CHƯƠNG 7 –
TRƯỜNG ĐIỆN TỪ
DAO ĐỘNG VÀ SÓNG ĐIỆN TỪ

1. Trường điện từ

2. Dao động điện từ

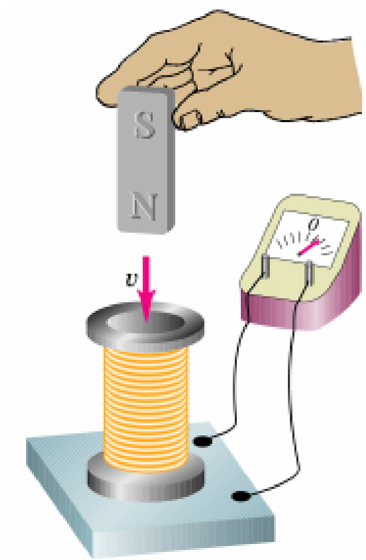
3. Sóng điện từ

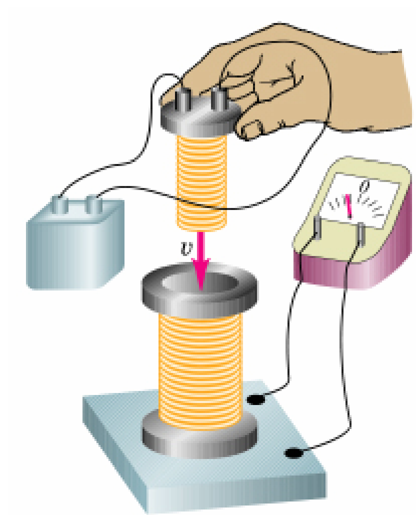
1. Trường điện từ

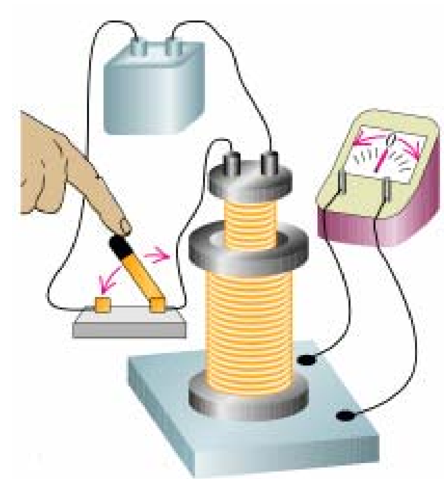
Hệ phương trình Maxwell

Thí nghiệm Faraday về hiện tượng cảm ứng điện từ

Michael Faraday
(1791-1867)







☞ Biến thiên từ thông (sinh ra bởi nam châm hoặc cuộn dây có dòng điện)

- Suất điện động cảm ứng: $\mathscr{E}_C = -\dfrac{d\Phi_m}{dt}$
- Dòng cảm ứng: I_c

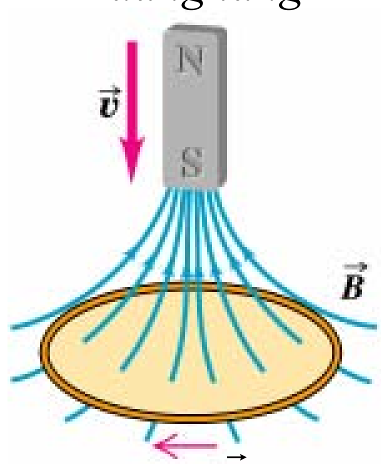
1. Trường điện từ

Hệ phương trình Maxwell

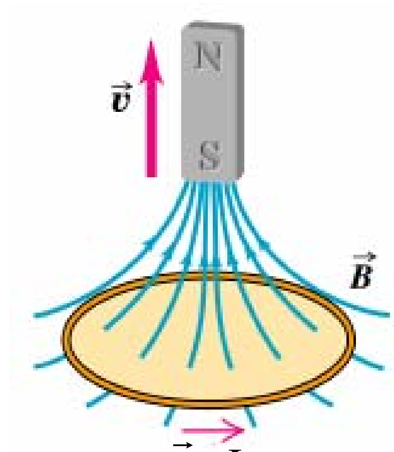
Điện trường xoáy và luận điểm thứ nhất của Maxwell

Jame Clerk Maxwell
(1831 - 1879)

B đang tăng



B đang giảm

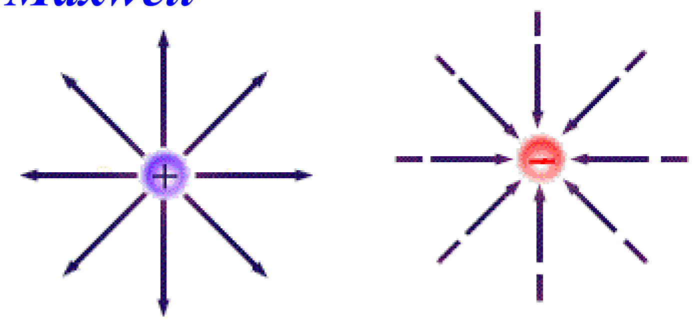


- Tồn tại một điện trường $\vec{E}$ cùng chiều dòng cảm ứng I_c
  - Không phụ thuộc bản chất dây dẫn
  - Không phụ thuộc nhiệt độ

1. Trường điện từ

Hệ phương trình Maxwell

Điện trường xoáy và luận điểm thứ nhất của Maxwell



- Điện trường tĩnh
  - Điện tích cố định
  - Đường sức không khép kín
  - Công thực hiện di chuyển điện tích theo đường cong kín = 0: $\oint q\vec{E}.\vec{dl} = 0$

Không thể làm các điện tích dịch chuyển theo đường cong kín để tạo thành dòng điện

- Để các điện tích dịch chuyển theo đường cong kín tạo ra dòng điện $\Rightarrow$ công dịch chuyển theo đường cong kín phải $\neq 0$, tức là: $\oint \vec{E}.\vec{dl} \neq 0$

- Điện trường $\vec{E}$ của dòng cảm ứng I_c (sinh ra bởi từ trường) có đường sức khép kín $\Rightarrow$ điện trường xoáy.

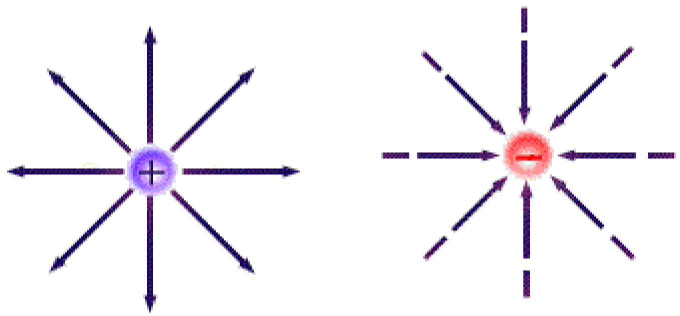
- ***Luận điểm của Maxwell***: *Bất kỳ một từ trường nào biến đổi theo thời gian cũng sinh ra một điện trường xoáy!*

1. Trường điện từ

Hệ phương trình Maxwell

So sánh điện trường tĩnh và điện trường xoáy

Điện trường tĩnh



- Điện tích cố định
- Đường sức không khép kín
- Công thực hiện di chuyển điện tích theo đường cong kín = 0

$$\oint q\vec{E}.\vec{dl} = 0$$

Điện trường xoáy

- Điện tích di chuyển
- Đường sức khép kín
- Công thực hiện di chuyển điện tích theo đường cong kín ≠ 0

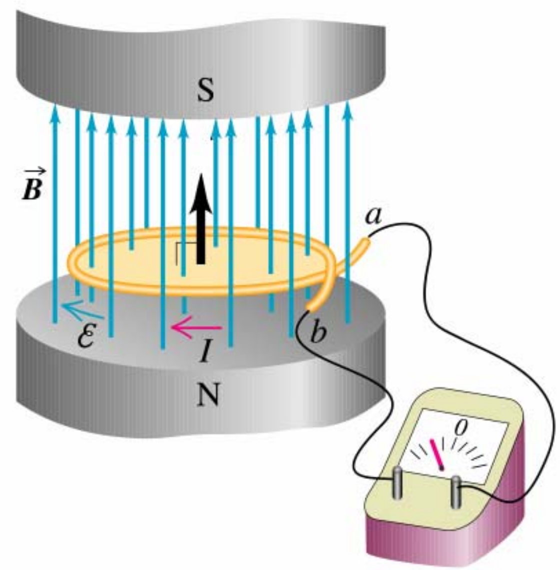
$$\oint q\vec{E}.\vec{dl} \neq 0$$

1. Trường điện từ

Hệ phương trình Maxwell

Phương trình Maxwell-Faraday

- Vòng dây dẫn kín đặt trong B biến đổi



Biến thiên từ thông $d\Phi_m$ gửi qua vòng dây trong thời gian $dt \Rightarrow$ xuất hiện s.đ.đ cảm ứng $\mathcal{E}_c$

$$\mathcal{E}_c = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d}{dt}\left(\int_S \vec{B}.d\vec{S}\right)$$

Đ/n s.đ.đ: $\mathcal{E}_c = \oint_{(C)} \vec{E}\overrightarrow{dl}$

$$\boxed{\oint_{(C)} \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}.d\vec{S}}$$

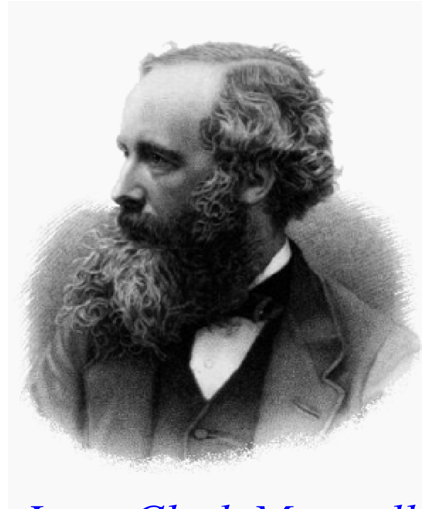
(dạng tích phân)

- *Lưu số của vector cường độ điện trường xoáy dọc theo một đường cong kín bất kỳ bằng nhưng trái dấu với tốc độ biến thiên theo thời gian của từ thông gửi qua diện tích giới hạn bởi đường cong kín đó.*

1. Trường điện từ

Hệ phương trình Maxwell

Phương trình Maxwell-Faraday



Jame Clerk Maxwell
(1831 - 1879)

Michael Faraday
(1791-1867)

- Dạng tích phân: $\boxed{\oint_{(C)} \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}.d\vec{S}}$

- VT theo đ/lý Stokes:

$$\oint_{(C)} \vec{E}d\vec{l} = \int_S \left(\nabla \times \vec{E}\right)d\vec{S} = \int_S rot\vec{E}.d\vec{S}$$

- VP có thể viết được: $-\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}.d\vec{S} = \int_S \left(-\frac{d\vec{B}}{dt}\right)d\vec{S}$

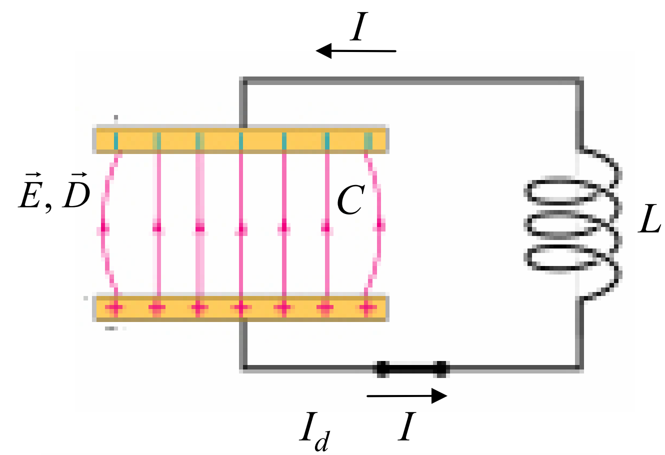
- Dạng vi phân: $\boxed{rot\vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}}$

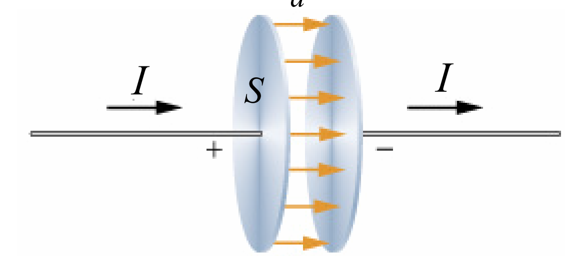
1. Trường điện từ

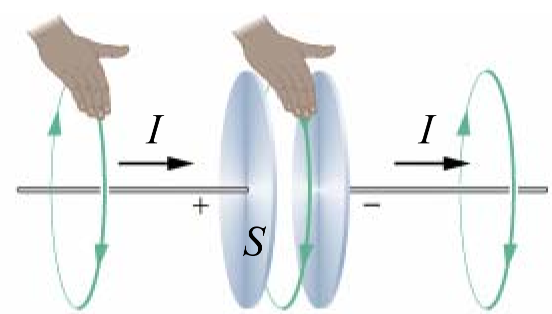
Hệ phương trình Maxwell

Dòng điện dịch và luận điểm thứ hai của Maxwell

- Mạch điện có L và C:
  - C phóng điện $\Rightarrow$ E và D trong không gian giữa 2 bản cực giảm
  - C nạp điện $\Rightarrow$ E và D trong không gian giữa 2 bản cực tăng
- ***Luận điểm của Maxwell***:
  - Bất kỳ một điện trường biến đổi theo thời gian cũng sinh ra một từ trường
  - Điện trường biến đổi $\Leftrightarrow$ dòng điện = dòng điện dịch I_d – (*displacement current*), có cùng chiều và độ lớn như dòng điện dẫn.





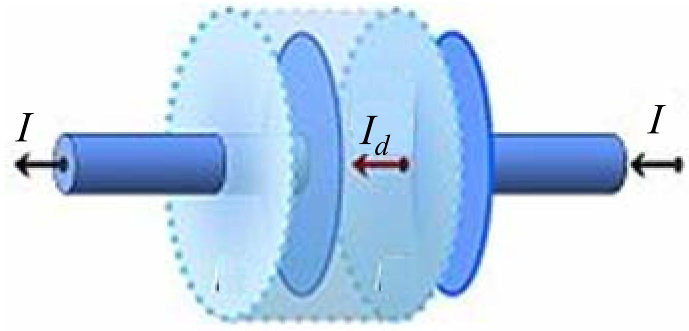


Từ trường của dòng I | Từ trường của dòng I_d | Từ trường của dòng I

1. Trường điện từ

Hệ phương trình Maxwell

Dòng điện dịch và luận điểm thứ hai của Maxwell



☞ Mật độ dòng điện dịch (trong chân không):

$$J_d = \frac{I_d}{S} = \frac{I}{S} = \frac{1}{S}\frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{q}{S}\right) = \frac{d\sigma}{dt}$$

Vì $D = \sigma \Rightarrow J_d = \frac{dD}{dt}$

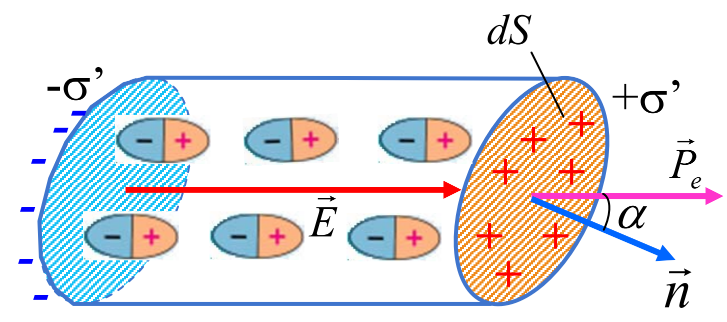
$$\vec{J}_d = \frac{d\vec{D}}{dt} \quad \text{hoặc:} \quad \vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \overset{\text{chân không}}{=} \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Dòng điện dịch chính là điện trường biến thiên theo thời gian

1. Trường điện từ

Hệ phương trình Maxwell

Dòng điện dịch và luận điểm thứ hai của Maxwell



☞ Đối với chất điện môi: $\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}_e$

☞ Mật độ dòng điện dịch trong chất điện môi:

$$\vec{J}_d = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} = \varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial\vec{P}_e}{\partial t}$$

- Chất điện môi: mật độ điện tích mặt liên kết $\sigma' = P_{en}$,

- Dòng qua dS: $I_{pc} = \int_S \vec{J}_{pc} d\vec{S} = \int_S \frac{\partial\sigma'}{\partial t} dS = \int_S \frac{\partial P_{en}}{\partial t} dS = \int_S \frac{\partial\vec{P}_e}{\partial t} d\vec{S}$

- $\vec{J}_{pc} = \frac{\partial\vec{P}_e}{\partial t} \Rightarrow \vec{J}_d = \vec{J}_{d(chân\ không)} + \vec{J}_{d(phân\ cuc)}$

☞ Mật độ dòng toàn phần của chất điện môi khi có dòng điện đi qua:

$$\vec{J}_{tp} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$$

1. Trường điện từ

Hệ phương trình Maxwell

Phương trình Maxwell-Ampere

☞ Có: $I_{tp} = \int_S \vec{J}_{tp} d\vec{S} = \int_S \left(\vec{J} + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$

Đ/lý Ampere: $\oint \vec{H}.d\vec{l} = I_{tp}$

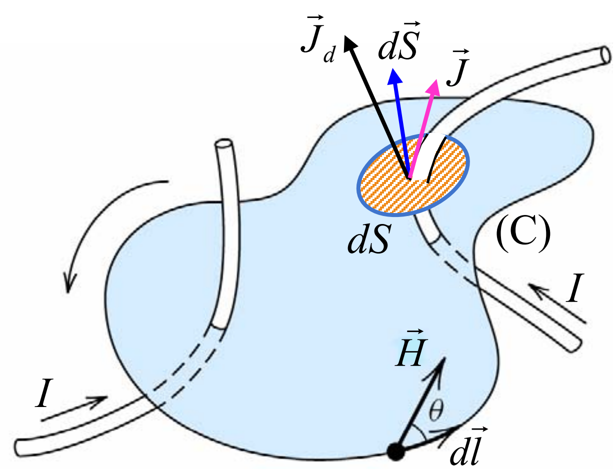
Jame Clerk Maxwell (1831 - 1879)

Andre Marie Ampere (1775 – 1836)

☞ Dạng tích phân: $\boxed{\oint_C \vec{H}.d\vec{l} = \int_S \left(\vec{J} + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}}$

VT theo đ/lý Gauss:

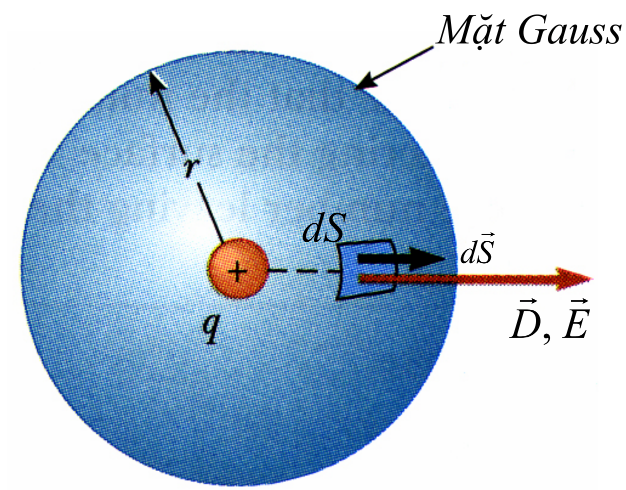
$$\oint_C \vec{H}.d\vec{l} = \int_S \left(\nabla \times \vec{H} \right) d\vec{S} = \int_S rot\vec{H}.d\vec{S}$$



☞ Dạng vi phân: $\boxed{rot\vec{H} = \vec{J} + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t}}$

1. Trường điện từ

Hệ phương trình Maxwell



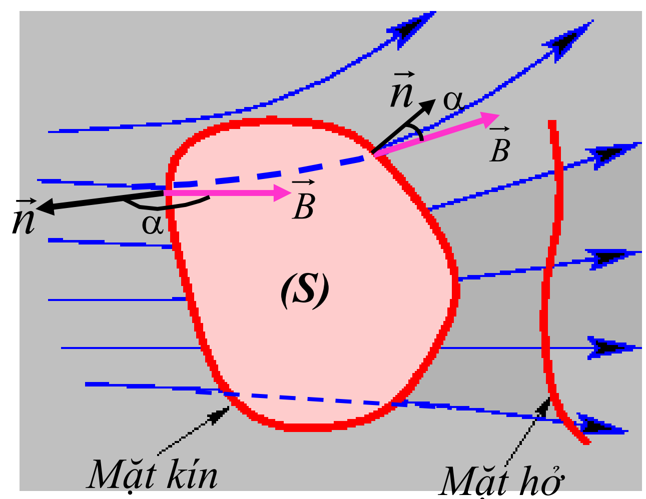
Phương trình Gauss cho điện trường

- Dạng tích phân: $\oint_S \vec{D}.d\vec{S} = \sum q = \int_V \rho dV$

- Dạng vi phân: $\vec{\nabla}.\vec{D} = div\vec{D} = \rho$

- Diễn tả tính không khép kín của đường sức điện trường tĩnh
- Điện trường tĩnh có thể tồn tại với chỉ một nguồn duy nhất (1 điện tích)

Phương trình Gauss cho từ trường



- Dạng tích phân: $\oint_S \vec{B}.d\vec{S} = 0$

- Dạng vi phân: $\vec{\nabla}.\vec{B} = div\vec{B} = 0$

- Diễn tả tính khép kín của đường sức từ trường
- Từ trường chỉ có thể tồn tại dưới dạng nguồn lưỡng cực

1. Trường điện từ

Hệ phương trình Maxwell (tổng hợp)

Các phương trình dạng tích phân — *Các phương trình dạng vi phân*

☞ Từ trường biến thiên theo thời gian sinh ra điện trường xoáy

$$\oint_{(C)} \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}.d\vec{S}$$

$$rot\vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$$

☞ Đường sức từ trường là đường khép kín (tính bảo toàn của từ thông)

$$\oint_S \vec{B}.d\vec{S} = 0$$

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

☞ Điện trường biến thiên theo thời gian sinh ra từ trường

$$\oint_C \vec{H}.d\vec{l} = \int_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$$

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

☞ Điện thông gửi qua mặt kín bất kỳ = tổng đại số đ/tích trong đó

$$\oint_S \vec{D}.d\vec{S} = \sum q = \int_V \rho dV$$

$$\vec{\nabla}.\vec{D} = div\vec{D} = \rho$$

1. Trường điện từ

Trường điện từ và năng lượng trường điện từ

☞ Từ trường biến đổi sinh ra điện trường (khép kín) và điện trường biến đổi cũng sinh ra từ trường

☞ Từ trường và điện trường đồng thời tồn tại, cũng như có mối liên hệ với nhau

} tạo thành một trường thống nhất gọi là *trường điện từ*

- Trường điện từ là một dạng vật chất đặc trưng cho tương tác giữa các hạt mang điện

☞ Năng lượng trường điện từ tồn tại và định xứ trong không gian có trường

- Mật độ năng lượng trường điện từ bằng tổng mật độ năng lượng của điện trường và từ trường:

$$w = w_E + w_M = \frac{1}{2}\left(\varepsilon\varepsilon_0 E^2 + \mu\mu_0 H^2\right) = \frac{1}{2}\left(ED + BH\right)$$

☞ Năng lượng trường điện từ:

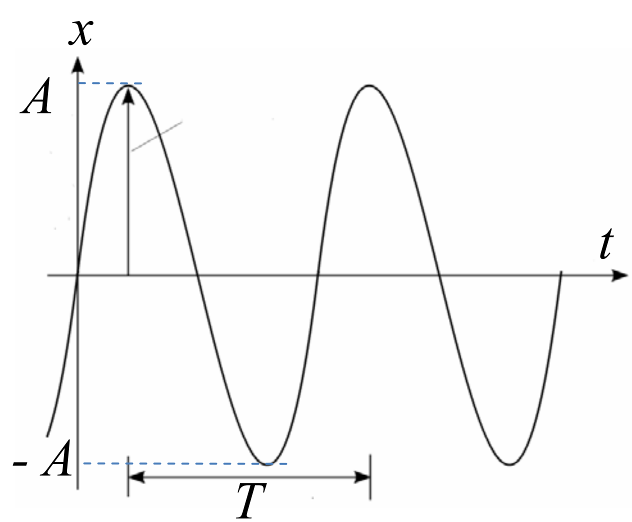
$$W = \int_V w dV = \frac{1}{2}\int_V \left(\varepsilon\varepsilon_0 E^2 + \mu\mu_0 H^2\right) dV = \frac{1}{2}\int_V \left(ED + BH\right) dV$$

2. Dao động điện từ

Dao động điện từ điều hòa

Dao động và các đặc trưng dao động

☞ Dao động: chuyển động có tọa độ biến thiên theo thời gian dưới dạng hàm sin hoặc cosin



$$x\,(t) = A.\cos(\omega_0 t + \varphi)$$

- *A:* biên độ đặc trưng phạm vi dao động;
- ω_0: tần số góc (rad/s); φ: pha ban đầu; $(\omega t + \varphi)$: pha
- φ: pha ban đầu; $(\omega t + \varphi)$: pha
- T: chu kỳ dao động, xác định khoảng thời gian lặp lại của dao động,

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

2. Dao động điện từ

Dao động điện từ điều hòa

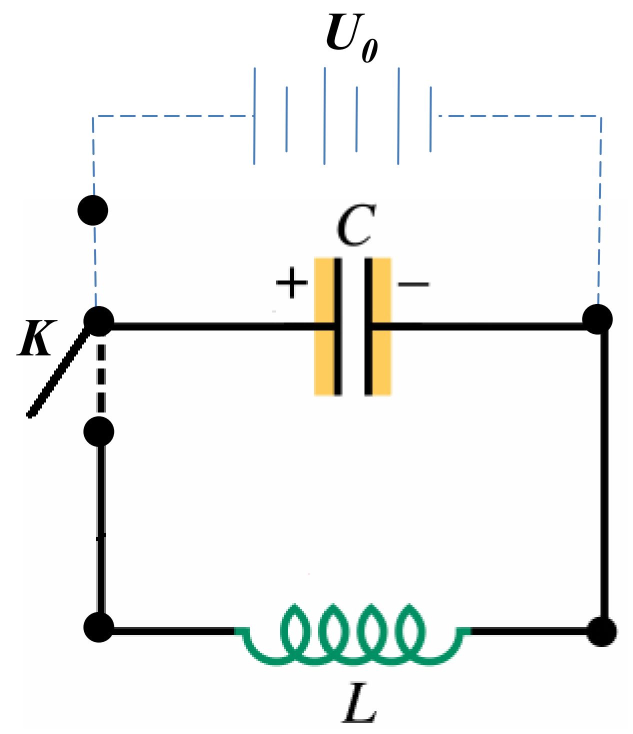
Dao động điện từ riêng mạch LC

☞ Mạch gồm cuộn dây L và tụ điện C

☞ Mạch được cung cấp năng lượng ban đầu bằng cách nạp điện cho tụ C

↳ có: $U_0 = \dfrac{q_0}{C}$

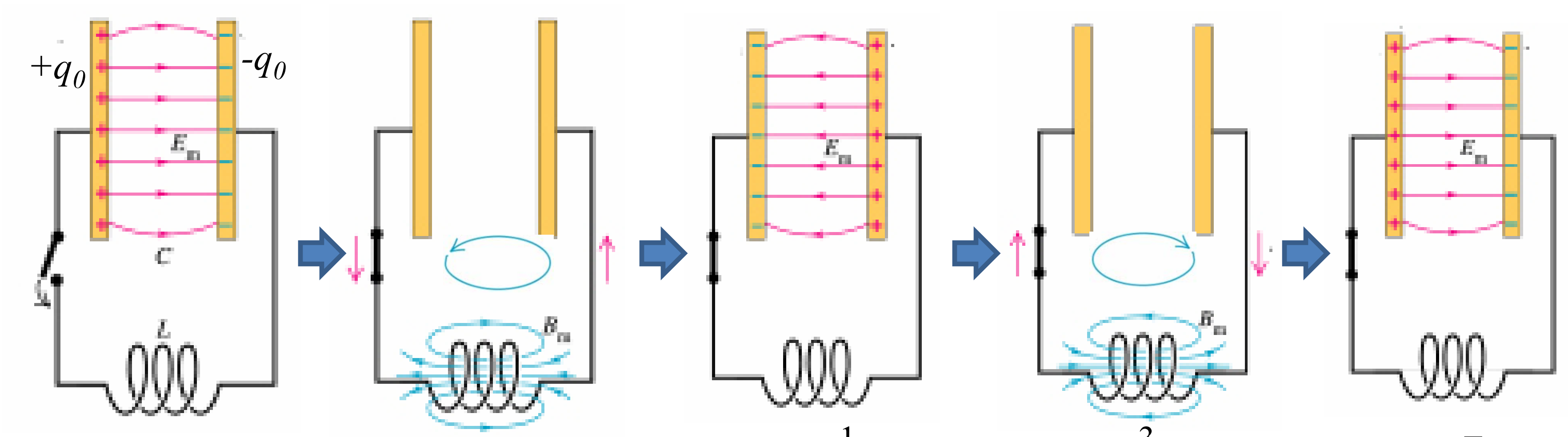
↳ Năng lượng của tụ: $W_0 = \dfrac{1}{2}\dfrac{q_0^2}{C}$



2. Dao động điện từ

Dao động điện từ điều hòa

Dao động điện từ riêng mạch LC



$t = 0$	$t = \frac{1}{4}T$	$t = \frac{1}{2}T$	$t = \frac{3}{4}T$	$t = T$
$W_e = \frac{1}{2}\frac{q_0^2}{C}$	$W_{m(\max)} = \frac{1}{2}LI_0^2$	$W_e = \frac{1}{2}\frac{q_0^2}{C}$	$W_{m(\max)} = \frac{1}{2}LI_0^2$	$W_e = \frac{1}{2}\frac{q_0^2}{C}$

2. Dao động điện từ

Dao động điện từ điều hòa

Phương trình dao động điện từ điều hòa

☞ Năng lượng toàn phần W của mạch dao động bảo toàn:

$$W = W_e + W_m = const$$

$$\Leftrightarrow \frac{q^2}{2C} + \frac{1}{2} L I^2 = const$$

Đạo hàm theo thời gian, có:

$$\frac{q}{C}\frac{dq}{dt} + LI\frac{dI}{dt} = 0$$

Vì: $\dfrac{dq}{dt} = I$ $\Rightarrow$ có: $\dfrac{dq}{dt}\left(\dfrac{q}{C} + L\dfrac{d^2q}{dt^2}\right) = 0$

$$\Rightarrow \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC} q = 0$$

2. Dao động điện từ

Dao động điện từ điều hòa

Phương trình dao động điện từ điều hòa

- Đặt: $\dfrac{1}{LC} = \omega_0^2$

  $\Rightarrow$ có: $\dfrac{d^2q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0$

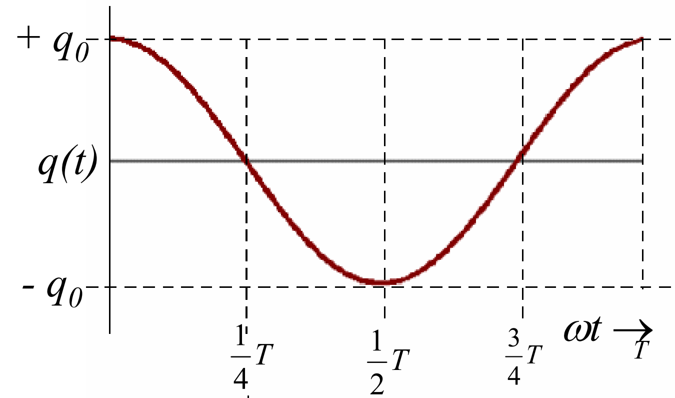
- Nghiệm: $q = q_0 cos(\omega_0 .t + \varphi)$

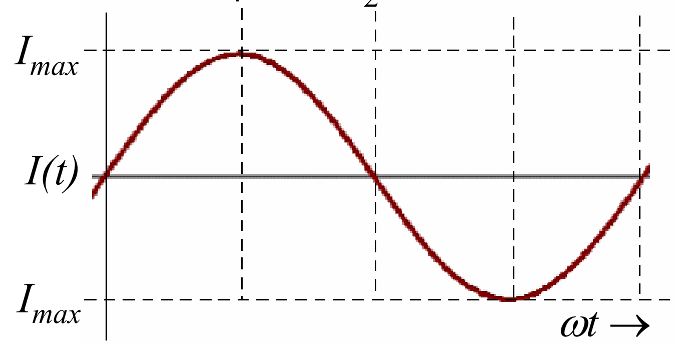
  Hoặc: $I = I_0 sin(\omega_0 .t + \varphi)$

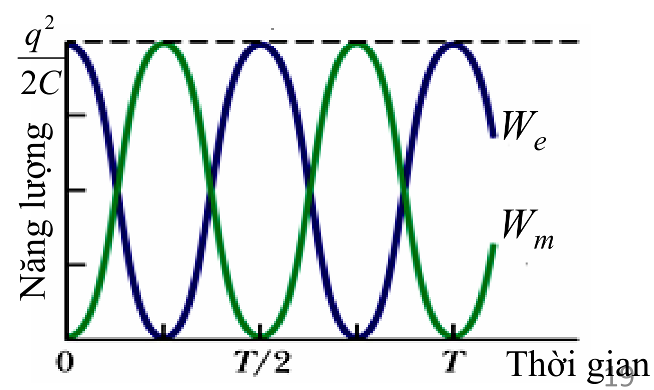
☞ Biến đổi năng lượng điện theo thời gian:

$$W_e = \frac{q^2(t)}{2C} = \frac{q_0^2}{2C}\cos^2(\omega_0 t + \varphi)$$

$$W_m = \frac{LI^2(t)}{2} = \frac{LI_0^2}{2}\sin^2(\omega_0 t + \varphi)$$



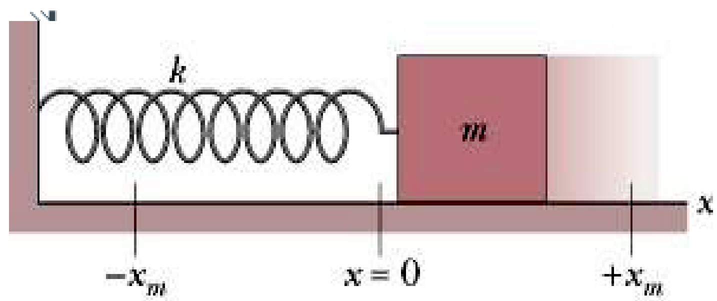


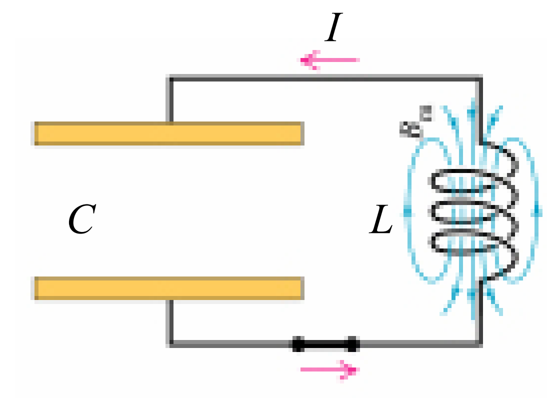


2. Dao động điện từ

Dao động điện từ điều hòa

So sánh dao động điện từ và dao động cơ điều hòa





- Năng lượng: $W = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = const$ $\qquad W = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} + \frac{1}{2}LI^2 = const$
- Phương trình dao động: $\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$ $\qquad \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0$
- Dạng dao động: $x(t) = x_0.cos(\omega_0.t + \varphi)$ $\qquad q(t) = q_0cos(\omega_0.t + \varphi)$

- Đại lượng vật lý: $x \Leftrightarrow q;\ k \Leftrightarrow 1/C;\ m \Leftrightarrow L;\ v \Leftrightarrow I;\ \omega_0^2 = \frac{k}{m} \Leftrightarrow \frac{1}{LC}$
- Năng lượng: $\frac{1}{2}kx^2 \Leftrightarrow \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}$ và $\frac{1}{2}mv^2 \Leftrightarrow \frac{1}{2}LI^2$

2. Dao động điện từ

Dao động điện từ tắt dần

Mạch dao động RLC

- Mạch gồm cuộn dây L và tụ điện C

- d không nối với a: Tụ C được tích điện

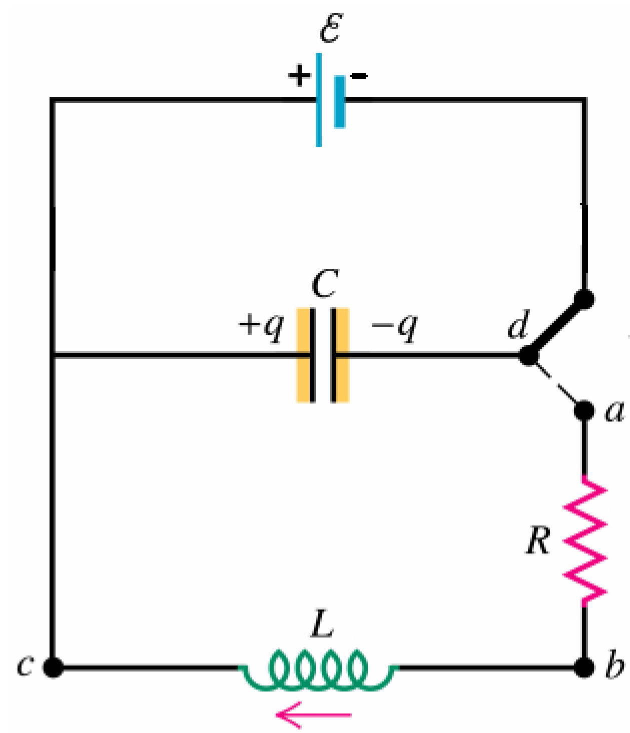
- d nối với a: Xảy ra quá trình chuyển hóa năng lượng điện trường trên C thành năng lượng từ trường trên L

- R chuyển một phần thành năng lượng nhiệt

- Năng lượng tỏa nhiệt trên R trong thời gian dt bằng độ giảm NL điện từ $-dW$ trong mạch, tức là:

$$-dW = R.I^2(t).dt$$

Hay: $$\frac{d}{dt}\left(\frac{q^2(t)}{2C}+\frac{1}{2}LI^2(t)\right)=-RI^2$$



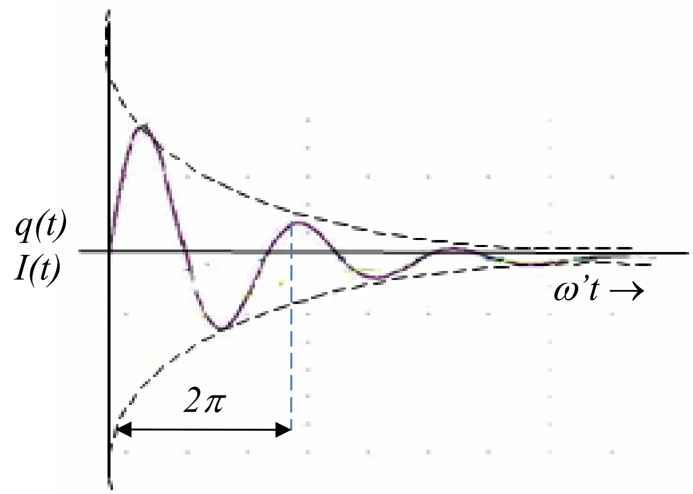
2. Dao động điện từ

Dao động điện từ tắt dần

Phương trình dao động mạch RLC

☞ Phương trình dao động:

$$\frac{d^2q(t)}{dt^2}+\frac{R}{L}\frac{dq}{dt}+\omega_0^2 q(t)=0 \text{ với: } \omega_0\equiv\sqrt{1/LC}$$



- Nghiệm: $q(t)=q_0 e^{-Rt/2L}\cos(\omega' t+\varphi)$
- hệ số $e^{-Rt/2L}$ là hàm suy giảm theo thời gian ⇒ dao động tắt dần
- tần số góc bị dịch đi $\omega'=\left[\omega_0^2-\left(\frac{R}{2L}\right)^2\right]^{1/2}$

Đặt $\beta\equiv\frac{R}{2L}$ = Hệ số tắt dần $\Rightarrow\ \omega'=\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}$ và $T'=\frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}}$

$\Rightarrow\ \omega'<\omega_0$ và $T'>T$

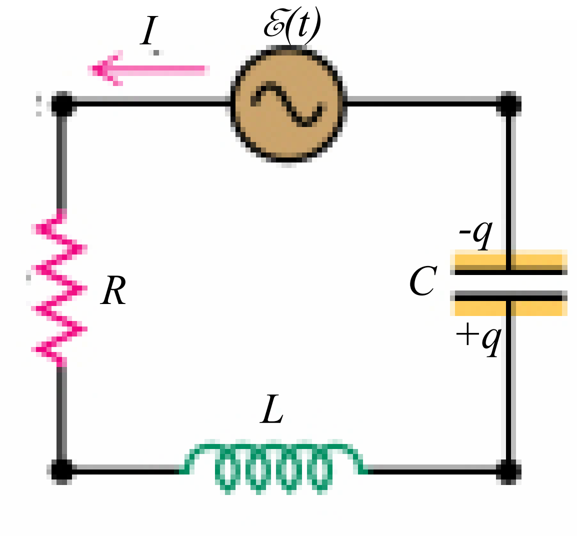
- Tỉ số giữa 2 biên độ kế tiếp $\delta=\ln\frac{I_0e^{-\beta t}}{I_0e^{-\beta(t+T)}}=\beta t$: giảm lượng loga

Nghĩa là, R càng lớn thì dao động tắt càng sớm

2. Dao động điện từ

Dao động điện từ cưỡng bức

Mạch dao động RLC được nuôi bằng nguồn xoay chiều



☞ Nguồn $\mathscr{E}(t)$: duy trì dao động không bị tắt dần

$$\mathscr{E}(t) = \mathscr{E}_0.\sin\Omega t$$

☞ Trong thời gian *dt*, nguồn $\mathscr{E}$ cung cấp cho mạch năng lượng = $\mathscr{E}.I.dt$ để bù đắp phần năng lượng tỏa nhiệt trên *R* và làm tăng NL điện từ *dW* trong mạch, tức là:

$$\mathscr{E}(t).I(t).dt = R.I^2(t).dt + dW$$

hay: $$\frac{d}{dt}\left(\frac{q^2(t)}{2C} + \frac{1}{2}LI^2(t)\right) + RI^2(t) = \mathscr{E}(t)I(t)$$

2. Dao động điện từ

Dao động điện từ cưỡng bức

Phương trình dao động điện từ cưỡng bức

- Có: $L\dfrac{dI}{dt} + RI + \dfrac{q}{C} = \mathcal{E}_0 sin\Omega t$

- Đạo hàm theo *t* : $\dfrac{d^2I}{dt^2} + 2\dfrac{R}{2L}\dfrac{dI}{dt} + \dfrac{1}{LC}I = \dfrac{\mathcal{E}_0\Omega}{L}cos\Omega t$

- Nghiệm: $I(t) = I_0.cos(\Omega t + \Phi)$

  với: $I_0 = \dfrac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{R^2 + (Z_L - Z_C)}}$ và: $\cot g\Phi = \dfrac{Z_L - Z_C}{R}$

- $Z_C = \dfrac{1}{\Omega C}$: dung kháng, và $Z_L = \Omega L$: cảm kháng

2. Dao động điện từ

Dao động điện từ cưỡng bức

Cộng hưởng điện từ mạch RLC

☞ Nhận thấy $I_0 = \dfrac{\mathscr{E}_0}{\sqrt{R^2 + (Z_L - Z_C)^2}} = \dfrac{\mathscr{E}_0}{\sqrt{Z}}$

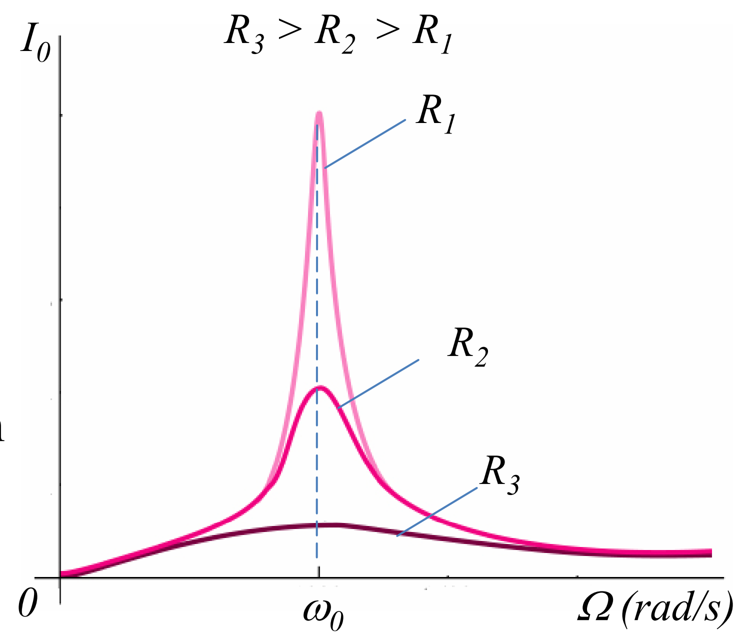
Biên độ dòng cưỡng bức phụ thuộc nguồn điện kích thích

Khi $\mathscr{E}_0$ và R cố định $\Rightarrow I_0$ max với $\sqrt{Z}$ min

Hay: $Z_L - Z_C = \Omega L - \dfrac{1}{\Omega C} = 0$

$\Leftrightarrow \Omega = \sqrt{\dfrac{1}{LC}} = \omega_0$: tần số riêng của mạch (LC)

$I_{0\max} = \dfrac{\mathscr{E}_0}{R}$



2. Dao động điện từ

Dao động điện từ cưỡng bức

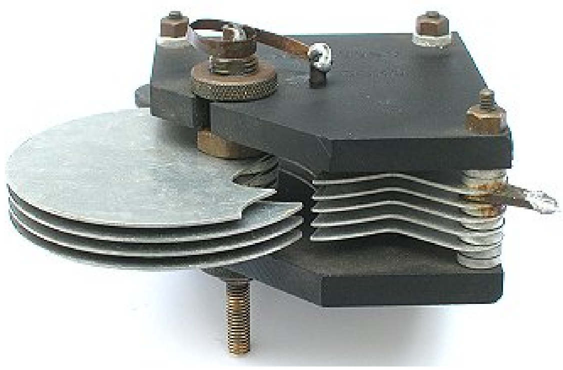
Cộng hưởng điện từ mạch RLC

- Để có cộng hưởng:
  - Điều chỉnh tần số nguồn kích thích
  - Thay đổi hệ số tự cảm hoặc điện dung

Ảnh hưởng hiện tượng cộng hưởng điện từ

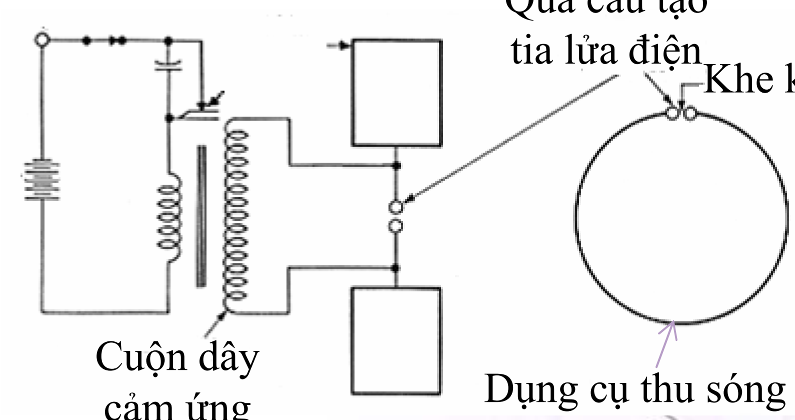
- Tác hại: R nhỏ ⇒ dễ xảy ra cộng hưởng ⇒ tổn thất NL càng lớn ($\sim I^2_{0max}$) ⇒ dây dẫn nóng lên ⇒ ảnh hưởng đến chất lượng mạch điện

- Tác dụng: làm tụ xoay cho các bộ khuếch đại trong mạch thu tín hiệu vô tuyến, mạch lọc tần số….

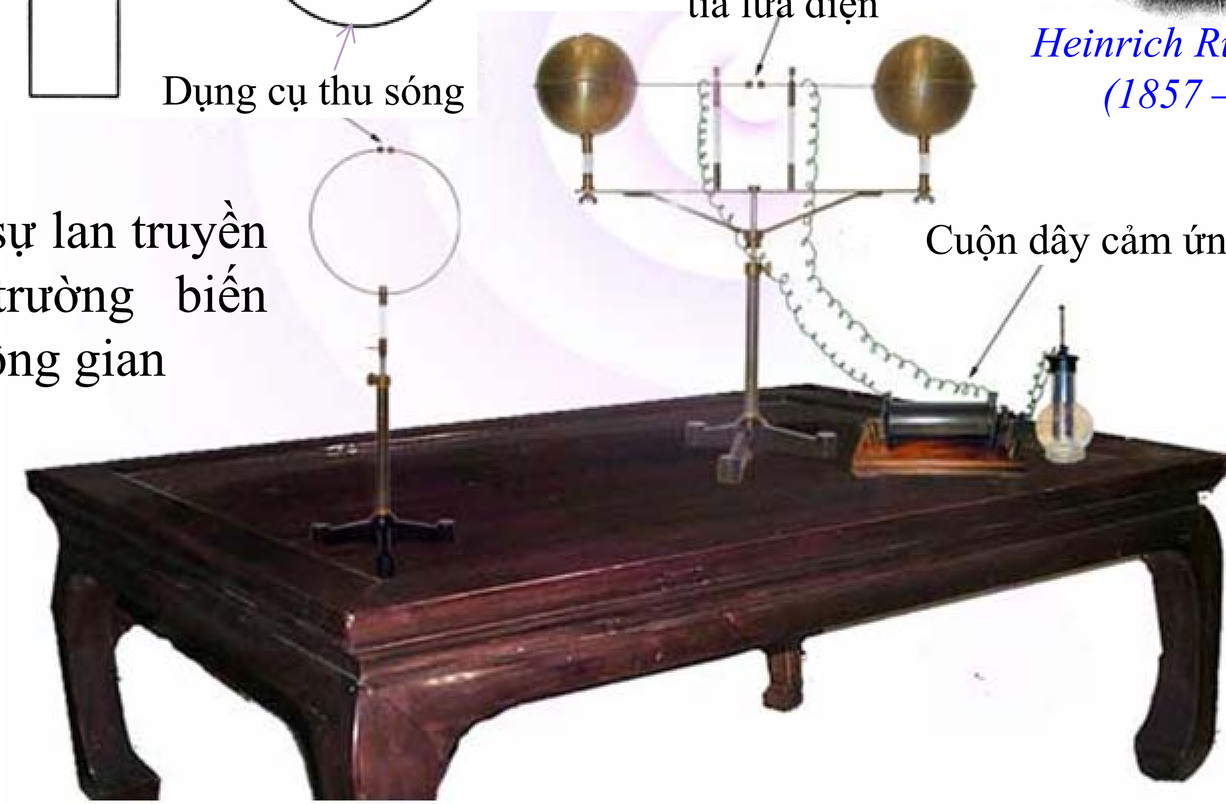


3. Sóng điện từ

Thí nghiệm Hertz về sự hình thành sóng điện từ



Heinrich Rudolf Hertz
(1857 – 1894)



Sóng điện từ: sự lan truyền của điện-từ trường biến thiên trong không gian

3. Sóng điện từ

Phương trình sóng điện từ

Hệ ph/tr Maxwell trong môi trường	Hệ ph/tr Maxwell trong chân không
$\begin{cases} rot\vec{E} = \vec{\nabla}\times\vec{E} = -\dfrac{\partial\vec{B}}{\partial t} \\ div\vec{D} = \vec{\nabla}.\vec{D} = \rho \end{cases}$ $\begin{cases} rot\vec{H} = \vec{\nabla}\times\vec{H} = \vec{J} + \dfrac{\partial\vec{D}}{\partial t} \\ div\vec{B} = \vec{\nabla}.\vec{B} = 0 \end{cases}$	$\begin{cases} \vec{\nabla}\times\vec{E} = -\dfrac{\partial\vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla}.\vec{D} = 0 \text{ hoặc } \vec{\nabla}.\vec{E} = 0 \end{cases}$ $\begin{cases} \vec{\nabla}\times\vec{H} = \dfrac{\partial\vec{D}}{\partial t} \\ \vec{\nabla}.\vec{B} = 0 \end{cases}$

☞ Lấy rot cả 2 vế, có: $\vec{\nabla}\times\vec{\nabla}\times\vec{E} = -\vec{\nabla}\times\dfrac{\partial\vec{B}}{\partial t} = -\dfrac{\partial}{\partial t}\left(\vec{\nabla}\times\vec{B}\right)$

☞ Áp dụng tính chất tích vector: $\vec{a}\times\vec{b}\times\vec{c} = \vec{b}(\vec{a}.\vec{c}) - \vec{c}(\vec{a}.\vec{b}) = \vec{b}(\vec{a}.\vec{c}) - (\vec{a}.\vec{b})\vec{c}$

$$\left.\begin{array}{l} \text{Có VT} = \vec{\nabla}\times\vec{\nabla}\times\vec{E} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla}.\vec{E}) - (\vec{\nabla}.\vec{\nabla})\vec{E} = -\vec{\nabla}^2\vec{E} \\ \text{Và VP} = -\vec{\nabla}\times\dfrac{\partial\vec{B}}{\partial t} = -\dfrac{\partial}{\partial t}\left(\vec{\nabla}\times\vec{B}\right) = -\mu_0\dfrac{\partial}{\partial t}\left(\vec{\nabla}\times\vec{H}\right) = -\mu_0\dfrac{\partial^2\vec{D}}{\partial t^2} = -\mu_0\varepsilon_0\dfrac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \end{array}\right\} \vec{\nabla}^2\vec{E} = \mu_0\varepsilon_0\dfrac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}$$

☞ Phương trình truyền của điện trường trong chân không:

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

Tương tự

☞ phương trình truyền của từ trường trong chân không:

$$\boxed{\vec{\nabla}^2\vec{B} - \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2} = 0}$$

3. Sóng điện từ

Tính chất sóng điện từ

Nhận thấy:

$$\frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{4\pi.10^{-7}\dfrac{1}{4\pi.9.10^{-9}}}} = \frac{1}{\sqrt{\dfrac{1}{9.10^{-16}}}} = 3.10^{8}\ m/s = c$$ là vận tốc ánh sáng

Phương trình sóng điện từ trong môi trường:
$$\begin{cases} \vec{\nabla}^2\vec{E} - \dfrac{1}{v^2}\dfrac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = 0 \\ \vec{\nabla}^2\vec{B} - \dfrac{1}{v^2}\dfrac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2} = 0 \end{cases}$$

Với: $v = \dfrac{1}{\sqrt{\mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0}} = \dfrac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} =$ vận tốc truyền sóng điện từ trong môi trường

ở đây: $n = \sqrt{\varepsilon\mu} =$ chiết suất môi trường truyền sóng

Sóng điện từ:
- *Tồn tại trong cả chân không và môi trường đồng nhất*
- *Giống ánh sáng*

3. Sóng điện từ

Tính chất sóng điện từ

☞ Xét sóng chỉ truyền theo 1 phương không gian ⇔ bài toán một chiều

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} - \dfrac{1}{v^2}\dfrac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \\ \dfrac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} - \dfrac{1}{v^2}\dfrac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \end{cases}$$

Nghiệm: $\begin{cases} E = E_m.\cos\omega\left(t - \dfrac{x}{v}\right) \\ B = B_m.\cos\omega\left(t - \dfrac{x}{v}\right) \end{cases} \overset{x=0}{\Rightarrow} \begin{cases} E = E_0.\cos\omega t \\ B = B_0.\cos\omega t \end{cases}$

$\Rightarrow \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\left|\vec{E}\right| = \sqrt{\mu\mu_0}\left|\vec{H}\right|$: $\vec{E}$ và $\vec{B}$ *luôn dao động cùng pha*

3. Sóng điện từ

Tính chất sóng điện từ

☞ Trong chân không:

$$\begin{cases} \vec{\nabla}.\vec{E} = \dfrac{\partial E_x}{\partial x} + \dfrac{\partial E_y}{\partial y} + \dfrac{\partial E_z}{\partial z} = 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} = \varepsilon_0 \dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{cases}$$

☞ Khi là sóng phẳng, có: $\dfrac{\partial E_x}{\partial x} = 0$

và: $\varepsilon_0 \dfrac{\partial E_x}{\partial t} = \dfrac{\partial H_z}{\partial y} - \dfrac{\partial H_y}{\partial z} = 0$

$\Rightarrow E_x = \text{const}$

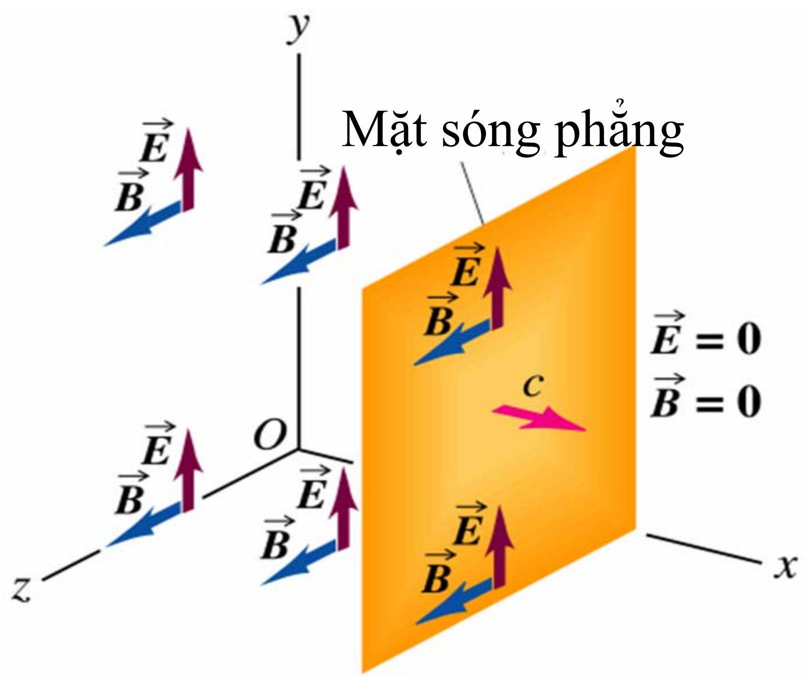
Hay: $\vec{E} \perp$ phương truyền x

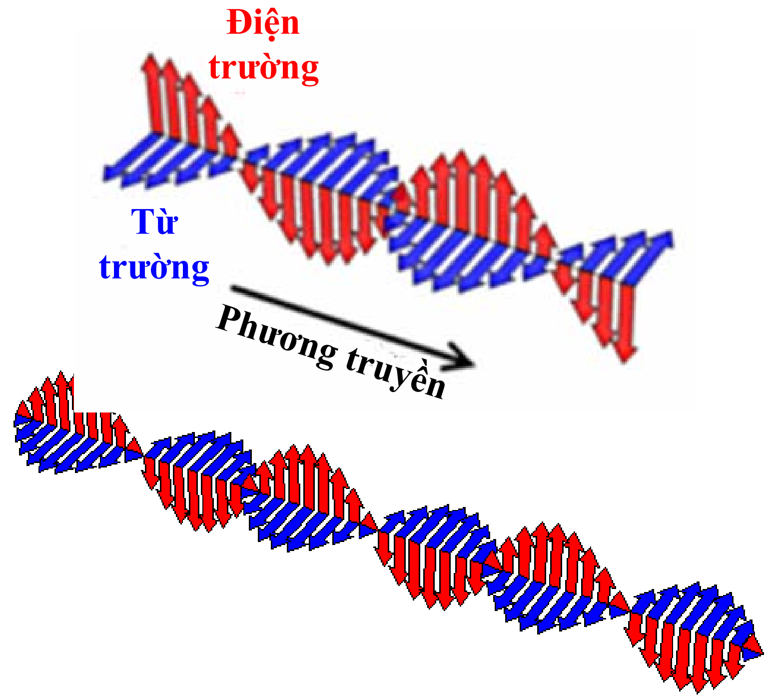
Tương tự: $\vec{B} \perp$ phương truyền x

3. Sóng điện từ

Tính chất sóng điện từ

- *Sóng điện từ là sóng phẳng (khi ở xa nguồn phát)*





- *Sóng điện từ là sóng ngang, có $\vec{E}$ và $\vec{H}$ vuông góc nhau và với phương truyền sóng (đặc trưng bởi vector vận tốc $\vec{v}$) $\Rightarrow \vec{E}, \vec{H}$ và $\vec{v}$ lập thành tam diện*

- $\vec{E}$ và $\vec{H}$ dao động cùng pha $\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\left|\vec{E}\right| = \sqrt{\mu\mu_0}\left|\vec{H}\right|$

3. Sóng điện từ

Năng lượng sóng điện từ

- Mật độ năng lượng điện trường: $w_E = \frac{1}{2}\varepsilon\varepsilon_0 E^2$
- Mật độ năng lượng từ trường: $w_B = \frac{1}{2}\mu\mu_0 H^2$
- Mật độ năng lượng trường điện từ:

$$w = w_E + w_B = \frac{1}{2}\varepsilon\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\mu\mu_0 H^2$$

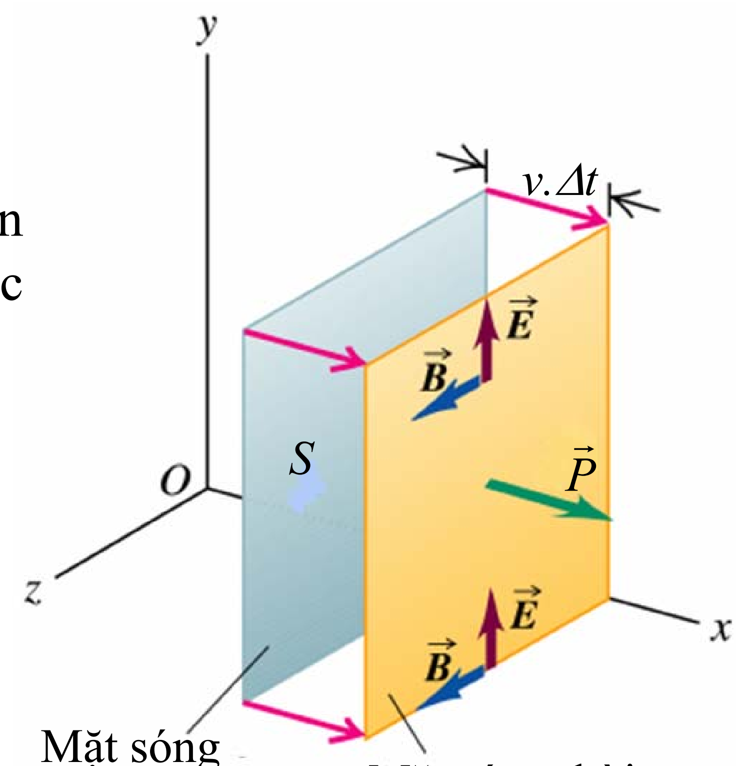
- Sóng điện từ có: $\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\left|\vec{E}\right| = \sqrt{\mu\mu_0}\left|\vec{H}\right|$
- Mật độ năng lượng sóng điện từ:

$$w = \frac{1}{2}\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}E.\sqrt{\mu\mu_0}H + \frac{1}{2}\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}E.\sqrt{\mu\mu_0}H = \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\sqrt{\mu\mu_0}E.H$$

3. Sóng điện từ

Năng thông sóng điện từ

☞ Khái niệm: năng lượng sóng truyền (vận tốc v) qua một đơn vị diện tích vuông góc phương truyền trong một đơn vị thời gian,



Mặt sóng thời điểm t

Mặt sóng thời điểm $t+\Delta t$

$$P = \frac{w.\Delta V}{S.\Delta t} = \frac{w.v.S.\Delta t}{S.\Delta t} = w.v =$$

$$= \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\sqrt{\mu\mu_0}E.H.\frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}} = EH$$

$$\vec{P} = \vec{E} \wedge \vec{H}$$

☞ Cường độ sóng điện từ: đại lượng về trị số bằng giá trị trung bình theo thời gian của mật độ năng thông tại 1 điểm với tốc độ truyền sóng.

$$J = \overline{w}v$$

3. Sóng điện từ

Năng thông sóng điện từ

☞ Sóng điện từ là sóng phẳng đơn sắc: $w = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 = \varepsilon\varepsilon_0 E_m^2 \cos^2\omega\left(t - \frac{y}{v}\right) =$

$$= \mu\mu_0 H^2 = \mu\mu_0 H_m^2 \cos^2\omega\left(t - \frac{y}{v}\right) =$$

$$= E.H = E_m H_m \cos^2\omega\left(t - \frac{y}{v}\right)$$

Vì giá trị TB của: $\cos^2\omega\left(t - \frac{y}{v}\right) = \frac{1}{2} \Rightarrow \overline{w} = \frac{1}{2}\varepsilon\varepsilon_0 E_m^2 = \frac{1}{2}\mu\mu_0 H_m^2 = \frac{1}{2}E_m H_m$

$$\Rightarrow \mathcal{J} = \frac{1}{2}\varepsilon\varepsilon_0 E_m^2 . v = \frac{1}{2}\varepsilon\varepsilon_0 E_m^2 . \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}}$$

☞ $$\begin{cases} \mathcal{J} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} E_m^2 \\ \mathcal{J} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}} H_m^2 \end{cases}$$

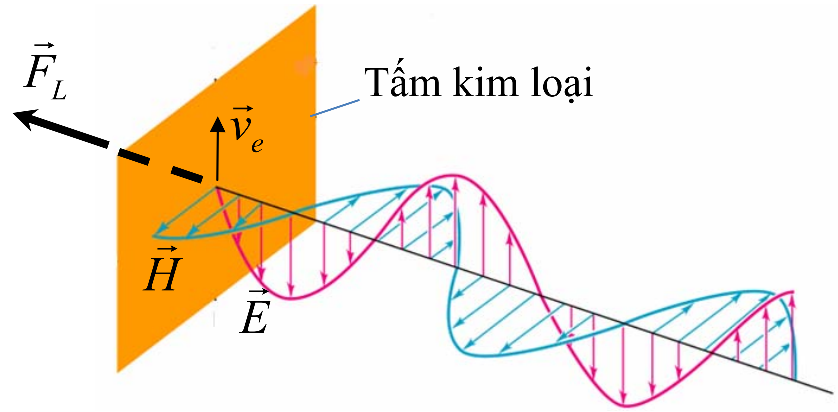
(E_m và H_m là biên độ của cường độ điện trường và từ trường)

3. Sóng điện từ

Áp suất sóng điện từ

☞ Sóng điện từ tới đập vào một tấm chắn kim loại vuông góc phương truyền

$\Rightarrow \vec{E}$ tạo ra dòng chuyển dời các điện tích (e) có vận tốc v_e



- $\vec{H}$ tác dụng lên e lực F_L

- Tác dụng áp suất p lên mặt tấm kim loại:

$$p = (1 + R)\overline{w}$$

(R: hệ số phản xạ của mặt KL)

- $R=1 \Rightarrow \quad p = 2\overline{w}$
- $R=0 \Rightarrow \quad p = \overline{w}$

$$\overline{w} \leq p \leq 2\overline{w}$$

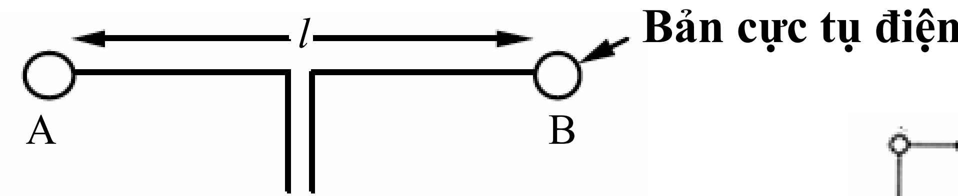
3. Sóng điện từ

Bức xạ lưỡng cực điện (dipole antenna)

Lưỡng cực dao động nguyên tố (element doublet)

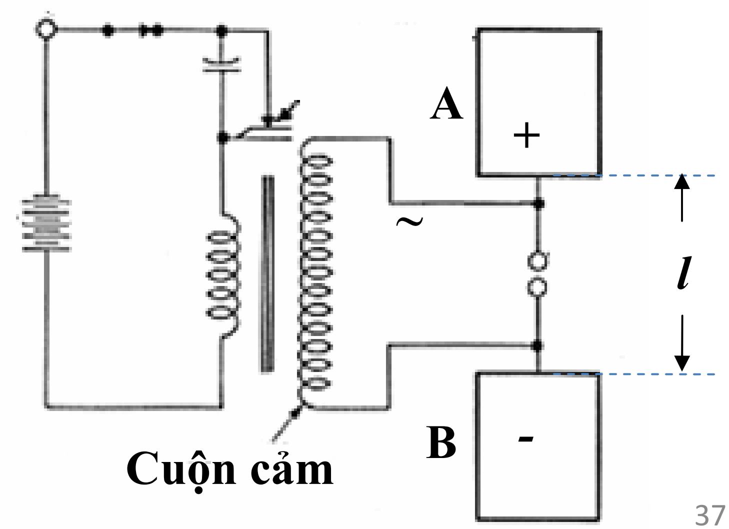
☞ Bao gồm 2 điện cực làm bằng vật dẫn cách nhau một khoảng

l << bước sóng λ



Bức xạ điện từ của lưỡng cực

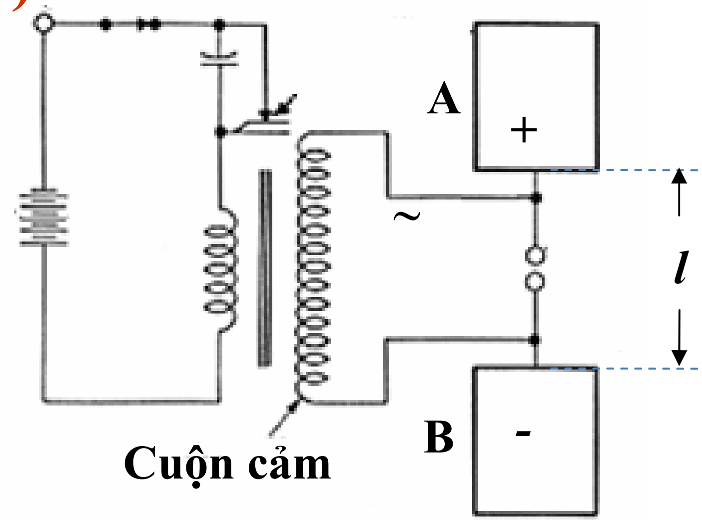
☞ Nguồn dao động điều hòa



3. Sóng điện từ

Bức xạ lưỡng cực điện (dipole antenna)

Bức xạ điện từ của lưỡng cực



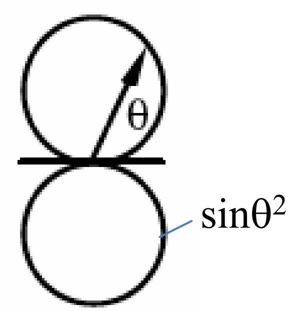
- Điện tích trên 2 bản cực biến thiên tuần hoàn: $q = q_0.sin\omega t$

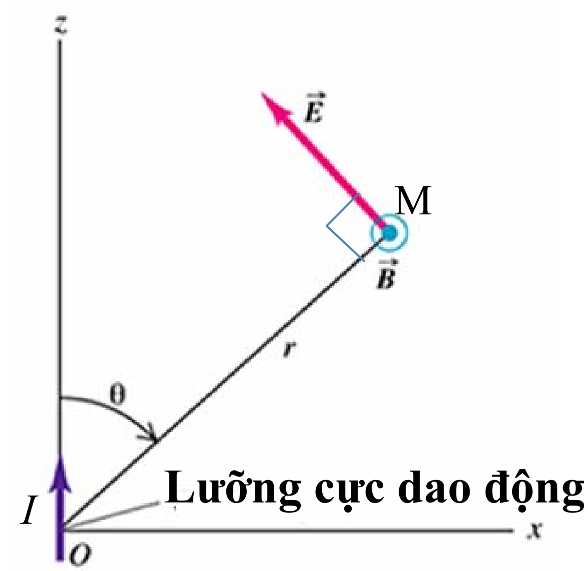
$$p = ql = q_0.l.\sin \omega t = p_0 \sin \omega t$$

$$\begin{cases} E = E_m.\sin \omega\left(t - \dfrac{r}{v}\right) = \dfrac{a}{r}\sin\theta \sin\omega\left(t - \dfrac{r}{v}\right) \\ B = B_m.\sin \omega\left(t - \dfrac{r}{v}\right) = \dfrac{b}{r}\sin\theta \sin\omega\left(t - \dfrac{r}{v}\right) \end{cases}$$

- Cường độ sóng điện từ tại M:

$$J = K\frac{\omega^4 \sin\theta^2}{r^2}$$



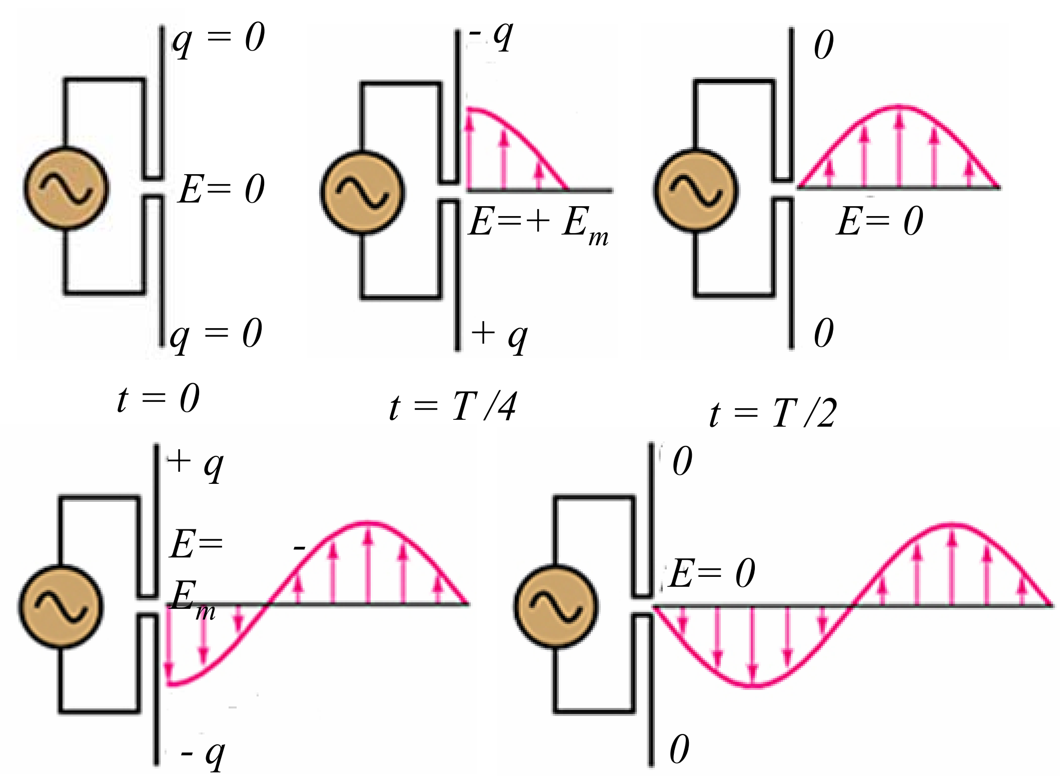


3. Sóng điện từ

Bức xạ lưỡng cực điện (dipole antenna)

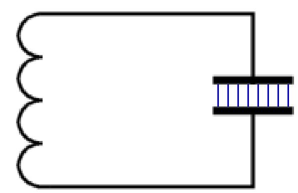
Bức xạ điện từ của lưỡng cực

☞ Một chu kỳ dao động của lưỡng cực điện tạo ra sóng điện từ



$t = 0$ $t = T/4$ $t = T/2$ $t = 3T/4$ $t = T$

☞ Đường sức điện trường và từ trường của sóng điện từ gây bởi lưỡng cực điện



3. Sóng điện từ

Phân loại sóng điện từ

☞ Sóng điện từ được phát bởi 1 nguồn xoay chiều có tần số ω và vận tốc truyền trong môi trường $v \Rightarrow$ bước sóng được xác định: $\lambda = v.T$

Ứng với mỗi λ và $\omega \Rightarrow$ có một sóng xác định $\Leftrightarrow$ *sóng đơn sắc*

Vì: $v = \dfrac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \dfrac{c}{n} \Rightarrow \lambda = \dfrac{c.T}{n} = \dfrac{\lambda_0}{n}$ (λ_0 bước sóng điện từ trong chân không)

☞ Phân loại sóng điện từ theo bước sóng λ (m)