

## CHƯƠNG 12

### VẬT LIỆU TỪ

Ngay từ giữa thế kỷ 19, Faraday đã chứng tỏ rằng tất cả chất đều có những tính chất từ. Cụ thể là tất cả các chất khi đặt vào trong một từ trường ngoài  $\vec{B}_0$  thì bên trong chúng đều xuất hiện một từ trường phụ  $\vec{B}'$  gây bởi chính các chất đó, nghĩa là đã có một quá trình từ hoá xảy ra ở trong chúng. Tùy theo mức độ, bản chất và sự tương tác của các chất với môi trường ngoài, người ta chia ra ba loại vật liệu từ: sắt từ, thuận từ, nghịch từ.

#### a - Sắt từ

Thuộc về loại này là các vật rắn tinh thể như sắt, kền, coban và một số hợp kim. Thực nghiệm chứng tỏ, khi đưa một thỏi lại gần cực một thanh nam châm, thỏi sắt bị nam châm hút. Thỏi sắt đã bị từ hoá (hay nhiễm từ).

Từ trường phụ  $\vec{B}'$  xuất hiện trong sắt từ cùng chiều với từ trường ngoài  $\vec{B}_0$ , về cường độ có thể lớn gấp hàng chục hay hàng trăm lần từ trường ngoài  $\vec{B}_0$ .

#### b - Thuận từ

Thuộc về loại này là các chất platin, nhôm, tungsten, tất cả các kim loại kiềm và kiềm thổ, còn khí thuận từ có thể là oxy, nitrit oxyt. Đối với các chất thuận từ, từ trường phụ  $\vec{B}'$  cùng chiều với  $\vec{B}_0$  nhưng cường độ của  $\vec{B}'$  rất nhỏ. Do đó, cần phải có một từ trường ngoài  $\vec{B}_0$  rất lớn mới quan sát thấy hiệu ứng thuận từ. Thực nghiệm chứng tỏ khi đưa một thỏi nhôm vào trong một từ trường ngoài không đều của một thanh nam châm điện mạnh, thì thỏi nhôm chỉ bị hút về phía từ trường mạnh. Hiện tượng xảy ra rất yếu nên khó quan sát.

#### c - Nghịch từ

Đó là những chất: vàng, bạc, đồng, kim cương, graphit, bismut, hầu hết các chất khí (trừ oxy), và nhiều hợp chất hữu cơ. Các chất nghịch từ khi bị từ hoá sẽ sinh ra một từ trường phụ  $\vec{B}'$  ngược chiều với  $\vec{B}_0$ . Thực nghiệm chứng tỏ, khi đưa một thỏi bismut vào trong một từ trường không đều, thỏi bismut bị đẩy khỏi nơi có từ trường mạnh nhưng với một lực đẩy rất yếu, về cấp độ lớn còn nhỏ hơn rất nhiều so với trường hợp chất thuận từ. Vì thế, để chứng tỏ hiệu ứng nghịch từ cần phải có từ trường ngoài cực kỳ mạnh.

Mọi chất đặt trong từ trường đều bị từ hoá, nên ta suy ra rằng, sự từ hóa các chất phải có liên quan đến tính chất từ của các nguyên tử tạo thành các chất đó. Do đó, để giải thích các hiện tượng từ hoá trước hết ta xét tính chất từ của từng nguyên tử khi đặt trong từ trường ngoài.

### 12.1. NGUYÊN TỬ TRONG TỪ TRƯỜNG NGOÀI

#### 12.1.1. Mômen từ của nguyên tử

Ta hãy xét một nguyên tử không chịu tác dụng của một từ trường ngoài. Như ta biết, nguyên tử gồm hạt nhân và các electron chuyển động xung quanh. Để đơn giản, ta giả thiết rằng quỹ đạo của electron trong nguyên tử là một vòng tròn, bán kính  $r$ , tâm ở hạt nhân (H.12.1). Electron đó (mang điện tích âm) chuyển động tương đương với một dòng điện tròn

có chiều ngược với chiều quay của electron. Nếu gọi  $e$  là điện tích của electron,  $f$  là tần số quay của electron, thì dòng điện tròn trên sẽ có cường độ bằng:

$$i = e \cdot f \quad \text{hay} \quad i = \frac{v}{2\pi r} \cdot e$$

trong đó  $v = 2\pi rN$  là vận tốc dài của electron. Dòng điện  $i$  tương đương có vector mômen từ  $\vec{p}_m$  gọi là mômen từ quỹ đạo của electron.

Vector  $\vec{p}_m$  có phương vuông góc với mặt phẳng quỹ đạo của electron, có chiều xác định bởi chiều của dòng điện  $i$  và có giá trị bằng:

$P_m = iS$ , với  $S$  là diện tích bao bởi quỹ đạo của electron:  $S = \pi r^2$

$$\text{Do đó } p_m = iS = \frac{ev}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{evr}{2}$$

Mặt khác, electron quay quanh hạt nhân có một vector mômen động lượng (còn gọi là mômen cơ quỹ đạo), ký hiệu bằng chữ  $\vec{l}$ . Vector  $\vec{l}$  có phương vuông góc với mặt phẳng quỹ đạo, có chiều thuận với chiều quay của electron và có giá trị bằng:  $l = mvr = m\omega r^2$ , trong đó  $\omega$  là vận tốc góc,  $m$  là khối lượng của electron. Hai vector  $\vec{p}_{mqd}$  và  $\vec{l}$  cùng phương nhưng ngược chiều nhau, tỷ lệ của chúng bằng:

$$\vec{p}_m = -\frac{e}{2m} \vec{l}$$

được gọi là tỷ lệ từ - cơ quỹ đạo của electron.

Mômen từ  $\vec{P}_m$  của nguyên tử bằng tổng các mômen từ của tất cả các electron trong nguyên tử. Tương tự, tổng các mômen cơ quỹ đạo của các electron trong nguyên tử được gọi là mômen động lượng của nguyên tử, ký hiệu bằng chữ  $\vec{L}$ .

$$\text{Người ta chứng minh được rằng: } \vec{P}_m \sim -\frac{e}{2m} \vec{L} = -g\vec{L}, g = \text{const} \quad (12.1)$$

Hệ thức này có một ý nghĩa quan trọng: nó nêu lên mối liên hệ từ - cơ giữa mômen từ và mômen động lượng của nguyên tử. Từ hệ thức ta suy ra: khi mômen động lượng biến thiên một lượng  $\Delta \vec{L}$  thì mômen từ cũng biến thiên một lượng tương ứng:

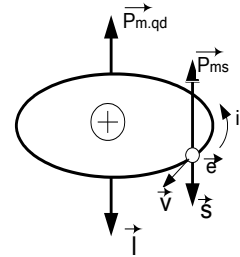
$$\Delta \vec{P}_m \sim -g \Delta \vec{L} \quad (12.2)$$

Tính chất này được ứng dụng để giải thích hiệu ứng nghịch từ.

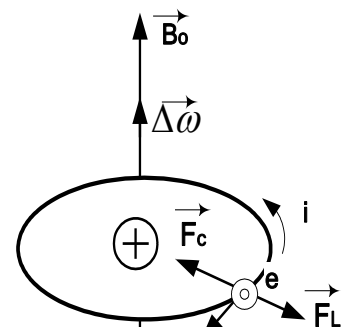
### 12.1.2. Hiệu ứng nghịch từ

Giả thiết ta có một nguyên tử đặt trong từ trường ngoài  $\vec{B}_0$ . Để đơn giản, ta xét trường hợp nguyên tử có một electron và vector cảm ứng từ  $\vec{B}_0$  vuông góc với mặt phẳng quỹ đạo của electron, có chiều như hình 12-2. Khi chưa đặt trong từ trường, electron chịu tác dụng của lực Culomb  $F_c$  hướng tâm (do hạt nhân hút).

$F_c = m\omega^2 r$ , trong đó  $\omega$  là vận tốc góc của electron.



Hình 12.1



Hình 12.2

Khi đặt trong từ trường, electron chịu thêm tác dụng của lực Lorentz  $\vec{F}_L$  xác định bởi công thức:

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \wedge \vec{B}_0$$

trong đó  $q$  là điện tích của electron ( $q = -e$ ). biểu thức trên được viết lại là:

$$\vec{F}_L = -e\vec{v} \wedge \vec{B}_0$$

Vì  $\vec{v}$  vuông góc với  $\vec{B}_0$  nên lực  $\vec{F}_L$  có giá trị bằng:

$$F_L = -e v B_0$$

Lực  $\vec{F}_L$  có phương nằm trên bán kính và hướng ra ngoài, nghĩa là cùng phương nhưng ngược chiều với  $\vec{F}_c$ . Tổng hợp lực tác dụng lên electron bây giờ có giá trị bằng  $m\omega^2 r - evB_0$ . Lực hướng tâm giảm, do đó vận tốc góc  $\omega$  của electron sẽ thay đổi. Nếu gọi  $\Delta\omega$  là độ biến thiên của  $\omega$  thì vận tốc góc của electron bây giờ sẽ bằng  $\omega + \Delta\omega$ . Ta có thể viết:

$$m\omega^2 r - evB_0 = m(\omega + \Delta\omega)^2 r = m\omega^2 r + 2m\omega\Delta\omega r + m\Delta\omega^2 r$$

( $\Delta\omega^2$  rất nhỏ, có thể bỏ qua). Biểu thức trên được viết thành:

$$-evB_0 = 2m\omega\Delta\omega r$$

Thay  $v = r\omega$  vào biểu thức trên, ta tính được:

$$\Delta\omega = -\frac{e}{2m} B_0 < 0$$

$\Delta\omega < 0$ , do đó vận tốc góc  $\omega$  giảm. Như vậy, véc tơ  $\vec{\Delta\omega}$  sẽ có chiều ngược với véc tơ  $\vec{\omega}$ . Từ hình vẽ (12-2), ta nhận thấy  $\vec{\Delta\omega}$  có cùng chiều với  $\vec{B}_0$ .

Nếu véc tơ cảm ứng  $\vec{B}_0$  vuông góc với mặt phẳng quỹ đạo của electron và cũng có chiều hướng xuống dưới như  $\vec{\omega}$  thì lực Lorentz sẽ có cùng phương chiều với lực hướng tâm Coulomb hướng vào phía trong. Trong trường hợp này, ta dễ dàng nhận thấy rằng  $\Delta\omega > 0$ , vận tốc góc  $\omega$  tăng,  $\vec{\Delta\omega}$  sẽ cùng chiều với  $\vec{\omega}$ , nghĩa là cùng chiều với  $\vec{B}_0$ .

Tóm lại, trong cả hai trường hợp ( $\vec{B}_0$  hướng lên trên và xuống dưới), véc tơ  $\vec{\Delta\omega}$  đều cùng chiều với  $\vec{B}_0$ . Hoặc nếu giữ nguyên chiều của  $\vec{B}_0$  và đổi chiều quay của electron, thì bằng cách lập luận tương tự,  $\vec{\Delta\omega}$  vẫn luôn cùng chiều với  $\vec{B}_0$ .

Khi vận tốc góc biến thiên một lượng bằng  $\vec{\Delta\omega}$  thì mômen động lượng  $\vec{L}$  cũng biến thiên một lượng bằng  $\vec{\Delta L}$  (vì  $\vec{L} = I\vec{\omega}$ ,  $\vec{\Delta L} = I\vec{\Delta\omega}$ , trong đó  $I$  là mômen quán tính của e trên quỹ đạo quay) có cùng chiều với  $\vec{B}_0$ . Do đó, theo (12-2), mômen từ  $\vec{P}_m$  của electron sẽ biến thiên một lượng bằng:

$$\vec{\Delta P}_m \sim -g\vec{\Delta L} \sim -g.I\vec{\Delta\omega} \sim -\vec{B}_0$$

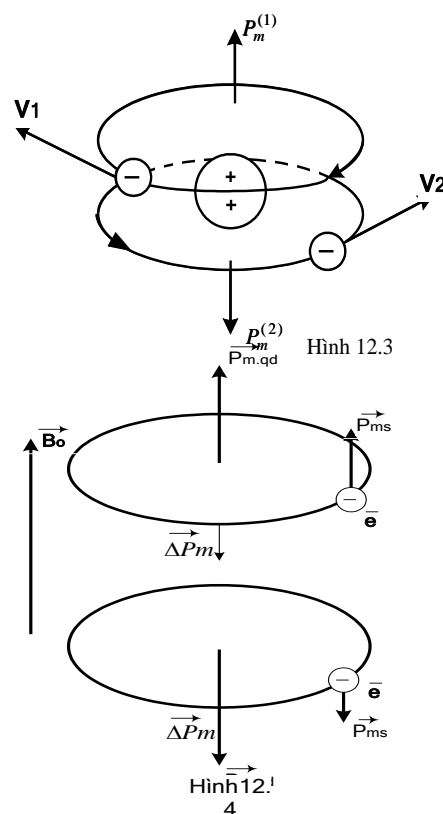
Kết luận: Khi đặt nguyên tử trong từ trường ngoài  $\vec{B}_0$  thì trong nguyên tử sẽ xuất hiện một mômen từ phụ  $\Delta\vec{P}_m$  luôn luôn ngược chiều với  $\vec{\Delta L}$ , tức là ngược chiều với  $\vec{B}_0$ . Mômen từ  $\Delta\vec{P}_m$  được gọi là mômen từ cảm ứng của nguyên tử. Hiện tượng đó gọi là hiệu ứng nghịch từ.

Hiệu ứng nghịch từ là một tính chất từ của nguyên tử, do đó nó xuất hiện trong cả chất nghịch từ và thuận từ.

## 12.2. CHẤT NGHỊCH TỪ VÀ CHẤT THUẬN TỪ

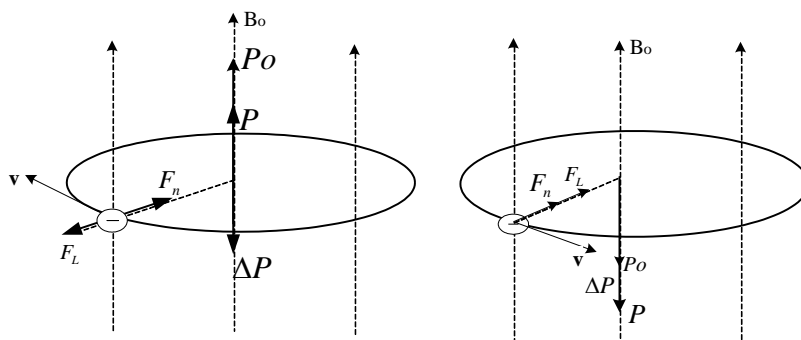
### 12.2.1. Chất nghịch từ

Chất nghịch từ là những chất có cấu tạo đối xứng, sao cho mômen từ nguyên tử hay phân tử của chúng bằng không ( $\vec{P}_m = 0$ ). Nguyên tử He là chất nghịch từ. Để cụ thể, ta xét quá trình từ hoá của He. Hạt nhân He có  $q = +2e$  và hai electron chuyển động quanh nó. Thực nghiệm xác nhận, nguyên tử He không có mômen từ. Điều này có thể hiểu được, nếu giả thiết rằng hai electron chuyển động quanh hạt nhân với cùng vận tốc trên những quỹ đạo giống nhau nhưng ngược chiều. Như vậy, các mômen từ quỹ đạo của chúng bằng nhau về độ lớn nhưng khác dấu, do đó tổng các mômen từ này bằng không. Thêm nữa, spin của hai electron này cũng ngược dấu nhau. Tóm lại, mômen từ của nguyên tử He bằng không (H 12.3).



Khi đặt nguyên tử He vào trong từ trường ngoài  $\vec{B}_0$  thì ngoài lực hút Coulomb, các electron còn chịu tác dụng của lực Lorentz. Vì hai electron chuyển động ngược chiều nhau nên một electron chịu lực Lorentz hướng vào tâm có tác dụng làm tăng  $\vec{\omega}$  ( $\Delta\vec{\omega} > 0$ ) còn một electron chịu lực Lorentz hướng ra xa tâm làm giảm  $\vec{\omega}$  ( $\Delta\vec{\omega} < 0$ ). Nhưng theo lập luận đã trình bày trong phần hiệu ứng nghịch từ, trong cả hai trường hợp  $\Delta\vec{\omega}$  đều hướng cùng chiều với  $\vec{B}_0$ . Kết quả là mômen từ  $\vec{P}_m$  của các electron biến thiên một lượng  $\Delta\vec{P}_m$  bằng:  $\Delta\vec{P}_m \sim -g\vec{\Delta L}$  tương ứng với sự xuất hiện một từ trường phụ  $\vec{B}'$  ngược chiều với  $\vec{B}_0$  (H.12-4) và (H.12-5).

Vậy: Khi đặt trong từ trường ngoài, khối nghịch từ có mômen từ phụ tổng cộng  $\Sigma\vec{P}_m$  khác không, tương ứng với sự xuất hiện một từ trường phụ  $\vec{B}'$  ngược chiều với  $\vec{B}_0$ .



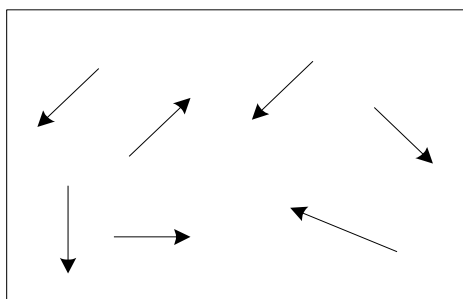
Hình 12.5

### 12.2.2. Chất thuận từ

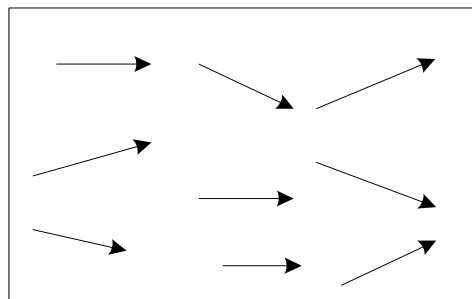
Chất thuận từ có mômen từ nguyên tử hay phân tử khác không ( $\vec{P}_m \neq 0$ ), thí dụ  $O_2$ , Al, Pt, đất hiếm, các kim loại kiềm là những chất thuận từ. Bình thường, do chuyển động nhiệt, các mômen từ sắp xếp hỗn loạn nên  $\Sigma \vec{P}_m$  trong thể tích của khối thuận từ luôn luôn triệt tiêu (H.12-6a).

Khi đặt khối thuận từ vào trong từ trường ngoài  $\vec{B}_0$  thì hai quá trình đồng thời xảy ra:

a - Các mômen từ nguyên tử  $\vec{P}_m$  có xu hướng sắp xếp để phương chiều của chúng trùng với phương chiều của  $\vec{B}_0$  (H. 12-6b). Tổng các mômen từ  $\Sigma \vec{P}_m$  của các nguyên tử sẽ khác không. Đó là hiệu ứng thuận từ.



Hình 12-6a: ( $B_0 = 0$ )



Hình 12-6b: ( $B_0 \neq 0$ )

b - Mỗi nguyên tử còn có thêm mômen từ phụ  $\Delta \vec{P}_m$  ngược chiều với  $\vec{B}_0$  do hiệu ứng nghịch từ. Nhưng hiệu ứng này nhỏ hơn rất nhiều so với hiệu ứng thuận từ nên ở đây có thể bỏ qua. Tóm lại, khi đặt trong từ trường ngoài thì tổng mômen từ  $\Sigma \vec{P}_m$  của khối thuận từ sẽ khác không và có cùng chiều với  $\vec{B}_0$  tương đương với sự xuất hiện một từ trường phụ  $\vec{B}'$  cùng chiều với  $\vec{B}_0$ .

### 12.2.3. Từ trường tổng hợp trong các chất thuận từ và nghịch từ

Theo lập luận trên, khi đặt trong từ trường ngoài, tổng các mômen từ  $\Sigma \vec{P}_m$  của khối thuận từ hay  $\Sigma \Delta \vec{P}_m$  của khối nghịch từ sẽ khác không. Nhưng các mômen từ đặc trưng cho

tính chất từ của dòng điện, ta suy ra trong khối thuận từ sẽ xuất hiện các từ trường phụ  $\vec{B}'$  tỷ lệ với tổng các mômen từ  $\vec{\Sigma P_m}$  và  $\vec{\Sigma \Delta P_m}$ . Chất từ môi đã bị từ hoá. Để đặc trưng cho mức độ từ hoá trong chất từ môi, người ta đưa vào một đại lượng gọi là vectơ từ hoá, ký hiệu bằng chữ  $\vec{J}$ . Theo định nghĩa:

$$\vec{J} = \frac{\vec{\Sigma p_m}}{\Delta V}$$

trong đó  $\Delta V$  là thể tích của khối từ môi. Như vậy, vectơ từ hoá bằng tổng mômen từ của một đơn vị thể tích từ môi (định nghĩa này sẽ áp dụng cho cả sắt từ). Nếu từ trường ngoài  $\vec{B}_0$  càng lớn, giá trị của vectơ từ hoá  $\vec{J}$  cũng càng lớn và ngược lại. Đối với chất thuận từ  $\vec{J}$  cùng chiều với  $\vec{B}_0$ . Đối với chất nghịch từ  $\vec{J}$  ngược chiều với  $\vec{B}_0$ . Lý thuyết và thực nghiệm đã chứng minh được rằng  $\vec{J}$  tỷ lệ với  $\vec{B}_0$  như sau:

$$\vec{J} = \frac{\chi}{\mu_0} \vec{B}_0 = \chi \vec{H} \quad (12.3)$$

Hệ số tỷ lệ  $\chi$  được gọi là độ cảm từ môi. Lý thuyết và thực nghiệm đã xác nhận: đối với chất thuận từ  $\chi > 0$ ; đối với chất nghịch từ  $\chi < 0$ .

Về cấp độ lớn, độ cảm từ của chất thuận từ lớn gấp hàng trăm lần độ lớn của chất nghịch từ. Người ta đã tìm được công thức cho phép tính độ cảm từ của các chất đó.

Đối với chất thuận từ :

$$\chi = \frac{n p_m^2 \mu_0}{3kT}$$

Nó tỷ lệ nghịch với nhiệt độ tuyệt đối T của chất thuận từ.

Còn đối với chất nghịch từ:

$$\chi = -\frac{e^2 r^2 n \mu_0}{2m}$$

Trong các công thức trên, n là mật độ nguyên tử của các chất từ môi, k là hằng số Boltzmann, T là nhiệt độ tuyệt đối, e, r, m là điện tích, bán kính quỹ đạo và khối lượng của electron.

Độ cảm từ của các chất thuận từ lớn gấp hàng trăm lần so với các chất nghịch từ, do đó hiệu ứng thuận từ mạnh át hiệu ứng nghịch từ yếu hơn.

Cuối cùng, cần lưu ý rằng trong các biểu thức trên, độ cảm từ của chất thuận từ và nghịch từ chỉ đúng khi từ trường ngoài  $\vec{B}_0$  không lớn lắm. Khi từ trường ngoài đủ lớn, hiện tượng từ hoá sẽ đạt trạng thái bão hoà.

Ngoài ra, như ta đã nói, từ trường  $\vec{B}'$  tỷ lệ với tổng các mômen từ, do đó  $\vec{B}'$  cũng tỷ lệ với  $\vec{J}$ . Người ta đã tìm được mối liên hệ giữa vectơ từ hoá  $\vec{J}$  và từ trường  $\vec{B}'$  như sau:

$$\vec{J} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (12-4)$$

Từ hai công thức (12-3) và (12-4), ta suy ra:

$$\vec{B} = \chi \vec{B}_0 \quad (12-5)$$

Kết quả, do quá trình từ hoá:

- Trong chất thuận từ sẽ xuất hiện từ trường  $\vec{B}'$  cùng chiều với  $\vec{B}_0$ .
- Trong chất nghịch từ sẽ xuất hiện từ trường  $\vec{B}'$  ngược chiều với  $\vec{B}_0$ .

Như vậy, khi đặt một chất từ môi vào trong một từ trường ngoài  $\vec{B}_0$  từ trường tổng hợp trong chất từ môi sẽ bằng:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

Thay  $\vec{B}'$  bằng  $\chi \vec{B}_0$ , ta có:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' = (1 + \chi) \vec{B}_0$$

Đặt  $1 + \chi = \mu$ , ta có:

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0 = \mu_0 \mu \vec{H} \quad (12.6)$$

Trong đó  $\mu$  được gọi là độ từ thẩm của chất từ môi. Đối với chất thuận từ:

$\chi > 0$  nên  $\mu > 1$ , đối với chất nghịch từ  $\chi < 0$  nên  $\mu < 1$ .

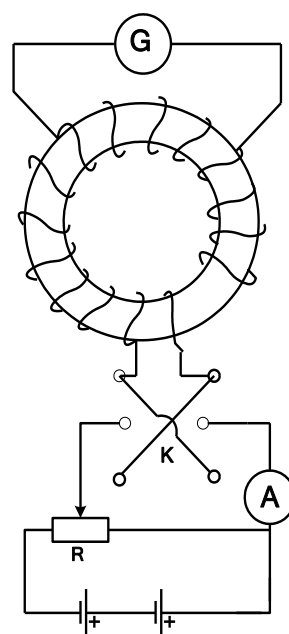
Công thức (12-6) có thể được phát biểu:

Vector cảm ứng từ  $\vec{B}$  trong từ môi có giá trị bằng vector cảm ứng từ trong chân không  $\vec{B}_0$  nhân với độ từ thẩm  $\mu$  của môi trường.

### 12.3. SẮT TỪ

Một trong những tính chất khác biệt của sắt từ là ở chỗ, vector từ hoá của thuận từ và nghịch từ tỷ lệ với cường độ từ trường ngoài, còn vector từ hoá của sắt từ phụ thuộc phức tạp vào từ trường ngoài. Ngoài ra độ từ thẩm  $\mu$  của sắt từ có thể đạt tới giá trị rất lớn, chẳng hạn đối với sắt  $\mu_{\max} = 5 \cdot 10^3$ , đối với pecmalôi (hợp kim Fe- Ni)  $\mu_{\max} = 10^5$ . Đối với các sắt từ  $\mu_{\max}$  rất lớn ( $\mu_{\max} \sim 10^3 \div 10^6$ ). Từ tính mạnh như vậy của sắt từ được phát hiện ở quặng sắt và sắt, sau đó ở các chất khác như kền, coban hoặc các hợp kim như pecmalôi (Fe -Ni), hợp kim (Fe-Ni -Al) hay (Cu -Mn- Al)... Sắt từ chỉ được quan sát thấy ở các tinh thể, trong khi đó thuận từ và nghịch từ có thể ở bất kỳ trạng thái kết tụ nào. Sắt từ có nhiều đặc tính khác biệt nữa.

Để nghiên cứu những đặc tính đó, người ta dùng mạch điện hình 12-7, bao gồm: một ống dây hình xuyên L bao quanh một lõi sắt từ cần nghiên cứu, một đảo điện K để đổi chiều dòng điện trong ống



Hình 12.7

dây và do đó để đổi chiều từ trường gây ra sự từ hóa lõi sắt từ trong ống dây, một biến trở R để thay đổi dòng điện trong ống dây, và như vậy thay đổi cường độ từ trường gây bởi ống dây. Cảm ứng từ  $B$  trong lõi sắt được xác định bằng điện kế G.

Đến đây cần lưu ý, vì vectơ từ hoá của chất sắt từ không tỷ lệ thuận với cường độ từ trường từ hoá, nên những công thức (12-3) và (12-6) không còn đúng. Tuy nhiên, về mặt hình thức các công thức đó vẫn có thể áp dụng được nếu ta chú ý rằng, đối với các chất sắt từ, độ

cảm từ  $\chi = \frac{J}{H}$  và độ từ thẩm  $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$  không phải là các hằng số, mà là các hàm rất phức tạp

của cường độ từ trường từ hoá.

Thí nghiệm tiến hành nêu trên cho ta thấy sự phụ thuộc của  $B$ ,  $J$  và  $\mu$  vào từ trường  $H$ .

### 12.3.1. Độ từ hoá $J$ của sắt từ không tỷ lệ thuận với cường độ từ trường $H$

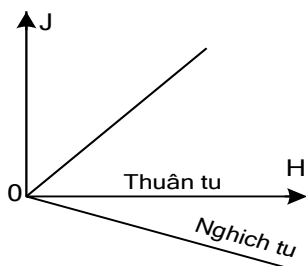
Hình (12-8) biểu diễn sự phụ thuộc  $J$  của các chất thuận từ và nghịch từ vào từ trường  $H$ , hình (H.12-9) biểu diễn sự phụ thuộc  $J$  của sắt từ vào từ trường  $H$ .

Từ hình vẽ, ta nhận thấy: đối với chất thuận từ và nghịch từ, sự phụ thuộc đó là tuyến tính, còn đối với chất sắt từ thì sự phụ thuộc đó là phi tuyến, phức tạp. Nếu khối sắt từ chưa bị từ hoá thì khi  $H=0$ , độ từ hoá  $J$  cũng bằng không. Khi  $H$  còn nhỏ,  $J$  tăng nhanh theo  $H$ , nhưng sau đó  $J$  tăng chậm theo  $H$ . Khi cường độ  $H$  đạt tới khoảng vài trăm A/m thì  $J$  đạt tới giá trị cực đại. Lúc này nếu tiếp tục tăng  $H$ ,  $J$  cũng không tăng nữa. Sự từ hoá đã đạt tới bão hoà. Đường cong biểu diễn sự phụ thuộc  $J$  của sắt từ vào  $H$  được gọi là đường cong từ hoá cơ bản.

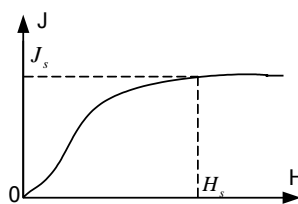
### 12.3.2. Sự phụ thuộc của $B$ vào $H$ là phức tạp

Từ biểu thức  $B = B_0 + B' = \mu_0 H + \mu J$

Ta nhận thấy: khi  $J$  đạt giá trị cực đại thì  $B$  tăng tuyến tính với  $H$  (H18-10), đường cong phụ thuộc của  $B = f(H)$  không có đoạn nằm ngang.

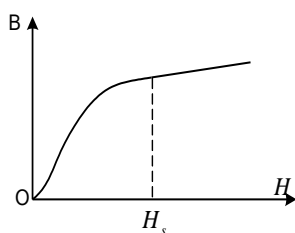


Hình 12-8

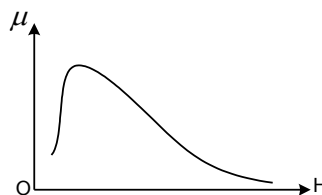


Hình 12-9

### 12.3.3. Độ từ thẩm $\mu$ phụ thuộc vào cường độ từ trường $H$ một cách phức tạp



Hình 12-10



Hình 12-11



Từ đồ thị (H.12- 11), ta nhận thấy: khi từ trường  $H$  tăng từ giá trị không, độ từ thẩm tăng nhanh theo  $H$  (khi  $H$  còn nhỏ) sau đó  $\mu$  tăng theo  $H$  tới khi đạt giá trị cực đại  $\mu_{\max}$ . Nếu tiếp tục tăng  $H$  thì  $\mu$  sẽ giảm dần và khi từ trường ngoài  $H$  khá lớn thì  $\mu$  tiến đến gần đơn vị. Động thái này có thể thấy được dễ dàng, nếu ta xuất phát từ công thức:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{\mu(H + J)}{\mu_0 H} = 1 + \frac{J}{H}$$

Khi  $H$  khá lớn,  $J$  đạt tới giá trị tự bão hoà (không đổi),

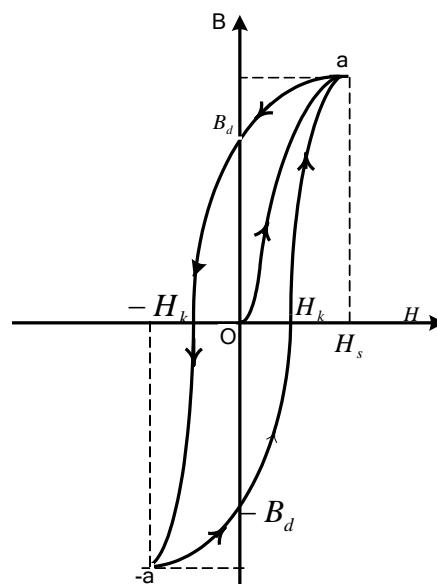
thì khi  $H$  tăng, tỷ số  $\frac{J}{H}$  sẽ tiến đến 0 và  $\mu \rightarrow 1$ .

#### 12.3.4. Chất sắt từ có tính từ dư - Chu trình từ trễ

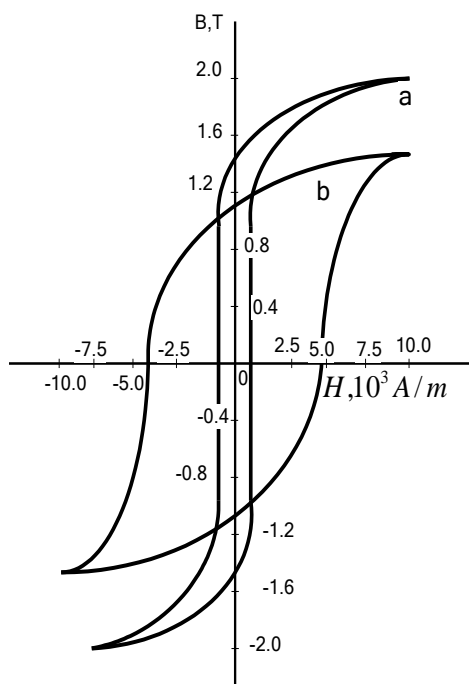
Đây là một đặc tính khác biệt nổi bật của sắt từ, đó là sau khi bỏ từ trường ngoài  $H$  đi, sắt từ vẫn còn từ tính, nghĩa là vẫn còn độ từ dư. Thực vậy, trong thí nghiệm nêu trên, ta dùng một lõi sắt từ chưa bị từ hoá lần nào. Đóng khoá K và tăng dần dòng điện trong ống dây bằng cách dịch chuyển con chạy C. Dòng điện tăng từ giá trị không và từ trường  $H$  cũng tăng từ giá trị không. Khi  $H$  tăng tới giá trị  $H_s$  tương ứng với giá trị độ từ hoá bão hoà  $J_{bh}$  thì trên đồ thị  $B(H)$ , ta thu được đường cong từ hoá  $Oa$  (H.12-12).

Tiếp đó ta giảm độ lớn của  $H$ , nhưng vẫn giữ chiều  $H$  như cũ, khi đó cảm ứng từ  $B$  trong lõi sắt không giảm theo đường  $ao$ , mà giảm theo đường cong  $aB_d$  nằm ở phía trên  $ao$ . Như vậy, khi ta bỏ từ trường  $H$  ngoài đi ( $H=0$ ) thì cảm ứng từ  $B$  vẫn còn giữ một giá trị  $B_d$  khác không nào đó, gọi là cảm ứng từ dư. Sau đó đổi chiều từ trường  $H$  (bằng cách dùng đảo điện để đổi chiều dòng điện) và tăng  $H$  từ giá trị 0 cho tới giá trị  $H_k$  thì cảm ứng từ  $B$  giảm theo đường  $B_d - H_k$ , về giá trị không. Vậy khi từ trường  $H$  ngoài bằng  $-H_k$  thì  $B=0$ , do đó  $H_k$  được gọi là cường độ từ trường khử từ. Bây giờ ta vẫn giữ nguyên chiều  $H$  (như đã đảo ngược) và tiếp tục tăng độ lớn của  $H$  tới  $-H_s$  thì lõi sắt từ lại bị từ hoá theo chiều ngược lại (đoạn cong  $-H_k a'$ ). Sau đó giảm độ lớn của từ trường từ giá trị  $-H_s$  về giá trị 0, thì cảm ứng từ  $B$  giảm theo đường  $a' - B_d$ . Giá trị  $-B_d$  tương ứng với giá trị cường độ từ trường  $H$  bằng không. Bây giờ lại đổi chiều của  $H$  và tăng từ 0 đến  $H_s$ ,  $B$  sẽ tăng theo đường  $-B_d$  tới  $a$ , nó cắt trục hoành tại giá trị  $H_k$ .

Ta được một đường cong khép kín  $aB_d - H_k a' - H_k a$  gọi là chu trình từ trễ, tương ứng với một chu trình từ hoá lõi sắt từ. Hiện tượng từ trễ là một tính chất điển hình của các vật liệu sắt từ. Nó nói nên sự từ hoá của các chất sắt từ không những chỉ phụ thuộc vào cường độ từ trường từ hoá tại một thời điểm nào đó,



Hình 12.12



Hình 12.13

mà còn phụ thuộc vào sự từ hoá trước đó của chất sắt từ, nghĩa là vào lịch sử trước đó của chất. Tùy theo các đặc điểm và hình dạng của chu trình từ trễ ( $B_d$  và  $H_k$ ) người ta phân biệt hai loại sắt từ: sắt từ cứng và sắt từ mềm.

Sắt từ cứng có từ trường khử  $H_k$  lớn, chu trình từ trễ rộng, cảm ứng từ dư tương đối cao và bền vững, do đó được dùng để chế tạo nam châm vĩnh cửu. Các nam châm này có thể giữ được từ tính mạnh trong thời gian lâu (H.12-13).

Sắt từ mềm có từ trường khử từ  $H_k$  nhỏ, chu trình từ trễ hẹp. Cảm ứng từ dư của loại này rất mạnh, nhưng lại dễ khử. Do đó các loại sắt từ mềm được dùng để chế tạo các nam châm điện, máy điện, mô tơ điện.

Thuộc về các sắt từ cứng có manhêtit ( $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ), thép thường, thép crôm, thép vonfram, thép côban, tungsten.

Thuộc về sắt từ mềm có: sắt tinh khiết sau khi tinh luyện trong hydro, sắt non, sắt silic, pecamloi (78%Ni, 22%Fe)...

### 12.3.5. Nhiệt độ Curie

Thực hiện chứng tỏ, khi nung nóng khối sắt từ thì cảm ứng từ dư của nó giảm. Nhiệt độ đạt tới một giá trị  $T_c$  nào đó thì tính từ dư mất hẳn. Nhiệt độ đó gọi là nhiệt độ Curie. Quá nhiệt độ Curie các chất sắt từ trở thành các chất thuận từ. Khi đó không những các tính chất đặc trưng của sắt từ bị mất đi, mà một số tính chất vật lý của nó như nhiệt dung, độ dẫn điện cũng thay đổi. Ta nêu nhiệt độ Curie của một số chất như sắt:  $77^{\circ}C$ ; Niken;  $360^{\circ}C$ ; Côban:  $1127^{\circ}C$ ; Pecamlôi:  $70^{\circ}C$ .

Các tính chất của sắt từ lại xuất hiện nếu ta làm lạnh sắt từ xuống dưới nhiệt độ Curie.

Tính từ dư của các chất sắt từ cũng giảm hoặc mất đi khi chúng chịu các va chạm. Cho nên, để đảm bảo các nam châm vĩnh cửu, cần tránh nung nóng và va chạm.

f- Hiện tượng từ giảo.

Khi bị từ hoá, hình dạng và kích thước của khối sắt từ bị thay đổi. Đó là hiện tượng từ giảo. Độ biến thiên tỷ đối kích thước dài  $\frac{\Delta l}{l}$  của vật theo phương của từ trường ngoài tỷ lệ với bình phương độ từ hoá:

$$\frac{\Delta l}{l} \sim J^2$$

Hiệu ứng này rất nhỏ. Trong từ trường ngoài  $H$  vào khoảng  $10^5 A/m$ :

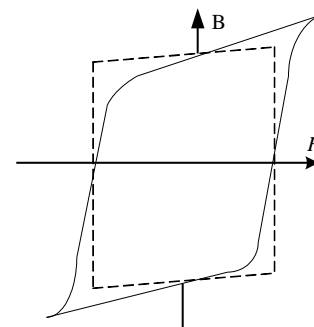
$$\frac{\Delta l}{l} \sim 10^{-5} \div 10^{-6}$$

Người ta cũng phát hiện thấy hiệu ứng từ giảo nghịch: khi khối sắt từ chịu một biến dạng cơ học thì trạng thái từ hoá của vật sẽ thay đổi.

Cũng như hiệu ứng điện giảo, hiệu ứng từ giảo được ứng dụng để tạo ra các máy phát siêu âm hoặc để đo siêu âm. Ngoài ra, hiệu ứng từ giảo còn được ứng dụng để chế tạo thiết bị role, bộ rung, bộ lọc, thiết bị ổn định v.v... Các thiết bị này có độ chính xác cao và được dùng trong các sơ đồ kiểm tra tự động và điều chỉnh.

### 12.3.6. Ferrit

Trong những năm gần đây, người ta thu được nhiều kết quả trong việc nghiên cứu các chất ferrit. Đó là những chất bán dẫn sắt từ - hợp chất hoá học của oxit sắt  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  và oxit của một hoặc vài kim loại hoá trị hai như Li, Zn, Cu, Ni, Co, Mn, Cd v.v... Để chế tạo ferrit, người ta trộn đều những mảnh nhỏ oxit rồi đem thiêu kết ở nhiệt độ  $900 \div 1400^\circ\text{C}$ . Ferrit cũng có những đặc tính phức tạp của sắt từ như  $\mu$  có giá trị rất lớn, phụ thuộc phức tạp vào từ trường ngoài  $H$ , có tính từ dư, nhiệt độ Curie  $300 \div 600^\circ\text{C}$  v.v... Những đặc điểm nổi bật của nó so với các sắt từ kim loại là điện trở suất rất lớn. Thí dụ: sắt có điện trở suất là  $8,5 \cdot 10^{-4} \Omega\text{m}$  thì Ferrit có điện trở lớn từ  $1 \div 10^7 \Omega\text{m}$ . Vì thế trong các trường cao tần, độ hao phí năng lượng do dòng Foucault trong các chất ferrit rất nhỏ. Các ferrit magiê -mangan có chu trình từ trễ gần như hình chữ nhật (H.12.14) được sử dụng làm các phần tử logic và phần tử nhớ trong các máy tính điện tử.



Hình 12.14

Cùng với sự phát triển mạnh của kỹ thuật cao tần và siêu cao tần, các ferrit có nhiều ứng dụng trong vô tuyến định vị, thông tin nhiều đường, máy tính điện tử cực nhanh. Nhờ sử dụng ferrit nên kích thước và trọng lượng máy móc được rút gọn. Điều này rất quan trọng đối với kỹ thuật hàng không và tên lửa.

Nếu đốt nóng sắt từ tới nhiệt độ  $T_c$  hay va chạm mạnh khối sắt từ, thì các đômen sẽ bị phá huỷ và chất sắt từ sẽ trở thành chất thuận từ.

## HƯỚNG DẪN HỌC CHƯƠNG 12

### I. MỤC ĐÍCH, YÊU CẦU

1. Phân biệt được các chất thuận từ, nghịch từ và sắt từ.
2. Nắm được bản chất của sự từ hoá các chất thuận từ và nghịch từ.
3. Hiểu và vận dụng được thuyết miền từ hoá tự nhiên để giải thích được sự từ hoá chất sắt từ.

### II. TÓM TẮT NỘI DUNG

Thực nghiệm xác nhận tất cả các chất đều có những tính chất từ. Cụ thể khi đặt các chất vào trong một từ trường ngoài  $B_0$  thì bên trong chúng đều xuất hiện một từ trường phụ  $B'$ . Các chất được chia làm ba loại:

- a) Sắt từ: Đối với loại này, từ trường phụ  $B'$  cùng chiều với  $B_0$ . Về cường độ,  $B'$  lớn hơn  $B_0$  rất nhiều.
- b) Thuận từ: Từ trường phụ  $B'$  xuất hiện trong chất thuận từ cùng chiều với  $B_0$  nhưng cường độ  $B'$  rất nhỏ.
- c) Nghịch từ: Từ trường phụ  $B'$  xuất hiện trong chất nghịch từ ngược chiều với  $B_0$ . Về cường độ,  $B'$  nhỏ hơn rất nhiều so với trường hợp chất thuận từ.

Để giải thích sự từ hoá của các chất thuận từ và nghịch từ, người ta xét tính chất từ của nguyên tử. Nguyên tử là một hệ mang điện: gồm hạt nhân tích điện dương và các electron tích điện âm chuyển động xung quanh. Chuyển động quay của các electron được đặc trưng bằng mômen cơ quỹ đạo  $\vec{l}$ . Electron chuyển động quanh hạt nhân tương đương với một dòng điện có chiều ngược với chiều quay của nó. Dòng điện này được đặc trưng bởi một mômen từ, gọi là mômen từ quỹ đạo  $\vec{p}_m$ . Mômen từ  $\vec{P}_m$  của nguyên tử bằng tổng các mômen từ của tất cả các electron trong nguyên tử. Tương tự, tổng các mômen cơ quỹ đạo của các electron trong nguyên tử được gọi là mômen động lượng của nguyên tử, ký hiệu bằng chữ  $\vec{L}$ .

Lý thuyết và thực nghiệm xác nhận tỷ lệ từ - cơ:

$$\vec{P}_m \sim -g\vec{L}, g = \text{const}$$

Như vậy, khi mômen động lượng  $L$  biến thiên một đại lượng  $\Delta L$  thì mômen từ cũng biến thiên một đại lượng:

$$\Delta \vec{p}_m \sim -g\Delta \vec{L}$$

Nếu đặt nguyên tử vào trong một từ trường ngoài  $\vec{B}_0$  thì ngoài lực Coulomb  $\vec{F}_c$  hướng tâm, electron còn chịu thêm một lực Lorentz  $\vec{F}_L$  nữa. Lực này có phương xuyên tâm. Tuỳ theo chiều quay của electron quanh hạt nhân, lực Lorentz  $\vec{F}_L$  có thể là hướng tâm hay ly tâm. Kết quả là vận tốc góc  $\vec{\omega}$  của electron sẽ biến thiên một đại lượng  $\Delta \vec{\omega}$ . Phép tính và thực nghiệm xác nhận, dù electron quay theo chiều nào, dù  $\vec{B}_0$  định hướng như thế nào thì  $\Delta \vec{\omega}$  bao giờ cũng cùng chiều với  $\vec{B}_0$ . Nhưng  $\Delta \vec{L} = I \Delta \vec{\omega}$ , trong đó  $I$  là mômen quán tính của electron đối với quỹ đạo. Do đó  $\Delta \vec{p}_m$  sẽ ngược chiều với  $\vec{B}_0$ . Và như vậy, từ trường phụ xuất hiện tương ứng với  $\Delta \vec{\omega}$  bao giờ cũng ngược chiều với  $\vec{B}_0$ . Hiện tượng này được gọi là hiệu ứng nghịch từ. Đó là một tính chất của nguyên tử, do đó nó xuất hiện trong cả chất thuận từ và chất nghịch từ.

Chất nghịch từ là chất có cấu tạo đối xứng sao cho mômen từ nguyên tử hay phân tử của chúng bằng không. Nhưng khi đặt trong từ trường ngoài  $\vec{B}_0$  thì hiệu ứng nghịch từ xuất hiện, do đó có thêm từ trường phụ  $\vec{B}'$  ngược chiều với  $\vec{B}_0$ . Độ lớn của  $\vec{B}'$  rất nhỏ.

Chất thuận từ là chất có mômen từ của nguyên tử hay phân tử khác không ( $\vec{p}_m \neq 0$ ).

Khi không có từ trường ngoài  $\vec{B}_0$ , các mômen từ này sắp xếp hỗn loạn do chuyển động nhiệt, nên tổng các mômen từ  $\sum \vec{p}_m$  trong khối thuận từ bằng không. Khi đặt trong từ trường ngoài  $\vec{B}_0$ , các mômen  $\vec{p}_m$  sẽ định hướng theo từ trường  $\vec{B}_0$ ;  $\sum \vec{p}_m$  sẽ khác không. Do đó từ trường phụ  $\vec{B}'$  sẽ cùng chiều với  $\vec{B}_0$ . Từ trường này nhỏ hơn so với  $\vec{B}_0$ . Ngoài ra hiệu ứng nghịch từ xuất hiện trong chất thuận từ cũng gây ra một từ trường phụ. Nhưng vì hiệu ứng này

rất nhỏ so với hiệu ứng thuận từ nên có thể bỏ qua. Kết quả là  $\sum \vec{p}_m$  của khối thuận từ khác không và gây ra từ trường phụ  $\vec{B}'$  cùng chiều với  $\vec{B}_0$ .

Để đặc trưng cho mức độ từ hoá, người ta đưa vào véc tơ từ hoá  $\vec{J}$ , được định nghĩa là tổng các mômen từ trong một đơn vị thể tích từ môi. Lý thuyết và thực nghiệm đã chứng minh được:

$$\vec{J} = \frac{\chi \vec{B}_0}{\mu_0} = \chi \vec{H}$$

$\chi$  là độ cảm từ môi. Đối với chất thuận từ,  $\chi > 0$ , đối với chất nghịch từ  $\chi < 0$ . Về cấp độ lớn  $\chi_{thuận từ}$  lớn gấp hàng trăm lần  $\chi_{nghịch từ}$ . Giữa từ trường phụ  $\vec{B}'$  và véc tơ từ hoá  $\vec{J}$  có mối liên hệ:

$$\vec{B}' = \mu_0 \vec{J}$$

Từ đó dễ dàng đi tới biểu thức:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' = (1 + \chi) \vec{B}_0 = \mu \vec{B}_0 = \mu \mu_0 \vec{H}$$

Trong đó  $\mu = 1 + \chi$  được gọi là độ từ thẩm của chất từ môi. Đối với chất thuận từ  $\mu > 1$ ; đối với chất nghịch từ  $\mu < 1$ .

So với chất thuận từ và chất nghịch từ thì sắt từ là một chất có nhiều tính chất khác biệt, cụ thể là  $\vec{J}$  của chất sắt từ phụ thuộc phức tạp vào từ trường ngoài  $\vec{H}$ . Đặc biệt  $\mu$  của chất sắt từ rất lớn, có những chất có  $\mu_{\max} \sim 10^3 \div 10^6$ . Ngoài ra sự phụ thuộc của cảm ứng từ  $\vec{B}$  trong lõi sắt vào từ trường ngoài  $\vec{H}$  cũng rất phức tạp. Thực nghiệm chứng tỏ sự từ hoá chất sắt từ không những phụ thuộc vào cường độ từ trường  $\vec{H}$  tại một thời điểm nào đó, mà còn phụ thuộc vào sự từ hoá trước đó của sắt từ. Đặc biệt, trong quá trình từ hoá, khi giảm từ trường ngoài về giá trị không, thì cảm ứng từ  $\vec{B}$  vẫn giữ một giá  $\vec{B}_d$  nào đó, gọi là cảm ứng từ dư. Tiếp tục tiến hành thí nghiệm, ta sẽ thu được một chu trình từ trễ tương ứng với một chu trình từ hoá lõi sắt từ. Đó là một tính chất điển hình của chất sắt từ.

Dựa theo đặc điểm và hình dạng của chu trình, người ta phân biệt sắt từ cứng và sắt từ mềm: sắt từ cứng được dùng để chế tạo nam châm vĩnh cửu; sắt từ mềm được dùng để chế tạo nam châm điện. Thực nghiệm chứng tỏ khi nung nóng sắt từ tới một nhiệt độ  $T_c$  nào đó gọi là nhiệt độ Curie, thì chất sắt từ trở thành chất thuận từ. Nếu va chạm mạnh thì tính từ dư của sắt từ cũng giảm hoặc mất đi.

### III. CÂU HỎI ÔN TẬP

1. Nêu những điểm khác chủ yếu giữa các chất thuận từ, nghịch từ và sắt từ.
2. Nguyên tử là một hệ điện tích. Nó có từ tính không? Tìm biểu thức mômen từ quỹ đạo  $p_m$  của các electron chuyển động trong nguyên tử.
3. Tìm tỷ lệ từ - cơ quỹ đạo của electron.

5. Trình bày hiệu ứng nghịch từ của nguyên tử khi đặt nguyên tử vào trong một từ trường ngoài.
6. Hiệu ứng nghịch từ được coi là một tính chất từ của nguyên tử. Tại sao? Hiệu ứng nghịch từ có xảy ra đối với chất thuận từ không?
7. Định nghĩa vectơ từ hoá  $\vec{J}$ . Trình bày sự từ hoá của chất thuận từ và chất nghịch từ khi đặt trong từ trường ngoài  $\vec{B}_0$ .
8. Thiết lập từ trường tổng hợp  $\vec{B}$  trong chất từ môi khi đặt trong từ trường ngoài  $\vec{B}_0$ .
9. Nêu những đặc điểm của các sự phụ thuộc  $J = J(H)$ ,  $\mu = \mu(H)$ ,  $B = B(H)$ . Vẽ đồ thị để minh hoạ các phụ thuộc đó.
10. Mô tả sơ đồ mạch điện nghiên cứu sự từ hoá chất sắt từ.
11. Mô tả sự phụ thuộc  $B = B(H)$  trong một chu trình từ hoá.
12. Phân tích ý nghĩa của cảm ứng từ dư  $B_d$  và cường độ từ trường khử từ  $H_k$ .
13. Dựa vào những đặc điểm gì để phân biệt sắt từ cứng và sắt từ mềm. Nêu những ứng dụng của chúng.
14. Nêu tính chất của sắt từ ở nhiệt độ  $T_c$ .
15. Tại sao để đảm bảo nam châm vĩnh cửu, cần phải tránh nung nóng và va chạm mạnh.
16. Trình bày hiện tượng từ giảo. Nêu ứng dụng của hiện tượng này.
17. Nêu đặc điểm nổi bật của Ferrit so với sắt từ kim loại. Nêu những ứng dụng của Ferrit trong kỹ thuật.

#### IV. BÀI TẬP

**Thí dụ 1.** Trên một vòng hình xuyên bằng thép chưa bị từ hoá, người ta quấn  $N=800$  vòng dây dẫn. Đường kính trung bình của vòng xuyên là  $d=30\text{cm}$ , tiết diện ngang của ống  $S=1,6\text{cm}^2$ . Khi cho một dòng điện  $I=1,80\text{A}$  chạy vào cuộn dây, một điện lượng chạy qua điện kế bằng  $q=0,24\text{mC}$ . Biết rằng điện trở của toàn mạch  $R=0,80\Omega$ , hãy xác định cường độ từ trường  $H$  và cảm ứng từ  $B$  ở trong ống, độ từ hoá  $J$  và độ từ thẩm  $\mu$  của thép khi cho dòng điện chạy trong cuộn dây.

**Giải.** Khi có dòng điện chạy qua cuộn dây, trong vòng xuyên có xuất hiện từ trường với các đường sức cảm ứng từ đi dọc theo vòng xuyên. Từ trường  $B$  đó là tổng hợp hai từ trường gây ra bởi dòng điện và từ trường của vật liệu vòng xuyên bị từ hoá. Từ trường  $H$  ở bên trong vòng xuyên chỉ phụ thuộc vào dòng điện. Do tính đối xứng tại mọi điểm trên vòng xuyên, nên từ trường  $H$  tại mọi điểm trên độ dài vòng xuyên ( $l = \pi d$ ) đều bằng nhau.

$$H = \text{const}$$

Áp dụng định lý Ampere về dòng điện ta có:

$$HI = NI$$

$$\text{Ta rút ra: } H = \frac{NI}{l} = \frac{NI}{\pi d}$$

$d, S$  của vòng xuyên rất nhỏ, nên có thể coi  $H$  là như nhau tại mọi điểm của vòng.

$$\text{Để tìm } B, \text{ ta áp dụng công thức: } \Phi = BS \quad (1)$$

Khi cho dòng điện chạy trong cuộn dây, cảm ứng từ tăng từ giá trị không đến B, tương ứng từ thông qua ống cũng tăng từ giá trị không đến  $\Phi$ . Kết quả là có xuất hiện dòng cảm ứng chạy trong mạch của điện kế G. Gọi q là điện tích chạy trong mạch đó, ta viết được:

$$\Delta\Phi = \Phi = qR \quad (2)$$

Từ (1) và (2), ta viết được:  $B = \frac{qR}{S}$

Ta dễ dàng tính được độ từ hoá J:

$$J = \frac{B}{\mu_0} - H = \frac{qR}{\mu_0 S} - \frac{NI}{\mu d}$$

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{qR \pi d}{\mu_0 S N I}$$

Áp dụng bằng số:  $d=0,3\text{m}$ ;  $S=1,6\text{cm}^2=1,6 \cdot 10^{-4}\text{m}^2$ ;  $N=800$ ;  $I=1,8\text{A}$ ;  $q=2,4 \cdot 10^{-4}\text{C}$ ;  $R=0,8\Omega$ , ta tìm được:  $H=1,5 \cdot 10^3\text{A/m}$ ;  $B=1,2\text{T}$ ;  $J=1,0 \cdot 10^6\text{A/m}$ ;  $\mu=6 \cdot 10^2$ .

**Thí dụ 2.** Cũng trong bài tập (1), khi ngắt dòng điện trong cuộn dây thì có một điện lượng  $q' = 80\mu\text{C}$  chạy qua điện thế G. Dùng các điều kiện của bài toán (1), hãy xác định độ từ hoá còn dư  $J'$  của vòng thép hình xuyên và cảm ứng từ dư của từ trường ở trong vòng thép khi dòng điện không còn trong cuộn dây.

**Giải:** Vì cường độ ở trong cuộn dây bây giờ bằng không, nên:

$$H = \frac{NI}{\pi d} = 0$$

Để xác định cảm ứng từ dư  $B'_d$  ở trong vòng dây, ta tìm  $q'$  từ biểu thức:

$$q' = \frac{\Phi - \Phi'}{R} = \frac{BS - B'S}{R}$$

Trong đó  $\Phi$  và  $\Phi'$  là từ thông gửi qua cuộn dây của vòng xuyên trước và sau khi dòng điện bằng không. Từ đó ta có:  $B - B' = q' R / S$

Ta rút ra:  $B' = (q - q') R / S$

Dựa vào công thức:  $H = B / \mu_0 - J$

Và chú ý rằng  $H=0$ , ta xác định được độ từ hoá còn dư của vòng:

$$J' = \frac{B'}{\mu_0} = \frac{(q - q')R}{\mu_0 S}$$

Thay các số liệu ta được:  $B' = 0,8\text{T}$ ;  $J' = 6 \cdot 10^5\text{A/m}$ .