi.n\,,\quad k = 2\pi/\lambda$$

- ***период на вълната*** (*T*) – най-краткото време между два момента, за които трептенията на дадена точка (x = const) са във фаза (фазовата им разлика е 2π).

x = const



- ***кръгова честота*** (ω) - показва колко периода на вълните се нанасят в отрязък 2π.

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega.(t_2 - t_1) = 2\pi.n\,,\quad T = 2\pi/\omega$$

2. Фазова и групова скорост

2.1 Фазова скорост

Скоростта, с която се разпространява всяка повърхност с постоянна фаза (φ = const), т.е. скоростта, с която се разпространява фронтът на вълната.

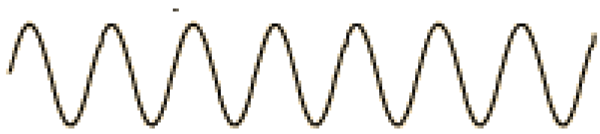
$$\varphi = \omega t - k.r + \alpha = const\,;$$
$$d\varphi = \omega.dt - k.dr = 0$$
$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T}$$

Това понятие е приложимо само за строго монохроматична вълна, разпространяваща се в среда без дисперсия. То не може да се определя експериментално. В среда с дисперсия ($n = f(\lambda)$ или $v = f(\lambda)$), резултатната вълна при разпространението си се деформира и скоростта е неопределено понятие.

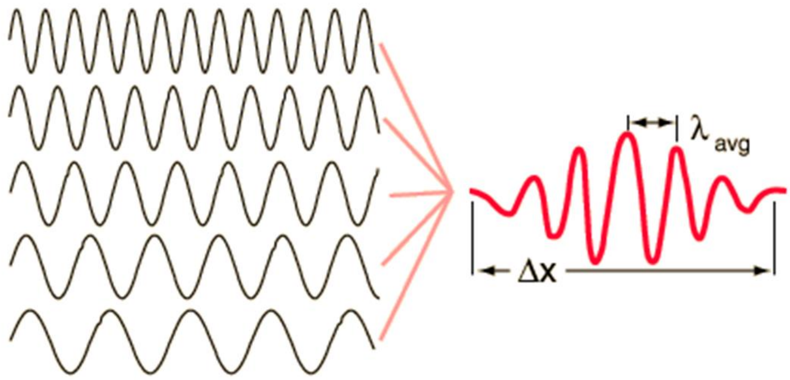
2.2. Групова скорост

2.2.1. Вълнов пакет – Импулс, който може да се представи като сума от безкраен брой синусоиди, чиито честоти малко се отличават една от друга.

Монохроматична вълна



Вълнов пакет



Ако всички монохроматични синусоиди, с различно λ, се разпространяват с една фазова скорост, независеща от λ, то импулсът (вълновият пакет) би се разпространявал с тази скорост, запазвайки своята форма, т.е. без да се деформира.

Ако средата се характеризира с дисперсия ($v = f(\lambda)$), то импулсът се деформира, но това става бавно, ако дисперсията е слаба.

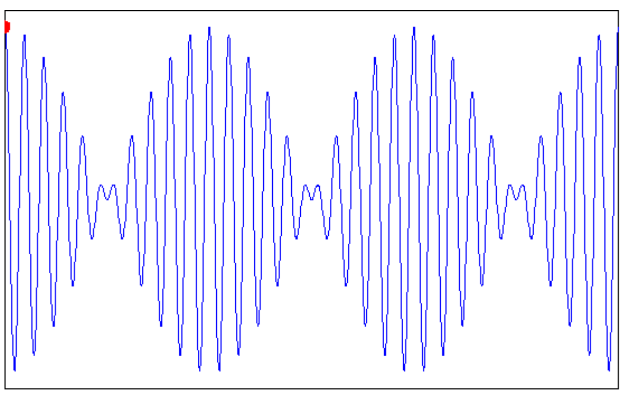
2.2.2. Групова скорост

Скоростта на разпространение на максималната амплитуда от вълновия пакет. Разгл. суперпозицията на 2 вълни, разпространяващи се независимо в една равнина с близки честоти и еднакви амплитуди.

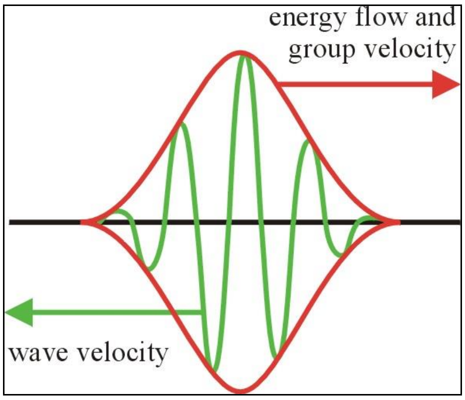
$$E_1 = E_0.\cos(\omega_1 t - k_1.r + \alpha) \quad ; \quad \omega_1 = \overline{\omega} + \delta\omega \quad ; \quad k_1 = \bar{k} + \delta k$$
$$E_2 = E_0.\cos(\omega_2 t - k_2.r + \alpha) \quad ; \quad \omega_2 = \overline{\omega} - \delta\omega \quad ; \quad k_2 = \bar{k} - \delta k$$

Получаваме хармонично трептене с амплитуда $E_0^{'}$, меняща се много бавно с времето и положението.

$$E = [2E_0.\cos(\delta\omega.t - \delta k.r)]'\cos(\overline{\omega}.t - \bar{k}.r + \alpha)$$



Ако вместо 2 вълни сумираме безкраен брой вълни се получава квазимонохроматична вълна с амплитуда отличаваща се от 0 в тесен интервал: $\overline{\omega} \pm \delta\omega$. Тогава се говори за вълнов пакет, който се разпространява с групова скорост.



Групова скорост - Скоростта на разпространение на равнината на постоянната амплитуда, а и следователно енергията, пренасяна от вълновия пакет.

$$E_0^{/} = 2E_0.\cos(\delta\omega.t - \delta k.r)$$

$$\delta\omega.t - \delta k.r = const$$

$$\delta\omega.dt - \delta k.dr = 0$$

$$u_{гр} = \frac{dr}{dt} = \frac{\delta\omega}{\delta k}$$

Извод:

Монохроматичната вълна се характеризира с фазова скорост $v=\omega/k$, означаваща скорост на преместване на фазата. Вълновият пакет се характеризира с групова скорост $u_{гр}=d\omega/dk$, съответстваща на скоростта на разпространение на полето на този пакет.

2.3. Връзка между фазова и групова скорост

а) формула на Релей

$$u_{гр} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(v.k)}{dk} = v + k.\frac{dv}{dk}$$

$$dk = -\frac{2\pi}{\lambda^2}d\lambda$$

$$u_{гр} = v - \lambda\frac{dv}{d\lambda}$$

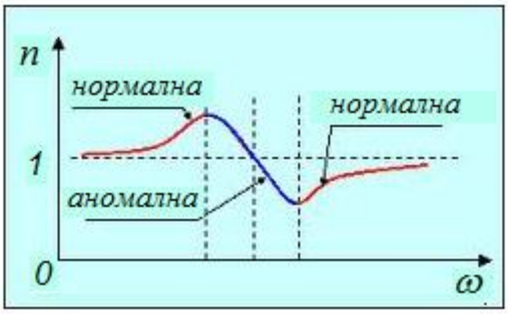
- нормална дисперсия - $dv/d\lambda > 0$, т.е. $u_{гр} < v$
- аномална дисперсия - $dv/d\lambda < 0$, т.е. $u_{гр} > v$

б) друга форма на закона

$$n = \frac{c}{v} \Rightarrow v = \frac{c}{n(\lambda)}, \quad \frac{dv}{d\lambda} = -\frac{c}{n^2(\lambda)} \cdot \frac{dn}{d\lambda}$$

$$u_{гр} = v + \frac{c.\lambda}{n^2} \cdot \frac{dn}{d\lambda}$$

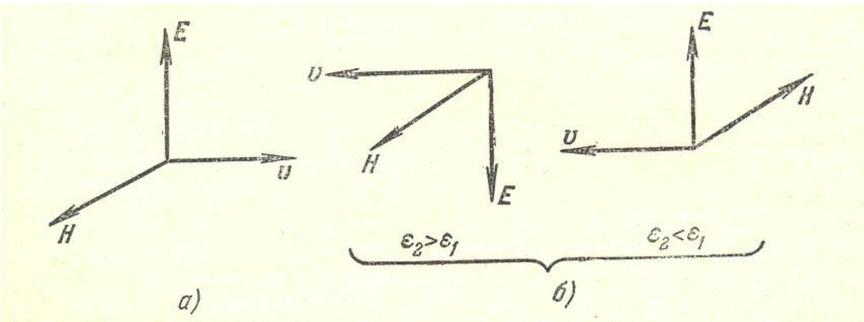
- нормална дисперсия - $dn/d\lambda < 0$
- аномална дисперсия - $dn/d\lambda > 0$



Ако n не зависи от $\lambda \Rightarrow u_{гр} = v$. Не се наблюдава дисперсия.
Ако n зависи от $\lambda \Rightarrow u_{гр} \neq v$. Наблюдава се дисперсия.

3. Стояща вълна.

Възниква при сумиране на две разпространяващи се една срещу друга бягащи монохроматични вълни с еднакви честота, амплитуда и поляризация. Наблюдава се при пълно вътрешно отражение на вълната от гранична повърхност.



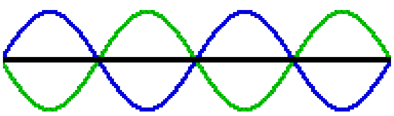
а) Падаща вълна, разпространяваща се по направление на ос Z:

$$E_1 = (E_0.\exp[-i(\omega.t - k.z)], 0, 0)$$
$$B_1 = (0, B_0.\exp[-i(\omega.t - k.z)], 0)$$

б) Насрещната вълна трябва да образува дясна тройка:

$$E_2 = (E_0.\exp[-i(\omega.t + k.z)], 0, 0)$$
$$B_2 = (0, B_0.\exp[-i(\omega.t + k.z)], 0)$$

Резултатната ЕМВ е стояща:

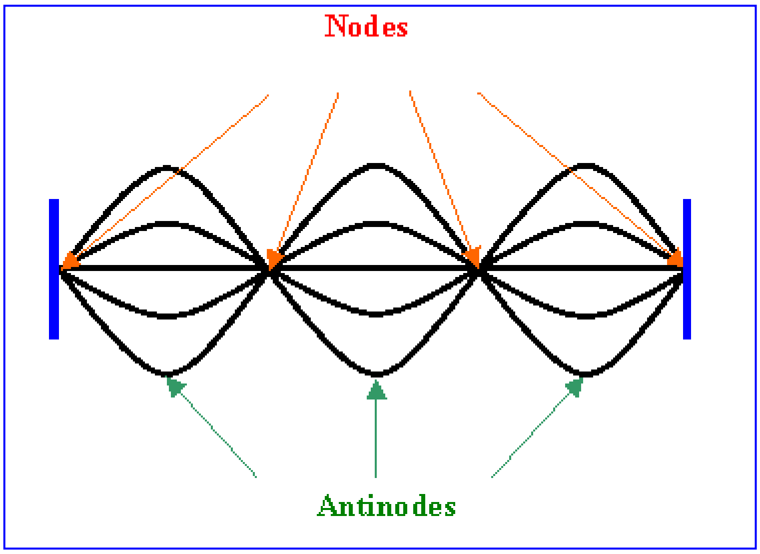


$$E = E_1 + E_2 = E_0.\cos(\omega.t - k.z) + E_0.\cos(\omega.t + k.z) = 2E_0.\cos(\omega.t).\cos(k.z)$$
$$B = B_1 + B_2 = B_0.\cos(\omega.t - k.z) - B_0.\cos(\omega.t + k.z) = 2B_0.\sin(\omega.t).\sin(k.z)$$

- $\varphi = \omega.t$ - фазата в момент t в коя да е точка. E и B са отместени по фаза на $\pi/2$.
- Амплитудите са функция на координатата Z, но не и на времето.

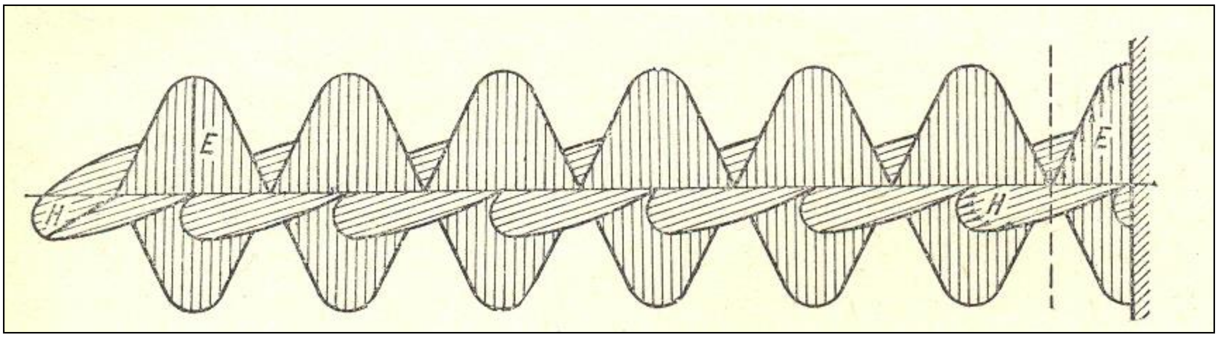
$$E_{ампл} = 2E_0.\cos(k.z)$$
$$B_{ампл} = 2B_0.\sin(k.z)$$

Амплитудата E се изменя от максимум ($2E_0$) до 0 за различно Z. Амплитудата B също се изменя от максимум ($2B_0$) до 0, но е отместена по Z спрямо E на четвърт период $\pi/2$ или на $\lambda/4$.



Резултантната електромагнитна вълна е стояща:

Минимуми, в които точките са неподвижна, се наричат **възли** на стоящата вълна, а максимуми – **върхове** на стоящата вълна. Разстоянието между два съседни възела е равно на половин дължина на падащата или на отразената вълна.



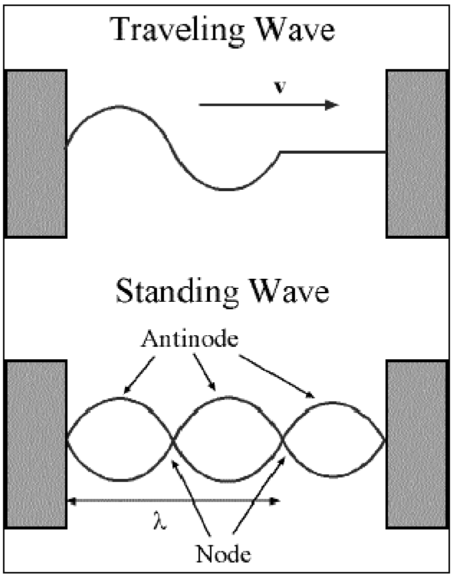
Извод:

В бягащата електромагнитна вълна ЕП и МП са насочени перпендикулярно едно спрямо друго и във всяка пространствена точка се изменят в течение на времето еднакво (т.е във фаза).

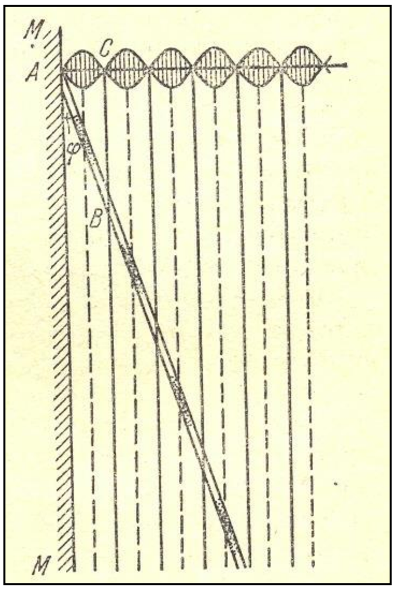
В стоящата електромагнитна вълна МП изостава спрямо това на ЕП по фаза $\pi/2$ или на $\lambda/4$ и във всяка точка от пространството амплитудаа не се изменя с времето.

Енергията на бягащата вълна се пренася в посоката на разпространение на вълната, а за стоящата вълна – е локализирана и преминава от максимална за ЕП към максимална за МП и обратно (т.е от една форма към друга) през четвърт период.

Стоящата вълна не пренася енергия, защото колкото енергия пренася падащата вълна в едната посока, толкова енергия пренася отразената вълна в обратна посока. При бягаща вълна източникът трябва непрекъснато да извършва работа, за да може трептенията да се разпространяват все по-надалече. При стояща вълна обаче източникът на вълната извършва работа само докато се образува стоящата вълна.



Опит на Винер



Получава стояща светлинна вълна и изследва действието на светлината върху фотографска емулсия (1890г.)

- ММ – метално огледало, от което се отразява светлинната вълна и се наблюдава стояща вълна в направление перпендикулярно на ММ. Възелът върху ММ е за *E* , тъй като при това отражение от метал ЕП изменя фазата си.
- АВ – стъклена пластина с нанесен светлочувствителен слой (BrAg).
- Фотографското въздействие на светлината върху бромистото сребро BrAg – максимално разлагане (почерняване на пластината) става послойно.

$$\varphi \approx 1', AB = \frac{\lambda / 2}{\sin \varphi} \Rightarrow AB \approx 1 \mu m$$

Следователно, могат да се наблюдават ивиците, разположени на разстояние АВ.

На кои максимуми - за ЕП или за МП -съответства това почерняване?

Заключение:
Фотографското действие на светлината, както и фотоефектът и флуорисценцията, са свързани с електричния вектор *E*. Това е следствие от електронната теория за взаимодействие на светлината и веществото, свеждащо се до действие на светлинната вълна върху електроните на веществото.

$$\boxed{\vec{F} = q.\vec{E} + q.\left[\vec{v} \times \vec{B}\right] = q.\vec{E} + q.\vec{E}.\frac{v}{c} \cong q.\vec{E};\ v << c}$$