

Effect of Sintering Temperature on Properties of $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ Ferrites Nanoparticles

N. T. Lan*, N. P. Duong, T. D. Hien, L. N. Anh
Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam
*Email: lan.nguyenthi1@hust.edu.vn

Abstract

In this work, $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ ferrite nanoparticles were synthesized by the sol-gel method. The influence of the annealing temperature on phase formation, microstructure, and magnetic characterizations of Li-ferrite was explored. The result of XRD showed that the preliminary calcined and sintered samples at 500 °C are single-phase spinel structures. The crystallite size increases from 16.9 nm to 37.8 nm, with sintering temperatures increasing from 500 °C to 800 °C. The magnetic properties of Li ferrite powders were strongly depended on sintering temperature (T_{ik}). Coercive force (H_c) followed a simple model of Gauss's law. The magnetic saturation (M_s) was dependent on the sintering temperature of the gel, reaching a maximum value of 74 emul/g, which is higher than the bulk material. Curie temperature (T_c) of Li ferrite nanoparticles is a function of gel sintering temperature, and it reaches 98% of the T_c value of bulk materials.

Keywords: Lithium ferrite, sol-gel, sintering, preliminary calcine

1. Giới thiệu

Vật liệu ferit Liti ($\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$) có nhiệt độ Curie lên tới 680 °C nên cho phép các thiết bị hoạt động ổn định trong khoảng nhiệt độ rộng. Do có điện trở suất lớn và có tổn hao nhỏ nên vật liệu thể làm việc ở vùng tần số cao tới 100 MHz. Khi kích thước hạt giảm xuống thang nanomet, ferit Liti có nhiều đặc tính ưu việt hơn so với vật liệu khối như: đơn đơ-men, siêu thuận từ, đặc tính tương tác, dị hướng từ,... Vì vậy, các hạt nano ferit Liti được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực công nghệ như pin lithium, truyền dẫn vi sóng, làm lõi từ trong phần tử nhớ, lõi máy biến áp, đầu ghi, cảm biến, bộ lọc tiếng ồn, siêu cao tần và chất lỏng từ,... [1].

Ferit Liti, $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ có cấu trúc lập phương spinel dạng AB_2O_4 , với hai dạng có trật tự và mất trật tự, phụ thuộc mạnh vào điều kiện tổng hợp mẫu. (i) Dạng có trật tự α , trong pha này các ion Li^+ và Fe^{3+} sắp xếp trật tự theo tỉ lệ 1:3 trong phân mạng bát diện B. Mỗi ion Li^+ được bao bởi hình khối 8 mặt do 6 ion sắt tạo nên và kéo dài theo trục bậc 3. Mỗi ion Fe^{3+} trong phân mạng B được bao bởi 4 ion Fe^{3+} khác và 2 ion Li^+ . (ii) Dạng mất trật tự β , các ion Li^+ và Fe^{3+} phân bố ngẫu nhiên trong vị trí bát diện. Dạng có trật tự α tồn tại khi làm lạnh chậm từ vùng 755 °C còn dạng mất trật tự β có được bằng cách tôi vật liệu từ ở nhiệt độ cao. Ở vùng nhiệt độ 735-755 °C xảy ra sự chuyển pha trật tự α - mất trật tự β vật liệu Li ferit [2].

Ở dạng vật liệu khối, ferit Liti thông thường được tổng hợp bằng phương pháp gồm trên cơ sở phản ứng pha rắn ở nhiệt độ cao (thiêu kết nhiều lần với nhiệt độ

thiêu kết lớn hơn 1000 °C). Gần đây, nhiều nhà nghiên cứu đã nỗ lực tìm kiếm phương pháp tổng hợp hạt nano ferit Liti nhằm giảm nhiệt độ thiêu kết và cải thiện tính chất từ bằng cách kiểm soát kích thước và hình dạng hạt. Nhiều phương pháp hóa học thực hiện ở nhiệt độ thấp đã sử dụng như: phản ứng pha rắn ở nhiệt độ thấp [3], nghiên cứu hành tinh năng lượng cao [4], sol-gel đốt tự động [5,6], phân hủy gel citrate [7], aerogel [8] và sol-gel tự cháy [9],... Trong đó phương pháp sol-gel tự cháy được chú ý hơn cả vì phương pháp này có khả năng tạo ra các hạt có kích thước nano đồng đều và nhiệt độ thiêu kết thấp [10]. Tuy nhiên, các yếu tố ảnh hưởng đến tính chất của hạt nano Li ferit như: tỷ lệ giữa axit citric (AC) và gốc muối nitrat, pH của dung dịch ban đầu, nhiệt độ thiêu kết (T_{ik}) và thời gian (t) xử lý gel, aerogel,... cần được quan tâm nghiên cứu khi sử dụng phương pháp này.

Trong nghiên cứu trước đây của chúng tôi, hạt nano ferit Liti đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp sol-gel tự cháy [11]. Sau đó, chúng tôi đã nghiên cứu tổng quát ảnh hưởng của các điều kiện thí nghiệm (nhiệt độ, độ pH, nung sơ bộ, thời gian thiêu kết) tới cấu trúc và tính chất của hạt nano ferit Liti [12]. Kết quả cho thấy, vi cấu trúc và tính chất từ của vật liệu chịu ảnh hưởng mạnh của nhiệt độ nung thiêu kết. Vì vậy, trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu và làm rõ ảnh hưởng của nhiệt độ nung thiêu kết T_{ik} tới vi cấu trúc và tính chất từ của các hạt nano ferit Liti. Một số kết quả được trích dẫn để làm rõ hơn các tác động của nhiệt độ thiêu kết đến cấu trúc và tính chất từ của hạt nano ferit Liti.

2. Thực nghiệm

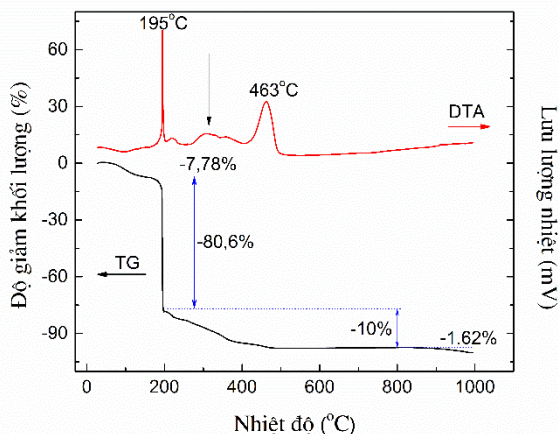
Đầu tiên, các muối LiNO_3 và $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ được hoà tan trong axit citric $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 1M với tỷ lệ mol giữa các ion (Li^+ , Fe^{3+}) là 1/5. Sau đó dung dịch được đun, khuấy ở 80 °C và dung dịch NH_3 (25%) được thêm vào từ từ để điều chỉnh pH = 7. Dung dịch sol tạo thành có màu vàng nâu và độ nhớt cao. Sấy dung dịch sol ở 100 °C trong 2 giờ thu được gel có độ xốp rất cao. Đốt gel ở 300 °C để các chất hữu cơ cháy hoàn toàn. Cuối cùng, thiêu kết bột ở các nhiệt độ khác nhau từ 500 °C – 800 °C trong thời gian từ 2 đến 6 giờ trong không khí [10-12].

Các giản đồ nhiễu xạ tia X được ghi trên máy SIEMEN D5005 Bruker- Germany, bức xạ Cu-K α với bước sóng $\lambda=1,5406$ Å, cường độ dòng điện bằng 30 mA, điện áp 40 kV, góc quét bằng $2\theta=10 \div 800$, tốc độ quét 0,030/s. Các ảnh TEM của vật liệu được chụp trên kính hiển vi điện tử truyền qua JEOL TEM 5410 NV có điện thế từ 40÷100 kV. Quá trình phân tích nhiệt của gel được thực hiện trên thiết bị phân tích nhiệt DTA-TGA Setaram Labsys 18 từ 30 °C đến 1000 °C, tốc độ nâng nhiệt 10 °C/phút trong không khí. Tính chất từ của vật liệu được nghiên cứu bằng hệ SQUID với từ trường lên tới 7 T và hệ đo từ kế mẫu rung DMS 880 với từ trường cực đại là 13,5 kOe và nhiệt độ tới 600 °C.

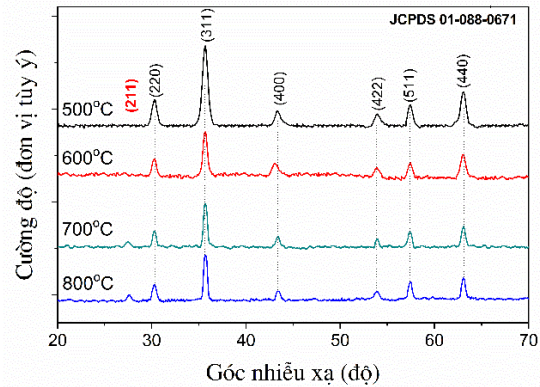
3. Kết quả và thảo luận

Giản đồ phân tích nhiệt DTA-TGA của mẫu gel ferit Liti chưa xử lý nhiệt được trình bày trên hình 1.

Đường TGA cho thấy khi nhiệt độ tăng từ nhiệt độ phòng đến gần 200 °C có sự giảm khối lượng khoảng 7,78%. Nguyên nhân của hiện tượng này là do nước trong gel bay hơi. Hiện tượng này có thể quan sát được khi sấy gel ở vùng 80-130 °C, gel chuyển từ dạng keo đặc sang dạng bông xốp, thể tích gel tăng khoảng 20-30 lần. Đỉnh cực đại ở 195 °C tương ứng với độ giảm khối lượng 80,6% cho thấy có sự giải phóng khí CO, CO₂ đồng thời sự phân hủy các muối kim loại gốc citrate bắt đầu xảy ra [11,12].



Hình 1. Giản đồ phân tích nhiệt DTA-TGA của mẫu gel ferit Liti chưa xử lý nhiệt [11]



Hình 2. Phổ nhiễu xạ tia X của các mẫu hạt nano ferit Liti thiêu kết ở nhiệt độ khác nhau [12]

Trong vùng nhiệt độ từ 200-400 °C trên đường DTA giá trị lưu lượng nhiệt tiếp tục tăng cao và trên đường TGA khối lượng tiếp tục giảm có thể do sự tự oxy hoá của NH_4NO_3 làm cho một số hợp chất hữu cơ bị oxy hoá và bốc cháy rất mạnh. Điều này phù hợp với thực nghiệm, bởi vì khi đốt mẫu ở nhiệt độ 300 °C có khí màu nâu bay ra. Đỉnh cực đại ở 463 °C trên đường DTA có thể là quá trình kết tinh tạo pha của $\text{Li}_{0,5}\text{Fe}_{2,5}\text{O}_4$. Khối lượng mẫu giảm chậm (khoảng 10%) và gần như không thay đổi ở vùng gần 500 °C – 850 °C, hoàn thành quá trình hình thành pha của vật liệu. Kết quả này tương tự như kết quả nghiên cứu của S. Dey và cộng sự [13] khi tổng hợp cùng vật liệu bằng phương pháp này [11,12]. Vùng từ 850 °C -1000 °C, khối lượng mẫu giảm nhẹ, khoảng 1,62%, tại đây có thể xảy ra quá trình chuyển pha cấu trúc của hạt nano ferit Liti.

Giản đồ nhiễu xạ tia X của các mẫu hạt nano ferit Liti thiêu kết ở nhiệt độ khác nhau được trình bày trong hình 2. Từ giản đồ nhiễu xạ của các mẫu ferit Liti cho thấy các mẫu tạo thành đều đơn pha, các đỉnh nhiễu xạ thể hiện cấu trúc spinel của ferit, phù hợp tốt với thể chuẩn 01-088-0671. Sự xuất hiện mặt nhiễu xạ đặc trưng (211) cho thấy có sự chuyển đổi cấu trúc giữa dạng có trật tự $\alpha\text{-Li}_{0,5}\text{Fe}_{2,5}\text{O}_4$ và mất trật tự $\beta\text{-Li}_{0,5}\text{Fe}_{2,5}\text{O}_4$ [2]. Sự thay đổi dạng cấu trúc có thể do phương pháp tổng hợp, do sự biến đổi khối lượng Liti trong quá trình tạo gel, ảnh hưởng của nhiệt độ thiêu kết,... đến quá trình phân bố, sắp xếp ion Li^+ trong phân mạng B [12].

Hằng số mạng trung bình của các mẫu được xác định từ giản đồ nhiễu xạ có giá trị cỡ 8,34 Å, gần với hằng số mạng của mẫu khối là 8,33 Å [14]. Sự tăng nhẹ của hằng số mạng sau khi xử lý nhiệt có thể do sự rối loạn bề mặt trong các hạt nano khi tăng nhiệt độ thiêu kết mẫu [13]. Kích thước tinh thể của hệ mẫu được xác định theo công thức Scherrer:

$$d_{XRD} = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1) \quad (1)$$

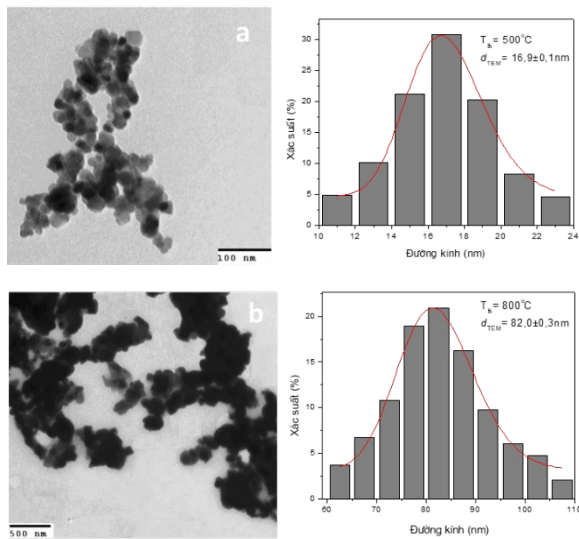
trong đó độ rộng bán vạch β và góc tại đỉnh nhiễu xạ cực đại 2θ được xác định bằng cách làm khớp các số

liệu thực nghiệm trên giản đồ nhiễu xạ tia X theo hàm Lorentz. Kết quả trên bảng 1 cho thấy, kích thước tinh thể trung bình d_{XRD} của hệ mẫu tăng từ 16,9 nm đến 37,8 nm khi tăng nhiệt độ thiêu kết mẫu từ 500 °C đến 800 °C.

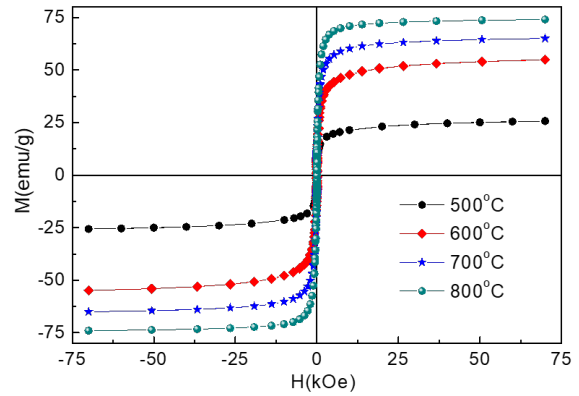
Các mẫu sau khi nung thiêu kết được rung siêu âm trong ethanol 99% để các hạt không bị kết tụ trước khi đo TEM. Ảnh TEM và đồ thị phân bố kích thước hạt của mẫu nung thiêu kết ở 500 °C và 800 °C được trình bày trong hình 3. Kết quả cho thấy các hạt đa số có dạng hình cầu và khá đồng đều. Giá trị kích thước hạt được mô hình hóa qua hàm phân bố LogNormal để đánh giá kích thước trung bình hạt (d_{TEM}). Khi tăng nhiệt độ thiêu kết, kích thước của các hạt tăng nhưng hình dạng hạt ít thay đổi. Với mẫu thiêu kết tại 500 °C, kích thước hạt ($d_{TEM} \approx 25,2$ nm) gần với kích thước tinh thể ($d_{XRD} = 16,9$ nm) chứng tỏ các hạt có thể là đơn tinh thể. Tiếp tục tăng nhiệt độ thiêu kết tới 800 °C, kích thước hạt tăng lên, giá trị d_{TEM} nằm trong khoảng 80÷85 nm (tập trung nhiều nhất ở 82 nm chiếm khoảng 23%), lớn hơn nhiều kích thước tinh thể d_{XRD} là 37,8 nm, chứng tỏ rằng dưới tác dụng của nhiệt độ các hạt đơn tinh thể đã kết hợp với nhau tạo thành các hạt đa tinh thể.

Bảng 1. Các tham số kích thước tinh thể d_{XRD} , mô-men từ bão hòa ở nhiệt độ phòng M_S , lực kháng từ H_C và nhiệt độ Curie T_C của các mẫu hạt ferit Liti theo nhiệt độ thiêu kết T_{tk} .

T_{tk} (°C)	d_{XRD} (nm)	M_S (emu/g)	H_C (Oe)	T_C (K)
500	16,9	26	90	850
600	25,4	55	120	908
700	34,5	65	100	930
800	37,8	74	60	940



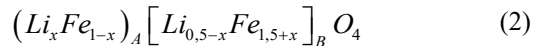
Hình 3. Ảnh TEM của mẫu ferit Liti được thiêu kết ở 500 °C và 800 °C



Hình 4. Đường cong từ trễ của các mẫu hạt nano ferit Liti thiêu kết ở các nhiệt độ khác nhau

Đường cong từ trễ của các mẫu bột ferit Liti được khảo sát ở nhiệt độ 300 K với từ trường ngoài lên tới 7 T và được biểu diễn trong hình 4 [12]. Các giá trị mô-men từ bão hòa xác định từ đường cong từ trễ của các mẫu được trình bày trong bảng 1. Với mẫu thiêu kết ở 500 °C và 600 °C, giá trị M_S thấp hơn giá trị M_S của vật liệu khối (65 emu/g) [12,15]. Khi tăng nhiệt độ thiêu kết lên 700 °C, giá trị M_S tương đương với mô-men từ của vật liệu khối. Tiếp tục tăng nhiệt độ thiêu kết lên 800 °C thì giá trị M_S đạt 74 emu/g cao hơn so với giá trị M_S của mẫu khối và tương đương với kết quả công bố của Mathew George và cộng sự [9,12].

Dựa trên lý thuyết Néel [15], mô hình ion cho dạng cấu trúc spinel của $Li_{0,5}Fe_{2,5}O_4$ có thể viết dưới dạng sau:



trong đó x là độ đảo – là hàm lượng ion Li^+ trong phân mạng A.

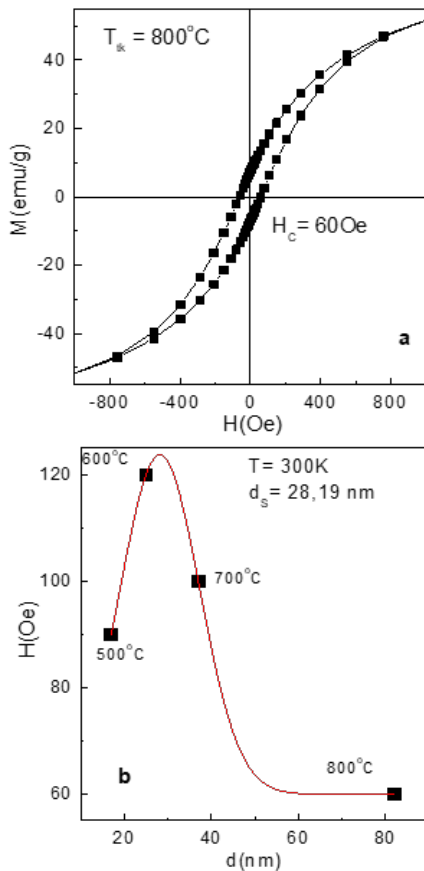
Trong trường hợp giá trị $M_S < M_S$ khối, nhiệt độ thiêu kết đối với hai mẫu này là 500 °C và 600 °C. Theo Seema Verma và cộng sự [2] nhiệt độ này nhỏ hơn nhiệt độ chuyển pha cấu trúc vì vậy trong mẫu có thể sẽ tồn tại dạng cấu trúc có trật tự α . Lúc này, các ion Li^+ với mô-men spin bằng $0\mu_B$ và của Fe^{3+} là $5\mu_B$ sắp xếp trật tự theo tỉ lệ 1:3 trong phân mạng bát diện B ($x = 0$), tương tự với mô hình Néel ở mẫu khối [15]. Cho nên, nguyên nhân của hiện tượng giảm mô-men từ có thể do ảnh hưởng của hiệu ứng giảm kích thước. Bên cạnh đó, nghiên cứu của K. Parekh và cộng sự [16] cũng chỉ ra rằng các hạt có kích thước nanomet luôn tồn tại lớp phi từ trên bề mặt làm giảm mô-men từ thực tế của hạt. Đây có thể là một nguyên nhân làm giảm M_S so với mẫu vật liệu khối trong các hạt nano ferit Liti trên.

Trong trường hợp giá trị $M_S \geq M_S$ khối (với mẫu thiêu kết ở 700 °C và 800 °C), nguyên nhân của hiện tượng này có thể do sự phân bố lại ion Li^+ trong hai phân mạng A và B. Dưới tác động của nhiệt độ, ion Li^+ có thể chiếm chỗ cả ở phân mạng A ($x > 0$). Khi đó, mô-men từ trong phân mạng A sẽ giảm và mô-men từ trong phân mạng B tăng lên, do đó mô-men của mẫu

từ tính theo mẫu Néel $M = M_B - M_A$ [15] sẽ tăng lên. Sự tăng mô-men spin do sự thay đổi trật tự ion trong mẫu lớn hơn nhiều so với sự giảm mô-men từ do hiệu ứng kích thước, vì vậy giá trị M_S của hạt nano tăng lên.

Lực kháng từ H_C được xác định từ đường cong từ hóa tại 300K của các hạt nano ferit Liti (Hình 4). Đường cong từ trễ của mẫu thiêu kết ở 800 °C ở từ trường thấp trên hình 5a cho thấy rõ hơn giá trị H_C của mẫu. Hình 5b biểu diễn sự phụ thuộc của giá trị H_C theo kích thước hạt xác định được ở nhiệt độ thiêu kết khác nhau. Đồ thị cho thấy rằng khi tăng nhiệt độ thiêu kết mẫu từ 500 °C đến 800 °C, kích thước hạt nano ferit Li tăng lên đồng thời giá trị H_C giảm chứng tỏ có tồn tại cấu trúc đa đô-men trong các mẫu này. Sự hình thành vách đô-men làm cho năng lượng khử từ của mẫu giảm dần tới giá trị của lực kháng từ giảm đi đáng kể [15].

Mặt khác, theo B.D. Cullity [15], lực kháng từ của các mẫu là một hàm của kích thước hạt. Ở vùng kích thước đơn đô-men $d < D_S$ (D_S -kích thước đơn đô-men), lực kháng từ tỉ lệ thuận với sự tăng của kích thước hạt. Ở vùng kích thước đa đô-men $d > D_S$, giá trị lực kháng từ tỉ lệ nghịch với sự gia tăng của kích thước hạt. Làm khớp số liệu thực nghiệm theo hàm phân bố Gauss [17] chúng ta tìm được kích thước đơn đô-men vật liệu này có giá trị $D_S \sim 28$ nm.

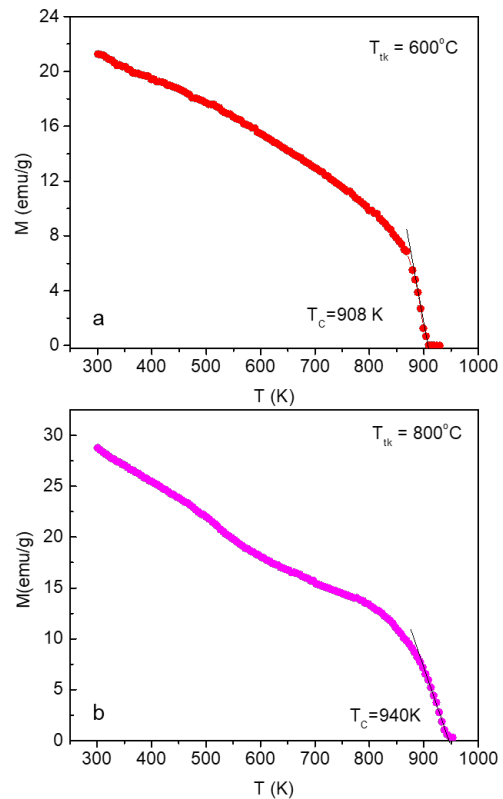


Hình 5. Đường cong từ trễ của mẫu hạt nano ferit Liti thiêu kết ở 800°C (a) và sự phụ thuộc của lực kháng từ vào kích thước hạt nano ferit Liti (b).

So sánh với kết quả phân tích ảnh TEM ta thấy rằng mẫu thiêu kết ở 500 °C khoảng phân bố kích thước hạt chỉ từ 10 nm đến 24 nm, do đó trong mẫu này có thể chỉ chứa hạt đơn đô-men. Với mẫu thiêu kết ở 800 °C, khoảng phân bố kích thước rộng từ 60 nm đến 110 nm do đó trong mẫu này có thể chỉ tồn tại các hạt đa đô-men.

Sự phụ thuộc của mô-men M theo nhiệt độ T trong từ trường ngoài $H = 100$ Oe của mẫu hạt nano ferit Liti thiêu kết ở 600 °C và 800 °C được trình bày trên Hình 6. Giá trị nhiệt độ Curie T_C được xác định là giao điểm giữa tiếp tuyến của đường $M(T)$ và trục hoành tại vùng có độ dốc lớn nhất và được trình bày trong Bảng 1. Khi tăng nhiệt độ thiêu kết, nhiệt độ Curie của các mẫu tăng và đạt giá trị lớn nhất là 940 K với mẫu thiêu kết tại 800 °C. Giá trị này đạt đến 98% so với nhiệt độ Curie của vật liệu khối (953 K)[15]. Sự giảm của giá trị T_C so với mẫu khối có thể do sự ảnh hưởng của hiệu ứng giảm kích thước và hiệu ứng bề mặt. Rõ ràng, kích thước hạt càng nhỏ thì nhiệt độ Curie càng giảm mạnh so với mẫu vật liệu khối.

Mặt khác, sự thay đổi trật tự sắp xếp ion trong các phân mạng từ của của hạt nano có thể ngăn chặn sự giảm nhiệt độ Curie bởi hiệu ứng giảm kích thước. Với giá trị T_C gần bằng nhiệt độ Curie của vật liệu khối cho phép các hạt nano ferit Liti có thể làm việc ổn định ở vùng nhiệt độ rộng.



Hình 6. Mô-men từ phụ thuộc nhiệt độ của mẫu hạt nano ferit Liti thiêu kết ở 600 °C (a) và 700 °C (b).

4. Kết luận

Vật liệu $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ có kích thước nanomet đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp sol-gel tự cháy. Ảnh hưởng của nhiệt độ nung thiêu kết đến cấu trúc vi mô và tính chất từ tính Li-ferit đã được nghiên cứu chi tiết. Mô-men từ bão hòa giảm so với mẫu khối trong mẫu thiêu kết ở nhiệt độ thấp có thể do ảnh hưởng của hiệu ứng giảm kích thước. Sự chiếm chỗ của ion Li^+ trong hai phân mạng A và B có thể làm tăng giá trị mô-men từ và nhiệt độ Curie của vật liệu. Lực kháng từ là một hàm Gauss của kích thước hạt. Việc thay đổi nhiệt độ thiêu kết mẫu giúp chúng tôi có thể điều khiển kích thước và từ tính của hạt nano ferit Li cho các ứng dụng cụ thể.

Lời cảm ơn

Công trình này được hỗ trợ về kinh phí từ đề tài cấp cơ sở phân cấp của Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, mã số T2018-PC-069.

References

- [1] E. Ranjith Kumar, R. Jayaprakash, J. Chandrasekaran, Effect of fuel ratio and the impact of annealing temperature on particle size, magnetic and dielectric properties of manganese substituted CuFe_2O_4 nanoparticles, *Superlattice. Microst.*, 64, (2013) 343 – 353.
<https://doi.org/10.1016/j.spmi.2013.10.001>.
- [2] Seema Verma, P. A. Joy, Magnetic properties of superparamagnetic lithium ferrite nanoparticles, *J. Appl. Phys.*, 98, (2005) pp. 124312.
<https://doi.org/10.1063/1.2149493>
- [3] Inaam M. Abdulmajeed, Emad K. AL-Shakarchi, Mohammad H. Al-Dharob, Brahim Elouadi, Preparation of nanoparticle Li-Ferrite materials by different chemical method, *European International Journal of Science and Technology*, Vol. 4, No. 2, (2015) 69-76.
https://ejst.org.uk/images/frontImages/gallery/Vol_4_No_2/8_69-76.pdf
- [4] S.A. Mazen, N.I. Abu-Elsaad, Structural, magnetic, and electrical properties of the lithium ferrite obtained by ball milling and heat treatment, *Appl. Nanosci.* 5, (2015) 105–114.
<https://doi.org/10.1007/s13204-014-0297-2>.
- [5] Mamata Maisnam, Nandeibam Nilima, Maisnam Victory, Sumitra Phanjoubam, Low dielectric loss in nano-Li-ferrite spinels prepared by sol-gel auto-combustion technique, *Bull. Mater. Sci.* Vol.39, No.1, (2016) 249–254.
<https://www.ias.ac.in/article/fulltext/boms/039/01/0249-0254>.
- [6] A. M. Samy, E. Hassan Aly, Effect of annealing temperature on prepared nanoparticles Li-Ferrite using positron annihilation lifetime technique, *Mater. Sci. Appl.*, 6, (2015) 436-444.
<http://dx.doi.org/10.4236/msa.2015.65047>.
- [7] Nataša Jović, Bratislav Antić, Gerardo F. Goya, Vojislav Spasojević, Magnetic properties of lithium ferrite nanoparticles with a core/shell structure, *Current Nanoscience*, Vol. 8, No. 5 (2012).
<https://doi.org/10.2174/157341312802884391>.
- [8] Sonal Singhal, Kailash Chandra, Cation distribution in lithium ferrite (LiFe_5O_8) prepared via aerosol route, *JEMAA*, 2, (2010) 51-55.
<https://doi.org/10.4236/jemaa.2010.21008>.
- [9] Mathew George, Swapna S Nair, Asha Mary John, P A Joy, M R Anantharaman, Structural, magnetic and electrical properties of the sol-gel prepared $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ fine particles, *Journal of Physics D: Applied Physics*. 39, (2006) 900–910.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/5/002>.
- [10] N.I. Abu-Elsaad, S.A. Mazen, H.M. Salem, The effect of zinc substitution and heat treatment on microstructural and magnetic properties of Li ferrite nanoparticles, *J. Alloys. Compd.*, 835, (2020), 155227.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155227>.
- [11] Nguyễn Thị Lan, Thân Đức Hiền, Nguyễn Phúc Dương, Cấu trúc và các tính chất từ của ferit $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ có kích thước nano, *Kỷ yếu Hội nghị Vật lý Chất rắn toàn quốc lần thứ 5, Vũng Tàu, Việt nam*, (2007) 239-242.
- [12] N. T. Lan, T. Đ. Hien, N. P. Duong, Ảnh hưởng của điều kiện thí nghiệm tới tính chất hạt nano ferit $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ tổng hợp bằng phương pháp sol-gel, *Kỷ yếu Hội nghị về Vật liệu và Công nghệ Nano Tiên tiến – WANN2017, Hà Nội, Việt nam*, (2017), 57-61.
- [13] S. Dey, A. Roy, D. Das, J. Ghose, Preparation and characterization of nanocrystalline disordered lithium ferrite by citrate precursor method, *JMMM*, 270, (2004) 224-229.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2003.08.024>.
- [14] S. Krupička, P. Novák, in: E.P. Wohlfarth (Ed.). *Ferromagnetic Materials*, vol. 3, North-Holland, Amsterdam, (1982).
- [15] B.D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison Wesley, New York, (1972).
- [16] K. Parekh, R.V. Upadhyay, L. Belova, K.V. Rao, Ternary monodispersed $\text{Mn}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite nanoparticles: preparation and magnetic characterization, *Nanotechnology*, 17 (24), (2006) 5970.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/24/011>.