

Khoa Sư Phạm

Vật Lý Đại Cương A1 - Tập 2

Tác giả: Vũ Tiến Dũng

Giới Thiệu

TRƯỜNG ĐẠI HỌC AN GIANG KHOA SƯ PHẠM

Giáo trình VẬT LÝ ĐẠI CƯƠNG A1 Tập 2

(Dùng cho sinh viên không chuyên về Vật lý)

Người biên soạn:

Thạc sĩ Vũ Tiến Dũng
Giảng viên Trường ĐẠI HỌC AN GIANG
LƯU HÀNH NỘI BỘ
Tháng 9 năm 2002

CHƯƠNG IX: Trường tĩnh điện

Nhiệm vụ: Khảo sát các hiện tượng điện liên quan tới các điện tích đứng yên đối với người quan sát thông qua các tác dụng giữa chúng. từ đó xây dựng các định luật cơ bản của trường tĩnh điện để áp dụng nó vào thực tiễn.

Mục tiêu:

- Điện tích và mô hình phân bố điện tích
- Tương tác tĩnh điện
- Trường tĩnh điện và các tính chất, các biểu diễn của nó

Bổ túc toán học

1. Vectơ điện tích nguyên tố

Trên mặt S , chọn một mặt nhỏ tùy ý có điện tích được giới hạn bởi đường biên

\mathcal{L} . Trên đường biên \mathcal{L} chọn một chiều dương tùy ý, gọi \vec{n} là pháp vectơ ứng với chiều dương đó, thì vectơ:

$$\vec{dS} = \vec{n} dS \quad (9.1)$$

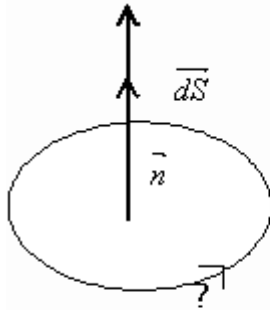
được gọi là vectơ diện tích nguyên tố.

Trong hệ tọa độ Descartes thuận vectơ \vec{dS} được phân tích thành các thành phần:

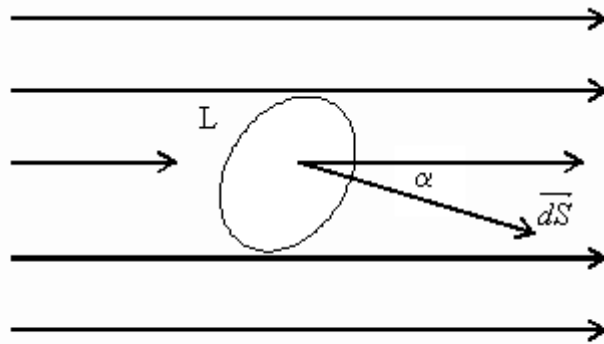
$$dS_x = dy dz$$

$$dS_y = dz dx \quad (9.2)$$

$$dS_z = dx dy$$



Hình (9.1)



Hình (9.2)

2. Thông lượng của một vectơ:

a. Định nghĩa:

Thông lượng của vectơ \vec{A} qua diện tích hữu hạn S bằng tích phân lấy trên mặt S của tích vô hướng giữa vectơ \vec{A} và vectơ diện tích nguyên tố $d\vec{S}$

$$J = \int_S \vec{A} d\vec{S} \quad (9.3)$$

b. Trong tọa độ Descartes thuận

$$J = \int_{S_x} A_x dS_x + \int_{S_y} A_y dS_y + \int_{S_z} A_z dS_z \quad (9.4)$$

3. Lưu số của một vectơ:

Lưu số của trường vectơ \vec{A} dọc theo một đường cong kín bằng tích phân lấy theo đường cong đó của tích vô hướng giữa vectơ \vec{A} và vectơ $d\vec{l}$

$$C = \oint_L \vec{A} d\vec{l} \quad (9.5)$$

4. Diver của một vectơ :

- Định nghĩa:

$$\text{div } \vec{A} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{J}{V} \quad (9.6)$$

Với J là thông lượng của vectơ \vec{A} qua mặt kín S bao quanh thể tích V. Trong tọa độ Descartes:

$$\operatorname{div} \vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (9.7)$$

Dive của một vectơ là một vô hướng, xác định tính chất phân kỳ của trường vectơ \vec{A}

5. Rota của trường vectơ:

Định nghĩa:
$$\operatorname{rot}_n \vec{A} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{C}{S} \quad (9.8)$$

$\operatorname{Rot}_n \vec{A}$ là hình chiếu của $\operatorname{rot} \vec{A}$ trên pháp tuyến dương \vec{n} của S. C là lưu số của \vec{A} dọc theo đường cong kín L giới hạn trên diện tích S.

□ Trong tọa độ Descartes:

$$\operatorname{rot} \vec{A} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (9.9)$$

Rota của một vectơ là một vectơ xác định tính chất xoáy của trường vectơ \vec{A} .

6. Gardien của một vô hướng;

- Định nghĩa: Gardien của một đại lượng vô hướng φ là một vectơ được xác định bởi hệ thức:

$$\operatorname{grad} \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k} \quad (9.10)$$

Ví dụ: trong cơ học quan hệ giữa lực thế và thế năng của nó được biểu diễn bằng gardien:

$$\vec{F} = -\operatorname{grad} E_1$$

Thuyết điện từ - Định luật bảo toàn điện tích - Tương tác giữa các điện tích

1. Tương tác điện từ:

- Vật chất được cấu tạo từ các hạt sơ cấp. Trong số các hạt sơ cấp, có những hạt tương tác với nhau bằng lực hút hoặc lực đẩy, lực này tỷ lệ với bình phương khoảng cách giữa chúng. Những hạt có khả năng tương tác như thế gọi là những hạt mang điện. Tương tác giữa các hạt mang điện gọi là tương tác điện từ.
- Hai hạt sơ cấp mang điện có thể tồn tại lâu dài ở trạng thái tự do là electron & proton, chúng là những thành phần cấu tạo nên nguyên tử.

Electron mang điện âm bằng

-e, proton mang điện dương bằng +e. Điện tích $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ gọi là điện tích nguyên tố.

- Điện tích của hạt sơ cấp là một thuộc tính không thể tách rời khỏi hạt. Điện tích tồn tại dưới dạng các hạt sơ cấp mang điện.
- Cấu trúc của vật chất là gián đoạn nên điện tích trên vật cũng phân bố gián đoạn và luôn bằng một số nguyên tố, ta nói điện tích bị lượng tử hoá.

2. Thuyết điện từ và định luật bảo toàn điện tích:

2-1. Những tư tưởng cơ bản của thuyết điện từ:

- Tương tác điện từ giữa các điện tích chỉ có thể truyền từ điện tích này đến điện tích kia nhờ một môi trường vật chất trung gian gọi là trường điện từ. Trường điện từ được lan truyền với vận tốc hữu hạn, do đó vận tốc truyền tương tác là hữu hạn.
- Giữa các hiện tượng điện và từ có quan hệ mật thiết với nhau và có tính chất đối xứng.
- Nội dung cơ bản của thuyết điện từ là các định luật cơ bản của điện trường và từ trường, đó là các định luật: coulomb, biểu diễn sự tương tác giữa các điện tích đứng yên, định luật Ampere về tương tác giữa các điện tích chuyển động, định luật faraday về cảm ứng điện từ và định luật bảo toàn điện tích...

2-2. Định luật bảo toàn điện tích:

- Vectơ mật độ dòng điện \vec{J} :
- Định nghĩa: Vectơ mật độ dòng qua mặt S có độ lớn bằng điện lượng qua một đơn vị diện tích đặt vuông góc phương chuyển dời của các điện tích, trong một đơn vị thời gian, có chiều là chiều của dòng điện.
- Biểu thức: trong không gian, tại điểm có mật độ điện tích ρ các điện tích chuyển động với vận tốc \vec{v} qua diện tích nguyên tố $ds \wedge \vec{v}$, điện lượng qua ds trong thời gian dt là

$dq = \rho \cdot v \cdot ds \cdot dt$, do đó mật độ dòng điện tại điểm đó là $J = \frac{dq}{ds \cdot dt} = \rho \cdot v$ là vectơ mật độ dòng.

$$\vec{J} = \rho \vec{v} \quad (9.11)$$

- Định luật bảo toàn điện tích:
 - Trong miền không gian có thể tích không đổi bất kỳ V, giới hạn bằng mặt kín S, tại thể tích nguyên tố dV có mật độ điện tích ρ , điện lượng chứa trong dV bằng:

Điện lượng chứa trong V: $dq = \rho dV$

$$q = \int_V \rho \, dV$$

- Giả sử điện tích trong V biến đổi theo thời gian thì cường độ dòng điện qua mặt S:

$$I = \oint_S \vec{j} \cdot d\vec{s} = \int_V \text{div} \vec{j} \, dV$$

- Theo định nghĩa của cường độ dòng điện và chú ý rằng dq trái dấu với $\vec{j} \cdot d\vec{s}$ và $\rho(\vec{r}, t)$:

$$I = - \frac{dq}{dt} = - \frac{d}{dt} \int_V \rho \, dV = - \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \, dV \quad \square \quad \oint_S \vec{j} \cdot d\vec{s} = - \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \, dV = \int_V \text{div} \vec{j} \, dV$$

Vì thể tích V là bất kỳ và không đổi nên:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div} \vec{j} \quad \square \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \vec{j} = 0 \quad (9-12)$$

Phương trình cho thấy để điện tích biến đổi theo thời gian tại một miền không gian nào đó cần phải chuyển điện tích từ nơi khác đến, kết quả điện tích tại nơi đó cũng biến đổi theo thời gian.

- Định luật: điện tích không tự sinh ra và cũng không tự mất đi mà chỉ chuyển từ nơi này đến nơi khác hay từ vật này sang vật khác.

3. Trường tĩnh điện:

- Ta xét trường hợp riêng, các điện tích không chuyển động đối với không gian chứa các điện tích $\vec{v} = 0$, thì vectơ mật độ dòng điện $\vec{j} = 0$.

Định luật bảo toàn điện tích cho trường tĩnh điện là:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \square \quad \rho = \text{const}$$

Điện tích toàn phần của hệ cô lập:

$$Q = \int_V \rho \, dV = \rho \int_V dV = \rho V = \text{const} \quad (9.13)$$

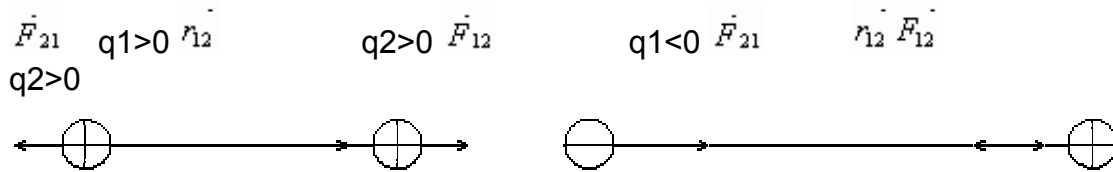
Điều này có nghĩa là nếu trong hệ sinh ra một điện tích dương thì đồng thời cũng tạo ra một điện tích âm có cùng độ lớn. Do đó điện tích chỉ có thể sinh ra từng cặp & mất đi từng cặp.

- Trường do các điện tích đứng yên tạo ra gọi là trường tĩnh điện. Tương tác giữa các điện tích đứng yên là tương tác điện. Lực tương tác giữa 2 điện tích điểm thoả mãn định luật Coulomb.

$$\vec{F}_{12} = - \vec{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{r}_{12} \quad (9.14)$$

Trong đó k là hệ số tỉ lệ phụ thuộc vào hệ đơn vị đo các đại lượng trong (9.14). Trong hệ SI

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \text{ với } \epsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$$



Điện trường. Vectơ cường độ điện trường. Nguyên lý chồng chất điện trường

1. Điện trường:

Theo thuyết điện trường tương tác giữa hai điện tích được truyền đi nhờ một môi trường vật chất trung gian. Môi trường vật chất trung gian truyền tương tác tĩnh điện gọi là điện trường tĩnh. Mỗi điện tích gây ra trong không gian bao quanh điện tích một điện trường. Điện trường này lan truyền trong không gian với một vận tốc hữu hạn, trong chân không vận tốc lan truyền của điện trường là 3.10^8 m/s

Tính chất cơ bản của điện trường là tác dụng lực lên điện tích đặt trong nó và do đó nó mang năng lượng.

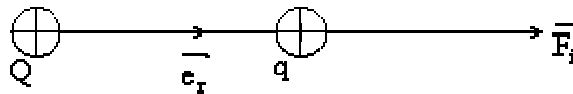
Như vậy: Điện trường là một dạng tồn tại của vật chất trong không gian bao quanh các điện tích, mà biểu hiện cụ thể của nó là tác dụng lên các điện tích đặt trong nó.

2. Vectơ cường độ điện trường:

2-1. Định nghĩa:

Trong điện trường của điện tích điểm Q lần lượt đặt các điện tích điểm q_1, q_2, \dots, q_n đủ nhỏ để không làm thay đổi đáng kể đến điện trường đang xét. Lực tác dụng lên q_i :

$$\vec{F}_i = k \frac{Qq_i}{r^2} \vec{e}_r \quad \vec{F}_1 = k \frac{Q}{r^2} \vec{e}_r \vec{F}_i$$



$$\vec{F}_i$$

Tỷ số $\frac{F_i}{q_i}$ chỉ phụ thuộc vào Q là điện tích gây ra điện trường và r xác định vị trí của điểm đang xét do đó có thể dùng nó để đặc trưng cho điện trường về phương diện tác dụng lực và gọi là vectơ cường độ điện trường \vec{E} của Q tại điểm đó.

Vậy: Vectơ cường độ điện trường \vec{E} tại một điểm trong điện trường có trị số bằng lực điện trường tác dụng lên một đơn vị điện tích dương đặt tại điểm đó và có hướng là hướng của lực tác dụng lên điện tích dương đó.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (9.15). \text{ Đơn vị trong hệ SI: } (\frac{V}{m})$$

2-2. Vectơ cường độ điện trường gây bởi hệ điện tích điểm:

□ Vectơ cường độ điện trường của một điện tích điểm:

Tại điểm M trong điện trường gây bởi điện tích điểm q, điện tích điểm q₀ chịu tác dụng của lực điện trường \vec{F} theo định luật Coulomb:

$$\vec{F} = k \frac{qq_0}{r^2} \vec{e}_r \quad \square \quad \vec{E} = k \frac{q}{r^2} \vec{e}_r \quad (9.16)$$

- Nếu q>0 thì \vec{E} cùng hướng với \vec{e}_r tức là hướng ra xa điện tích.

$$q > 0 \quad \square \longrightarrow \square \vec{E}$$

- Nếu q<0 thì \vec{E} ngược hướng với \vec{e}_r tức là hướng lại gần điện tích.

$$q < 0 \quad \ominus \longleftarrow \square \vec{E}$$

□ Nguyên lý chồng chất điện trường:

- Xét một hệ điện tích điểm q₁, q₂,q_n phân bố không liên tục trong không gian, điện tích q_i tác dụng lên q₀ một lực \vec{F}_i , hợp lực tác dụng lên q₀:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = kq_0 \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \vec{e}_{ri}$$

- Vectơ cường độ điện trường tổng hợp tại M.

$$\vec{E}_M = \frac{\vec{F}}{q_0} = \sum_{i=1}^n k \frac{q_i}{r_i^2} \vec{e}_{ri} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \quad (9.17)$$

- Nguyên lý: Vectơ cường độ điện trường gây bởi hệ điện tích điểm tại một điểm bằng tổng các vectơ cường độ điện trường do từng điện tích điểm của hệ gây ra tại điểm đó.

2-3. Vectơ cường độ điện trường gây bởi một vật tích điện:

Có thể mở rộng nguyên lý cho một vật tích điện bằng cách chia vật thành những phần rất nhỏ, mỗi phần có điện tích dq được coi là điện tích điểm. Mỗi điện tích gây ra cường độ điện trường:

$$d\vec{E} = k \frac{dq}{r^2} \vec{e}_r$$

Vectơ cường độ điện trường do toàn vật gây ra tại một điểm trong điện trường:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{d\vec{E}n}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int k \frac{dq}{r^2} \vec{e}_r \quad (9.18)$$

Mômen lưỡng cực điện

1. lưỡng cực điện:

Một hệ điện tích điểm $+q$ & $-q$ đặt cách nhau một đoạn l rất nhỏ so với khoảng cách từ $+q$ & $-q$ tới điểm đang xét lập thành một lưỡng cực điện.

2 Vectơ cường độ điện trường gây bởi lưỡng cực điện:

Xét điện trường tại điểm M nằm trên trung trục của l . Vectơ cường độ điện trường tại M do $+q$ gây ra là \vec{E}_1 và $-q$ là \vec{E}_2 .

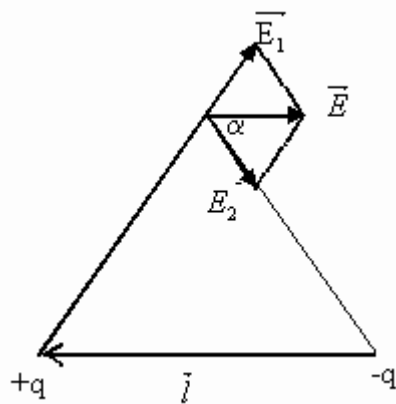
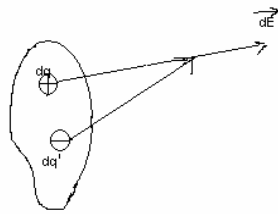
Vì $r_1 = r_2 = r$ nên $E_1 = E_2$ và có hướng như hình vẽ (9.6). Có độ lớn $E_1 = E_2 = k \frac{q}{r^2}$

Theo nguyên lý chồng chất $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ □

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\alpha = 2E_1^2(1+\cos\alpha) = 4E_1^2\cos^2\frac{\alpha}{2}$$

$$\square E = 2E_1\cos\frac{\alpha}{2}$$

$$\square E = 2k\frac{q}{r^2}\cos\frac{\alpha}{2} = k\frac{ql}{r^3} \quad (9.19)$$



3. Mômen lưỡng cực điện:

Trong hệ thức (9.19) nếu gọi vectơ \vec{l} hướng từ $-q$ đến $+q$ có độ lớn bằng l , thì vectơ

$$\vec{p}_e = q\vec{l} \quad (\text{C.m}) \quad (9.20)$$

Vectơ \vec{p}_e được gọi là mômen lưỡng cực điện.

Ngoài đơn vị C.m người ta còn dùng đơn vị đơbai (debye) ký hiệu D.

$$1D = 1/3 \cdot 10^{-29} \text{ Cm}$$

Khi đó (9.19) có thể viết: $\vec{E} = -k \frac{P_e}{r^3}$

4. Sự phân cực của phân tử:

4-1. Các phân tử có cực:

Do sự phân bố không đối xứng của các electron trong phân tử đối với các ion dương đã làm cho tâm hấp dẫn các ion dương và ion âm không trùng nhau, nên mỗi phân tử là một lưỡng cực điện.

Ví dụ: phân tử HCl có liên kết có cực, đám mây điện tử nằm lệch về phía nguyên tử Cl nên tâm hấp dẫn các electron ở gần Cl, tâm hấp dẫn các ion dương ở gần H tạo thành một lưỡng cực có P_e hướng từ Cl sang H.

Phân tử H₂O; NH₃...cũng là những phân tử có cực.

4-2. Phân cực do tác dụng của trường ngoài:

Các phân tử hay nguyên tử cũng có thể bị phân cực khi đặt trong trường ngoài, trường này có tác dụng “kéo” các điện tích dương và các điện tích âm ngược chiều nhau. Các đám mây điện tử bị biến dạng, các chiều dài, các góc của các liên kết hoá học có thể bị thay đổi làm tính chất của phân tử có thể bị thay đổi.

Điện cảm - Thông lượng cảm ứng điện - Định lý O-G (OSTROGRADSKI-GAUSS) và ứng dụng

1. Điện cảm:

1-1. Định nghĩa:

Trong hệ thức định nghĩa của cường độ điện trường (9.15), lực F phụ thuộc hằng số điện môi ϵ đặc trưng cho môi trường đặt các điện tích vì vậy vectơ cường độ điện trường cũng phụ thuộc vào môi trường, do đó khi đi từ môi trường này sang môi trường khác cường độ điện trường biến đổi gián đoạn. Sự biến đổi gián đoạn của \vec{E} không thuận tiện đối với nhiều phép tính về điện trường và tính liên tục của đường dòng do đó để mô tả điện trường người ta còn dùng một đại lượng vật lý không phụ thuộc vào tính chất của môi trường gọi là vectơ cảm ứng điện \vec{D} (hay gọi tắt là vectơ điện cảm) và D gọi là cảm ứng điện (hay điện cảm).

Định nghĩa:

Trong môi trường đồng chất vectơ điện cảm được xác định bởi hệ thức:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (9.21)$$

Với định nghĩa đó, ta thấy vectơ điện cảm biến đổi liên tục qua mặt phân cách giữa hai môi trường.

1-2. Vectơ cảm ứng điện gây bởi điện tích điểm:

$$\vec{D} = \frac{q}{4\pi r^2} \vec{r} \quad (9.22)$$

Hằng số 4π trong hệ thức biểu diễn tính chất đối xứng cầu của điện trường.

Tính chất đối xứng cầu được bảo toàn đối với vectơ cảm ứng điện \vec{D} .

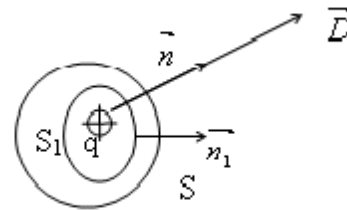
Vectơ \vec{D} cũng thỏa mãn nguyên lý chồng chất: $\vec{D} = \sum_i \vec{D}_i$; $\vec{D} = \int_{toàn\text{vũ\text{v}}}\vec{dD}$

2. Thông lượng cảm ứng điện (điện thông):

Thông lượng của \vec{D} qua mặt S: $\Phi_e = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_S D_x \cos \alpha$ (9.23)

α là góc giữa \vec{n} và \vec{D}

Với các mặt S kín: $\Phi_e = \int_S D_x \cos \alpha$



Pháp vectơ có chiều dương hướng ra phía ngoài mặt kín S.

Hình 9-7: Thông lượng của \vec{D} qua

Ví dụ: Tính điện thông gây bởi 1 điện tích điểm $q > 0$ qua mặt cầu bao quanh điện tích đó và nhận q làm tâm. Trên mặt cầu S chọn diện tích nguyên tố dS có pháp vectơ \vec{n} . Điện cảm tại M $\hat{=} dS$:

$$D = \frac{q}{4\pi r^2}$$

Vì M $\hat{=} S$ có $r = \text{const}$ nên $D = \text{const}$ và $\alpha = 0$, với mọi điểm M $\hat{=} S$ do đó:

$$\Phi_e = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = D \int_S ds = D \cdot 4\pi r^2 = q$$

Dễ dàng nhận thấy vì tính liên tục của D nên với mọi mặt kín S_i bao quanh điện tích q một lần điện thông là không đổi.

$$\Phi_e = \int_{S_i} \vec{D} \cdot d\vec{s} = q = \text{const}$$

3. Định lý O-G:

3-1. Định lý O-G:

Từ kết quả ở thí dụ trên ta thấy nếu trong mặt kín S có nhiều điện tích điểm q_1, q_2, \dots, q_n thì từ nguyên lý chồng chất điện trường ta suy ra:

$$\Phi_e = \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \sum_{i=1}^n q_i \quad (9.24)$$

Định lý: Điện thông qua một mặt kín bất kỳ bằng tổng số các điện tích nằm trong mặt kín đó.

3-2. Định lý O-G dạng vi phân:

- Từ định nghĩa của divergence:

$$\text{Div } \vec{D} = \lim \frac{\Delta \Phi_e}{\Delta V} = \frac{d\Phi_e}{dV} \square d\Phi_e = \text{div } \vec{D} \cdot dV$$

• Gọi ρ là mật độ điện tích của dV thì:

$$q = \int_V \rho dV$$

$$\text{Vậy: } \int_V \text{div } \vec{D} \, dV = \int_V \rho dV$$

Vì thể tích V được chọn bất kỳ nên:

$$\text{Div } \vec{D} = \rho \quad (9.25)$$

Phương trình (9.25) là dạng vi phân của định lý O-G hay còn gọi là phương trình Poisson.

4. Ứng dụng:

Định lý O-G cho phép xác định cường độ điện trường hoặc điện cảm trong trường hợp sự phân bố điện tích có tính chất đối xứng 1 cách rất tiện lợi. Dưới đây ta xét một số thí dụ:

4-1. Điện trường của một mặt cầu tích điện đều:

- Một mặt cầu bán kính R , tích một lượng điện tích Q phân bố đều trên bề mặt. Hãy xác định E & D tại các điểm bên trong & bên ngoài mặt cầu.
- Vì điện tích được phân bố đều trên mặt cầu nên mật độ điện mặt $s = Q/S = \text{const} \square D(r, \theta, \phi) = D(r)$ nghĩa là trường có tính chất đối xứng cầu, do đó vectơ cảm ứng điện tại mỗi điểm luôn có phương đi qua tâm cầu.

Để áp dụng định lý O-G ta chọn một mặt kín S là mặt cầu đồng tâm với mặt cầu tích điện bán kính r , đi qua điểm tính điện trường.

$$\Phi_e = \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \oint_S D \, dS = D \cdot 4\pi r^2 = \sum_i q_i$$

- Trường hợp $r < R$:

Trong mặt S không có điện tích $q = 0$

Vậy $D = 0 \Rightarrow E = 0$

- Trường hợp $r > R$:

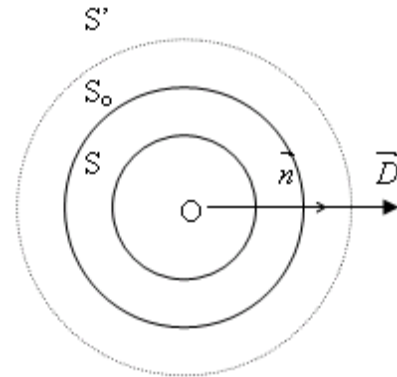
Trong S' $\sum_i q_i = Q \Rightarrow D \cdot 4\pi r^2 = Q$

$$D = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

- Cường độ điện trường:

$$\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \vec{n}$$

- Nhận xét: Đối với những điểm nằm ngoài mặt cầu vector cường độ điện trường có hệ thức giống như vector cường độ điện trường gây bởi một điểm tích điện Q đặt tại tâm cầu.



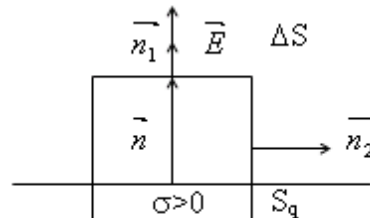
Hình (9.8)

4-2. Điện trường gây bởi mặt phẳng vô hạn tích điện đều:

- Một mặt phẳng vô hạn tích điện đều với mật độ điện mặt s . Hãy xác định \vec{D} , \vec{E} tại M ở gần mặt tích điện.
- Vì tính chất vô hạn của mặt tích điện, và sự phân bố điện tích là đều nên điện trường do nó gây ra là một điện trường đều có vector cảm ứng điện vuông góc với mặt tích điện.

Để tính cường độ điện trường tại điểm M, ta chọn một mặt trụ có đường sinh vuông góc với mặt tích điện, 2 đáy có diện tích ΔS . Điện thông qua mặt kín đó

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_{S_1} \vec{D} \cdot d\vec{s} + \int_{S_2} \vec{D} \cdot d\vec{s}$$



Gọi \vec{n}_1 là pháp vectơ của DS, gọi \vec{n}_2 là pháp vectơ của Sxq thì $\vec{D} \cdot \vec{n}_1$ & $\vec{D} \wedge \vec{n}_2$ nên:

$$\int_{S_w} \vec{D} d\vec{S} = 0 \quad \square \quad \int_{\Delta S} \vec{D} d\vec{S} = D \cdot \Delta S \quad \& \quad \int_{\Delta S} \sigma dS = \sigma \Delta S$$

Theo định lý O-G: $D \cdot \Delta S = \sigma \Delta S$ & $D = \frac{\sigma}{2} \Rightarrow E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}$

Trường hợp mặt phẳng tích điện hữu hạn, nhưng điểm M ở rất gần với mặt phẳng tích điện, vẫn có thể áp dụng được hệ thức ở trên với một sai số nào đó.

Điện thế và hiệu điện thế - Lưu số của vectơ cường độ điện trường - Gradient điện thế

1. Điện thế và hiệu điện thế.

1-1. Công của lực tĩnh điện:

Một điện tích điểm q_0 dịch chuyển trong điện trường gây bởi điện tích điểm q từ điểm M đến điểm N, theo một đường cong L nào đó: điện tích q tác dụng lên q_0 một lực, theo định luật Coulomb:

$$\vec{F} = k \frac{qq_0}{\epsilon r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

Công nguyên tố dA của F trong dịch chuyển vi phân $d\vec{S}$:

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{S} = F ds \cos \alpha$$

Chú ý rằng $ds \cos \alpha = dr$

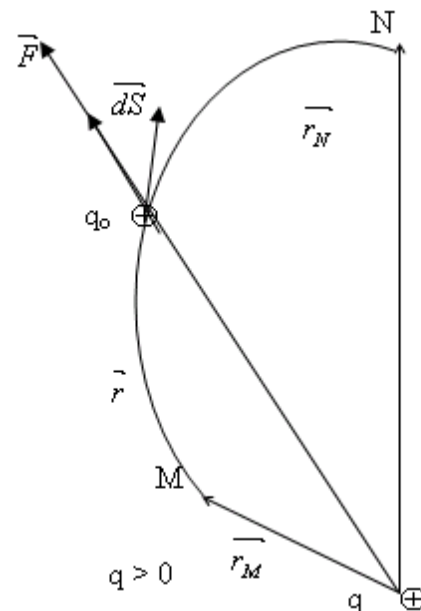
$$dA = F dr.$$

Công của lực tĩnh điện khi q_0 dịch chuyển từ M tới N:

$$AMN = \int_M^N dA = \int_M^N F dr = \frac{kqq_0}{\epsilon} \int_M^N \frac{dr}{r^2} = k \frac{qq_0}{\epsilon} \left(\frac{1}{r_M} - \frac{1}{r_N} \right)$$

$$AMN = k \frac{qq_0}{\epsilon} \left(\frac{1}{r_M} - \frac{1}{r_N} \right) \quad (9.26)$$

Như vậy: công của lực tĩnh điện làm dịch chuyển điện tích điểm q_0 trong



Hình 9-11

điện trường của điện tích điểm q, không phụ thuộc vào dạng đường cong dịch chuyển, mà chỉ phụ thuộc vào vị trí điểm đầu và điểm cuối của chuyển dời.

- Nếu q₀ dịch chuyển trong điện trường của một hệ n điện tích điểm thì lực điện trường tổng hợp tác dụng lên q₀ bằng:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \quad \text{với} \quad \vec{F}_i = k \frac{q_i q_0}{r_i^2} \vec{r}_i$$

Công của lực điện trường:

$$AMN = \int_M^N \vec{F} \cdot d\vec{s} = \sum_{i=1}^n \int_M^N \vec{F}_i \cdot d\vec{s}$$

Nhưng theo (9.26)

$$\int_M^N \vec{F}_i \cdot d\vec{s} = \frac{q_0 q_i}{4\pi \epsilon \epsilon_0} \left(\frac{1}{r_{iM}} - \frac{1}{r_{iN}} \right)$$

Trong đó r_{iM} và r_{iN} lần lượt là khoảng cách từ điện tích q_i đến điểm M và N. Từ đó ta có:

$$AMN = \sum_{i=1}^n \frac{q_0 q_i}{4\pi \epsilon \epsilon_0} \left(\frac{1}{r_{iM}} - \frac{1}{r_{iN}} \right) \quad (9.27)$$

Công AMN cũng không phụ thuộc vào dạng đường chuyển dời mà chỉ phụ thuộc vào điểm đầu và điểm cuối.

1-2. Lưu số của vectơ cường độ điện trường:

$$AMN = \int_C \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_C q_0 \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad \square \quad C = \int_C \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{A_{AMN}}{q_0}$$

- Nếu C là một đường cong kín $M \equiv N$ \square $r_M = r_N$ \square $A = \oint_C \vec{F} \cdot d\vec{s} = \oint_C q_0 \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (9.28)$$

Vậy: Lưu số của vectơ cường độ trường tĩnh điện dọc theo một đường cong kín bằng không. Trường tĩnh điện là một trường thế.

2. Thế năng của một điện tích trong điện trường:

- Trường tĩnh điện là trường thế nên công của lực trường bằng cường độ giảm thế năng của điện tích q₀ khi dịch chuyển từ điểm M đến điểm N của trường:

$$AMN = \int_M^N q_0 \overline{E} ds = WM - WN \quad (9.29)$$

- Nếu điện trường do điện tích điểm q gây ra, thì theo (9.26)

$$AMN = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_M} - \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_N} = WM - WN$$

Vì WM chỉ phụ thuộc vào tọa độ của điểm M mà không phụ thuộc vào tọa độ của điểm N , WN chỉ phụ thuộc vào tọa độ của N do đó:

$$WM = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r_M} + W_0 \quad \text{và} \quad WN = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r_N} + W_0$$

Với W_0 là một hằng số tùy ý. Nếu quy ước $W_\infty = 0$ thì $W_0 = 0$ và thế năng của q_0 ở một điểm nào đó cách q một khoảng r là:

$$W = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r} \quad (9.30)$$

W gọi là thế năng tương tác của hệ 2 điện tích q và q_0

- Trong trường hợp tổng quát điện tích điểm q_0 dịch chuyển trong điện trường có cường độ điện trường E (với quy ước $W_\infty = 0$) từ điểm M ra xa vô cùng:

$$WM = \int_M^\infty q_0 \overline{E} ds \quad (9.31)$$

3. Điện thế và hiệu điện thế:

3-1: Điện thế:

- Định nghĩa: điện thế của điện trường tại một điểm bằng tỷ số giữa thế năng của điện tích q_0 tại điểm đang xét và điện tích q_0 đó.

$$V = \frac{W}{q_0}$$

- Điện thế của gây bởi điện tích điểm q tại điểm cách điện tích q một khoảng r :

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \quad (9.32)$$

- Điện thế tại điểm M bất kỳ trong điện trường:

$$V_M = \int_M^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (9.33)$$

3-2. Hiệu điện thế:

- Định nghĩa: Hiệu điện thế giữa hai điểm M và N trong điện trường có trị số bằng công của lực điện trường làm dịch chuyển một đơn vị điện tích dương giữa hai điểm đó.

$$U_{MN} = V_M - V_N = \frac{A_{MN}}{q_0} = \int_{(MN)} \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (9.34)$$

4. Gradient điện thế:

4-1. Mặt đẳng thế:

- Mặt đẳng thế là quỹ tích của những điểm có cùng điện thế. Phương trình của mặt đẳng thế: $V = \text{const}$
- Tính chất của mặt đẳng thế:
 - Từ (9.34) \square $A_{MN} = q_0 (V_M - V_N)$, nếu M và N nằm trên một đẳng thế thì: $V_M = V_N$ do đó $A_{MN} = 0$

Vậy: Công của lực tĩnh điện làm dịch chuyển điện tích q_0 trên một mặt đẳng thế bằng không:

- Từ hệ thức $dA = q_0 \vec{E} \cdot d\vec{S}$ nếu $dS \square$ mặt $V = \text{const}$ thì $dA = 0$

$$\square \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0 \text{ vì } E \neq 0 \text{ và } dS \neq 0 \text{ nên vectơ } \vec{E} \square d\vec{s}$$

Vậy: Vectơ cường độ điện trường tại một điểm trên mặt đẳng thế vuông góc với mặt đẳng thế tại điểm đó.

4-2. Gradient điện thế:

Gradient điện thế:

$$\text{grad } V = \frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k}$$

- Xét sự dịch chuyển của điện tích q_0 từ điểm M \square mặt đẳng thế V đến điểm N \square mặt đẳng thế $V + dV$ (với $dV > 0$) rất gần nhau. Công của lực điện trường:

$$dA = q_0 \vec{E} \cdot d\vec{s} = q_0 [V - (V + dV)] = -q_0 dV \square \vec{E} \cdot d\vec{s} = -dV$$

Vì $dV > 0$ nên $\vec{E} \cdot d\vec{s} = E dS \cos\alpha < 0$ hay $\cos\alpha < 0$ nghĩa là \vec{E} luôn hướng theo chiều điện thế giảm.

- Trong hệ tọa độ Oxyz:

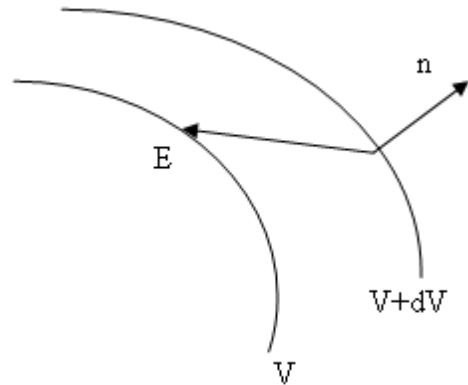
$$\vec{E} \cdot d\vec{s} = E_x dx + E_y dy + E_z dz$$

- Vì dV là vi phân toàn phần nên:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial z} dz$$

Do đó: $E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}$; $E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}$; $E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}$

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k} \right)$$



Hình (9.12)

□ $\vec{E} = -\text{grad}V$ (9.36)

Véc-tơ cường độ điện trường \vec{E} tại một điểm bất kỳ trong điện trường bằng và trái dấu với gradient điện thế tại điểm đó.

Chất điện môi - Hiện tượng phân cực điện trường trong điện môi

1. Chất điện môi:

Theo vật lý cổ điển, điện môi là những chất không dẫn điện, khác với chất dẫn điện môi không có các hạt mang điện tự do, do đó không có dòng điện trong điện môi.

Theo vật lý hiện đại, với một điện trường ngoài không lớn, electron liên kết không có đủ năng lượng để trở thành tự do nên không có dòng điện. Nếu điện trường ngoài đủ mạnh sao cho electron thu được năng lượng đủ để trở thành tự do, nó trở nên dẫn điện. Đó là hiện tượng đánh thủng điện môi.

Trong phần này, ta chỉ nghiên cứu điện môi không bị đánh thủng.

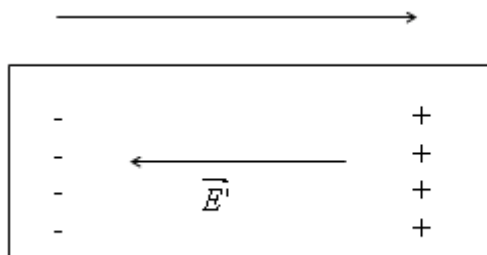
2. Hiện tượng phân cực điện môi:

2-1. Hiện tượng phân cực:

Thực nghiệm chứng tỏ rằng khi điện môi đồng chất và đẳng hướng đặt trong một điện trường ngoài thì trên các mặt giới hạn của điện môi (vuông góc với \vec{E}) xuất hiện những điện tích trái dấu \vec{E}_0

Nếu điện môi không đồng chất và đẳng hướng thì ngay trong lòng điện môi cũng xuất hiện điện tích.

Điện tích xuất hiện trên điện môi không thể tách riêng để chỉ còn một loại. Điện tích xuất hiện ở đâu thì định xứ ở đó, vì vậy gọi là điện tích liên kết.



Hình (9.13)

2-2. Vectơ phân cực: Khi bị phân cực mỗi phân tử điện môi trở thành một lưỡng cực điện có mômen lưỡng cực \vec{P}_i

Để đặc trưng cho mức độ phân cực của điện môi, người ta dùng một đại lượng gọi là vectơ phân cực điện môi.

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{P}_i}{\Delta V} \quad (9.37)$$

Trong đó \vec{P}_i là mômen lưỡng cực của phân tử thứ i; n số phân tử điện môi trong thể tích ΔV

Nếu gọi ϵ là hệ số phân cực của một đơn vị thể tích điện môi. Gọi \vec{E} là vectơ cường độ điện trường tổng hợp trong điện môi thì:

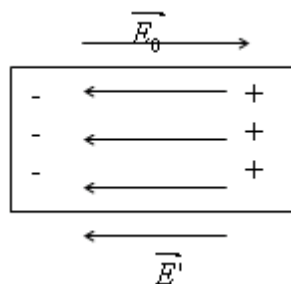
$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad \text{với } \chi > 0 \quad (9.38)$$

3. Điện trường trong điện môi:

Điện môi được đặt trong một điện trường ngoài có vectơ cường độ điện trường \vec{E}_0 , trên bề mặt điện môi xuất hiện điện tích liên kết, tạo ra một điện trường phụ \vec{E}' . Lúc này trong điện môi đồng thời tồn tại hai điện trường: điện trường ngoài \vec{E}_0 và điện trường phụ \vec{E}' , vậy điện trường tổng hợp: $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$

Trong trường hợp đơn giản nhất điện trường ngoài đều, điện môi là đồng chất có dạng một hình hộp và \vec{E} vuông góc với bề mặt điện môi thì \vec{E}_0 và \vec{E}' cùng phương ngược chiều nên:

$$E = E_0 - E'$$



Hình (9.14)

Nhưng: $E' = \frac{\sigma'}{\epsilon_0}$ mà $\sigma' = \rho = \tilde{\rho} \epsilon_0$ $E = E_0 - \chi E$

$$E = \frac{E_0}{1 + \chi} = \frac{E_0}{\epsilon} \quad (9.40)$$

Kết quả này cũng đúng cho trường hợp tổng quát.

Hằng số $\epsilon = 1 + \chi$ được gọi là hằng số điện môi.

Như vậy: Cường độ điện trường trong điện môi giảm đi ϵ lần so với cường độ điện trường trong chân không.

Năng lượng của trường tĩnh điện

1. Năng lượng của một hệ điện tích điểm

- Các điện tích tương tác với nhau với thế năng tương tác:

$$W_e = \sum_i^n \frac{q_0 q_i}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}$$

Vì vậy hệ điện tích có năng lượng.

- Để cụ thể hơn ta hãy xét một hệ hai điện tích điểm q_1 và q_2 tương tác với nhau, thế năng tương tác giữa chúng là:

$$W_e = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

Hay:
$$W_e = \frac{1}{2} q_1 \left(\frac{q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \right) + \frac{1}{2} q_2 \left(\frac{q_1}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \right)$$

Nhưng: $V_2 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$; $V_1 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$ V_2 là điện thế do q_1 gây ra tại điểm đặt q_2 , V_1 do q_2 gây ra tại điểm đặt q_1

$$W_e = \frac{1}{2} q_1 V_1 + \frac{1}{2} q_2 V_2$$

Một cách tổng quát cho hệ điện tích điểm q_1, q_2, \dots, q_n

$$W_e = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} q_i V_i \quad (9.42)$$

Trong đó V là điện thế tại điểm đặt điện tích q .

2. Năng lượng của trường tĩnh điện.

Một điện tích đặt trong điện trường, điện tích có thể dịch chuyển, tức là có khả năng sinh công. Do đó điện trường mang năng lượng.

Ta hãy xét điện trường giữa hai bản cực của một tụ điện phẳng:

$$W_e = \frac{1}{2}qV_1 + \frac{1}{2}(-q)V_2 = \frac{1}{2}qU = \frac{1}{2}\sigma \cdot SEd = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \varepsilon E^2 S \cdot d = \frac{1}{2}\varepsilon \varepsilon_0 E^2 \cdot V$$

Mật độ năng lượng: Vì điện trường giữa hai bản tụ là đều nên:

$$\omega_e = \frac{W_e}{V} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \varepsilon E^2 = \frac{1}{2}ED \quad (9.43)$$

Vậy mật độ năng lượng điện trường tỷ lệ với bình phương cường độ điện trường.

Suy rộng kết quả trên đây cho một điện trường bất kỳ với w_e là mật độ năng lượng điện trường tại điểm có cường độ điện trường E thì năng lượng điện trường trong thể tích nguyên tố dV là:

$$dW_e = \omega_e dV = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \varepsilon E^2 dV = \frac{1}{2}ED = \frac{1}{2}EDdV$$

Năng lượng điện trường trong không gian có thể tích V của điện trường là:

$$W_e = \frac{1}{2} \int_{(V)} DEdV \quad (9.44)$$

Bài đọc thêm

1. CÁC PHÂN BỐ ĐIỆN TÍCH

1-1. Các điện tích điểm:

- Một hạt là một vật có kích thước khác không và là một tổ hợp của các electron và nuclon, kích thước của các nuclon vào cỡ 10-15 m. Các định luật điện từ vẫn mô tả đầy đủ đặc tính của các hạt mang điện chừng nào những khoảng cách đang dùng là rất lớn so với kích thước của vật, khi đó ta không cần chú ý tới phân bố của điện tích trong vật và coi toàn bộ vật là một điện tích.
- Các vật tích điện có kích thước rất nhỏ so với khoảng cách giữa chúng, mỗi vật được coi là một điểm tích điện.

Như vậy: Với một sự gần đúng thoả mãn điều kiện của bài toán các vật có kích thước rất nhỏ so với khoảng cách giữa chúng là những điện tích điểm.

Một phân bố N điện tích điểm sẽ được xác định bởi tập hợp các vị trí \vec{r}_i của các điện tích q_i .

1-2. Các phân bố liên tục:

Một vật tích điện có kích thước lớn so với các khoảng cách khảo sát là một phân bố điện tích. Trong giới hạn gần đúng của khái niệm điện tích điểm các phân bố điện tích trên vật được coi là liên tục.

Tùy theo sự sắp xếp các điện tích trên vật mà các phân bố điện tích đượ chia thành 3 loại phân bố:

1-2-1. Phân bố thể tích:

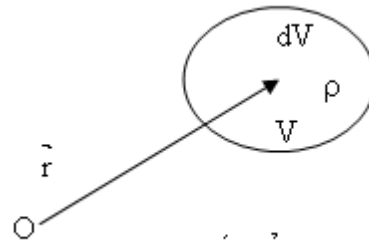
- Sự có mặt các điện tích phân bố trong toàn thể tích V của vật là một phân bố thể tích.
- Mật độ điện tích khối: Trong thể tích dV , chứa một điện lượng dq phân bố đều trong dV , mỗi đơn vị thể tích của dV có một điện lượng ρ được gọi là mật độ điện tích khối.

$$\rho = \frac{dq}{dV}$$

- Điện tích trên vật:

$$dq = \rho \cdot dV$$

$$dq = \int_V \rho dV$$



Phân bố thể tích

1-2-2. Phân bố mặt:

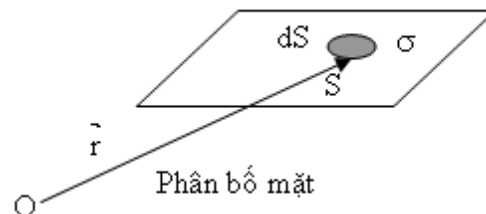
Sự có mặt các điện tích chỉ phân bố trên bề mặt của vật gọi là một phân bố mặt.

- Mật độ điện tích mặt: trên diện tích nguyên tố dS có một điện lượng dq thì mỗi đơn vị diện tích có một điện lượng σ gọi là mật độ điện mặt.

$$\sigma = \frac{dq}{dS}$$

- Điện lượng:

$$dq = \sigma dS \quad q = \int_S \sigma dS$$

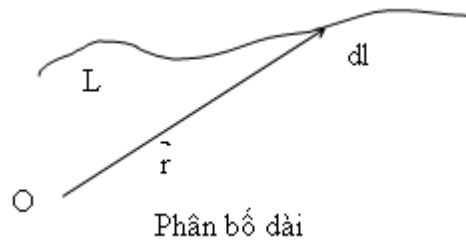


Phân bố mặt

1-2-3. Phân bố dài:

- Một vật có dạng một sợi chỉ có điện tích phân bố dọc theo chiều dài của vật là một phân bố dài.

- Mật độ điện dài: $\lambda = \frac{dq}{dl}$



- Điện lượng: $\square dq = \lambda dl \square q = \int_L \lambda dl$

1-3. TÍNH ĐỐI XỨNG CỦA CÁC PHÂN BỐ:

1-3-1. Đối xứng phẳng:

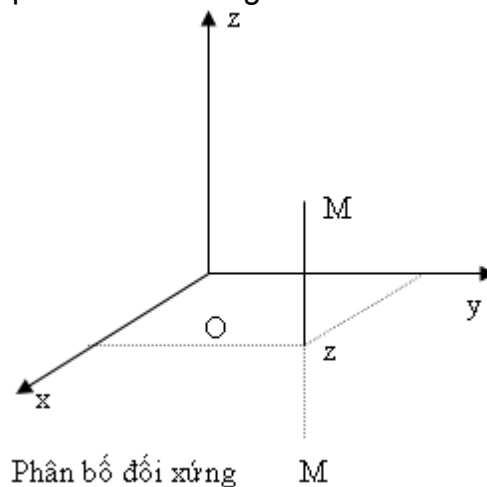
- Một phân bố điện tích D, có mật độ điện tích là một hàm của tọa độ $f(x,y,z)$ nếu $f(x,y,z)=f(x,y,-z)$ thì phân bố D là một phân bố đối xứng phẳng. Mặt đối xứng là mặt phẳng xOy .
- Ngược lại nếu mặt xOy là mặt tích điện thì trường do phân bố tạo ra có tính chất đối xứng phẳng.

1-3-2. Đối xứng cầu:

- Nếu hàm $f(r,q,j) = f(r)$ thì phân bố D là phân bố đối xứng cầu.
- Trường do phân bố D tạo ra cũng có tính chất đối xứng cầu.

1-3-3. Đối xứng trụ:

- Nếu $f(r,q,z) = f(r)$ thì phân bố D là phân bố đối xứng trụ.
- Trường do phân bố tạo ra cũng có tính chất đối xứng trụ.



2. ĐIỀU CẦN GHI NHỚ:

- Điện tích: Các điện tích quan sát được luôn là các bội số nguyên lần điện tích nguyên tố $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Bảo toàn điện tích: tổng đại số các điện tích được bảo toàn.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \vec{i} = 0$$

Trường tĩnh điện: $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ □ $Q = \text{const}$

■ Lực Coulomb: Lực tương tác giữa hai điện tích điểm đặt trong môi trường

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2} \vec{r}_{12}; \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.109 \frac{\text{N.m}^2}{\text{C}^2}$$

■ Vector cường độ điện trường:

• Hệ điện tích điểm:
$$\vec{E} = \sum_i^n \vec{E}_i = \sum_i^n k \frac{q_i}{\epsilon r_i^2} \vec{e}_i$$

• Các phân bố liên tục:
$$\vec{E} = \int_{\text{toàn bộ V}} k \frac{dq}{\epsilon r_i^2} \vec{e}_i$$

■ Lưu số của trường tĩnh điện:

- Lưu số của trường tĩnh điện là bảo toàn.
- Lưu số của trường tĩnh điện dọc theo một đường cong kín bằng không.

$$\oint_C \vec{E} d\vec{l} = 0$$

■ Điện thế:

• Điện tích điểm:
$$V = k \frac{q}{\epsilon_1 r} + V_0$$

• Hệ điện tích điểm:
$$V = \sum_i^n V_i$$

• Các phân bố liên tục:
$$V = \int_{\text{toàn bộ V}} dV = \int_{\text{toàn bộ V}} k \frac{dq}{\epsilon r}$$

■ Liên hệ giữa điện trường và điện thế: $\vec{E} = -\text{grad}V$

■ Thế năng của trường tĩnh điện:
$$W_e = \frac{1}{2} \sum_i q_i V_i$$

■ Năng lượng của trường tĩnh điện:
$$W_e = \frac{1}{2} \int_V \epsilon \epsilon_0 E^2 dV = \frac{1}{2} \int_V \vec{E} D dV$$

CHƯƠNG X: Dòng điện

Nhiệm vụ: Khảo sát chuyển động có hướng của các điện tích, từ đó, xây dựng các định luật chuyển động của chúng.

Mục tiêu:

- Mô tả chuyển động của các điện tích trong điện trường
- Các định luật vĩ mô của chuyển động của tập hợp lớn các điện tích.
- Áp dụng các định luật vĩ mô.

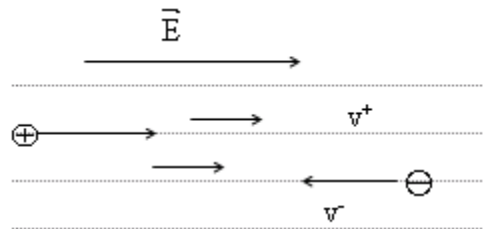
Dòng điện - Nguồn điện

1. Dòng điện:

1-1. Định nghĩa:

▪ Dòng điện là dòng chuyển dời có hướng của các hạt mang điện trong điện trường.

- Với vật dẫn loại 1: Bản chất của các hạt điện chuyển dời có hướng là các electron tự do.
- Với vật dẫn loại 2: Bản chất của các hạt điện chuyển dời có hướng là các ion dương và âm chuyển dời theo hai hướng ngược nhau.
- Đối với chất khí: Bản chất của các hạt điện chuyển dời có hướng là ion dương, ion âm và các electron.



Hình 10-1

Chuyển động của điện trong điện trường

▪ Quy ước chiều dòng điện là chiều chuyển động của các hạt điện dương, hay ngược chiều với chiều chuyển động của các hạt mang điện.

1-2. Các đại lượng đặc trưng của dòng điện:

1-2-1. Cường độ dòng điện:

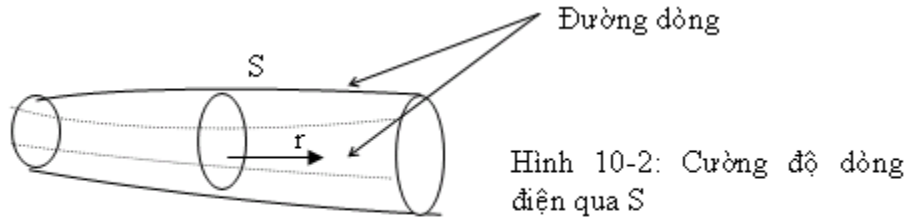
- Định nghĩa: Cường độ dòng điện qua diện tích S có trị số bằng điện lượng qua diện tích S trong một đơn vị thời gian.
- Công thức: Gọi dq là điện lượng qua S trong thời gian dt, thì cường độ

dòng điện qua S là:
$$i = \frac{dq}{dt} \quad (10.1)$$

Dòng điện không đổi là dòng điện có cường độ và chiều không đổi theo thời gian.

Vì $i = \text{const}$ nên $I = q/t$

Trong hệ SI đơn vị của cường độ dòng điện là Ampere ký hiệu là A: Ampere là một trong những đơn vị cơ bản của hệ SI.



1-2-2. Vectơ mật độ dòng:

$$J = \frac{di}{dS_n}$$

- Mật độ dòng điện qua dS

$dS_n = dS \cos \alpha$ là hình chiếu của dS lên mặt phẳng vuông góc với \vec{j}

- Vectơ mật độ dòng \vec{j} : Gọi n là mật độ các hạt mang điện, \vec{v} là vectơ vận tốc trung bình của các hạt mang điện, q là điện tích của các hạt thì:

$$\vec{j} = nq\vec{v} \quad (10.2)$$

Từ $J = \frac{di}{dS_n}$ □ $di = JdS_n = \vec{j} \cdot \vec{dS}$

Vậy: $i = \int_S \vec{j} \cdot \vec{dS}$ (10.3)

2. Nguồn điện:

2-1. Định nghĩa:

Giả sử có hai vật dẫn tích điện trái dấu A và B, vật A mang điện dương, vật B mang điện âm, đặt gần nhau thì giữa A và B có một điện trường tĩnh \vec{E}

Nếu nối A với B bằng một vật dẫn M thì các điện tích dương chuyển động theo chiều điện trường từ A sang B, các điện tích âm chuyển động theo chiều ngược lại. Trong vật dẫn M có dòng điện

Để duy trì dòng điện, cần phải đưa điện tích dương từ B về A, điện tích âm từ A sang B tức là cần phải làm cho chúng chuyển động ngược chiều lại với chiều lực tĩnh điện. Muốn vậy phải tác dụng lên chúng những lực không phải do

trường tĩnh điện gây ra, ta gọi là các lực phi tĩnh điện hay lực lạ. Trường lực gây ra lực lạ ấy gọi là trường lạ. Một cơ cấu tạo ra trường lạ ấy được gọi là nguồn điện.

Bản chất của lực lạ với các nguồn điện khác nhau là khác nhau. Thí dụ: trong Pin vàẮc quy lực lạ là lực tương tác phân tử, còn trong máy phát điện kiểu cảm ứng lực lạ là lực điện từ,...

HÌNH 10.3 NGUỒN ĐIỆN

2-2. Suất điện động của nguồn điện:

Suất điện động của nguồn điện có trị số bằng công của lực lạ làm dịch chuyển một đơn vị điện tích dương một vòng quanh mạch kín đó.

$$\varepsilon = \frac{A}{q} \quad (10.4a)$$

$$A = \oint_L q(\vec{E} + \vec{E}^*) \cdot d\vec{l} = \oint_L q\vec{E} \cdot d\vec{l} + \oint_L q\vec{E}^* \cdot d\vec{l} = \oint_L q\vec{E}^* \cdot d\vec{l} \Rightarrow \varepsilon = \oint_L \vec{E}^* \cdot d\vec{l}$$

Trường lực lạ chỉ tồn tại trong một phần của mạch:

$$\varepsilon = \int_{L_1} \vec{E}^* \cdot d\vec{l} \quad (10.4b)$$

Các định luật Kirchoff

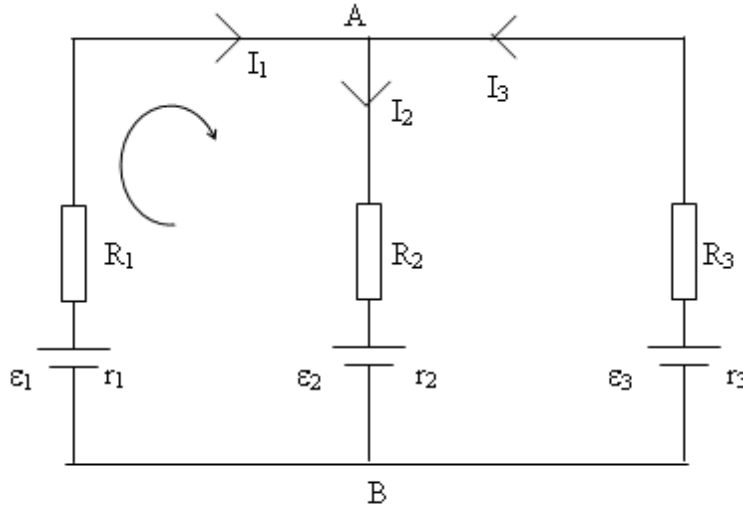
1. Định luật Kirchoff 1:

Định luật Kirchoff 1 viết cho một nút mạng, nút mạng là điểm chung của ít nhất từ 3 dây dẫn trở lên. Trên hình vẽ có 2 nút A và B.

Tại A các dòng I1; I3 đi vào nút A, dòng I2 đi ra xa nút A. Theo định luật bảo toàn điện tích trong một đơn vị thời gian có bao nhiêu điện tích đi tới A phải có bấy nhiêu điện tích ra khỏi A.

$$I1 + I3 = I2$$

$$I1 + I3 + (-I2) = 0$$



Hình 10.4 Mạch điện

Nếu quy ước dòng điện đi tới nút là dương, dòng điện đi xa nút là âm thì hệ

thức trên được viết thành:
$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (10.5)$$

Định luật: Tổng đại số các cường độ dòng điện tại một nút bằng không.

2. Định luật Kirchhof 2:

Định luật Kirchhof thứ 2 được viết cho một mạch kín không phân nhánh ta gọi là một mắt mạng. Trên hình vẽ ta có 3 mắt mạng: $AB \square I R_1 A$; $AB \square I R_3 A$; $AR_3 \square \square \square I \square$

Xét mắt mạng $AB \square I R_1 A$. Trên mắt mạng đó chọn một chiều dương tùy ý. Chẳng hạn cùng chiều kim đồng hồ, và chú ý: $V_A - V_B + V_B - V_A = 0$

Áp dụng định luật Ohm tổng quát cho đoạn mạch $A \square \square$ & $\square \square I \square$

$$V_A - V_B = \square_2 + I_2(R_2 + r_2) \quad (1)$$

$$V_B - V_A = -\square_1 + I_1(R_1 + r_1) \quad (2)$$

Cộng (1) vào (2)

$$\square_2 + I_2(R_2 + r_2) - \square_1 + I_1(R_1 + r_1) = 0$$

$$\square \square I + (-\square_2) = I_1(R_1 + r_1) + I_2(R_2 + r_2)$$

Nếu quy ước:

- Suất điện động mang dấu dương nếu đi theo chiều dương đã chọn ta gặp cực âm của nguồn điện trước, ngược lại thì suất điện động mang dấu âm.
- Cường độ dòng điện có dấu dương nếu nó cùng chiều với chiều dương đã chọn, ngược lại nó có dấu âm.

Hệ thức trên được viết lại thành:

$$\sum_{k=1}^n \mathcal{E}_k = \sum_{k=1}^n I_k (R_k + r_k) \quad (10.6)$$

Định luật: trong một mắt mạng tổng đại số các suất điện động bằng tổng đại số các độ giảm thế trên các điện trở.

Ví dụ:

$$\mathcal{E}_1 = 1V \quad \mathcal{E}_2 = 2V \quad \mathcal{E}_3 = 3V$$

$$r_1 = 0,5\Omega \quad r_2 = 0,5\Omega \quad r_3 = 0,5\Omega$$

$$R_1 = 0,5\Omega \quad R_2 = 3,5\Omega \quad R_3 = 1,5\Omega$$

- Phương trình cho nút: $I_1 - I_2 + I_3 = 0$ (1)
- Phương trình cho mắt: $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = I_1(R_1 + r_1) + I_2(R_2 + r_2)$ (2)

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3 = I_1(R_1 + r_1) - I_3(R_1 + r_3) \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_1 - I_2 + I_3 = 0 \\ I_1 + 4I_2 = -1 \Rightarrow I_2 = -(1 + I_1) \frac{1}{4} \\ I_1 - 2I_3 = -2 \Rightarrow I_3 = (2 + I_1) \frac{1}{2} \end{cases}$$

Thế I_2 và I_3 vào (1):

$$I_1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}I_1 + 1 + \frac{1}{2}I_1 = 0$$

$$7I_1 = -5 \quad I_1 = -\frac{5}{7}A$$

$$I_2 = -\left(1 - \frac{5}{7}\right) \frac{1}{4} = -\frac{1}{14}A$$

$$I_3 = \left(2 - \frac{5}{7}\right) \frac{1}{2} = \frac{9}{14}A$$

Dòng I_1 và I_2 âm, chứng tỏ chiều của các dòng điện đó ngược với chiều đã chọn.

Điều cần ghi nhớ

- Dòng điện là dòng chuyển dời có hướng của các hạt mang điện trong điện trường.
- Cường độ dòng điện liên quan với điện lượng qua S : $I = dq/dt$

• Vector mật độ dòng: $\vec{j} = n_0 q \vec{v}$ suất điện động $\mathcal{E} = \int_L \vec{E} \cdot d\vec{l}$

• Dòng điện không đổi: $\vec{j} = \text{const}$

• Định luật Kirchoff: $\sum_K I_K = 0$

$$\sum_K \mathcal{E}_K = \sum_K (R_K + r_K) I_K$$

Bài đọc thêm

Các chất bán dẫn điện:

Các dụng cụ bán dẫn là trái tim của cuộc cách mạng số hoá các lĩnh vực của cuộc sống.

Để nhận biết các tính chất của chất bán dẫn chúng ta hãy so sánh tính chất dẫn điện của kim loại điển hình Cu với bán dẫn điển hình Si.

Tính chất	Đơn vị	Đồng	Silic
Loại vật liệu		Kim loại	Chất bán dẫn
Mật độ hạt tải điện	Hạt/m ³	9.10 ²⁸	1.10 ¹⁶
Điện trở suất	Ω.m	2.10 ⁻⁸	3.10 ³
Hệ số nhiệt của điện trở suất	K ⁻¹	+4.10 ⁻³	-70.10 ⁻³

Bảng so sánh cho thấy:

- So với đồng, silic tinh khiết có rất ít các hạt tải điện. điện trở suất lớn hơn rất nhiều, hệ số nhiệt điện trở vừa lớn vừa âm.
- Hệ số nhiệt điện trở âm nghĩa là điện trở của Si giảm khi nhiệt độ tăng theo hệ thức:

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{B}{T}} \quad (B \text{ là hằng số đặc trưng cho chất bán dẫn, } T \text{ là nhiệt độ tuyệt đối})$$

Nhiệt độ tăng kéo theo mật độ các hạt tải điện tăng nên điện trở giảm. điều đó hoàn toàn trái ngược với đồng.

Về mặt cấu trúc năng lượng tinh thể bán dẫn có một vùng năng lượng bị chiếm đầy đến miền cấm ngoài miền cấm là miền dẫn. Dưới tác dụng của điện trường ngoài các electron dẫn tạo thành dòng điện. Sự chuyển động của các electron từ miền đầy lên miền dẫn tạo ra những trạng thái năng lượng bị bỏ trống lập tức các electron từ trạng thái năng lượng thấp lên chiếm chỗ trống đó các electron

khác lại nhảy lên lấp lỗ trống đó tạo thành lỗ trống tham gia vào quá trình dẫn điện.

Mặt khác tính chất dẫn điện của silic biến đổi một cách đáng kể khi cho thêm vào silic tinh khiết một lượng tạp chất nhỏ. Như vậy với những lượng tạp chất khác nhau thì tính chất dẫn điện của silic cũng khác nhau đến mức có thể phân biệt được ở những phần tử rất nhỏ. Đó chính là cơ sở để tạo ra các tập hợp lớn các phần tử có tính chất khác nhau có thể phân biệt được. Nếu mỗi phần tử được liên kết với một đối tượng thì tập hợp các đối tượng phần tử đó là một sự vật cần biểu diễn.

Ngoài Silic trong tự nhiên còn có nhiều nguyên tố hoá học khác như: Ge, Se, B, C, P,... cũng như các tập hợp chất hai thành phần như CuCl, CuO, ... hoặc ba thành phần như CuAlS₂... Một số hợp chất hữu cơ, một số vật liệu vô định hình cũng có tính chất bán dẫn.

CHƯƠNG XI: Từ trường và cảm ứng điện từ

Nhiệm vụ: Khảo sát sự tương tác giữa các điện tích chuyển động và tác dụng của dòng điện đối với không gian bao quanh và ngược lại. Từ đó xây dựng các khái niệm và định luật cơ bản của từ trường và cảm ứng điện từ.

Mục tiêu:

- Tương tác từ và định luật Ampere.
- Từ trường và các đặc trưng của từ trường
- Các tác dụng của từ trường lên dòng điện và các hiệu ứng.

Tương tác từ

1. Tương tác từ:

1-1. Thí nghiệm:

- Đặt 2 cực của 2 thanh nam châm gần nhau thì chúng có thể hút, hoặc đẩy nhau tùy theo các cực đặt gần nhau của chúng là cùng tên hay khác tên. Các thanh nam châm lại có thể hút được vụn sắt. Vì lý do đó người ta nói rằng nam châm có từ tính và gọi tương tác giữa các nam châm là tương tác từ.
- Khi đặt một kim nam châm gần một dòng điện, kim châm quay đi. Ngược lại khi đưa một thanh nam châm lại gần một cuộn dây có dòng điện chạy qua nó có thể hút hoặc đẩy cuộn dây đó.

1-2. Tương tác từ:

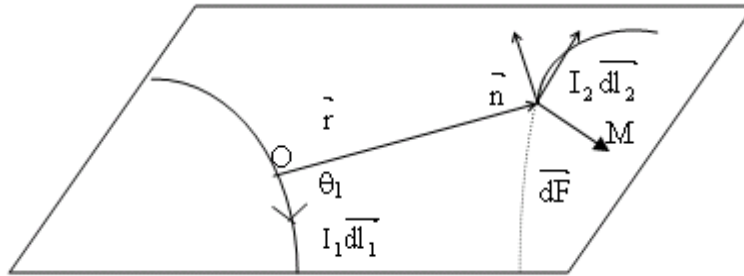
Trong tất cả các thí nghiệm ở trên, tương tác giữa ácc nam châm, giữa nam châm và dòng điện, giữa các dòng điện với nhau đều có cùng bản chất đó là tương tác giữa các điện tích chuyển động và gọi chung là tương tác từ.

Vậy: Tương tác từ là tương tác giữa các điện tích chuyển động, lực trong tương tác gọi là lực từ.

2. Định luật Ampere về tương tác từ:

▪ Định luật Ampere xác định lực tương tác giữa hai phần tử dòng điện. Giả sử có hai dòng điện I_1 và I_2 chạy trong hai dây dẫn đặt trong chân không, trên mỗi dòng điện ta lấy một đoạn dây dl sao cho có thể coi là đoạn thẳng và gọi $I_1 d\vec{l}_1$, $I_2 d\vec{l}_2$ là 2 vectơ có độ lớn bằng $I_1 dl_1$, $I_2 dl_2$ có chiều của dòng điện là các phần tử dòng điện.

Vẽ $\vec{OM} = \vec{r}$, gọi góc giữa $I_1 d\vec{l}_1$ và \vec{r} là θ_1 . Vẽ mặt phẳng P chứa $I_1 d\vec{l}_1$ và điểm M, tại M vẽ vectơ pháp tuyến \vec{n} của P, gọi góc giữa \vec{n} và $I_2 d\vec{l}_2$ là θ_2 .



▪ Định luật: Lực từ $d\vec{F}$ do phần tử dòng điện $I_1 d\vec{l}_1$ tác dụng lên phần tử dòng điện $I_2 d\vec{l}_2$ cùng đặt trong chân không.

Có phương vuông góc với mặt phẳng chứa $I_2 d\vec{l}_2$ và vectơ \vec{n} .

Có chiều sao cho 3 vectơ $I_2 d\vec{l}_2$, \vec{n} , $d\vec{F}$ theo thứ tự đó lập thành tam diện thuận.

- Có độ lớn:

$$dF = k \frac{I_1 dl_1 \sin \theta_1 I_2 dl_2 \sin \theta_2}{r^2} \quad (11.1)$$

Với k là hệ số tỷ lệ phụ thuộc vào đơn vị đo các đại lượng trong công thức. Trong hệ SI

$$k = \frac{\mu_0}{4\pi} \quad \text{với} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \text{ gọi là hằng số từ}$$

$$dF = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 dl_1 \sin \theta_1 I_2 dl_2 \sin \theta_2}{r^2}$$

$$\text{Vì } (I_1 d\vec{l}_1 \wedge \vec{r}) = n I_1 dl_1 r_1 \sin \theta_1; (I_2 d\vec{l}_2 \wedge \vec{n}) \uparrow \uparrow d\vec{F} \Rightarrow d\vec{F} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 d\vec{l}_2 \wedge \vec{r}}{r^3} \quad (11.2)$$

▪ Khi hai dòng điện đặt trong một trường đồng chất nào đó thì lực từ tăng lên m lần so với lực từ trong chân không. m gọi là độ từ thẩm của một trường

$$\vec{dF} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 d\vec{l}_2 \wedge (I_1 d\vec{l}_1 \wedge \vec{r})}{r^3} \quad (11.3)$$

Từ trường - Vector cảm ứng từ - Định luật Biot-Savar-Laplace

1. Khái niệm từ trường:

Một dòng điện (hay một nam châm) gây ra ở không gian xung quanh nó một từ trường. Thông qua từ trường mà lực từ được chuyển đi với một vận tốc hữu hạn. Từ trường tác dụng lực từ lên dòng điện hay nam châm đặt trong nó. Từ trường mang năng lượng, có xung lượng và khối lượng do đó nó là một dạng tồn tại của vật chất.

Vậy: Từ trường là một dạng vật chất, mà biểu hiện cụ thể của nó là tác dụng lực từ lên các dòng điện hay nam châm đặt trong nó.

2. Vector cảm ứng từ:

2-1. Vector cảm ứng từ;

$$\vec{dF} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 d\vec{l}_2 \wedge (I_1 d\vec{l}_1 \wedge \vec{r})}{r^3}$$

• Từ định luật Ampere:

$$\vec{dB} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 d\vec{l}_1 \wedge \vec{r}}{r^3}$$

Ta nhận thấy vector: (11.4)

Chỉ phụ thuộc vào I_1 là phần tử dòng điện sinh ra từ trường và vector \vec{r} xác định vị trí $I_2 d\vec{l}_2$.

Vì vậy vector \vec{dB} có thể đặc trưng cho từ trường tại điểm đang xét về phương diện tác dụng lực. Ta gọi \vec{dB} là vector cảm ứng từ do phần tử dòng điện $I_1 d\vec{l}_1$ sinh ra tại điểm M.

2-2. Định luật Biot-Laplace:

Hệ thức (11.4) được Bio-Xavar-Laplace đưa ra từ thực nghiệm, do đó còn được gọi là định luật Biot-Xavart-Laplace.

• Định luật: Vector cảm ứng từ \vec{dB} do một phần tử dòng điện I gây ra tại M cách phần tử dòng điện một khoảng \vec{r} là một vector có:

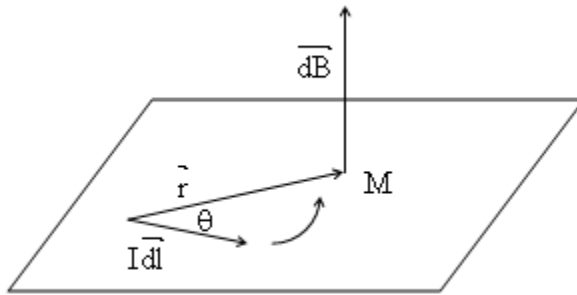
- Có gốc tại điểm M
- Có hướng sao cho $I d\vec{l}$; \vec{r} ; \vec{dB} lập thành một tam diện thuận.
- Có độ lớn (gọi là cảm ứng từ) được xác định bởi hệ thức:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \theta}{r^2}$$

Hướng của $d\vec{B}$ cũng có thể xác định theo quy tắc cái đinh ốc “Quay cái đinh ốc theo chiều từ $I d\vec{l}$ đến \vec{r} theo góc \square chiều tiến của cái đinh ốc chỉ chiều của $d\vec{B}$ ”.

• Định luật Ampere:

$$d\vec{F} = I_0 d\vec{l} \wedge d\vec{B} \quad (11.5)$$



Hình 11-2. Vectơ cảm ứng từ.

2-3. Nguyên lý chồng chất từ trường:

• Vectơ cảm ứng từ do một dòng điện bất kỳ gây ra tại điểm M:

$$\vec{B} = \int_{\text{cả dòng điện}} d\vec{B} \quad (11.6)$$

• Vectơ cảm ứng từ do n dòng điện gây ra tại cùng một điểm:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i \quad (11.7)$$

Mômen từ - Từ thông - Định lý O-G cho từ trường - Tính chất xoáy của từ trường

1. Mômen lực từ:

• Xét từ trường của một dòng điện có dạng một đường tròn bán kính R tại những điểm nằm trên trục của đường tròn. Vectơ cảm ứng từ tại điểm M cách

tâm vòng tròn một khoảng h:

$$\vec{B} = \int_L d\vec{B} = \int_L \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

- Phân tử dòng điện $I d\vec{l} \perp \vec{r}$ nên $\square = 90^\circ$, vì tính chất đối xứng nên ta luôn tìm được một cặp hai phân tử dòng điện đối xứng qua tâm gây ra các cảm ứng từ $d\vec{B}_1$ và $d\vec{B}_2$ có độ lớn bằng nhau và đồng phẳng.

Vì vậy:
$$\vec{B} = \int_L d\vec{B}_n + \int_L d\vec{B}_t = \int_L d\vec{B}_n \quad \text{với: } dB_n = dB \cos \theta = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{IR}{r^3} dl$$

$$B = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu\mu_0 I 3R}{4\pi r} dl = \frac{\mu\mu_0 IR}{4\pi r^3} 2\pi R = \frac{\mu\mu_0 I (\pi R^2)}{4\pi (R^2 + h^2)^{3/2}}$$

$$B = \frac{\mu\mu_0 IS}{4\pi (R^2 + h^2)^{3/2}}$$

Vector điện tích $\vec{S} = S\vec{n}$ mà $\vec{n} \uparrow \uparrow \vec{B} \Rightarrow \vec{B} = \frac{\mu\mu_0 IS}{4\pi (R^2 + h^2)^{3/2}} \vec{n}$

Đặt: $\vec{P}_m = IS$ (11.8)

\vec{P}_m gọi là vector mômen từ của dòng điện tròn có độ lớn $P_m = IS$ có hướng của

\vec{n} do đó cùng chiều với \vec{B} nên: $\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 \vec{P}_m}{2\pi (R^2 + h^2)^{3/2}}$ dòng điện tròn

Khái niệm vector momen từ vẫn áp dụng đúng cho một dòng điện kín bất kỳ với S là diện tích phẳng vuông góc với \vec{n} của mạch.

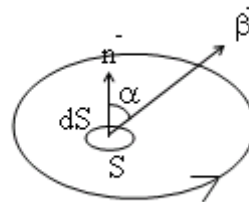
Nếu biết \vec{P}_m ta xác định được \vec{B} .

2. Từ thông:

Trong từ trường về một mặt có diện tích S . Tại điểm có vector điện tích nguyên tố $d\vec{S}$ từ trường qua dS có vector cảm ứng \vec{B} không đổi.

Theo định nghĩa thông lượng của một vector, thông lượng của vector cảm ứng từ \vec{B} hay từ thông qua mặt S là:

$$\phi_m = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B dS \cos \alpha \quad (11.9)$$



Hình 11-4: Từ thông qua mặt S

Đơn vị của từ thông trong hệ SI là Vêbe kí hiệu Wb. Đơn vị của cảm ứng từ B trong hệ SI là:

$$[B] = \frac{[\phi]}{[S]} = \frac{1\text{Wb}}{1\text{m}^2} = 1\text{T}$$

Định nghĩa Tesla: Tesla là cảm ứng từ của một qua mặt từ trường đều có từ thông 1 Wb qua một đơn vị diện tích 1m² đặt vuông góc với véctor cảm ứng từ.

3. Định lý O - G cho từ trường:

Từ thông toàn phần gửi qua một mặt kín bất kỳ bằng không.

$$\phi_m = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (11.10a)$$

Hay viết dưới dạng vi phân $\text{div} \vec{B} = 0$ (11.10b)

So sánh (11.10) với biểu thức (9.24) của định lý O - G đối với trường tĩnh điện:

$$\phi_e = \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_{i=1}^n q_i$$

Ta thấy sự khác nhau cơ bản giữa hai trường là ở chỗ trong tự nhiên không có từ tích.

Định luật Ampere về lưu số của vector cường độ từ trường

1. Cường độ từ trường:

Vector cảm ứng từ \vec{B} là một vector phụ thuộc vào môi trường nên trong nhiều trường hợp người ta biểu diễn từ trường bằng một vector không phụ thuộc vào môi trường và do đó có giá trị biến đổi liên tục qua các môi trường khác nhau và cũng là đặc trưng cho từ trường về mặt tác dụng lực gọi là vector cường độ từ trường.

- Định nghĩa: Trong môi trường đồng tính và đẳng hướng vector cường độ từ trường \vec{H} là vector được xác định bởi hệ thức:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0} \quad (11.11)$$

- Từ hệ thức (11.4) suy ra:

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

- Theo (11.6)

$$\vec{H} = \int d\vec{H} \quad (11.13)$$

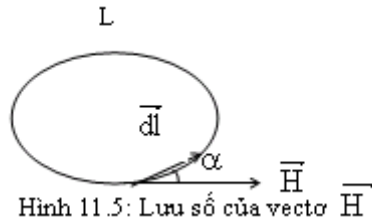
$|\vec{H}|$ gọi là cường độ từ trường.

2 Định luật Ampere về lưu số của vector cường độ từ trường:

2-1. Lưu số của vector cường độ từ trường:

Theo định nghĩa lưu số, lưu số của vector \vec{H} dọc theo một đường cong kín bất kỳ L vẽ trong từ trường là:

$$C_m = \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \oint_L H dl \cos \alpha \quad (11.14)$$



2-2: Định luật Ampere về lưu số:

Lưu số của vector cường độ từ trường \vec{H} dọc theo một đường cong kín bất kỳ L (một vòng) bằng tổng đại số cường độ các dòng điện xuyên qua diện tích giới hạn bởi đường cong đó.

$$C_m = \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (11.15)$$

Trong đó dòng li mang dấu dương nếu chiều dòng điện li và chiều của đường cong L tuân theo qui tắc cái đinh ốc, ngược lại thì li mang dấu âm.

3. Tính chất xoáy của từ trường:

Định luật Ampere cho thấy lưu số của vector cường độ từ trường \vec{H} nói chung khác không, trong khi đó lưu số của trường tĩnh điện theo (9.24) là:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$$

Rõ ràng có sự khác nhau cơ bản về tính chất của trường tĩnh điện là một trường thế và của từ trường không phải là một trường thế. Tương ứng trong tự nhiên chỉ tồn tại điện tích là điểm tận cùng hay bắt đầu của các đường sức điện trường, mà không tồn tại từ tính do các đường cảm ứng từ không có điểm đầu và điểm cuối mà chúng lag những đường cong khép kín nghĩa là một trường xoáy.

Tác dụng của từ trường lên dòng điện - Công của lực từ - Lực Lorentz - Hiệu ứng Hall

1. Tác dụng của từ trường lên dòng điện:

1-1. Tác dụng của từ trường lên phần tử dòng điện:

Một dòng điện đặt trong từ trường có cảm ứng từ \vec{B} . Theo định luật Ampere mỗi phần tử dòng điện $I d\vec{l}$ sẽ chịu tác dụng của lực từ:

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

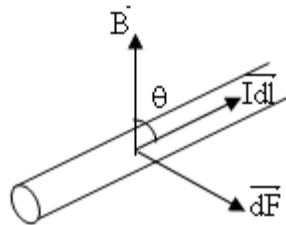
Lực $d\vec{F}$ có:

- Độ lớn: $dF = I dl B \sin\alpha$.
- Chiều: theo quy tắc bàn tay trái.

1-2. Tác dụng của từ trường lên dòng điện:

Theo nguyên lý chồng chất lực từ tác dụng lên dòng điện dài L đặt trong từ trường là:

$$\vec{F} = \int_L I d\vec{l} \wedge \vec{B} \quad (11.16)$$



Hình 11.6: Lực từ tác dụng lên dòng điện

2. Công của lực từ:

Để đơn giản ta xét một thanh kim loại AB dài l có thể trượt trên hai thanh kim loại song song và tạo thành một mạch điện kín đặt trong từ trường đều có $\vec{B} \perp$ mặt phẳng của mạch. Thanh AB luôn vuông góc với hai thanh kim loại. (hình 11.7)

Lực tác dụng lên AB: $F = I.B.l$

Công nguyên tố trong dịch chuyển vi phân dr

$$dA = \vec{F} d\vec{r} = IB ds = Id\phi_m$$

Khi AB dịch chuyển từ vị trí có từ thông qua mạch ϕ_{1m} đến ϕ_{2m} là:

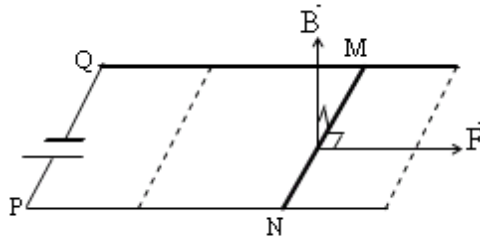
$$A_n = \int_1^2 dA = \int_{\phi_{1m}}^{\phi_{2m}} Id\phi_m \quad (11.16)$$

Nếu $I = \text{const}$ thì:

$$A_{12} = I(\phi_{2m} - \phi_{1m})$$

Công thức (11.16) cũng đúng với một mạch điện bất kỳ chuyển động trong một từ trường không đều.

Vậy: Công của lực từ sinh ra khi một mạch điện bất kỳ dịch chuyển trong một từ trường bằng tích giữa cường độ dòng điện trong mạch với độ biến thiên từ thông qua diện tích của mạch đó.



Hình 11.7: Công của lực

3. Chuyển động của điện tích trong từ trường.

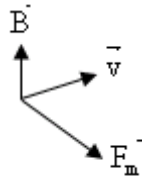
Một điện tích q chuyển động với vận tốc \vec{v} trong từ trường có cảm ứng từ \vec{B} , tương đương với một phần tử dòng điện $|\vec{d}| = q\vec{v}$. Do đó chịu tác dụng của lực từ:

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Dưới tác dụng của lực từ hạt thu được gia tốc:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_m}{m} = \frac{q}{m} \vec{v} \wedge \vec{B}$$

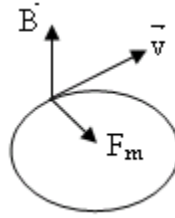
Trong đó m là khối lượng của hạt tích điện.



Mặt khác lực từ luôn vuông góc với \vec{B} và \vec{v} nên nó không sinh công, vận tốc có độ lớn không đổi nhưng có hướng luôn thay đổi. Vì vậy quỹ đạo của chuyển động là một đường cong với an là gia tốc pháp tuyến. Nếu $\vec{v} \perp \vec{B}$ thì quỹ đạo là đường cong phẳng. Nếu \vec{v} không vuông góc với \vec{B} thì quỹ đạo là một đường cong trong không gian.

- Trường hợp riêng khi $\vec{B} = \text{const}$. Nếu $\vec{v} \perp \vec{B}$ quỹ đạo là đường tròn có bán kính:

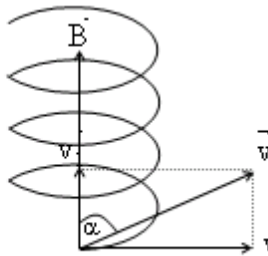
$$F_m = m \frac{v^2}{R} = |q|vB \Rightarrow R = \frac{mv^2}{|q|vB} = \frac{mv}{|q|B} \quad (11.17)$$



Nếu \vec{v} không vuông góc với \vec{B} thì hạt chuyển động theo một đường xoắn ốc, với bước ốc:

$$\lambda = v_1 \frac{2\pi m}{|q|B} \quad (11.19)$$

trong đó v_1 là thành phần vận tốc theo phương của \vec{B} .



Hình 11.8: Chuyển động trong từ trường đều

4. Lực Lorentz.

- Trong điện trường hạt chịu tác dụng của lực điện trường:

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

- Khi chuyển động trong từ trường hạt chịu tác dụng của lực từ:

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Khi hạt chuyển động trong trường điện từ, hạt chịu tác dụng của lực điện từ.

$$\vec{F} = q[\vec{E} + (\vec{v} \wedge \vec{B})] \quad (11.20)$$

Lực điện từ \vec{F} gọi chung là lực Lorentz.

5. Hiệu ứng Hall:

Theo định nghĩa của dòng điện thì lực tác dụng lên dòng điện, thực chất là lực tác dụng lên hạt mang điện chuyển động có hướng đã tạo nên dòng điện đó.

Dưới tác dụng của lực từ hạt mang điện chuyển động theo một quỹ đạo cong.

Kết quả làm xuất hiện một hiệu điện thế theo phương vuông góc với \vec{B} và \vec{v} bên

trong vật dẫn. Hiện tượng xuất hiện hiệu điện thế đó được gọi là hiệu ứng Hall. Hiệu điện thế này gọi là hiệu điện thế Hall U_H .

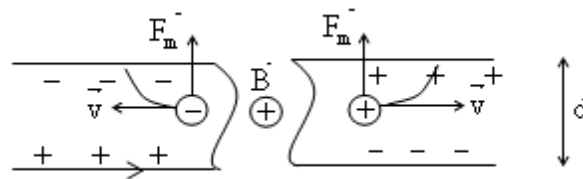
$$U_H = R \cdot B \cdot I \cdot d$$

$$R = \frac{1}{n_0 e}$$

Với: $n_0 e$ là hệ số Hall, n_0 là mật độ các hạt mang điện.

Trong lòng vật dẫn xuất hiện điện trường Hall.

$$E_H = \frac{U_H}{d} = R B I \quad (11.22)$$



Hình 12.8: Hiệu ứng Hall

Cảm ứng điện từ - Sức điện động cảm ứng - Hiện tượng tự cảm - Hiệu ứng mặt ngoài

1. Các định luật về hiện tượng cảm ứng điện từ:

Năm 1831, nhà vật lý học Faraday đã chứng minh bằng thực nghiệm rằng: khi làm cho từ thông qua một mạch kín thay đổi theo thời gian, thì trong mạch xuất hiện dòng điện. Dòng điện đó được gọi là dòng điện cảm ứng. Hiện tượng xuất hiện dòng điện cảm ứng gọi là hiện tượng cảm ứng điện từ. Hiện tượng cảm ứng điện từ tuân theo các định luật sau:

1-1. Định luật Lenz:

Dòng điện cảm ứng có chiều sao cho từ trường do nó sinh ra có tác dụng chống lại sự biến đổi của từ thông sinh ra nó.

1-2. Định luật Faraday (Định luật cơ bản của hiện tượng cảm ứng điện từ)

Sự xuất hiện dòng điện cảm ứng chứng tỏ trong mạch đã xuất hiện một sức điện động cảm ứng \mathcal{E}_c trong thời gian từ thông biến thiên.

Giả sử mạch điện kín dịch chuyển trong một từ trường, sau thời gian dt từ thông qua mạch biến đổi một lượng $d\Phi_m$ làm xuất hiện một dòng điện cảm ứng I_c thì lực từ sinh công:

$$dA = I_c d\Phi_m$$

Theo định luật Lenz công của lực từ là công cản, do đó công để dịch chuyển mạch điện trong từ trường $dA' = -dA \Rightarrow$

$$dA' = -dA = -I_c d\Phi_m$$

Công mà mạch nhận được chuyển thành năng lượng của dòng điện cảm ứng nên:

$$dA' = \varepsilon_c \cdot I_c dt = -I_c d\phi_m$$

Vậy:
$$\varepsilon_c = -\frac{d\phi_m}{dt} \quad (11.23)$$

Định luật: Suất điện động cảm ứng bằng về trị số, nhưng trái dấu với tốc độ biến thiên từ thông qua diện tích của mạch điện.

2. Hiện tượng tự cảm:

* Khi cho một dòng điện biến đổi đi qua một cuộn dây, dòng điện đó sinh ra một từ trường biến đổi theo thời gian qua chính cuộn dây đó, kết quả là từ thông qua cuộn dây biến đổi nên hai đầu của cuộn dây có một suất điện động cảm ứng. Hiện tượng cảm ứng này gọi là hiện tượng tự cảm.

* Suất điện động tự cảm:

Từ thông qua cuộn dây tỷ lệ với dòng điện qua cuộn dây, gọi là hệ số tỷ lệ là L thì:

$$\phi_m = L \cdot I$$

Theo định luật Faraday.

$$\varepsilon_{tc} = -\frac{d\phi_m}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -\left(I \frac{dL}{dt} + L \frac{dI}{dt}\right)$$

Nếu mạch điện đứng yên, không thay đổi hình dạng, từ môi không phải là sắt từ thì L là không đổi khi đó:

$$\varepsilon_{tc} = -L \frac{dI}{dt} \quad (11.20)$$

* Hệ số tự cảm: Hệ số tỷ lệ L gọi là hệ số tự cảm:
$$L = \frac{\phi_m}{I}$$

Nếu I = 1A thì L = ϕ_m . Trong hệ SI đơn vị của L là: $\frac{Wb}{A}$ gọi là Henry (H) 1Wb/A = 1H.

Hệ số tự cảm phụ thuộc vào hình dạng kích thước của mạch điện và môi trường đặt mạch điện.

Ví dụ: Hệ số tự cảm của một ống dây thẳng dài l rất lớn so với đường kính tiết

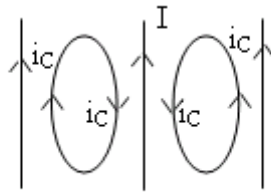
diện:
$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l}$$
 với N là số vòng dây.

3. Hiệu ứng mặt ngoài:

* Hiệu ứng mặt ngoài: Hiện tượng tự cảm không những chỉ xảy ra trong một mạch điện mà còn xảy ra ngay trong lòng một dây dẫn có dòng điện biến đổi chạy qua. Kết quả là dòng điện ấy hầu như chỉ chạy ở lớp mặt ngoài của dây dẫn. Hiện tượng đó gọi là hiệu ứng mặt ngoài.

* Giải thích hiện tượng: Khi I tăng, từ thông qua tiết diện của dây tăng, làm xuất hiện IC khép kín trong các mặt phẳng vuông góc với tiết diện của dây. Ở trục IC ngược chiều với I , ở mặt ngoài IC cùng chiều với I nên dòng tổng cộng ở gần trục bằng không, dòng mặt ngoài là I .

* Ứng dụng: Dòng điện chạy ở mặt ngoài gây ra sự toả nhiệt ở mặt ngoài, đốt nóng lớp mặt ngoài. Hiện tượng này được sử dụng trong tôi kim loại



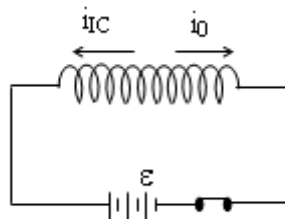
Hình 11-9: Hiệu ứng mặt ngoài

Năng lượng từ trường

1. Năng lượng từ trường của ống dây:

Xét một mạch điện như hình vẽ. Giả sử ban đầu mạch đã được đóng kín trong mạch có dòng điện không đổi i_0 . Khi ấy toàn bộ điện năng do nguồn điện cung cấp đều biến thành nguồn nhiệt. Điều này chỉ đúng khi dòng điện trong mạch không đổi, còn lúc đóng mạch hoặc ngắt mạch thì điều đó không còn đúng nữa. Thật vậy khi đóng khoá k , i tăng từ 0 đến giá trị ổn định I . Trong quá trình ấy trong mạch xuất hiện dòng điện tự cảm i_{tc} ngược chiều với dòng điện i_0 do nguồn tạo ra. Dòng điện toàn phần qua mạch:

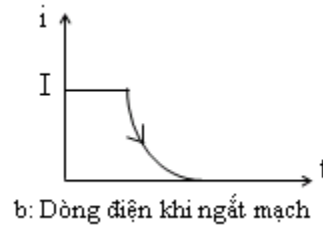
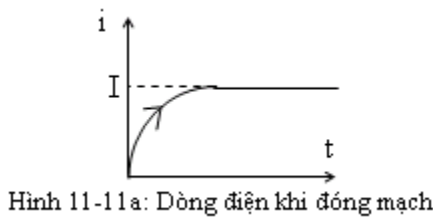
$$i = i_0 - i_{tc} < i_0$$



Hình 11-10: Năng lượng từ trường

Kết quả chỉ một phần điện năng do nguồn cung cấp là biến thành nhiệt. Ngược lại, khi ngắt mạch dòng điện chính i_0 đột ngột giảm về 0, do đó trong mạch xuất hiện dòng điện i_{tc} cùng chiều với i_0 , nên dòng điện toàn phần trong mạch lớn hơn i_0 và giảm từ từ. Nhiệt lượng tỏa ra trong mạch lúc này lớn hơn năng lượng do nguồn điện cung cấp.

Như vậy, rõ ràng khi đóng mạch một phần năng lượng của nguồn điện cung cấp đã được tích lũy dưới một dạng nào đó, để khi ngắt mạch phần năng lượng này lại tỏa ra dưới dạng nhiệt năng, Khi đóng mạch dòng điện trong mạch tăng (hình 11.11a) thì từ trường trong ống dây cũng tăng theo, nên phần năng lượng đó tích lũy trong từ trường của ống dây. Khi ngắt mạch I giảm về không (hình 11.11b) và từ trường cũng giảm về không và năng lượng tích lũy trong từ trường của nó chuyển thành nhiệt năng.



Theo định luật Ohm:

$$\varepsilon_{IC} = -L \frac{di}{dt}$$

$$\varepsilon = Ri + L \frac{di}{dt}$$

Nhân phương trình với idt: $\varepsilon idt = Ri^2 dt + Lidi$

Trong phương trình đó $dA = \varepsilon \cdot i \cdot \text{diện tích}$ là công của nguồn điện, $dQ = Ri^2 dt$ là nhiệt lượng tỏa ra trong mạch, $dW_m = Lidi$ là phần năng lượng tích lũy hay năng lượng từ trường.

Vậy trong quá trình thiết lập dòng điện, phần năng lượng được tích lũy dưới dạng năng lượng từ trường là:

$$W_m = \int_0^I dW_m = \int_0^I Lidi = \frac{1}{2} LI^2 \quad (11.24)$$

2. Năng lượng từ trường:

* Mật độ năng lượng từ trường:

Thực nghiệm và lý thuyết chứng tỏ rằng năng lượng từ trường được phân bố trong khoảng không gian có từ trường. Trong trường hợp ta xét ở trên, từ trường của ống dây dẫn thẳng chủ yếu tập trung ở lòng ống dây và là một từ trường đều. Gọi S là tiết diện thẳng của ống dây, l là chiều dài của ống dây thì thể tích ống dây là:

$$V = S \cdot l$$

Mật độ năng lượng từ trường trong ống dây:

$$\omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{1}{2} \frac{LI^2}{V} = \frac{\mu\mu_0 N^2 \frac{S}{l} I^2}{2Sl} = \frac{1}{2} \mu\mu_0 \frac{N^2}{l^2} I^2$$

$$\text{Vi: } B = \mu\mu_0 \frac{N}{l} I \quad H = \frac{B}{\mu\mu_0} = \frac{N}{l} I \Rightarrow \omega_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0} = \frac{1}{2} BH$$

Rõ ràng ω_m được định xứ trong từ trường.

Mở rộng công thức này cho một từ trường bất kỳ, tại điểm có cảm ứng từ B, cường độ từ trường H thì mật độ năng lượng từ trường tại điểm đó:

$$\omega_m = \frac{1}{2} BH \quad (11.22)$$

Trong nguyên tố thể tích dV đủ nhỏ sao cho từ trường được coi là đều, thì năng lượng từ trường trong nguyên tố thể tích đó là:

$$dW_m = \omega_m dV = \frac{1}{2} BHdV$$

Năng lượng trong thể tích V của từ trường là:

$$W_m = \int_V dW_m = \frac{1}{2} \int_V BHdV \quad (11.23)$$

Điều cần ghi nhớ

$$\vec{dF} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{l_2 d\vec{l}_2 \wedge (l_1 d\vec{l}_1 \wedge \vec{r})}{r^3}$$

* Định luật Ampere:

$$\vec{dB} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{(I_1 d\vec{l}_1 \wedge \vec{r})}{r^3}$$

* Định luật Biot-Savar-Laplace:

$$\Phi_m = \int_S \vec{B} d\vec{S}$$

$$\Phi_m = \int_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

* Từ thông:

$$\text{* Định luật Ampere về lưu số của } \vec{H}: \quad C = \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_i I_i$$

$$\text{* Công của lực từ: } \quad A = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} I d\Phi_m$$

* Sức điện động cảm ứng: $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_m}{dt}$

* Năng lượng từ trường: $W_m = \int_V \omega_m \cdot dV = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \cdot dV$

CHƯƠNG XII: Lý thuyết MAXWELL - Sóng điện từ

Nhiệm vụ: Khảo sát quan hệ giữa điện trường và từ trường trong một không gian chung. Từ đó xây dựng nội dung cơ bản của thuyết Maxell

Mục tiêu: Các luận điểm của Maxell

Hệ phương trình Maxell

Sóng điện từ tự do.

Các luận điểm của Maxwell - Hệ phương trình Maxwell

1. Luận điểm thứ nhất: Điện trường xoáy - Phương trình Maxwell - Faraday:

1-1. Điện trường xoáy:

Trong thí nghiệm của Faraday về hiện tượng cảm ứng điện từ, sự xuất hiện dòng điện cảm ứng trong mạch kín khi từ thông qua mạch biến đổi chứng tỏ các điện tích chịu tác dụng của một trường lực. Trường lực đó theo Maxell là lực điện trường.

Điện trường này không thể là điện trường tĩnh điện vì: $\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$ nên không thể duy trì dòng điện trong mạch. Do đó điện trường làm dịch chuyển các điện tích dọc theo đường cong kín phải là điện trường có các đường sức khép kín để lưu thông các vectơ cường độ điện trường dọc theo đường cong kín đó khác không. Điện trường có các đường sức khép kín đó Maxell gọi là điện trường xoáy \vec{E}^*

Như vậy từ sự phân tích thí nghiệm của Faraday, Maxell đã đưa ra khái quát điện trường xoáy với đặc điểm cơ bản là:

$\oint_L \vec{E}^* \cdot d\vec{l} \neq 0$ và phụ thuộc vào dạng đường cong lấy tích phân.

Kết luận: một từ trường biến đổi theo thời gian sẽ sinh ra một điện trường xoáy ở không gian bao quanh.

1-2. Phương trình Maxwell - Faraday:

* Theo định luật Faraday: suất điện động cảm ứng: $\mathcal{E}_{cu} = -\frac{d\phi}{dt}$

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

Trong đó: $\int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$ là từ thông qua diện tích S giới hạn bởi mạch kín. Trong trường hợp mạch cố định trong trường biến thiên thì:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s}$$

* Theo Maxxell:
$$\varepsilon_{cu} = \int_L \vec{E}^* \cdot d\vec{l}$$

Do đó:
$$\int_L \vec{E}^* \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (12.1)$$

Đó là phương trình Maxell - Faraday dưới dạng tích phân. Phương trình biểu diễn quan hệ nhân quả giữa nguyên nhân là từ trường biến đổi theo thời gian và kết quả là xuất hiện điện trường xoáy. Nó cho phép ta tính được điện trường xoáy \vec{E}^* khi biết trước qui luật biến đổi của từ trường theo thời gian. Nó có giá trị như một tiên đề của thuyết Maxell.

Theo giải thích Vector:

$$\int_L \vec{E}^* \cdot d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Nên
$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (12.2)$$

Là phương trình Maxell - Faraday theo dạng vi phân.

2. luận điểm thứ hai của Maxell - Dòng điện dịch - Phương trình Maxell - Ampere.

2-1. Dòng điện dịch:

Trong các đoạn mạch có tụ điện dòng điện biến đổi vẫn khép kín. Rõ ràng giữa hai bản cực tụ điện không có dòng hạt mang điện, mà chỉ có một điện trường biến đổi theo thời gian, nên có thể nói rằng điện trường biến đổi theo thời gian đã đóng vai trò khép kín dòng điện trong mạch. Trong vật dẫn mật độ dòng điện là J, để đảm bảo tính liên tục của đường dòng thì trong không gian giữa hai bản cực của tụ điện phải có một mật độ dòng tương ứng. Maxell gọi là mật độ dòng giữa hai bản cực tụ điện là mật độ dòng điện dịch i_d có giá trị bằng tốc độ biến đổi của vector cảm ứng điện.

Thật vậy, ta hãy xét mật độ dòng điện dịch giữa hai bản cực một tụ phẳng rộng, điện trường bên trong tụ điện được coi là đều. Gọi s là mật độ điện mặt tại thời điểm thì:

$$D = \sigma \quad \sigma Q = \sigma S = DS$$

$$J = \frac{dQ}{S dt} = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{dD}{dt}$$

$$i_d = J = \frac{dD}{dt}$$

Vì tính liên tục của dòng nên:

Trong trường hợp tổng quát, vectơ cảm ứng điện có thể không đều mà thay đổi theo tọa độ, nhưng dòng điện dịch chỉ phụ thuộc vào sự thay đổi theo thời gian nên:

$$\vec{i}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (12.3)$$

Vậy: mật độ dòng điện dịch là đại lượng vectơ bằng đạo hàm của vectơ điện dịch theo thời gian.

Mặt khác từ trường là dấu hiệu cơ bản và tất yếu của mọi dòng điện nên dòng điện dịch cũng phải có một từ trường và như vậy không những chỉ có ở trong không gian của tụ điện mà bất cứ ở chỗ nào có điện trường biến đổi theo thời gian đều sinh ra một từ trường. từ đó Maxell nêu lên luận điểm thứ hai:

Một điện trường biến đổi theo thời gian sẽ sinh ra một từ trường ở không gian bao quanh.

2-2. Phương trình Maxell - Ampe

* Theo định lý Ampe:

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

* Theo Maxell:

$$I = \oint_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} \quad (12.4)$$

Vậy:

Đó là phương trình Maxwell - Ampere dạng tích phân. Phương trình cũng có ý nghĩa tương tự như phương trình Maxwell - Faraday.

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_S \text{rot} \vec{H} \cdot d\vec{S} = \oint_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$$

Theo giải tích vectơ:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (12.5)$$

Vậy

Đó là dạng vi phân của phương trình Maxwell - Ampere.

3. Hệ phương trình Maxwell

Theo các luận điểm của Maxwell một từ trường biến đổi theo thời gian sẽ sinh ra một điện trường xoáy trong không gian. Do đó giữa các đại lượng đặc trưng cho điện trường và từ trường có quan hệ với các đại lượng gây ra từ trường cũng như tính chất điện từ của môi trường. Các phương trình biểu diễn quan hệ đó lập thành một hệ phương trình gọi là hệ phương trình Maxwell thứ nhất. Mặt khác một điện trường biến đổi theo thời gian cũng gây ra một từ trường trong không gian, quan hệ đó được biểu diễn bằng hệ phương trình Maxwell thứ hai.

3-1. Hệ phương trình Maxwell thứ nhất:

- Phương trình Maxwell - Ampere:

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} \quad (12.6a)$$

- Định Lý O-G

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_i q_i \quad (b)$$

- Quan hệ giữa \vec{E} và \vec{D} đối với môi trường đồng chất và đẳng hướng

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \quad (c)$$

- Định luật Ohm:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (d)$$

Hay dưới dạng vi phân:

$$\left. \begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \vec{D} &= \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \\ \text{div} \vec{D} &= \rho \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E} \end{aligned} \right\} \quad (12.7)$$

a. Hệ phương trình Maxwell thứ hai:

- Phương trình Maxwell Faraday:

$$\oint_{\xi} \vec{E} * d\vec{l} = - \int_{\xi} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \quad (12.8a)$$

- Định lý O-G đối với từ trường:

$$\oint_s \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (12.8b)$$

- Qua hệ giữa \vec{B} và \vec{H} trong môi trường đồng chất và đẳng hướng.

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \quad (12.8c)$$

Hay dưới dạng vi phân:

$$\left. \begin{array}{l} \text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} \\ \text{div } \vec{B} = 0 \end{array} \right\} \quad (12-9)$$

Hai hệ phương trình Maxell bao gồm tất cả các định luật cơ bản về các hiện tượng điện từ xảy ra trong các môi trường đứng yên.

Trường điện từ

1. Trường điện từ:

Theo các luận điểm Maxell, từ trường biến đổi theo thời gian sinh ra điện từ xoáy và ngược điện trường biến đổi theo thời gian sẽ sinh ra từ trường. Như vậy, nếu tại một thời điểm trong không gian có một điện trường (hoặc từ trường) biến đổi theo thời gian thì tại đó có từ trường (hoặc điện trường) được sinh ra. Điện trường và từ trường đó đồng thời tồn tại, liên hệ chặt chẽ với nhau, không thể tách rời nhau, tạo thành một thể thống nhất, gọi là trường điện từ. Trường điện từ được biểu diễn bằng hệ phương trình Maxell. Trường điện từ là một dạng vật chất, mang ml có xung lượng. Điện trường tĩnh là một trường hợp riêng của trường điện từ, khi xét trong hệ qui chiếu mà đối với nó các điện tích là đứng yên.

2 Sự lan truyền của trường điện từ:

Ta hãy xét sự lan truyền của trường điện từ trong không gian không có dòng điện $J=0$ và không có điện tích tự do $r=0$. Hệ phương trình Maxell tại một điểm trong không gian đó là:

Hệ 1:

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} & (1a) \\ \text{div} \vec{D} = 0 & (2a) \\ \vec{D}_{z_0} = \vec{E} & (3a) \end{cases}$$

Hệ 2:

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & (1b) \\ \text{div} \vec{B} = 0 & (2b) \\ \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} & (3b) \end{cases}$$

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

Từ (1b):

Từ (3b) và (1a) ta có:

$$-\frac{\partial}{\partial t} (\text{rot} \vec{B}) = -\mu \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\text{rot} \vec{H}) = -\mu \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial t^2} = -\mu \mu_0 \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Mặt khác: $\text{rot}(\text{rot} \vec{E}) = \text{grad}(\text{div} \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$ vì $\text{div} \vec{E} = \rho = 0$ nên:

$$-\nabla^2 \vec{E} = -\mu \mu_0 \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\text{Hay: } \nabla^2 \vec{E} - \mu \mu_0 \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (12-9)$$

(12-9) là phương trình vectơ \vec{E} trong không gian với vận tốc truyền v:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}} \quad (12-10)$$

Trong chân không $\epsilon = \mu = 1$ nên $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ thay các giá trị của $\epsilon_0 = 1/4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ F/m}$ và $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ vào hệ thức ấy ta được vận tốc truyền vectơ \vec{E} là $v = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ bằng vận tốc truyền ánh sáng trong chân không.

Phương trình (12-9) là phương trình truyền sóng, như vậy trường điện từ lan truyền dưới dạng sóng gọi là sóng điện từ.

3. Năng lượng của trường điện từ:

Tại mỗi điểm trong không gian vectơ cường độ điện trường \vec{E} , vectơ điện dịch \vec{D} thì mật độ năng lượng điện trường là:

$$w_e = \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{D}$$

Tại điểm đó vectơ cường độ từ trường là \vec{H} , vectơ cảm ứng từ là \vec{B} thì mật độ năng lượng từ trường là:

$$\omega_m = \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H}$$

Mật độ năng lượng của trường điện từ tại điểm đó

$$\omega = \frac{1}{2} (\vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{B} \cdot \vec{H}) \quad (12.11)$$

Năng lượng trong miền không gian có thể tích V của trường điện từ là:

$$W = \int_V \omega dV \quad (12.13)$$

Điều cần ghi nhớ

* Từ trường biến đổi theo thời gian làm xuất hiện trong không gian bao quanh điện trường xoáy.

* Điện trường biến đổi theo thời gian làm xuất hiện từ trường trong không gian bao quanh

$$\vec{j}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

* Mật độ dòng điện dịch:

* Hai hệ phương trình Maxell:

Hệ 1:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E} \\ \text{div} \vec{D} &= \rho \\ \vec{D} &= \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \end{aligned}$$

Hệ 2:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{B} &= 0 \\ \vec{B} &= \mu \mu_0 \vec{H} \end{aligned}$$

* Tính chất của sóng điện từ:

- Sóng điện từ là sóng ngang $\vec{E} \perp \vec{H} \perp \vec{v}$

- Sóng điện từ truyền được trong chân không, vận tốc truyền sóng phụ thuộc vào tính chất điện trường của môi trường

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{C}{n}$$
- Sóng điện từ mang năng lượng, có xung lượng do đó là một trường vật chất

* Phương trình truyền sóng:

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{E} - \mu\mu_0\epsilon\epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \\ \nabla^2 \vec{H} - \mu\mu_0\epsilon\epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \end{cases}$$

CHƯƠNG XIII: Quang học sóng

Nhiệm vụ: Áp dụng lý thuyết Macxell vào một thực thể vật chất đó là ánh sáng. Từ đó, xác định cơ sở thực nghiệm cho thuyết điện từ về ánh sáng. Mở rộng sự tương tác giữa trường điện từ với môi trường vật dẫn.

Mục tiêu:

- Thuyết sóng điện từ về ánh sáng.
- Sự tương tác giữa ánh sáng và ánh sáng theo quan niệm sóng.
- Sự tương tác giữa ánh sáng với môi trường theo quan niệm sóng.

Thuyết điện từ về ánh sáng

1. Tư tưởng cơ bản của thuyết điện từ về ánh sáng:

Tư tưởng cơ bản của thuyết điện từ về ánh sáng là quan niệm về sự thống nhất giữa các hiện tượng điện từ và hiện tượng quang học. Thuyết điện từ ánh sáng đã giải đáp được câu hỏi về bản chất ánh sáng. Ánh sáng là một loại sóng điện từ do đó là một thực thể vật lý.

2. Cơ sở thực nghiệm của thuyết điện từ ánh sáng:

Những thí nghiệm giao thoa, nhiễu xạ ánh sáng khẳng định ánh sáng có tính chất ánh sáng.

Những thí nghiệm về sự phân cực ánh sáng cho thấy ánh sáng là một sóng ngang.

Thí nghiệm Faraday về sự quay mặt phẳng phân cực của ánh sáng trong từ trường cho thấy giữa các hiện tượng quang học và hiện tượng điện từ có quan hệ với nhau. Ánh sáng có thể gây ra các tác dụng điện từ trong các môi trường chất. Ngược lại điện trường và từ trường cũng có tác dụng lên những tính chất quang học của các môi trường.

Thí nghiệm đo vận tốc ánh sáng cho thấy vận tốc truyền ánh sáng bằng vận tốc truyền sóng điện từ trong cùng một môi trường. Sóng ánh sáng và sóng điện từ đều truyền được trong chân không với cùng một vận tốc 3.108m/s .

Thí nghiệm đo áp suất nổi tiến của Lebedev (1899) đã xác nhận một cách trực tiếp bản chất vật chất của ánh sáng. Thí nghiệm của Michelson 1881 nghiên cứu sự kéo theo của ête vũ trụ đã phủ nhận sự tồn tại của ête và buộc phải thừa nhận sự tồn tại của vật chất dưới dạng trường. Ánh sáng cũng như sóng điện từ là sự lan truyền của vật chất dưới dạng trường.

Nhiều hiện tượng quang học như phản xạ, khúc xạ, tán xạ, tán sắc,... và các hiện tượng điện từ có thể giải thích được từ cùng một lí thuyết chung "lí thuyết electron của Lorentz". Thuyết electron còn có thể tiên đoán được một số hiện tượng quang học khác mà sau đó thực nghiệm đã xác nhận là đúng.

Bản chất điện từ của ánh sáng còn được xác nhận bằng việc sóng ánh sáng đã phủ kín hàng sóng điện từ.

3. Hàm sóng của ánh sáng:

Ánh sáng là một sóng điện từ nên trong trường hợp tổng quát, hàm sóng của ánh sáng là nghiệm của phương trình truyền sóng điện từ (12-14)

$$\nabla^2 \psi - \mu\mu_0 \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (13-1)$$

Hàm ψ là một hàm tuần hoàn trong không gian theo thời gian với chu kỳ tương ứng là λ và T .

$$\psi(\vec{r}, t) = \psi(\vec{r} + \vec{\lambda}, t + T) \quad (13-2)$$

Trong trường hợp đơn giản nhất là sóng phẳng, đơn sắc truyền theo phương trục Ox thì hàm sóng có dạng:

$$\psi(\vec{r}, t) = \psi_0 e^{\pm i\omega(t - \frac{x}{v})} = \omega_0 e^{\pm i(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})} \quad (13-3)$$

Với các đại lượng dao động.

- Vectơ cường độ điện trường:

$$E = E_0 \sin \omega(t - \frac{x}{v}) \quad (13-4)$$

- Vectơ cường độ từ trường

$$H = H_0 \sin \omega(t - \frac{x}{v}) \quad (13-4)$$

Gọi chung là vectơ dao động sáng. Nhưng thí nghiệm của Vienerơ (Wiener) đã cho thấy chỉ có điện trường trong sóng ánh sáng mới gây ra những hiệu ứng trong quang học, do đó trong các hiện tượng quang học ta chỉ chú ý tới điện trường trong sóng ánh sáng.

4. Những định luật cơ bản và phương trình cơ bản của thuyết điện từ về ánh sáng:

Sóng ánh sáng là một bộ phận của sóng điện từ nên những định luật cơ bản của hiện tượng điện từ và hệ các phương trình Maxwell cũng là những định luật cơ bản và phương trình cơ bản của sóng ánh sáng.

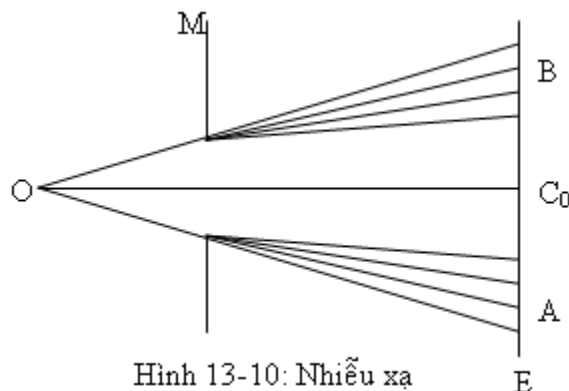
Nhiễu xạ ánh sáng

1. Hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng:

Cho một ánh sáng từ nguồn điểm O truyền qua một lỗ tròn nhỏ trên màn chắn sáng M. Sau M đặt một màn ảnh E.

Theo định luật truyền thẳng thì trên màn ảnh E có một vệt sáng tròn đường kính AB và nếu thu nhỏ lỗ tròn thì vệt sáng cũng thu nhỏ lại. Tuy nhiên thực nghiệm cho thấy khi thu nhỏ lỗ tròn đến một mức độ nào đó thì trên màn ảnh E trong miền AB xuất hiện những vòng tròn tối và ngoài miền AB lại xuất hiện những vòng tròn sáng.

Đặt biệt tại C₀ có thể sáng hoặc tối tùy theo kích thước của lỗ tròn và khoảng cách từ lỗ tới màn ảnh. Điều đó chứng tỏ khi ánh sáng qua lỗ tròn nhỏ các tia sáng bị lệch khỏi phương truyền thẳng. Hiện tượng tia sáng bị lệch khỏi phương truyền thẳng khi gần đến vật cản gọi là hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng. các vòng tròn sáng và tối gọi là vân nhiễu xạ.



Hình 13-10: Nhiễu xạ

2. Nguyên lý Huyghens - Fresnell:

Mỗi điểm trên mặt sóng là một nguồn sóng thứ cấp. Các sóng thứ cấp là kết hợp nên chúng có thể giao thoa với nhau. Dao động sáng tại một điểm nào đó là tổng hợp các dao động sáng do các sóng thứ cấp giao thoa với nhau gây ra.

Nguyên lý Huyghens - Fresnell giải thích được hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng. Tuy nhiên mỗi trường hợp cụ thể là một bài toán phức tạp. Người ta chỉ quan

tâm tới những bài toán nhiễu xạ có tính chất đối xứng, Sau đây chúng ta nghiên cứu hai trường hợp đơn giản nhất.

3. Nhiễu xạ của một sóng cầu:

3-1. Bài toán nhiễu xạ:

Khảo sát sự nhiễu xạ của một sóng cầu đơn sắc phát ra từ nguồn điểm S, qua một lỗ tròn nhỏ. Lỗ tròn có tâm nằm trên Sx và thuộc mặt phẳng vuông góc với Sx. Gọi mặt sóng truyền qua lỗ là Σ_1 , mỗi điểm trên Σ_1 là nguồn sáng thứ cấp gây ra ở P một dao động sáng có biên độ E_1

Biên độ dao động sáng tổng hợp ở P phải thỏa mãn nguyên lý chồng chất sóng:

$$E_n = \sum_1^n E_i$$

Để tính E_i , Fresnel chia mặt sóng Σ_1 thành những nguồn nguyên tố bằng cách vẽ những đới cầu gọi là đới Fresnel.

3-2. Đới Fresnel:

* Cách chia đới Fresnel:

Lấy P làm tâm vẽ những mặt cầu có bán kính lần lượt là:

$$PM_0 = b; PM_1 = b + \frac{\lambda}{2}; PM_2 = b + 2 \frac{\lambda}{2} \dots PM_n = b + n \frac{\lambda}{2}$$

Trong đó λ là bước sóng do S phát ra. Các mặt cầu vừa vẽ chia mặt sóng Σ_1 thành những đới Fresnel.

* Tính chất của đới Fresnel:

- Diện tích các đới đều bằng nhau và bằng $\Delta S = \frac{\pi R b}{R + b} \lambda$ (13-26)
- Hiệu số pha của hai sóng thứ cấp do hai đới cạnh nhau gây ra là:

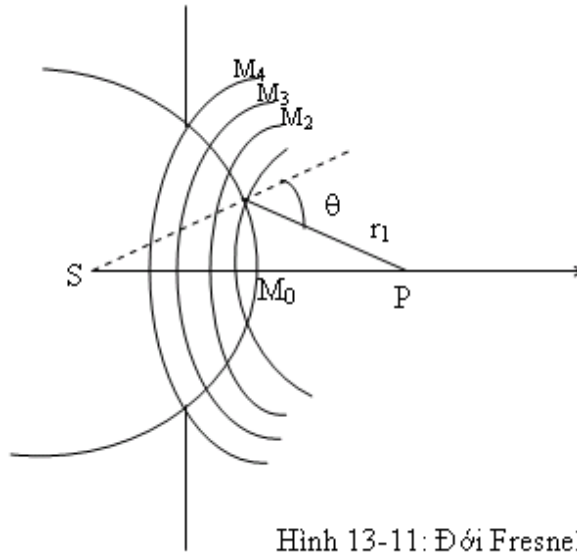
$$\Delta\varphi = \omega \left(t - \frac{r_k}{v} \right) - \omega \left(t - \frac{r_{k+1}}{v} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} (r_{k+1} - r_k) = \pi$$

nên chúng ngược pha với nhau.

- Mỗi đới cầu gây ra ở P một dao động sáng có biên độ tỷ lệ nghịch với khoảng cách tới P và giảm khi góc q tăng, vì vậy chúng thành lập thành một dãy giảm liên tục $E_1 > E_2 > E_3 > \dots > E_n$
- Mặt khác khoảng cách từ các đới cầu tới P giảm chậm nên có thể lấy gần đúng:

$$E_k \approx \frac{E_{k+1} - E_{k-1}}{2}$$

Khi n khá lớn thì $E_n \approx 0$



Hình 13-11: Đới Fresnel

3-3. Biên độ sóng tổng hợp tại P:

$$E_p = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n$$

Vì dao động sáng do 2 đới kế tiếp gây ra ở P là ngược pha nếu $E_1 > 0$ thì $E_2 < 0$ do đó:

$$E_p = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n$$

Lấy dấu (+) với n lẻ và dấu (-) với n chẵn và chú ý tới hệ thức E_k

$$E_p = \frac{E_1}{2} + \left(\frac{E_1}{2} - E_2 + \frac{E_3}{2} \right) + \left(\frac{E_3}{2} - E_4 + \frac{E_5}{2} \right) + \frac{E_5}{2} \dots$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{E_n}{2} \\ \frac{E_{n-1}}{2} - E_n \approx \frac{E_n}{2} \end{array} \right.$$

Mọi số hạng trong dấu ngoặc đơn đều bằng 0 nên cuối cùng ta có:

$$E_p = \frac{E_1}{2} \pm \frac{E_n}{2} \quad (13.27)$$

Nhận xét: khi không có màn chắn hoặc lỗ có kích thước lớn, n lớn thì

$$E_n = 0 \Rightarrow E_p = E = \frac{E_1}{2}$$

3-4. Cường độ sáng tại P:

Cường độ sáng tại P tỷ lệ với E_p^2 , gọi k là hằng số tỷ lệ thì $I_p = kE_p^2$

- Khi không có màn chắn hoặc lỗ có kích thước lớn:

$$I_{OP} = kE_p^2 = k \frac{E_1^2}{4}$$

- Khi số đôi vẽ được là lẻ thì:

$$E_p = \frac{E_1}{2} + \frac{E_n}{2}$$

Cường độ ánh sáng tại P:

$$I_p = kE_p^2 = k \left(\frac{E_1}{2} + \frac{E_n}{2} \right)^2 > I_{OP}$$

Điểm P sáng hơn khi không có màn chắn, đặc biệt nếu $n=1$ thì $I_p = kE_1^2 = 4I_{OP}$

Khi số đôi vẽ được là chẵn thì $E_p = \frac{E_1}{2} - \frac{E_n}{2}$ thì cường độ sáng tại P:

$$I_p = k \left(\frac{E_1}{2} - \frac{E_n}{2} \right)^2 < I_{OP}$$

Điểm P tối hơn khi không có màn chắn, P là một điểm tối. Số đôi vẽ được từ P phụ thuộc vào vị trí của P, nên khi đi dọc theo trục Sx ta lần lượt gặp những điểm P mà từ đó số đôi vẽ được là số lẻ thì P là một điểm sáng và xen kẽ với nó là những điểm P mà từ đó số đôi vẽ được là số chẵn thì P là một điểm tối.

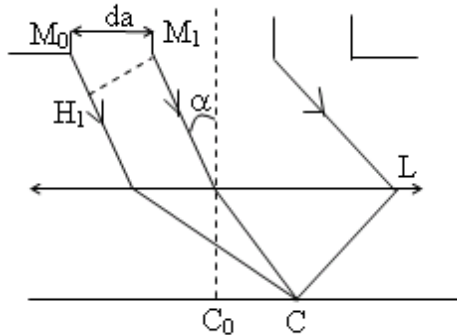
Nếu đặt một màn ảnh vuông góc với Sx thì ta sẽ thu được hình ảnh nhiễu xạ. Ánh nhiễu xạ là những vòng tròn sáng và vòng tròn tối xen kẽ và đồng tâm. Tại tâm là một điểm sáng nếu màn đặt tại điểm sáng và là một điểm tối nếu màn ảnh đặt tại điểm tối.

Nhiễu xạ của sóng phẳng qua khe hẹp cách tử nhiễu xạ - Quang phổ nhiễu xạ

1. Nhiễu xạ qua một khe hẹp (nhiễu xạ Fraunhofer)

1-1. Bài toán nhiễu xạ:

Chiếu một chùm tia sáng đơn sắc song song, vuông góc với màn chắn sáng trên có một khe hẹp hình chữ nhật bề rộng a rất nhỏ so với chiều dài b của khe. Phía sau khe đặt một thấu kính hội tụ L để thu ảnh của các chùm tia nhiễu xạ trên màn ảnh đặt tại tiêu diện của thấu kính. Xác định cường độ sáng và ảnh nhiễu xạ trên màn ảnh.



Hình 13-12: Nhiễu xạ

1-2. Biên độ dao động sáng tại C:

Chia khe thành những dãy hẹp ra đến mức có thể coi mọi điểm thuộc dãy đều dao động đồng pha và phát sóng thứ cấp hội tụ tại C trên màn ảnh.

Theo cách chia đó, thì diện tích các dãy là như nhau quang trình của các tia sáng đến C xấp xỉ như nhau, nên biên độ dao động sáng do các dãy khác nhau gây ra tại C là như nhau.

$$E_{01} = E_{02} = \dots = E_{0n} = E_0$$

Pha của các dao động biến đổi từ dãy nọ đến dãy kia. Hiệu số pha của hai dao động sáng do hai dãy cạnh gây ra ở C là:

$$\begin{aligned} d\delta &= \omega \left(t - \frac{d_2}{v} \right) - \omega \left(t - \frac{d_1}{v} \right) \\ &= \frac{\omega}{v} (d_1 - d_2) = \frac{\omega}{v} \Delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda} \end{aligned}$$

Vì sóng là sóng phẳng nên:

$$\Delta = M_1H = da \cdot \sin \varphi$$

$$d\delta = 2\pi \frac{da \cdot \sin \varphi}{\lambda} \quad (13.28)$$

Do đó nếu sóng tới khe có phương trình $E = E_0 \cdot \sin \omega t$ thì sóng thứ cấp nhiễu xạ tại mặt sóng M1H1 là:

$$M_0H_1: E_1 = E_{01} \sin(\omega t)$$

$$M_1H_2: E_2 = E_{02} \sin(\omega t - d\delta)$$

.....

$$M_{n-1}H_n: E_n = E_{0n} \sin(\omega t - (n-1)d\delta)$$

Với n là dãy chia được. Dao động sáng tổng hợp tại C có biên độ.:

$$E_{0\varphi} = E_{01} + E_{02} + E_{03} + \dots + E_{0n}$$

và từ (13.30) suy ra:

$$\sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2a} \quad (13.33)$$

Những điểm thoả mãn (13.33) là những điểm cực đại phụ có cường độ sáng bằng

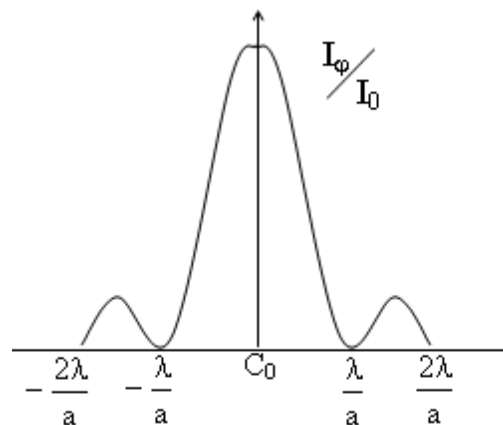
$$I_{\varphi} = \frac{4I_0}{(2k + 1)\pi^2} \quad (13.34)$$

- Tại những điểm C có $\sin 2u = 0 \Rightarrow u = k\pi$ với $k \neq 0$ (vì $k=0$ trùng với cực đại trung tâm) thì $I_j = 0$, tại đó có những vân tối:

$$\sin \varphi = k \frac{\lambda}{a} \quad (13.34)$$

với $k = \pm 1, \pm 2, \dots$

* Hình ảnh nhiễu xạ:



Hình 13-14: Phân bố cường độ sáng

- Sự phụ thuộc của cường độ sáng tỉ đối I/I_0 vào phương nhiễu xạ φ được biểu diễn bằng đồ thị (hình 13.14)
- Tại C_0 có một vân sáng trung tâm rất sáng và rộng gấp đôi cực đại phụ.
- Hai bên vân sáng trung tâm là những vân tối xen kẽ với những cực đại phụ có độ sáng rất nhỏ.
- Các hệ thức (13-33) và (13-34) cho thấy vị trí các cực đại và cực tiểu giao thoa không phụ thuộc vào vị trí của khe hẹp, nên khi dịch chuyển khe hẹp trong mặt phẳng song song với chính nó và giữ nguyên vị trí của thấu kính và màn ảnh thì hình ảnh giao thoa không thay đổi.

Khi $a \gg \lambda$ vân sáng trung tâm rất hẹp các cực đại phụ rất gần nhau, nên thực tế chỉ quan sát được ảnh của khe qua thấu kính. Hiện tượng nhiễu xạ ảnh hưởng

không đáng kể đến sự truyền ánh sáng. Các định luật của quang hình học lại được nghiệm đúng.

2.Cách tử nhiễu xạ:

2-1: Định nghĩa:

Tập hợp những khe hẹp giống nhau, song song cách đều và nằm trong cùng một mặt phẳng được gọi là cách tử nhiễu xạ. Khoảng cách giữa hai khe kế tiếp được gọi là chu kì của cách tử (hình 13.15)

Số khe trên một đơn vị chiều dài của cách tử là:

$$n = \frac{1}{d} \quad (13.35)$$

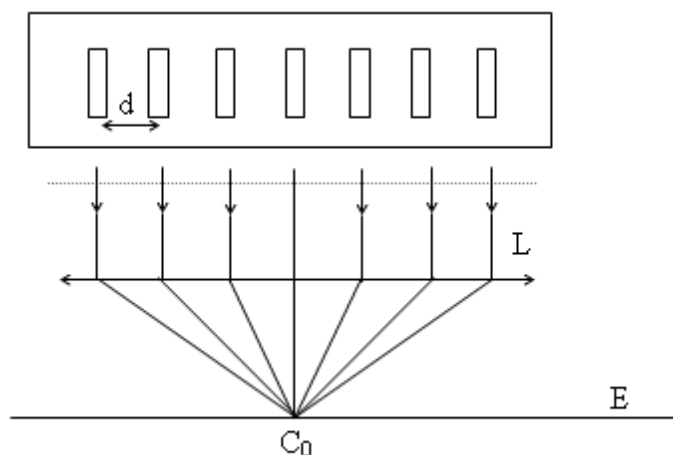
2-2.Hiện tượng giao thoa qua cách tử:

- Từ kết quả ở trên ta nhận thấy mỗi khe hẹp cho một hệ vân nhiễu xạ đều có vân tròn tâm tại C_0 , do đó các hệ vân này chồng khít lên nhau. Ánh sáng nhiễu xạ là sự kết hợp nên một lần nữa chúng lại giao thoa với nhau.

Kết quả trên màn ảnh ở những vân sáng nhiễu xạ lại xuất hiện một hệ vân giao thoa:

- Trên màn ảnh những điểm có cực tiểu nhiễu xạ qua một khe hẹp cũng là các cực tiểu của hệ vân giao thoa qua N khe gọi là các cực tiểu chính, có vị trí:

$$\sin \varphi = k \frac{\lambda}{a}$$



Hình 13-15: Giao thoa qua cách tử

- Sự phân bố cường độ sáng giữa hai cực tiểu chính, hai tia sáng phát ra từ hai khe liên tiếp đến M có hiệu quang lộ là:

$$d \sin \alpha = k \lambda$$

Để có cực đại giao thoa: $d \sin \alpha = k \lambda$

Vậy: $\sin \alpha = k \frac{\lambda}{d}$ (13.36) với $k = \pm 1, \pm 2, \dots$

Tại C_0 ($k=0$ và $j=0$) là cực đại giao thoa của ánh sáng nhiễu xạ, gọi là cực đại

chính giữa. Những cực đại có $-\frac{d}{\lambda} < k < \frac{d}{\lambda}$ là những cực đại chính với cường độ sáng $I_{\text{tg}} = N^2 I_0$

Trong đó I_{tg} là cường độ sáng của vân giao thoa theo phương j của cách tử có N khe I_0 là cường độ sáng của vân nhiễu xạ qua một khe xác định bởi (13-34)

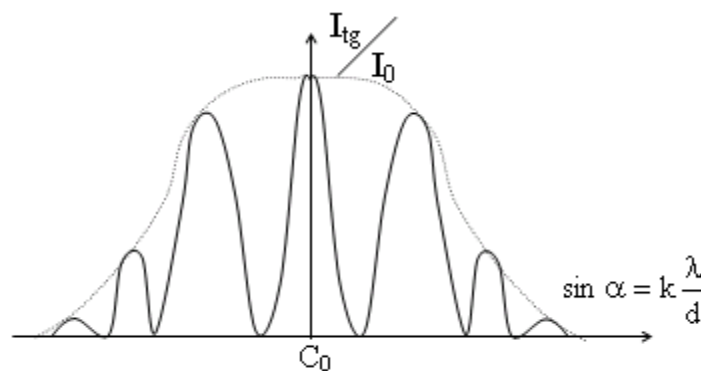
Giữa hai cực đại chính có $(N - 1)$ cực tiểu phụ có cường độ sáng bằng 0. Giữa hai cực đại chính có $N - 2$ cực đại phụ.

Thông thường ta chỉ quan sát được các cực đại giao thoa nằm trong vân sáng trung tâm gồm những vạch sáng song song cách đều với độ sáng giảm dần.

Trên hình (13.18) biểu diễn cường độ sáng với $N=3$

3. Quang phổ nhiễu xạ:

Ta hãy xét trường hợp cách tử được rọi sáng bằng ánh sáng trắng, sẽ cho hệ thống các cực đại chính. Tại C_0 mọi ánh sáng đơn sắc đều cho cực đại chính tại C_0 nên ở đó có một vạch sáng trắng. Những cực đại chính có $k \neq 0$ của các ánh sáng đơn sắc không trùng nhau. Tập hợp các cực đại chính đó hợp thành một quang phổ bậc k . Trong mỗi quang phổ vạch tím nằm trong, vạch đỏ nằm ngoài. Ra xa các vân sáng trung tâm các quang phổ bậc cao có thể chồng lên nhau. Các quang phổ cho bởi cách tử được gọi là các quang phổ nhiễu xạ.



Hình 13-16: Phân bố cường độ

Những điều cần ghi nhớ

- Hiện tượng nhiễu xạ. Phương pháp giải bài toán nhiễu xạ.

- Chia mặt sóng thành những nguồn sóng phát sóng nguyên tố đồng pha.
- Áp dụng nguyên lý chồng chất để xác định biên độ dao động sóng tổng hợp.
- Cách tử nhiễu xạ là hệ thống tạo ra sự giao thoa của N chùm tia nhiễu xạ
- Sự phân cực là sự biến đổi vectơ dao động điện từ đẳng hướng sang mất đẳng hướng.
- Sự quay mặt phẳng phân cực là sự quay hướng ưu tiên của vectơ dao động điện.