

[www.mientayvn.com](http://www.mientayvn.com)

Dịch tiếng anh chuyên ngành khoa học tự nhiên và kỹ thuật.

Dịch các bài giảng trong chương trình học liệu mở của học viện MIT, Yale.

Tìm và dịch tài liệu phục vụ cho sinh viên làm seminar, luận văn.

Tại sao mọi thứ đều miễn phí và chuyên nghiệp ???

Trao i tr c tuy n t i:

[www.mientayvn.com/chat\\_box\\_li.html](http://www.mientayvn.com/chat_box_li.html)

## Chương 16

# ĐIỆN TỪ TRƯỜNG

Điện trường và từ trường không tồn tại độc lập mà có mối liên hệ chặt chẽ với nhau. Từ trường biến thiên sẽ làm xuất hiện điện trường xoáy và ngược lại, điện trường biến thiên sẽ làm xuất hiện từ trường. Như vậy, điện trường và từ trường có thể chuyển hoá qua lại, chúng là hai mặt của một trường thống nhất – **trường điện từ**. Nhà Bác học vĩ đại người Anh, Maxwell đã khám phá ra mối liên hệ này và xây dựng nên lý thuyết tổng quát về điện – từ trường.

### § 16.1 THUYẾT MAXWELL VỀ ĐIỆN TỪ TRƯỜNG

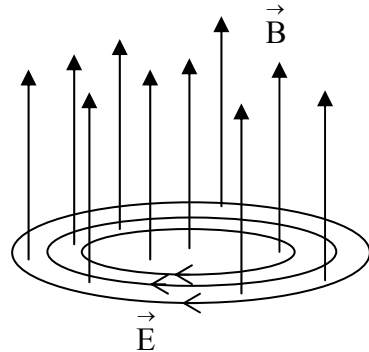
#### 1 – Luận điểm Maxwell thứ nhất – điện trường xoáy:

Xét một mạch kín đứng yên trong từ trường biến thiên. Từ thông qua mạch kín đó thay đổi làm trong mạch xuất hiện dòng điện cảm ứng. Sự xuất hiện dòng điện cảm ứng, chứng tỏ trong mạch phải tồn tại một trường lực lạ. Phân tích các kết quả thực nghiệm của Faraday, Maxwell cho rằng, trường lực lạ ở đây chính là *điện trường xoáy*. Nhưng điện trường này không phải là điện trường tĩnh, vì như ta đã biết, điện trường tĩnh không thể làm di chuyển điện tích theo mạch kín được. Maxwell cho rằng điện trường đó phải là *điện trường xoáy*.

Theo Maxwell, mạch điện kín không phải là nguyên nhân gây ra điện trường xoáy, mà nó chỉ là phương tiện giúp ta nhận biết sự tồn tại của điện trường xoáy. Nguyên nhân gây ra điện trường xoáy chính là sự biến thiên của từ trường. Từ đó Ông đưa ra luận điểm thứ nhất: “*Mọi từ trường biến thiên theo thời gian đều làm xuất hiện một điện trường xoáy*”.

Khác với điện trường tĩnh, điện trường xoáy có các đường sức khép kín và lưu thông của vectơ cường độ điện trường xoáy dọc theo một đường cong bất kỳ không những phụ thuộc vào vị trí điểm đầu và điểm cuối, mà còn phụ thuộc vào hình dạng đường cong mà ta tính lưu thông. Vì thế lưu thông của vectơ cường độ điện trường xoáy dọc theo một đường cong kín bất kỳ là khác không. Chính vì vậy, điện trường xoáy đóng vai trò là trường lực lạ, tạo ra suất điện động làm di chuyển điện tích trong mạch, tạo thành dòng điện khép kín.

Dựa vào định luật Faraday về hiện tượng cảm ứng điện từ, Maxwell đã xây dựng một phương trình diễn tả định lượng luận điểm thứ nhất của mình:



**Hình 16.1:** Từ trường biến thiên sinh ra điện trường xoáy

$$\oint_{(L)} \vec{E} d\vec{\ell} = - \int_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \quad (16.1)$$

Phương trình (16.1) được gọi là phương trình Maxwell – Faraday ở dạng *tích phân*. Nó diễn tả đặc tính *xoáy* của điện trường. Trong đó, vế phải thể hiện tốc độ biến thiên của từ thông qua diện tích S; vế trái là lưu thông của vectơ cường độ điện trường xoáy dọc theo chu tuyến L bao quanh S.

Ở dạng vi phân, phương trình Maxwell – Faraday có dạng:

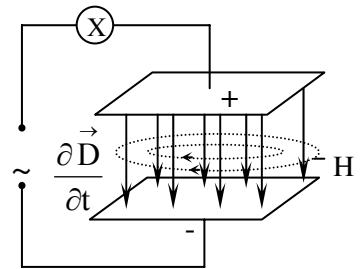
$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (16.2)$$

trong đó, toán tử vi phân  $\text{rot } \vec{E}$  là một vec tơ có các thành phần được xác định bởi

$$\text{định thức: } \text{rot } \vec{E} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} \quad (16.3)$$

Do đó (16.2) tương đương với hệ ba phương trình đại số:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= - \frac{\partial B_x}{\partial t} \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= - \frac{\partial B_y}{\partial t} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= - \frac{\partial B_z}{\partial t} \end{aligned} \quad (16.4)$$



**Hình 16.2:** Dòng điện dịch sinh ra từ trường

**2 – Luận điểm Maxwell thứ hai – dòng điện dịch:**

Ở luận điểm thứ nhất, Maxwell cho rằng mọi từ trường biến thiên đều sinh ra điện trường (xoáy). Phân tích các hiện tượng điện từ khác Maxwell khẳng định phải có điều ngược lại: “*Mọi điện trường biến thiên theo thời gian đều làm xuất hiện từ trường*” – luận điểm thứ hai của Maxwell.

Vì từ trường là dấu hiệu cơ bản nhất và tất yếu của mọi dòng điện, nên, nếu sự biến thiên của điện trường tạo ra từ trường thì sự biến thiên của điện trường đó có tác dụng như một dòng điện. Maxwell gọi đó là *dòng điện dịch*, để phân biệt với dòng điện dẫn – là dòng chuyển dời có hướng của các điện tích.

Dòng điện dịch có tính chất cơ bản giống dòng điện dẫn ở chỗ nó gây ra từ trường. Nhưng nó không giống dòng điện dẫn về bản chất: dòng điện dẫn là do sự chuyển dời có hướng của các điện tích trong một môi trường dẫn nào đó; còn dòng điện dịch là do sự biến thiên của điện trường sinh ra. Vì thế, khác với dòng điện

dẫn, dòng điện dịch có thể tồn tại ngay cả trong điện môi hoặc trong chân không; dòng điện dịch không có tác dụng nhiệt Joule – Lenz như dòng điện dẫn.

Để hình dung về dòng điện dịch, ta xét một mạch điện xoay chiều gồm tụ điện C mắc nối tiếp với một bóng đèn. Đèn sáng bình thường, điều này có phải dòng điện đã chạy qua tụ điện không? Không phải! Do tụ điện liên tục phóng điện và nạp điện nên trong dây dẫn và đèn luôn tồn tại dòng điện dẫn xoay chiều. Còn giữa hai bản tụ điện, mạch hở nên không có dòng điện dẫn. Nhưng hiệu điện thế giữa hai bản tụ luôn biến thiên làm điện trường trong lòng tụ biến thiên, sinh ra dòng điện dịch. Như vậy dòng điện dẫn trong dây dẫn của mạch điện đã được đóng kín bằng dòng điện dịch trong lòng tụ điện.

Với giả thuyết về dòng điện dịch, bằng cách vận dụng định lý Ampère về lưu thông của vector cường độ từ trường, Maxwell đã thiết lập được biểu thức định lượng cho luận điểm thứ hai của mình:

$$\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{\ell} = \int_{(S)} \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S} \quad (16.5)$$

Phương trình (16.5) được gọi là phương trình Maxwell – Ampère ở dạng tích phân.

Trong đó  $\vec{j}$  là mật độ dòng điện dẫn,  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  là mật độ dòng điện dịch; vế phải biểu diễn cường độ dòng điện toàn phần (gồm dòng điện dẫn và dòng điện dịch) chạy qua tiết diện S; vế trái là lưu thông của vector cường độ từ trường dọc theo chu tuyến L bao quanh S.

Ở dạng vi phân, phương trình Maxwell – Ampère có dạng:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (16.6)$$

Phương trình (16.6) tương đương với hệ ba phương trình đại số:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= j_x + \frac{\partial D_x}{\partial t} \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= j_y + \frac{\partial D_y}{\partial t} \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= j_z + \frac{\partial D_z}{\partial t} \end{aligned} \quad (16.7)$$

### 3 – Hệ phương trình Maxwell

Theo các luận điểm của Maxwell, từ trường biến thiên sinh ra điện trường xoáy và ngược lại, mà sự biến thiên của từ trường là bất kỳ, nên đạo hàm  $\frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$  cũng biến thiên theo thời gian, do đó điện trường xoáy xuất hiện cũng biến thiên theo thời gian và nó lại gây ra một từ trường biến thiên, ... Như vậy, điện trường

và từ trường liên hệ chặt chẽ với nhau và chuyển hoá lẫn nhau. Chúng tồn tại đồng thời trong không gian tạo thành trường thống nhất – trường điện từ.

Khái niệm về trường điện từ được Maxwell nêu lên đầu tiên và để diễn tả định lượng, ông đã thiết lập các phương trình – gọi là hệ phương trình Maxwell:

- Dạng vi phân:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (16.8a)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (16.9a)$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (16.10a)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (16.11a)$$

- Dạng tích phân:

$$\oint_{(L)} \vec{E} d\vec{\ell} = -\int_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (16.8b)$$

$$\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{\ell} = \int_{(S)} \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S} \quad (16.9b)$$

$$\int_{(S)} \vec{D} d\vec{S} = \sum q \quad (16.10b)$$

$$\int_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (16.11b)$$

Phương trình (16.8a) và (16.8b) là phương trình Maxwell – Faraday ở dạng vi phân và tích phân, diễn tả luận điểm thứ nhất của Maxwell về mối liên hệ giữa từ trường biến thiên và điện trường xoáy. Phương trình (16.9a) và (16.9b) là phương trình Maxwell – Ampère ở dạng vi phân và tích phân, diễn tả luận điểm thứ hai của Maxwell về mối liên hệ giữa điện trường biến thiên và từ trường. Các phương trình (16.10a), (16.10b) và (16.11a), (16.11b) diễn tả định lý Ostrogradsky – Gauss ở dạng vi phân, tích phân đối với điện trường và từ trường.

Ngoài các phương trình cơ bản trên, còn có các phương trình diễn tả mối quan hệ giữa các đại lượng đặc trưng cho trường ( $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$ ) với các đại lượng đặc trưng cho tính chất của môi trường ( $\mu$ ,  $\epsilon$ ,  $\sigma$ ):

+ Môi trường điện môi:  $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \quad (16.12)$

+ Môi trường điện dẫn:  $\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (16.13)$

$$+ \text{Môi trường từ hoá: } \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} \quad (16.14)$$

Trong các phương trình Maxwell, các đại lượng đặc trưng cho trường đều là các đại lượng biến thiên theo toạ độ và thời gian. Nói cách khác, chúng là hàm của  $x, y, z, t$ .

Hệ phương trình Maxwell bao hàm tất cả các định luật cơ bản về điện và từ. Trường tĩnh điện, trường tĩnh từ và sóng điện từ chỉ là những trường hợp riêng của điện từ trường mà thôi.

#### 4 – Ý nghĩa của thuyết Maxwell

*Lý thuyết trường điện từ của Maxwell thống nhất giữa điện trường và từ trường (công bố vào những năm đầu thập niên 60 của thế kỉ XIX), là một bước phát triển hoàn thiện những hiểu biết của con người về điện, từ. Trước đó, những hiểu biết của con người về điện, từ còn rời rạc; người ta quan niệm rằng điện và từ là hai lĩnh vực không liên quan nhau. Maxwell đã phát triển các ý tưởng của Faraday về điện, từ một cách sâu sắc và đã xây dựng lý thuyết thống nhất giữa điện và từ - lý thuyết trường điện từ - một cách hoàn hảo.*

*Thuyết Maxwell không những giải thích triệt để các hiện tượng điện từ đã biết mà nó còn cho phép tiên đoán sự tồn tại của sóng điện từ (mà gần 30 năm sau thực nghiệm mới xác lập được). Nghiên cứu bằng lý thuyết về các tính chất của sóng điện từ, Maxwell đã khẳng định ánh sáng cũng là sóng điện từ.*

Với những đóng góp to lớn của mình, Maxwell được đánh giá là một trong những nhà vật lý đi tiên phong, mở ra bước ngoặt trong lịch sử nhận thức của nhân loại.

## § 16.2 SÓNG ĐIỆN TỪ TỰ DO

### 1 – Hệ phương trình Maxwell mô tả sóng điện từ tự do:

*Điện từ trường lan truyền trong không gian theo thời gian tạo thành sóng điện từ. Nếu ta xét sự lan truyền của sóng điện từ trong môi trường không dẫn và không có các điện tích thì  $\vec{j} = 0$  và  $\rho = 0$ , khi đó ta có sóng điện từ tự do và hệ phương trình Maxwell mô tả sóng điện từ tự do là:*

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (16.15)$$

$$\text{div } \vec{D} = 0; \quad \text{div } \vec{B} = 0 \quad (16.16)$$

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} \quad (16.17)$$

**2 – Tính chất tổng quát của sóng điện từ:**

Giải hệ phương trình (16.15), (16.16) và (16.17) ta xác định được vectơ  $\vec{E}$  và  $\vec{H}$  đặc trưng cho điện từ trường tại một điểm trong không gian. Chúng là những hàm tuần hoàn của thời gian  $t$ . Từ đó, rút ra được những tính chất tổng quát của sóng điện từ. Những tính chất này đã được thực nghiệm kiểm chứng.

**Tính chất 1:** *Sóng điện từ là sóng ngang:* tại mỗi điểm trong không gian có sóng điện từ, các vectơ  $\vec{E}$  và  $\vec{H}$  luôn dao động theo hai phương vuông góc nhau và vuông góc với phương truyền sóng.

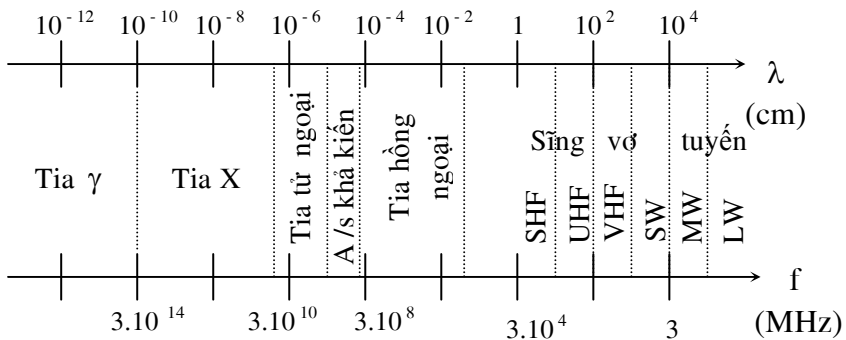
**Tính chất 2:** Khác với sóng cơ học, *sóng điện từ truyền được cả trong môi trường vật chất và trong chân không.*

**Tính chất 3:** *Vận tốc lan truyền sóng điện từ trong chân không là  $c = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 3.10^8$  m/s; và trong môi trường vật chất đồng nhất và đẳng hướng là  $v = \frac{c}{n}$ , với  $n = \sqrt{\epsilon \mu}$  là chiết suất tuyệt đối của môi trường;  $\epsilon$  và  $\mu$  là hệ số điện môi và từ môi của môi trường đó. Vì  $\epsilon, \mu > 1$  nên  $n > 1$  và  $v < c$ .*

**Tính chất 4:** *Sóng điện từ có mang năng lượng.* Năng lượng sóng điện từ chính là năng lượng của điện từ trường. Mật độ năng lượng sóng điện từ là:

$$w = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu \mu_0 H^2 \tag{16.18}$$

**3 – Thang sóng điện từ:**



**Hình 16.3:** Thang sóng điện từ.

Sóng điện từ đơn sắc là sóng điện từ phát ra từ một nguồn có tần số xác định. Khi truyền trong môi trường nhất định, sóng điện từ đơn sắc có một bước sóng xác định:

$$\lambda = v.T = \frac{c.T}{n} = \frac{\lambda_0}{n} \tag{16.19}$$

trong đó  $\lambda_0 = c.T$  là bước sóng của sóng điện từ trong chân không.

Người ta *phân loại sóng điện từ đơn sắc theo tần số hay bước sóng* (trong chân không). Bảng phân loại sóng điện từ được gọi là *thang sóng điện từ*.

#### 4 - Ứng dụng sóng điện từ trong thông tin liên lạc:

Vì sóng điện từ có thể lan truyền được cả trong môi trường vật không khí lẫn chân không với vận tốc rất lớn ( $v \approx 300\,000\text{ km/s}$ ), nên sóng điện từ được ứng dụng trong thông tin liên lạc vô tuyến.

Thông tin (âm thanh, hình ảnh, ...) được mã hoá thành các tín hiệu điện và được trộn lẫn với sóng điện từ cao tần (còn gọi là biến điệu, hay điều chế sóng điện từ – modulation), rồi phát đi trong không gian. Máy thu sẽ thu được sóng điện từ cao tần này, sau đó tách sóng, tái tạo lại thông tin ban đầu.

Miền sóng điện từ có tần số nhỏ hơn 30GHz được dùng trong thông tin liên lạc vô tuyến nên gọi là miền sóng vô tuyến. Trong miền này, người ta chia làm nhiều băng tần:

- Băng sóng dài LW – Long Wave (từ 30kHz đến 300kHz): dùng truyền thanh trong các thành phố nhỏ (đài địa phương).
- Băng sóng trung MW – Medium Wave (từ 300kHz đến 3MHz): dùng truyền thanh trong khu vực lớn.
- Băng sóng ngắn SW – Short Wave (từ 3MHz đến 30MHz): bị phản xạ mạnh ở tầng điện li, nên sóng điện từ ở dải tần này có thể truyền đi vòng quanh thế giới. Tuy nhiên, nó bị ảnh hưởng nhiều bởi thời tiết.
- Băng sóng siêu tần số VHF – Very High Frequency (từ 30MHz đến 300MHz): dùng trong vô tuyến truyền hình, FM. Sóng điện từ ở dải tần này có tính chất truyền thẳng nên không truyền đi xa được (do bề cong của trái đất).
- Băng sóng cực tần số UHF – Ultra High Frequency (từ 300MHz đến 3000MHz): dùng trong vô tuyến truyền hình. Sóng điện từ ở dải tần này có tính chất truyền thẳng và ít bị nhiễu.
- Băng sóng siêu cao tần SHF – Super High Frequency (lớn hơn 3GHz): dùng liên lạc giữa các con tàu vũ trụ với mặt đất.

Ngoài ứng dụng thông tin liên lạc bằng vô tuyến, ngày nay, với sự phát triển mạnh của laser và sợi quang học, miền sóng khả kiến còn được ứng dụng thông tin liên lạc hữu tuyến rất hiệu quả.