

## CHƯƠNG 2. SÓNG ĐIỆN TỪ

Giảng viên: Nguyễn Đức Cường

Trường Đại học Công nghệ - ĐHQGHN

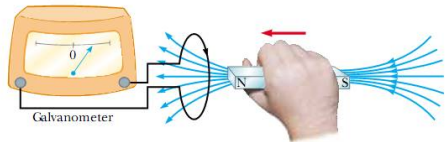
*Email: cuongnd@vnu.edu.vn*

Ngày 23 tháng 5 năm 2022

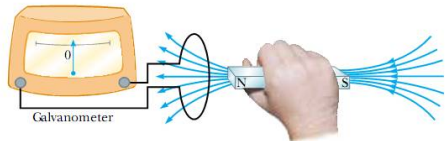
- 1 HIỆN TƯỢNG CẢM ỨNG ĐIỆN TỪ. ĐỊNH LUẬT LENZ. ĐỊNH LUẬT FARADAY
- 2 TỰ CẢM. HỖ CẢM
- 3 HỆ PHƯƠNG TRÌNH MAXWELL. TRƯỜNG ĐIỆN TỪ
- 4 SÓNG ĐIỆN TỪ

## 2.1. Hiện tượng cảm ứng điện từ. Định luật Lenz. Định luật Faraday

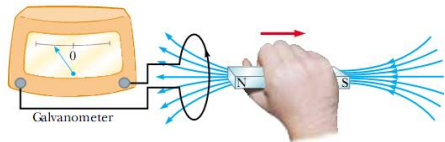
### 2.1.1. Hiện tượng cảm ứng điện từ



(a)



(b)



(c)

- Khi có chuyển động tương đối giữa nam châm và vòng dây, trong vòng dây xuất hiện dòng điện cảm ứng sao cho từ trường do nó sinh ra ngược hướng với từ trường của nam châm.
- Suất điện động gây ra dòng điện cảm ứng trên gọi là suất điện động cảm ứng.

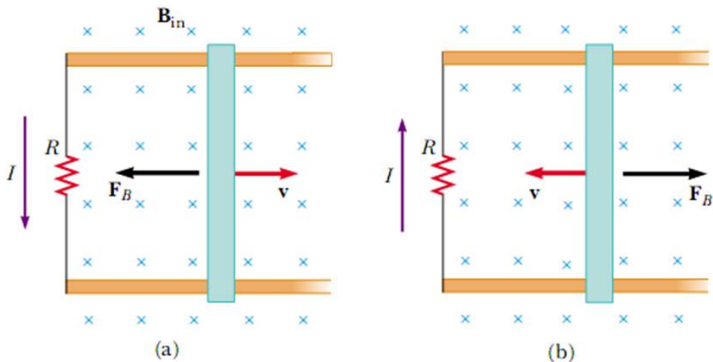
## 2.1. Hiện tượng cảm ứng điện từ. Định luật Lenz. Định luật Faraday

### 2.1.1. Hiện tượng cảm ứng điện từ

- Sự biến thiên của từ thông gửi qua mạch kín là nguyên nhân sinh ra dòng điện cảm ứng trong mạch kín đó.
- Dòng điện cảm ứng chỉ xuất hiện trong thời gian từ thông qua mạch kín thay đổi.
- Cường độ dòng điện cảm ứng tỷ lệ thuận với tốc độ biến thiên của từ thông gửi qua mạch.
- Chiều của dòng cảm ứng phụ thuộc từ thông tăng hay giảm.

## 2.1. Hiện tượng cảm ứng điện từ. Định luật Lenz. Định luật Faraday

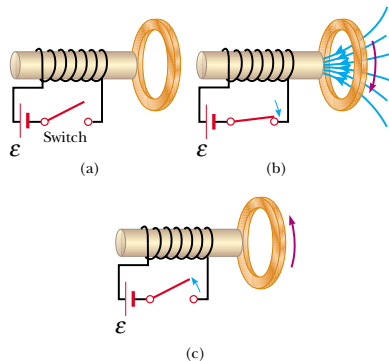
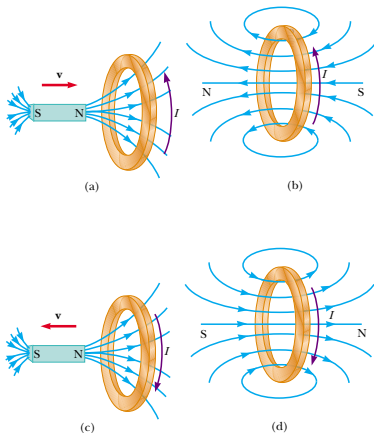
### 2.1.2. Định luật Lenz



- Suất điện động cảm ứng xuất hiện trong mạch kín có chiều sao cho nó tạo ra một dòng điện có từ thông chống lại sự thay đổi của từ thông xuyên qua mạch kín chứa dòng điện đó.

## 2.1. Hiện tượng cảm ứng điện từ. Định luật Lenz. Định luật Faraday

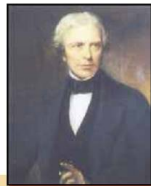
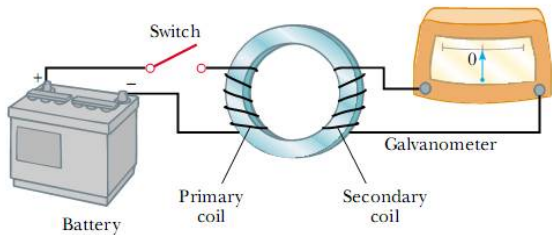
### 2.1.2. Định luật Lenz



Xem thêm: Ring Jump Demonstration

## 2.1. Hiện tượng cảm ứng điện từ. Định luật Lenz. Định luật Faraday

### 2.1.3. Định luật Faraday



Michael Faraday (1791–1867)

- Khi khóa đóng, trong cuộn dây thứ 2 cũng xuất hiện một suất điện động cảm ứng, do sự thay đổi của từ trường được truyền hoàn toàn qua vòng xuyên.
- Suất điện động cảm ứng:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

trong đó  $\Phi_B$  là từ thông xuyên qua vòng dây.

## 2.1. Hiện tượng cảm ứng điện từ. Định luật Lenz. Định luật Faraday

### 2.1.4. Suất điện động cảm ứng và điện trường

- Một điện trường xuất hiện trong vật dẫn do sự thay đổi của từ thông.

$$q\mathcal{E} = qE(2\pi r)$$

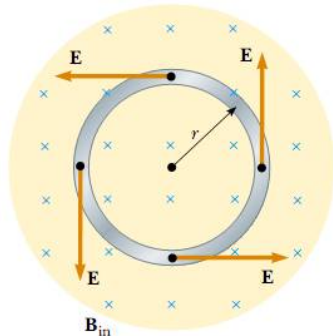
$$E = \frac{\mathcal{E}}{2\pi r}$$

$$\Phi_B = BA = \pi r^2 B \text{ đối với vòng dây tròn}$$

$$\rightarrow E = -\frac{1}{2\pi r} \frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{r}{2} \frac{dB}{dt}$$

- Trường hợp tổng quát với vòng dây kín bất kì:

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$





## 2.1. Hiện tượng cảm ứng điện từ. Định luật Lenz. Định luật Faraday

### 2.1.4. Suất điện động cảm ứng và điện trường

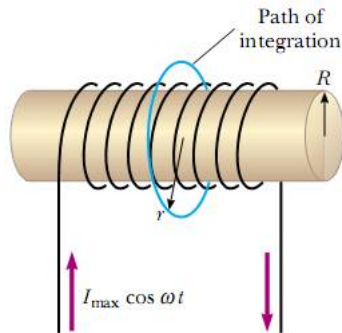
Ví dụ 1: Một dòng điện  $I = I_0 \cos \omega t$  chạy qua một cuộn dây solenoid bán kính  $R$  có  $n$  vòng dây trên một đơn vị chiều dài. Xác định cường độ điện trường cảm ứng ở khoảng cách  $r > R$  tính từ trục đối xứng của cuộn dây.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = E(2\pi r) = -\frac{d}{dt}(B\pi R^2) = -\pi R^2 \frac{dB}{dt}$$

Thay  $B = \mu_0 n I$  và  $I = I_0 \cos \omega t$  ta có:

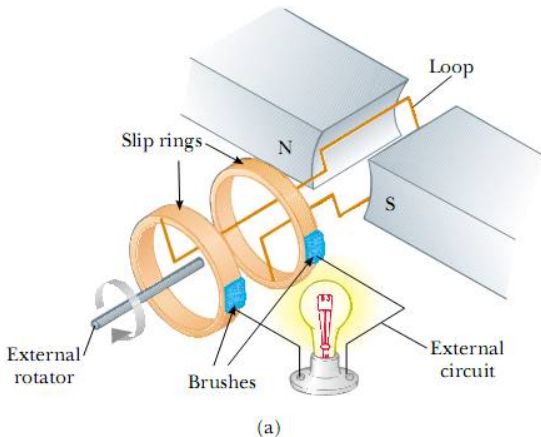
$$E(2\pi r) = -\pi R^2 \mu_0 n I_0 \frac{d}{dt}(\cos \omega t) = \pi R^2 \mu_0 n I_0 \omega \sin \omega t$$

$$E = \frac{\mu_0 n I_0 \omega R^2}{2r} \sin \omega t, \text{ với } r > R$$



## 2.1. Hiện tượng cảm ứng điện từ. Định luật Lenz. Định luật Faraday

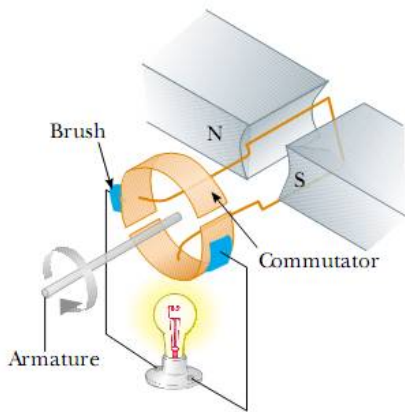
### 2.1.5. Ứng dụng: máy phát điện và động cơ điện



Mô hình máy phát điện xoay chiều

## 2.1. Hiện tượng cảm ứng điện từ. Định luật Lenz. Định luật Faraday

### 2.1.5. Ứng dụng: máy phát điện và động cơ điện



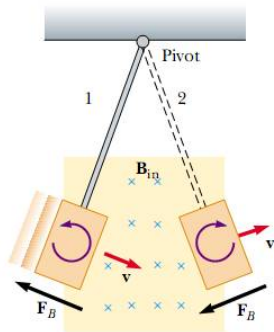
(a)

(b)

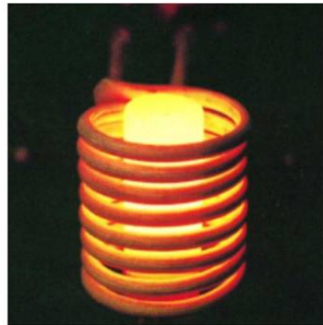
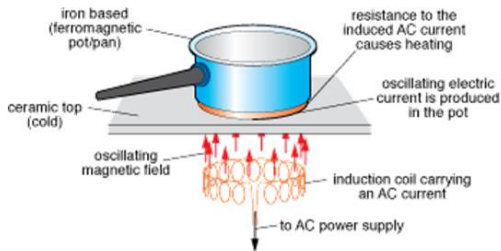
Mô hình máy phát điện một chiều

## 2.1. Hiện tượng cảm ứng điện từ. Định luật Lenz. Định luật Faraday

### 2.1.6. Ứng dụng: dòng Foucault (Fu-cô) và đốt nóng bằng cảm ứng (IH)



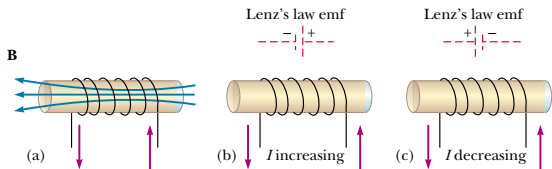
Dòng điện Foucault



Dòng điện cao tần gây ra dòng điện cảm ứng cường độ lớn trong vật cần đốt nóng. Suất điện động cảm ứng  $\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s}$  (và dòng điện trong vật cần đốt nóng) tỉ lệ thuận với tần số  $\omega$  của dòng cao tần (xem ▶ Ví dụ 1, mục 2.1.4).

## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

### 2.2.1. Hiện tượng tự cảm



Joseph Henry (1797-1878)

- Hiện tượng xuất hiện suất điện động cảm ứng ngay trong mạch điện do sự thay đổi của cường độ dòng điện trong chính mạch đó.
- Suất điện động cảm ứng  $\mathcal{E}_L$  luôn ngược hướng với suất điện động của nguồn ngoài và tỉ lệ thuận với tốc độ thay đổi dòng điện do nguồn ngoài cung cấp.

$$\mathcal{E}_L = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

$L = N\Phi_B/I$  là hệ số tự cảm của cuộn dây, phụ thuộc vào dạng hình học của nó và một số đặc trưng vật lý khác. Đơn vị là H ( $1 \text{ H} = 1 \text{ (V.s)/A}$ )

## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

### 2.2.1. Hiện tượng tự cảm

Ví dụ: Tìm hệ số tự cảm của cuộn dây solenoid có  $N$  vòng dây và chiều dài  $\ell$ . Coi chiều dài  $\ell$  của cuộn dây lớn hơn nhiều bán kính của nó và vùng không gian trong ống là không khí.

$$\text{Từ trường của ống dây: } B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{\ell} I$$

trong đó  $n = N/\ell$  là số lượng vòng dây trên một đơn vị chiều dài.

$$\text{Từ thông xuyên qua từng vòng dây: } \Phi_B = BA = \mu_0 \frac{NA}{\ell} I$$

trong đó  $A$  là diện tích cắt ngang của vòng dây. Độ tự cảm của cuộn dây:

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell}$$

$$\text{Vì } N = n\ell \text{ nên: } L = \frac{\mu_0 (n\ell)^2}{\ell} A = \mu_0 n^2 A \ell = \mu_0 n^2 V$$

với  $V = A\ell$  là thể tích của cuộn dây solenoid.

## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

### 2.2.2. Mạch $RL$

Suất điện động cảm ứng:

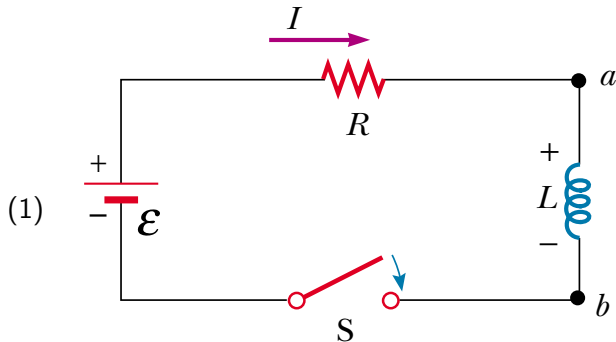
$$\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt}$$

Áp dụng định luật Kirchhoff II:

$$\mathcal{E} - IR - L \frac{dI}{dt} = 0$$

Đổi biến:  $x = \mathcal{E}/R - I$

$$x + \frac{L}{R} \frac{dx}{dt} = 0 \rightarrow \frac{dx}{x} = -\frac{R}{L} dt$$



## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

### 2.2.2. Mạch $RL$

$$\text{Tích phân 2 vế: } \ln \frac{x}{x_0} = -\frac{R}{L}t$$

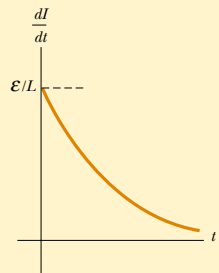
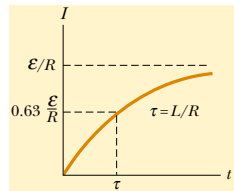
$x_0$  là giá trị của  $x$  khi  $t = 0 \rightarrow x = x_0 e^{-Rt/L}$ .  $I = 0$  khi  $t = 0$  và  $x_0 = \mathcal{E}/R$

$$\frac{\mathcal{E}}{R} - I = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-Rt/L}$$

$$\rightarrow I = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-Rt/L}) \text{ hoặc } I = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-t/\tau})$$

với  $\tau = L/R$  là hằng số thời gian của mạch  $RL$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{L} e^{-t/\tau}$$





## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

### 2.2.3. Năng lượng từ trường

Nhân cả 2 vế phương trình (1) với  $I$ :  $I\mathcal{E} - I^2R - LI\frac{dI}{dt} = 0$

Trong đó  $I\mathcal{E}$  là tốc độ cung cấp năng lượng bởi nguồn,  $dU_R/dt = I^2R$  là tốc độ năng lượng tiêu tán trên điện trở. Tốc độ dự trữ năng lượng trong cuộn cảm:

$$\frac{dU_L}{dt} = LI\frac{dI}{dt} = \frac{1}{2}\frac{d}{dt}(LI^2)$$

với  $U_L = \frac{1}{2}LI^2$  là năng lượng dự trữ trong cuộn cảm.

Xét một cuộn dây solenoid với độ tự cảm  $L = \mu_0 n^2 A\ell$  và cảm ứng từ  $B = \mu_0 nI$

$$U_L = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\mu_0 n^2 A\ell \left(\frac{B}{\mu_0 n}\right)^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} A\ell$$

Mật độ năng lượng từ trường:

$$u_B = \frac{U_L}{A\ell} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

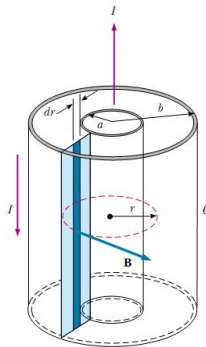
## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

### Ví dụ: Cáp đồng trục

Một đoạn cáp đồng trục bao gồm hai hình trụ bằng vật dẫn đồng tâm có bán kính trong là  $a$ , bán kính ngoài là  $b$  và chiều dài  $\ell$ . Vỏ trong và vỏ ngoài cùng dẫn dòng điện  $I$  nhưng ngược chiều nhau. Hãy tính hệ số tự cảm của đoạn cáp và năng lượng từ trường dự trữ trong nó.

Cảm ứng từ trong vùng giữa hai vỏ ( $a < r < b$ ):

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, r \text{ là khoảng cách tính từ trục}$$



Cảm ứng từ tại vùng  $r < a$  và  $r > b$  bằng không, do  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \Sigma I = 0$ . Véc-tơ cảm ứng từ vuông góc với mặt phẳng màu xanh, vì vậy từ thông tổng cộng là:

$$\Phi_B = \int B dA = \int_a^b \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \ell dr = \frac{\mu_0 I \ell}{2\pi} \int_a^b \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 I \ell}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

### Ví dụ: Cáp đồng trục

Từ đó, hệ số tự cảm của đoạn cáp là:

$$L = \frac{\Phi_B}{I} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \ln \left( \frac{b}{a} \right)$$

Năng lượng dự trữ trong đoạn cáp:

$$U_L = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{\mu_0 \ell I^2}{4\pi} \ln \left( \frac{b}{a} \right)$$

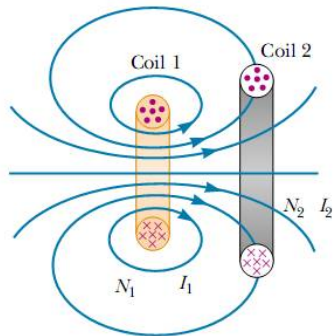
## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

### 2.2.4. Hiện tượng hồ cảm

- Hiện tượng xảy ra khi sự thay đổi dòng điện của một mạch kín gây ra sự thay đổi từ thông xuyên qua một mạch kín khác gần đó.
- Dòng điện  $I_1$  trong cuộn dây 1 với  $N_1$  vòng gây ra một từ thông, với một phần xuyên qua cuộn dây thứ 2 có  $N_2$  vòng. Phần từ thông đó gọi là  $\Phi_{21}$ . Hệ số hồ cảm  $M_{12}$  của cuộn 2 đối với cuộn 1 là:

$$M_{12} = \frac{N_2 \Phi_{12}}{I_1}$$

- Hệ số hồ cảm phụ thuộc vào dạng hình học của cả hai cuộn dây và sự định hướng tương đối giữa chúng. Khi kéo chúng ra xa nhau,  $M_{12}$  giảm do  $\Phi_{12}$  giảm.



## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

### 2.2.4. Hiện tượng hồ cảm

- Nếu dòng  $I_1$  thay đổi với thời gian, suất điện động cảm ứng gây ra bởi cuộn 1 trong cuộn 2 là:

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt} \left( \frac{M_{12} I_1}{N_2} \right) = -M_{12} \frac{dI_1}{dt}$$

- Nếu xét nguồn dòng điện trong cuộn dây 2, thì suất điện động cảm ứng trong cuộn dây 1 là:

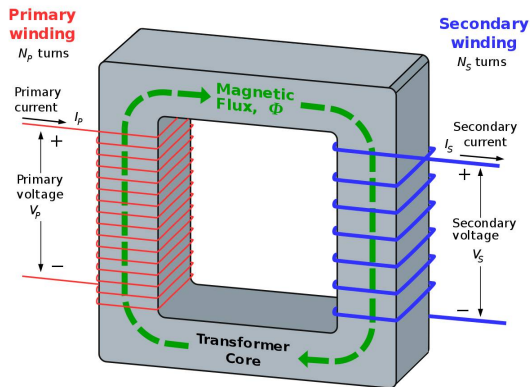
$$\mathcal{E}_1 = -M_{21} \frac{dI_2}{dt}$$

- Kết luận: trong hiện tượng hồ cảm, suất điện động cảm ứng xuất hiện trên cuộn dây này luôn tỉ lệ thuận với tốc độ biến thiên của dòng điện ở cuộn dây kia.
- Người ta chứng minh được rằng:  $M_{12} = M_{21} = M$ , do đó:

$$\mathcal{E}_2 = -M \frac{dI_1}{dt} \text{ và } \mathcal{E}_1 = -M \frac{dI_2}{dt}$$

## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

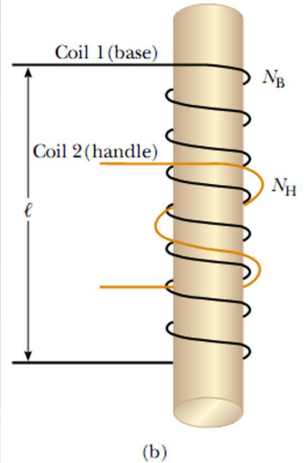
### 2.2.5. Ứng dụng hiện tượng hồ cảm



Biến thế

## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

### 2.2.5. Ứng dụng hiện tượng hồ cảm



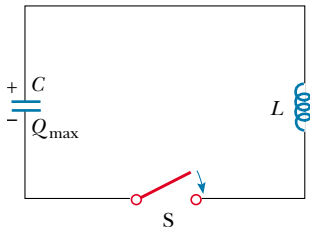
**Sạc không dây**

## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

### 2.2.6. Dao động trong mạch LC

Tổng năng lượng của mạch là không đổi (bằng năng lượng dự trữ ban đầu trong tụ điện):

$$U = U_C + U_L = \frac{Q^2}{2C} + \frac{1}{2}LI^2$$
$$\frac{dU}{dt} = 0 \rightarrow \frac{Q}{C} \frac{dQ}{dt} + LI \frac{dI}{dt} = 0$$



Do  $I = dQ/dt$  nên  $dI/dt = d^2Q/dt^2$ , từ đó:

$$\frac{Q}{C} + L \frac{d^2Q}{dt^2} = 0 \text{ hay là: } \frac{d^2Q}{dt^2} = -\frac{1}{LC}Q$$

Nghiệm phương trình vi phân:  $Q = Q_{\max} \cos(\omega t + \phi)$  với  $\omega = 1/\sqrt{LC}$

Dòng điện:  $I = \frac{dQ}{dt} = -\omega Q_{\max} \sin(\omega t + \phi)$



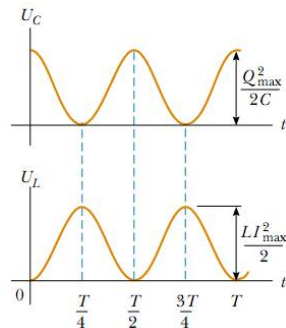
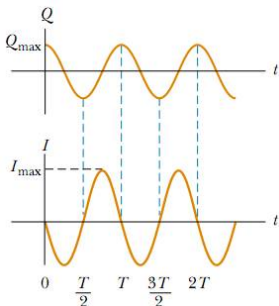
## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

### 2.2.6. Dao động trong mạch LC

Đặt  $I = 0$  khi  $t = 0 \rightarrow \phi = 0$ :

$$Q = Q_{\max} \cos(\omega t)$$

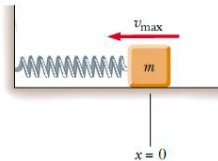
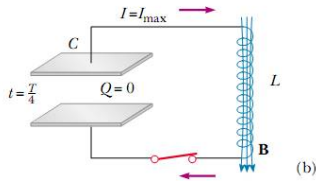
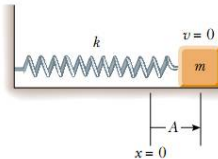
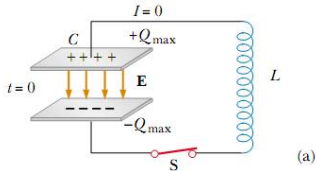
$$I = -\omega Q_{\max} \sin(\omega t) = -I_{\max} \sin(\omega t)$$



## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

### 2.2.6. Dao động trong mạch LC

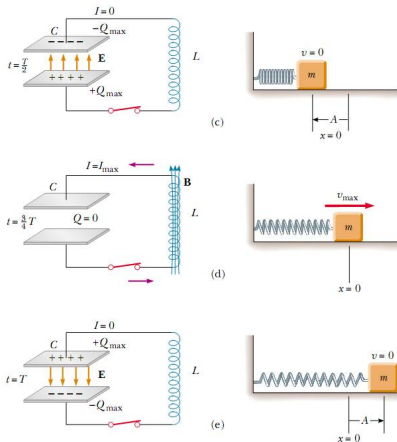
*Tương tự điện cơ*



## 2.2. Tự cảm. Hồ cảm

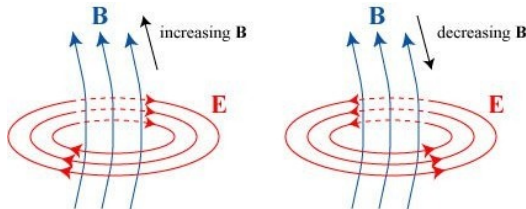
### 2.2.6. Dao động trong mạch LC

#### Tương tự điện cơ (tiếp)



## 2.3. Hệ phương trình Maxwell. Trường điện từ

### 2.3.1. Luận điểm thứ 1 của Maxwell - Phương trình Maxwell-Faraday



- Bất kỳ một từ trường nào biến đổi theo thời gian cũng sinh ra một điện trường xoáy với  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} \neq 0$ .
- Lưu số của véc-tơ cường độ điện trường xoáy dọc theo một đường cong kín bất kỳ thì bằng về giá trị tuyệt đối, nhưng trái dấu với tốc độ biến thiên theo thời gian của từ thông gửi qua diện tích giới hạn bởi đường cong đó.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

## 2.3. Hệ phương trình Maxwell. Trường điện từ

### 2.3.2. Luận điểm thứ 2 của Maxwell - Phương trình Maxwell-Ampere

- Bất kỳ một điện trường nào biến đổi theo thời gian cũng sinh ra một từ trường.
- Dòng điện dịch  $I_d$  là dòng điện tương đương với điện trường biến đổi theo thời gian về phương diện sinh ra từ trường (*xem lại Chương 1, Mục 1.6.4*).

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0(I + I_d) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

- Điện trường biến đổi giữa hai bản của tụ điện sinh ra từ trường giống như một dòng điện (dòng điện dịch) chạy qua toàn bộ không gian giữa hai bản của tụ điện, có chiều và cường độ giống với dòng điện dẫn trong mạch đó.

## 2.3. Hệ phương trình Maxwell. Trường điện từ

### 2.3.3. Trường điện từ

- Điện trường và từ trường đồng thời tồn tại trong không gian, tạo thành một trường thống nhất là trường điện từ.
- Trường điện từ mang năng lượng. Năng lượng đó định xứ trong không gian có trường điện từ. Mật độ năng lượng là:

$$w = w_e + w_m = \frac{1}{2}(\epsilon\epsilon_0 E^2 + \mu\mu_0 H^2) = \frac{1}{2}(ED + BH)$$

Năng lượng của trường điện từ:

$$W = \int_V w.dV = \frac{1}{2} \int_V (ED + BH).dV$$

## 2.3. Hệ phương trình Maxwell. Trường điện từ

### 2.3.4. Hệ phương trình Maxwell

- Maxwell đã chỉ ra rằng sóng điện từ (sự lan truyền dao động điện từ trong không gian) là hệ quả của 4 phương trình cơ bản sau:

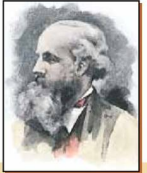
$$\text{Trên mặt kín } A: \oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (2)$$

$$\text{Trên mặt kín } A: \oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3)$$

$$\text{Theo đường cong kín } C: \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (4)$$

$$\text{Theo đường cong kín } C: \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (5)$$

- Hertz - bằng thí nghiệm của mình - đã chỉ ra rằng ánh sáng nhìn thấy và sóng radio có cùng bản chất là sóng điện từ và có thể bị phản xạ, khúc xạ và nhiễu xạ (*Xem thêm: Hertz Experiment*).



**James Clerk Maxwell** Scottish theoretical physicist (1831–1879)

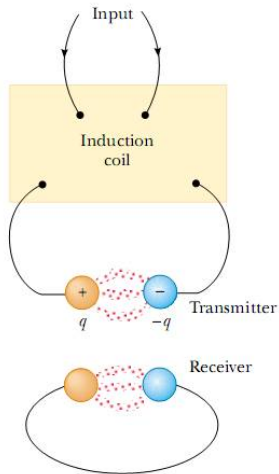


**Heinrich Rudolf Hertz** German physicist (1857–1894) Hertz

## 2.3. Hệ phương trình Maxwell. Trường điện từ

### 2.3.5. Thí nghiệm Hertz

- Trong mạch phát, cuộn dây đóng vai trò cuộn cảm  $L$ , còn hai điện cực hình cầu đóng vai trò tụ điện  $C$ .
- Khi một hiệu điện thế cao được đặt vào cuộn cảm trong thời gian ngắn, giữa hai điện cực hình cầu xảy ra hiện tượng ion hóa không khí với lượng điện tích tăng nhanh và các điện tích này dao động với tần số  $\omega = 1/\sqrt{LC}$ , sinh ra sóng điện từ.
- Tần số dao động riêng của mạch thu được điều chỉnh sao cho trùng với của mạch phát.
- Thí nghiệm Hertz chứng tỏ rằng dòng điện xoay chiều cảm ứng sinh ra trong mạch thu được tạo ra do sóng điện từ phát ra từ mạch phát.

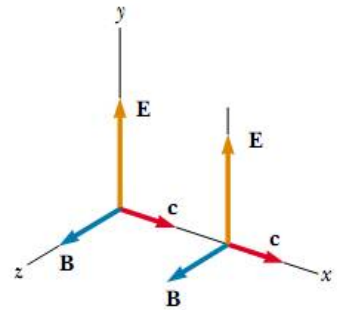




## 2.4. Sóng điện từ

### 2.4.1. Định nghĩa

- Sóng điện từ là sóng ngang, bao gồm điện trường  $\vec{E}$  và từ trường  $\vec{B}$  dao động theo hướng vuông góc nhau và vuông góc với phương truyền sóng.
- Không giống như sóng cơ, sóng điện từ không cần môi trường để lan truyền, vì vậy nó có thể truyền đi trong chân không.
- Sóng phẳng: độ lớn của  $\vec{E}$  và  $\vec{B}$  tại điểm bất kỳ chỉ phụ thuộc vào  $x$  và  $t$ , không phụ thuộc  $y$  hay  $z$ .
- Mặt đầu sóng: quỹ tích tất cả các điểm trong không gian có cùng pha dao động.
- Đối với nguồn phát điểm, sóng là sóng cầu (mặt đầu sóng là các mặt cầu).



Xem thêm:  
**Electromagnetic Waves  
Animation**

## 2.4. Sóng điện từ

### 2.4.2. Phương trình sóng điện từ phẳng

- Khi  $Q = 0$  và  $I = 0$  (xem ▶ Hệ phương trình Maxwell):

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

- Sau khi biến đổi (xem ▶ Phụ lục):

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (6)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (7)$$

Vi phân lần 2:  $\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial B}{\partial x} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left( -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right)$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

## 2.4. Sóng điện từ

### 2.4.2. Phương trình sóng điện từ phẳng

- Phương trình sóng tổng quát:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

- Tốc độ truyền sóng:

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Với  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$  và  $\epsilon_0 = 8.85419 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$ , ta tìm được  $c = 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Vậy ánh sáng là một loại sóng điện từ.

- Nghiệm đơn giản nhất:

$$E = E_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

$$B = B_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

với  $k = 2\pi/\lambda$  là số sóng,  $\omega = 2\pi f$  là tần số góc,  $\omega/k = c$  là vận tốc pha.

*Chú ý: nếu thành phần phụ thuộc không gian và thời gian trái dấu nhau như trên thì sóng truyền theo chiều dương trục x, còn nếu chúng cùng dấu nhau thì sóng truyền theo chiều âm trục x.*

## 2.4. Sóng điện từ

### 2.4.2. Phương trình sóng điện từ phẳng

- Lấy vi phân các nghiệm:

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial x} &= -kE_{\max} \sin(kx - \omega t) \\ \frac{\partial B}{\partial t} &= \omega B_{\max} \sin(kx - \omega t) \\ \frac{\partial E}{\partial x} &= -\frac{\partial B}{\partial t} \rightarrow \frac{E_{\max}}{B_{\max}} = \frac{\omega}{k} = c\end{aligned}$$

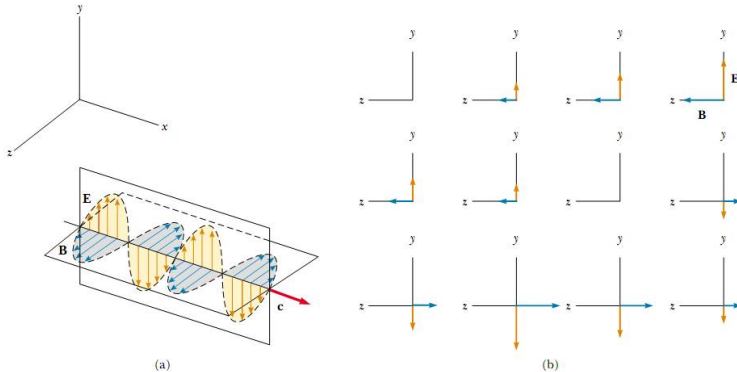
- Tại thời điểm bất kỳ, tỉ số độ lớn điện trường và từ trường của sóng điện từ bằng tốc độ ánh sáng:

$$\frac{E_{\max}}{B_{\max}} = \frac{E}{B} = c$$

- Sóng điện từ tuân theo nguyên lý chồng chất (trừ các sóng có cường độ mạnh như laser).

## 2.4. Sóng điện từ

### 2.4.2. Phương trình sóng điện từ phẳng



Mô tả chuyển động dọc theo trục  $x$  của một sóng điện từ phẳng, hình sin, phân cực tuyến tính. (a) Hình dạng sóng tại một thời điểm bất kỳ. (b) Sự biến đổi theo thời gian của các véc-tơ điện trường và từ trường trên mặt phẳng  $yz$ , khi nhìn về phía chiều âm của trục  $x$ .

## 2.4. Sóng điện từ

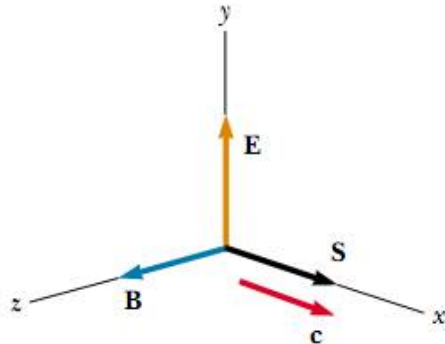
### 2.4.4. Năng lượng của sóng điện từ

- Tốc độ truyền năng lượng trong sóng điện từ được đặc trưng bằng véc-tơ Poynting với độ lớn thể hiện tốc độ truyền năng lượng qua một đơn vị diện tích vuông góc với phương truyền sóng. Đơn vị là  $\text{J/s}\cdot\text{m}^2 = \text{W/m}^2$ .

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} [\vec{E} \times \vec{B}]$$

- Đối với sóng phẳng:  $|\vec{E} \times \vec{B}| = EB$

$$S = \frac{EB}{\mu_0} = \frac{E^2}{\mu_0 c} = \frac{c}{\mu_0} B^2$$



## 2.4. Sóng điện từ

### 2.4.4. Năng lượng của sóng điện từ

- Cường độ sóng:

$$I = S_{tb} = \frac{E_{\max} B_{\max}}{2\mu_0} = \frac{E_{\max}^2}{2\mu_0 c} = \frac{c}{2\mu_0} B_{\max}^2$$

- Mật độ năng lượng tức thời:

$$u_E = u_B = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

- Tổng mật độ năng lượng tức thời:

$$u = u_E + u_B = \varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0}$$

- Tổng mật độ năng lượng trung bình:

$$u_{tb} = \varepsilon_0 (E^2)_{tb} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_{\max}^2 = \frac{B_{\max}^2}{2\mu_0}$$

## 2.4. Sóng điện từ

### 2.4.5. Áp suất của bức xạ điện từ

- Xét một chùm sóng điện từ mang tổng năng lượng  $T_{\text{ER}}$  đập vuông góc vào một bề mặt trong một khoảng thời gian  $\Delta t$ . Trong trường hợp hấp thụ hoàn toàn, tổng động lượng truyền cho bề mặt đó có độ lớn:

$$p = \frac{T_{\text{ER}}}{c} \quad (\text{hấp thụ hoàn toàn})$$

- Áp suất  $P$  tác dụng lên bề mặt là lực trên một đơn vị diện tích  $F/A$ , và có dạng:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A} \frac{dp}{dt} = \frac{1}{c} \frac{dT_{\text{ER}}/dt}{A}$$

- Chú ý rằng  $dT_{\text{ER}}/dt$  là năng lượng tới 1 đơn vị diện tích trong 1 đơn vị thời gian và bằng với độ lớn của véc-tơ Poynting  $S$  (xem [véc-tơ Poynting](#)). Vì vậy áp suất của bức xạ lên một bề mặt hấp thụ hoàn toàn là:

$$P = \frac{S}{c}$$



## 2.4. Sóng điện từ

### 2.4.5. Áp suất của bức xạ điện từ

- Nếu bề mặt là phản xạ hoàn toàn (như 1 cái gương) và bức xạ tới vuông góc, thì động lượng truyền cho bề mặt trong một đơn vị thời gian  $\Delta t$  gấp đôi phương trình trước:

$$P = \frac{2T_{\text{ER}}}{c} = \frac{2S}{c} \quad (\text{phản xạ hoàn toàn})$$

- Với 1 bề mặt không phải hấp thụ hay phản xạ hoàn toàn, giá trị của áp suất là:

$$P = (1 + f) \frac{S}{c}$$

trong đó  $f$  là phần bức xạ phản xạ từ bề mặt.

## 2.4. Sóng điện từ

### 2.4.5. Áp suất của bức xạ điện từ

Ví dụ: tìm áp suất gây ra bởi một tia laser lên màn chiếu, biết tia laser có công suất trung bình 3 mW, tạo ra một chấm đường kính 2 mm trên màn chiếu, và màn chiếu phản xạ 70% ánh sáng chiếu tới nó. Độ lớn trung bình của véc-tơ Poynting:

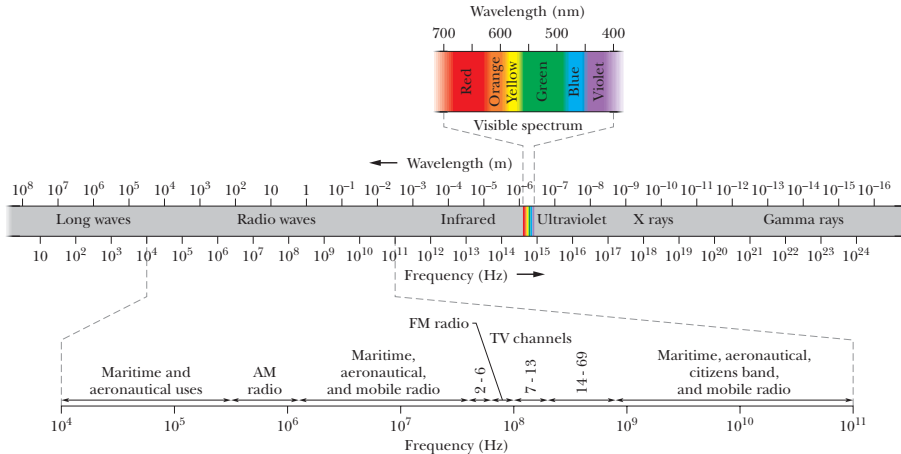
$$S_{tb} = \frac{\text{Công suất trung bình}}{A} = \frac{\text{Công suất trung bình}}{\pi r^2} = \frac{3 \times 10^{-3} \text{ W}}{\pi \left( \frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}}{2} \right)^2} = 955 \text{ W/m}^2$$

Áp suất trên bề mặt là:

$$P = (1 + f) \frac{S_{tb}}{c} = (1 + 0.7) \frac{955 \text{ W/m}^2}{299792458 \text{ m/s}} = 5.4 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$$

## 2.4. Sóng điện từ

### 2.4.6. Phổ sóng điện từ

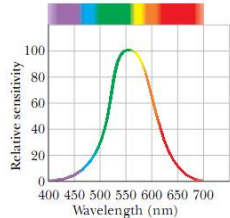


### Phổ sóng điện từ

## 2.4. Sóng điện từ

### 2.4.6. Phổ sóng điện từ

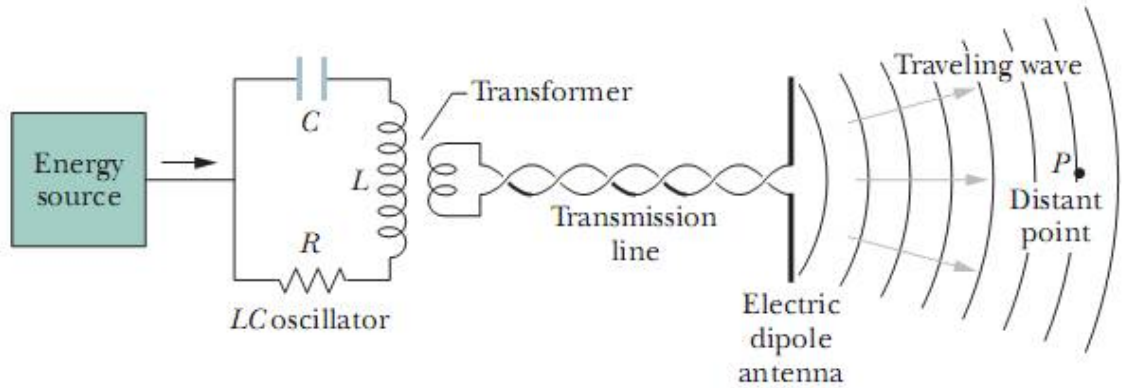
- Tất cả các loại bức xạ đều được tạo ra từ cùng một hiện tượng: dao động của điện tích.
  - +) Sóng radio (RF): thông tin liên lạc, điều khiển, v..v.
  - +) Sóng viba (microwaves): các hệ rada, nghiên cứu về tính chất nguyên tử và phân tử của vật chất, lò vi sóng, v..v.
  - +) Tia hồng ngoại (IR): sử dụng trong vật lý trị liệu, chụp ảnh hồng ngoại, phổ dao động, điều khiển và cảm biến cự li gần, v..v.
  - +) Ánh sáng nhìn thấy (Vis):  $\lambda$  từ 400 đến 700 nm, mắt người có độ nhạy cao nhất ở 550 nm.
  - +) Tia tử ngoại (UV): ứng dụng trong diệt khuẩn, kích thích phát quang, v..v
  - +) Tia X: ứng dụng chẩn đoán hình ảnh, nghiên cứu cấu trúc vật liệu, v..v



Độ nhạy của mắt người theo màu sắc

## 2.4. Sóng điện từ

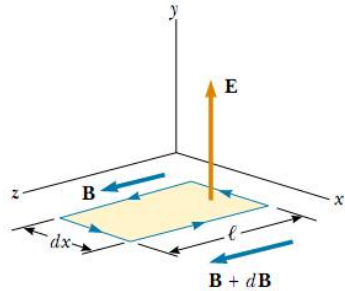
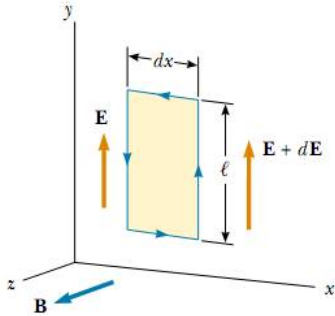
### 2.4.7. Hệ phát sóng điện từ



Sơ đồ một hệ phát sóng ngắn (radio).

## 2.4. Sóng điện từ

### Phụ lục



$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$E(x + dx, t) \approx E(x, t) + \left. \frac{dE}{dx} \right|_{t=\text{const}} dx = E(x, t) + \frac{\partial E}{\partial x} dx$$

## 2.4. Sóng điện từ

### Phụ lục

Từ thông qua diện tích  $\ell \cdot dx$  là  $\Phi_B = B \cdot \ell \cdot dx$ . Khi đó:

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \ell \cdot dx \cdot \left. \frac{dB}{dt} \right|_{x=\text{const}} = \ell \cdot dx \cdot \frac{\partial B}{\partial t}$$

Từ đó:

$$\left( \frac{\partial E}{\partial x} \right) dx \cdot \ell = -\ell \cdot dx \cdot \frac{\partial B}{\partial t}$$
$$\rightarrow \boxed{\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}}$$

Thực hiện tương tự với  $B$ , ta có:

$$\boxed{\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}}$$

# The End