

PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH CẤU TRÚC GÓC CỦA MÔ MEN TỪ TRONG VÙNG TÁI ĐỊNH HƯỚNG SPIN

*Phạm Hồng Quang, Nguyễn Hoàng Lương, Nguyễn Phú Thủy,
Nguyễn Minh Hồng, Lê Đức Tùng*
Khoa Vật lý - ĐHTH Hà Nội

1. MỞ ĐẦU

Khi nghiên cứu các vật liệu từ loại RE-TM (RE = kim loại đất hiếm, TM = kim loại tiếp), người ta thường gặp hiện tượng tái định hướng spin. Đó là hiện tượng cấu trúc từ đổi khi nhiệt độ thay đổi. Cấu trúc góc hay cấu trúc cone của mô men từ trong một tinh thể trực được đặc trưng bởi góc θ tạo giữa mô men từ và trục c của tinh thể. Tại một nhiệt độ đó, góc θ được xác định từ điều kiện cực tiểu của năng lượng tự do.

Năng lượng tự do của hệ hai phân mạng RE và TM được biểu diễn bằng công thức:

$$F(\theta, T) = F_{RE}(\theta, T) F_{TM}(\theta, T)$$

với $F_{RE}(\theta, T) = -k_B T \ln Z(\theta, T)$

$$F_{TM}(\theta, T) = K_{1TM} \sin^2 \theta$$

trong đó k_B là hằng số Boltzmann, θ là góc giữa mô men từ và trục tinh thể. Với một đất hiếm đặt ở trạng thái multiplet cơ bản tách bởi trường tinh thể

$$Z(\theta, T) = \sum_{i=1}^{2J+1} \exp \frac{E_i(\theta, T)}{k_B T}$$

Ở đây J là số lượng tử toàn phần của ion, K_{1TM} là hằng số dị hướng bậc hai của phân mạng kim loại trực tiếp (là đóng góp chủ yếu vào năng lượng dị hướng của phân mạng TM).

Các mức năng lượng $E_i(\theta, t)$ được xác định từ việc chéo hóa Hamiltonian của ion 4f.

$$\mathcal{H} = \sum_{m,n} B_n^m O_n^m + 2(g-1)\mu_S J \vec{H}_{ex}$$

Số hạng đầu là Hamiltonian trường tinh thể, trong đó B_n^m số trường tinh thể, O_n^m là các toán tử tương đương Stevens. Số lượng các thông số B_n^m được giới hạn bởi tính đối xứng của tinh thể và sự đóng góp yếu (có thể bỏ qua) của các thông số bậc cao. Số hạng thứ hai trong biểu thức (5) biểu diễn tương tác trao đổi giữa spin đất hiếm và trường trao đổi H_{ex} gây bởi phân mạng TM, g là thừa số Lande của ion đất hiếm. Số hạng này được viết trong trường hợp trường từ hai chiều nằm trong mặt phẳng $x-z$ dưới dạng

$$\mathcal{H} = g\mu_B \vec{J} \cdot \vec{H}_m = g\mu_B H_m (J_x \sin \theta + J_z \cos \theta)$$

trường phân tử H_m liên hệ với H_{es} bởi biểu thức

$$H_m = 2(g - 1)H_{es}/g \quad (7)$$

ur vậy giữa đặc trưng của cấu trúc từ (góc cone θ) và các thông số đặc trưng của vật liệu liên quan chặt chẽ. Một bộ các thông số trường tinh thể B_n^m và trường trao đổi H_{es} cho các định năng lượng tự do và giá trị góc θ tương ứng thỏa mãn điều kiện cực tiểu năng lượng ở mỗi nhiệt độ. Ngược lại, từ sự phụ thuộc nhiệt độ của góc θ xác định từ thực nghiệm, ta kiểm tra độ chính xác của các thông số vi mô (B_n^m, H_{es}) mô tả vật liệu. Có một số phép đo nhau xác định góc θ như đo đường cong từ hóa của mẫu đơn tinh thể trong từ trường cao, men xoắn cơ học, phân tích phổ Mossbauer v.v... Giá trị góc lệch định hướng spin trong từ trường được xác định từ phép đo kết hợp thành phần song song ($M_{//}$) và thành phần vuông góc (M_{\perp}) từ trường ngoài của mô men từ trên mẫu bột định hướng. Đây là phép đo tương đối đơn giản không đòi hỏi các mẫu đơn tinh thể.

2. TẠO MẪU BỘT ĐỊNH HƯỚNG

Phương pháp chế tạo mẫu bột định hướng được tóm tắt như sau: Vật liệu sau khi đã xử lý để đảm bảo đơn pha, được nghiền nhỏ thành những hạt bột có đường kính nhỏ hơn $50 \mu\text{m}$. Mỗi hạt bột là một đơn tinh thể. Bột kim loại được trộn với epoxy rồi định hướng và hóa rắn trong từ trường 20 kOe, tại nhiệt độ mà phương dễ từ hóa trùng với trục tinh thể, thường là trục c của cấu trúc hexagonal hoặc tetragonal. Mẫu có dạng trụ, phương định hướng vuông góc với trục. Chi tiết về phương pháp tạo mẫu bột định hướng có thể xem trong [1].

3. PHÉP ĐO $M_{//}$ VÀ M_{\perp}

Trong các phép đo $M_{//}$ và M_{\perp} mẫu được đặt và quay trong từ trường với trục quay là trục c. Giá trị $M_{//}$ được đo bằng các cặp cuộn Helmholtz có trục song song với từ trường. Giá trị M_{\perp} được đo bằng các cặp cuộn Helmholtz có trục vuông góc với từ trường (hình 1a)

Để đo từ độ trước đây của phòng thí nghiệm vật lý Nhiệt độ thấp chỉ cho phép đo $M_{//}$ (Chỉ đo tham khảo [2]). Chúng tôi đã lắp thêm các cặp cuộn Helmholtz có trục vuông góc với trục để đo M_{\perp} . Các phép đo $M_{//}$ và M_{\perp} đều dựa trên nguyên lý cảm ứng. Khi mẫu dịch chuyển từ tâm một cặp cuộn Helmholtz này đến tâm một cặp cuộn Helmholtz khác, mô men từ mẫu gây nên một suất điện động cảm ứng

$$e_{ind} = \frac{M}{i} \frac{dH_z}{dr} \frac{dr}{dt} \quad (8)$$

ở đó: r là các trục tọa độ x, y, z

H_z là đại lượng đặc trưng cho kết cấu của hệ cuộn cảm ứng được xác định là từ trường hướng song song z do hệ cuộn cảm ứng sinh ra khi có dòng điện cảm ứng i chạy trong nó.

Tích phân tín hiệu cảm ứng đó ta thu được tín hiệu tỷ lệ trực tiếp với mô men từ M

$$u = A \int_{t_1}^{t_2} e_{ind} dt = \frac{A}{V} [H_s(x_2) - H_s(x_1)] \cdot M$$

trong đó A là hệ số của máy tích phân; x_1, x_2 là vị trí của mẫu tại thời điểm t_1 và t_2 , k chuyển theo trục x_0 . Các vị trí này được chỉnh sao cho tín hiệu cảm ứng thu được là cực đại. Tín hiệu u được ghi lại trên máy tự ghi $X-t$. Đối với phép đo $M_{//}$ hệ số $\frac{A}{V} [H_s(x_2) - H_s(x_1)]$ xác định thông qua phép đo với mẫu chuẩn Ni sạch đã biết độ từ hóa riêng. Việc chuẩn M_{\perp} được thực hiện bằng cách so sánh với tín hiệu $M_{//}$ đo trên cùng một mẫu nam châm cứng trong điều kiện hoàn toàn không có từ trường ngoài.

Nhờ có một hệ lò nung bao quanh buồng mẫu, các phép đo $M_{//}$ và M_{\perp} có thể được thực hiện trong dải nhiệt độ từ 77K đến 1000K, trong từ trường cho đến 7,5 kOe. Đối với các mẫu bột hướng, trong thực tế, nhiệt độ đo cao nhất mà mẫu chịu được phụ thuộc vào vật liệu kết dính dùng để chế tạo mẫu (thông thường phép đo thực hiện trong khoảng nhiệt độ từ 77K đến 300K).

4. NGUYÊN LÝ XÁC ĐỊNH GÓC LỆCH θ

Giả sử tại một nhiệt độ nào đó, vật liệu ta đang xét có cấu trúc góc, tức là phương lệch khỏi trục c một góc θ . Khi đó đường cong $M_{//}(\varphi)$ biểu diễn sự phụ thuộc của thành phần song song của mô men từ như một hàm của góc φ tạo bởi trục c và phương từ trường sẽ có cực đại tại góc $\varphi = 0$ mà có hai đỉnh đối xứng nhau qua trục c tương ứng với các góc $\varphi = \pm \theta$ (hình 1b). Tuy nhiên các đỉnh này thường không đủ nhọn sắc để có thể xác định chính xác góc lệch θ .

Đối với thành phần vuông góc với từ trường của mô men từ, ta có nhận xét khi từ trường trùng với hướng từ trường ngoài, mô men từ của các đô men đều trùng với phương từ trường, tức là $M_{\perp} = 0$ (hình 1b). Cần lưu ý trong các trường hợp $\varphi = 90^\circ, 180^\circ$, và 270° cũng bằng không bởi vì các đô men đối xứng nhau tạo nên các tín hiệu M_{\perp} bù trừ nhau. Trên đường cong $M_{\perp}(\varphi)$ chúng ta có thể xác định góc φ mà tại đó $M_{\perp} = 0$ tức là có thể xác định góc lệch θ .

Sự kết hợp hai đường cong $M_{//}(\varphi)$ và $M_{\perp}(\varphi)$ cho ta giá trị đáng tin cậy của góc lệch θ .

Cũng cần nói thêm rằng giữa M_{\perp} và mô men xoắn cơ học L để giữ mẫu ở trạng thái từ hóa mô men từ M của mẫu tạo với phương từ trường góc α có mối liên hệ

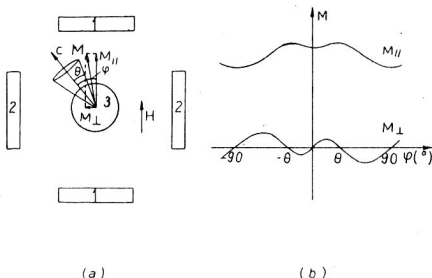
$$L = M \cdot H \sin \alpha = M_{\perp} \cdot H$$

Nguyên lý xác định góc lệch θ từ đường cong $M_{\perp}(\varphi)$ đã được một nhóm tác giả khác bày trong [3]. Tuy nhiên công trình đó chỉ giới hạn trong trường hợp đơn giản là mẫu có các đô men đơn. Trong thực tế, các vật liệu mà chúng ta khảo sát, mặc dù có kích thước hạt nhỏ để được coi như một tiểu tinh thể nhưng chưa đủ nhỏ để có thể coi là đơn đô men. Hơn nữa

thường có một mức độ bất đồng nhất định. Trong các vật liệu này độ dịch chuyển vách không chỉ phụ thuộc vào từ trường ngoài mà còn phụ thuộc vào các yếu tố khác như sai lệch, biên hạt, pha phụ v.v... Mối quan hệ giữa từ trường và dạng đường cong $M_{//}(\varphi)$ và do đó trở nên phức tạp và cần được xem xét tỉ mỉ.

Hiện tượng hai đỉnh đối xứng nhau qua góc $\varphi = 0$ của đường cong $M_{//}(\varphi)$ chỉ xuất hiện trong một khoảng độ lớn từ trường thích hợp. Nếu từ trường quá lớn, do sự bão hòa từ, $M_{//}$ sẽ không đổi trong một khoảng góc rộng. Nếu từ trường quá nhỏ, trong mỗi hạt bột, lượng từ có mô men từ định hướng theo hai phương $(-\theta)$ và $(+\theta)$ xấp xỉ nhau. Tổng $M_{//}$ của hai mô men này không đạt cực đại tại $\varphi = \pm\theta$ mà tại $\varphi = 0$.

Đối với đường cong $M_{\perp}(\varphi)$, độ lớn của từ trường cũng có những ảnh hưởng tương tự. Từ trường quá lớn sẽ làm bão hòa từ, kết quả tín hiệu M_{\perp} luôn bằng không. Từ trường quá thấp sẽ đủ để làm dịch chuyển vách đô men, do đó ngay cả trong trường hợp từ trường tạo với góc $\pm\theta$ (tức là trùng với phương dễ từ hóa) không phải tất cả các đô men đều có mô men song song với từ trường mà vẫn còn có một lượng các đô men có mô men từ định hướng theo góc đối xứng qua trục c, kết quả là M_{\perp} của toàn mẫu khác không tại $\varphi = \pm\theta$.



Hình 1: Phương pháp xác định góc lệch θ của mô men từ khỏi trục tinh thể từ các đường cong $M_{//}$ và $M_{\perp}(\varphi)$.

a) Mô tả phép đo $M_{//}$ và M_{\perp} ; b) Dạng đường cong $M_{//}(\varphi)$ và $M_{\perp}(\varphi)$.
1. cặp cuộn dây đo $M_{//}$; 2. cặp cuộn dây đo M_{\perp} ; 3. mẫu

Tóm lại, để phép đo được chính xác, từ trường phải đủ lớn để dịch chuyển vách đô men phải nhỏ hơn từ trường bão hòa. Trong thực tế, với những vật liệu dị hướng lớn, chúng ta thường gặp trường hợp với từ trường cực đại tới 7,5 kOe, khi quay mẫu theo một chiều nào đó (là sự theo chiều âm sang dương) đường cong $M_{\perp}(\varphi)$ cắt trục hoành tại $\varphi = -\theta$, nhưng lại cắt trục hoành tại $\varphi = 0$ và $\varphi = \theta$. Còn khi quay theo chiều ngược lại, đường $M_{\perp}(\varphi)$ chỉ cắt trục hoành tại $\varphi = \theta$. Hiện tượng này được giải thích như sau: xét chiều quay từ âm sang dương, tại vị trí $\varphi = -\theta$, từ trường 7,5 kOe đủ để tạo nên trạng thái mà trong các hạt bột chỉ

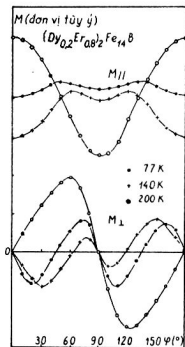
tồn tại một loại đô men có mô men từ song song với từ trường. Tiếp tục quay mẫu ở $\varphi = 0$, do cơ chế hãm dịch chuyển vách, sự phát triển của các đô men có mô men từ định theo phương θ bị trễ, tại vị trí này lượng đô men theo hai phương $(-\theta)$ và $(+\theta)$ không bằng nhau. Kết quả M_{\perp} của hai loại đô men theo hai phương đối xứng không triệt tiêu nhau. Tiếp tục quay mẫu đến vị trí $\varphi = 0$ do hiện tượng trễ, trong các hạt bột lúc này không chỉ có các đô men từ theo phương θ mà vẫn còn một lượng nhất định các đô men có mô men từ theo $-\theta$. Thành phần M_{\perp} gây bởi loại đô men này làm cho M_{\perp} tổng cộng khác 0. Dựa trên các tích này, chúng tôi vẫn có thể xác định được góc θ cả trong trường hợp đa đô men. Khi $\varphi = 0$ được xác định từ điểm cắt trục hoành của đường cong $M_{\perp}(\varphi)$ do tại nhiệt độ mà ta biết chắc rằng mẫu có cấu trúc đơn trục. Giá trị θ xác định bằng cách như vậy là đáng nếu thỏa mãn các điều kiện:

- Với từ trường thấp cỡ 4-6 kOe, đường cong $M_{\perp}(\varphi)$ vẫn cắt trục hoành tại cùng một vị trí $\varphi = -\theta$ hoặc $\varphi = +\theta$ tùy theo chiều quay mẫu.

- Đường cong $M_{//}(\varphi)$ tương ứng có đỉnh tại $\varphi = \pm\theta$.

5. MỘT SỐ KẾT QUẢ MINH HỌA

Kết quả đo $M_{//}(\varphi)$ và $M_{\perp}(\varphi)$ của mẫu $(Dy_{0,2}Er_{0,8})_2Fe_{14}B$ tại các nhiệt độ khác nhau trong từ trường 7,5 kOe được trình bày trong hình 2. Đối với mẫu này, từ trường 7,5 kOe đủ để mẫu ở trạng thái đơn đô men tại vị trí $\varphi = \pm\theta$. Hình 3 là đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của góc lệch θ trên mẫu $(Dy_{0,2}Er_{0,8})_2Fe_{14}B$ theo kết quả của chúng tôi và theo Ibarra kết quả rất phù hợp với nhau.



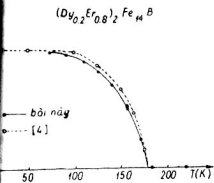
Hình 2: Đường cong $M_{//}(\varphi)$ và $M_{\perp}(\varphi)$ của mẫu $(Dy_{0,2}Er_{0,8})_2Fe_{14}B$ tại các nhiệt độ khác nhau, đo trong từ trường $H = 7,5$ kOe

Một ví dụ điển hình của trường hợp đa đô men cấp đến ở trên là mẫu $DyFe_{11}Ti$. Kết quả đo $M_{//}(\varphi)$ và $M_{\perp}(\varphi)$ của mẫu $DyFe_{11}Ti$ tại các nhiệt độ khác nhau trong từ trường 7,5 kOe được trình bày trong Hình 5 là đồ thị $M_{\perp}(\varphi)$ của mẫu $DyFe_{11}Ti$ tại nhiệt độ 100K ở các từ trường 2, 4, 6 và 7,5 kOe có nhận xét, trong khoảng từ trường 4-7,5 kOe đường cong $M_{\perp}(\varphi)$ cắt trục hoành tại cùng một vị trí $-\theta = -30^\circ$. Từ trường càng cao, đường cong càng có xu hướng cắt trục hoành tại cả ba điểm $0, \pm\theta$. Hình 6 là đồ thị $\theta(T)$ của mẫu $DyFe_{11}Ti$ định dựa trên các lập luận trình bày ở phần 4.

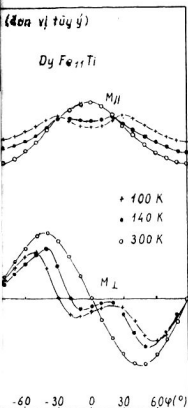
6. KẾT LUẬN

Kết quả đo trên các mẫu chuẩn cho thấy có độ tin cậy cao. Thiết bị có thể được sử dụng cho các nghiên cứu cơ bản cũng như nghiên cứu ứng dụng các vật liệu từ.

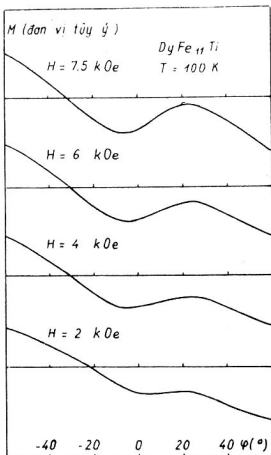
Các tác giả xin chân thành cảm ơn sự giúp đỡ của Giáo sư Tiến sĩ Thân Đức Hiền đồng nghiệp ở phòng thí nghiệm Vật lý Nhiệt độ thấp của Viện Vật lý Đại học Tổng hợp Hà Nội công các chi tiết của hệ đo.



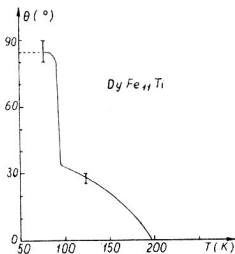
nh 3: Sự phụ thuộc nhiệt độ của góc lệch mẫu $(Dy_{0.2}Er_{0.8})_2Fe_{14}B$ theo kết quả của ði và theo Ibarra [4]



nh 4: Đường $M_{//}(\varphi)$ và $M_{\perp}(\varphi)$ của $yFe_{11}Ti$ tại các nhiệt độ khác nhau, đo ở từ trường $H = 7,5$ kOe



Hình 5: Đường cong $M_{\perp}(\varphi)$ của mẫu tại cùng nhiệt độ 100K, đo trong các từ trường 2, 4, 6 và 7,5 kOe



Hình 6: Sự phụ thuộc nhiệt độ của góc lệch θ trong mẫu $DyFe_{11}Ti$

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. L. T. Tài, N. M. Hồng, N. P. Thủy, Tạp chí khoa học ĐHTH Hà Nội No 4 (1990) tr 5.
2. N. M. Hồng, N. P. Thủy, T. Đ. Hiền, L. T. Tài, Đ. H. Mạnh, Tạp chí khoa học ĐHTH No 1 (1986) tr 39.
3. A. del Moral, E. Joven, M. R. Ibarra và J. I. Arnaudas. *J. Physique* 49 (1989) C8-44
4. M. R. Ibarra, P. A. Algarabel, C. Marquina, J. I. Arnaudas, A. del Moral L. Paret, G. Marusi và M. Solsi, *Phys. Rev. B* 39 (1989) 7081.

DETERMINATION OF THE CONE ANGLE STRUCTURE OF THE MAGNETIZATION VECTOR IN THE SPIN-REORIENTATION TEMPERATURE REGION

*Pham Hong Quang, Nguyen Hoang Luong, Nguyen Phu Thuy,
Nguyen Minh Hong, Le Duc Tung
Faculty of Physics, Hanoi University*

The principle of the method for determination of the cone angle structure of the magnetization vector in an uniaxial magnetic material based on the measurements of parallel and perpendicular magnetisation components of an aligned powder sample is presented. The reliability of the method has been illustrated by the measurement results obtained on different rare earth transition metal intermetallic samples.