

Bài báo nghiên cứu

**TÍNH CHẤT NHIỆT VÀ TỪ CỦA VẬT LIỆU NANO HoFeO_3
TỔNG HỢP BẰNG PHƯƠNG PHÁP KẾT TỦA HOÁ HỌC**

Nguyễn Anh Tiến*, Trương Thị Thuận, Đỗ Hoàng Phúc

Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ: Nguyễn Anh Tiến – Email: tienna@hcmue.edu.vn

Ngày nhận bài: 05-6-2021; ngày nhận bài sửa: 17-6-2021; ngày duyệt đăng: 21-6-2021

TÓM TẮT

Trong bài báo này, các hạt nano orthoferrite HoFeO_3 với cấu trúc perovskite được tổng hợp thành công bằng phương pháp kết tủa hoá học đơn giản với tác nhân kết tủa là dung dịch NaOH 5%. Các hạt nano đơn pha orthoferrite HoFeO_3 tạo thành sau khi nung tiền chất kết tủa ở 700, 800 và 900°C trong 1 giờ có kích thước tinh thể trung bình khoảng 35-70 nm và tăng dần theo chiều tăng nhiệt độ nung mẫu (XRD), kích thước hạt 30-50 nm (SEM, TEM). Các mẫu vật liệu nano HoFeO_3 tổng hợp được có lực kháng từ bé ($H_c < 10$ Oe), độ từ dư bé ($M_r \sim 0$), độ từ hoá lớn ($M_s \sim 5$ emu·g⁻¹), là vật liệu nghịch từ thể hiện hành vi siêu thuận từ. Các đặc trưng từ tính của vật liệu nano HoFeO_3 như lực kháng từ và độ từ dư bé hơn, nhưng độ từ hoá lớn hơn so với các hệ perovskite đất hiếm LaFeO_3 , NdFeO_3 , PrFeO_3 đã công bố.

Từ khoá: kết tủa hoá học; HoFeO_3 ; vật liệu nano; tính chất nhiệt; tính chất từ

1. Mở đầu

Trong các oxides bán dẫn có kích thước hạt nhỏ thì các orthoferrites đất hiếm LnFeO_3 (Ln = La, Y, Pr, Ho, Gd...) chiếm một vị trí đặc biệt cả trong nghiên cứu cơ bản lẫn nghiên cứu ứng dụng (Rempel, 2007). Một trong các orthoferrites đất hiếm đang được quan tâm nghiên cứu là HoFeO_3 . Trong nghiên cứu của Kondrashkova và cộng sự đã tổng hợp thành công các tinh thể HoFeO_3 kích thước 27-40 nm bằng phương pháp đốt cháy glycine-nitrate ở nhiệt độ 625-725°C trong 8 giờ (Kondrashkova et al., 2018). Các hạt nano HoFeO_3 tổng hợp được có năng lượng vùng cấm thấp ($E_g \sim 2,1$ eV) và được ứng dụng phân huỷ Methyl Orange (MB) trong vùng tử ngoại khả kiến (UV-Vis). Trong công trình của Habib và cộng sự (Habib et al., 2016), vật liệu orthoferrite HoFeO_3 được tổng hợp bằng phương pháp gôm truyền thống từ các tiền chất oxit là Ho_2O_3 và Fe_2O_3 , sau khi nung ở 1200°C trong 12 giờ thu được đơn pha orthorhombic có kích thước hạt trung bình là 149,30 nm. Nghiên cứu tính chất quang và tính chất từ của vật liệu HoFeO_3 tổng hợp được cho thấy $E_g = 3,39$ eV ở 300K; độ từ hoá $M_s = 25,50$ emu·g⁻¹; lực kháng từ $H_c = 2659$ Oe và độ từ dư $M_r = 4,08$ emu·g⁻¹

Cite this article as: Nguyen Anh Tien, Truong Thi Thuan, & Do Hoang Phuc (2021) Thermal and magnetic properties of HoFeO_3 nanoparticles prepared by chemical co-precipitation method. *Ho Chi Minh City University of Education Journal of Science*, 18(6), 1161-1169.

(các đặc trưng từ tính đo ở 10 K và từ trường cực đại 60 kOe). Với giá trị lực kháng từ và độ từ dư lớn ($H_c \gg 100$ Oe), HoFeO_3 tổng hợp được trong công trình Habib và cộng sự thuộc nhóm vật liệu từ cứng do kích thước hạt lớn và không đồng nhất, dẫn đến hạn chế tiềm năng ứng dụng của vật này (Nada et al., 2016).

Do đó, việc nghiên cứu cải tiến phương pháp tổng hợp nhằm giảm kích thước hạt của vật liệu HoFeO_3 với mục tiêu cải thiện các đặc trưng từ tính của chúng là mục tiêu của công trình này.

2. Vật liệu và phương pháp

2.1. Hoá chất, dụng cụ, thiết bị

Các hoá chất được sử dụng để tổng hợp vật liệu nano orthoferri HoFeO_3 bao gồm $\text{Ho}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 99,8% (hãng Merck), $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 99,6% (hãng Sigma-Aldrich), dung dịch $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 25% ($D = 0,91 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$), nước cất hai lần, giấy lọc băng xanh, giấy tẩm phenolphthalein, giấy cân, giấy đo pH. Các hoá chất $\text{Ho}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ và $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ được cân theo tỉ lệ mol là 1:1 và hoà tan vào tam giác chứa 50 mL nước cất.

Các dụng cụ cần cho thực nghiệm bao gồm cốc thủy tinh dung tích 1000 mL, tam giác dung tích 100 mL, buret dung tích 25 mL, bộ lọc hút chân không, đĩa thủy tinh, muỗng xúc hoá chất, bình tia nước cất, cối và chày sứ.

Các máy móc thiết bị được sử dụng bao gồm cân phân tích 4 số, máy khuấy từ gia nhiệt và con cá từ, máy lọc hút chân không, bếp điện.

2.2. Phương pháp tổng hợp vật liệu nano orthoferrite HoFeO_3

Các hạt nano HoFeO_3 được tổng hợp bằng phương pháp kết tủa hoá học đơn giản dựa trên các công trình tổng hợp nano NdFeO_3 và PrFeO_3 (Nguyen et al, 2020). Nhỏ từ từ từng giọt 50 mL dung dịch chứa hỗn hợp hai muối $\text{Ho}(\text{NO}_3)_3$ và $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ vào cốc chứa 400 mL nước nóng ($t^\circ > 95^\circ\text{C}$) trên máy khuấy từ gia nhiệt. Sau khi nhỏ hết dung dịch hỗn hợp muối, hệ tiếp tục được gia nhiệt thêm 10 phút, rồi để nguội tự nhiên đến nhiệt độ phòng ($\sim 30^\circ\text{C}$). Tiếp theo, nhỏ từ từ 50 mL dung dịch NaOH 5% vào hệ thu được và tiếp tục khuấy từ. Lượng dung dịch NaOH 5% được thêm vào vừa đủ để kết tủa hết các cation Ho^{3+} và Fe^{3+} có trong hệ (thử hệ bằng giấy tẩm phenolphthalein hoá hồng). Sau khi cho dung dịch NaOH 5% vào hệ vừa đủ, tiếp tục khuấy từ thêm 60 phút để kết tủa phân tán đều và ổn định trong nhau. Để kết tủa lắng trong khoảng 30 phút rồi tiến hành lọc lấy kết tủa trên hệ lọc hút chân không và rửa nhiều lần bằng nước cất đến giá trị pH = 7 (thử nước lọc bằng giấy đo pH).

Kết tủa được để khô tự nhiên ở nhiệt độ phòng khoảng 3-5 ngày, rồi nghiền mịn bằng cối và chày sứ ta thu được bột mịn màu vàng nâu (tiền chất tổng hợp vật liệu nano orthoferrite HoFeO_3).

2.3. Các phương pháp nghiên cứu vật liệu nano orthoferrite HoFeO_3

Tính chất nhiệt (TG-DSC) của mẫu bột tiền chất được đo trên máy Labsys Evo 1600°C (Pháp) trong môi trường không khí khô, tốc độ gia nhiệt $10 \text{ K} \cdot \text{phút}^{-1}$, nhiệt độ nung tối đa 900°C , chén đựng mẫu bằng platinum.

Cấu trúc và thành phần pha tinh thể của các mẫu tiền chất sau khi nung được nghiên cứu bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) trên máy Brucker D8-ADVANCE (Đức), sử dụng thể gia tốc và cường độ dòng lần lượt là 40 kV và 40 mA với nguồn bức xạ Cu K_{α} có $\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$, bước đo $0,019^{\circ}$, $2\theta = 10-80^{\circ}$. Kích thước tinh thể của pha HoFeO_3 (D_{XRD} , nm) được tính theo công thức Scherrer (Sasikala et al., 2017).

$$D = \frac{0.89\lambda}{\beta \cos\theta}, \quad (1)$$

trong đó, β là độ rộng ứng với nửa chiều cao của cực đại nhiễu xạ (FWHM, $^{\circ}$), còn θ là góc nhiễu xạ ứng của cực đại nhiễu xạ tương ứng.

Các hằng số mạng tinh thể orthorhombic HoFeO_3 (a ; b ; c ; Å) và thể tích ô mạng (V , Å^3) được tính theo công thức (2) và (3) dựa theo công trình (Sasikala et al., 2017).

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}, \quad (2)$$

$$V = a \cdot b \cdot c. \quad (3)$$

Hình thái và kích thước hạt của mẫu vật liệu orthoferrite HoFeO_3 xác định dựa vào ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) trên máy HITACHI S-4800 (Nhật Bản) và ảnh hiển vi điện tử truyền qua (TEM) trên máy JEOL-1400 (Nhật Bản).

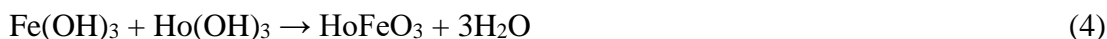
Hàm lượng các nguyên tố (Ho, Fe và O) được xác định dựa vào phổ tán sắc năng lượng tia X (EDX) trên máy FE SEM S-4800, xác định tại 5 vị trí khác nhau rồi lấy giá trị trung bình.

Các đặc trưng từ tính của vật liệu nano orthoferrite HoFeO_3 như đường cong từ trễ, lực kháng từ (H_c , Oe), độ từ hoá (M_s , emu/g) và độ từ dư (M_r , emu/g) được nghiên cứu trên từ kế mẫu rung (VSM) trên máy MICRSENE EV11 (Nhật Bản), đo ở nhiệt độ phòng (300 K), từ trường từ -20 kOe đến + 20 kOe.

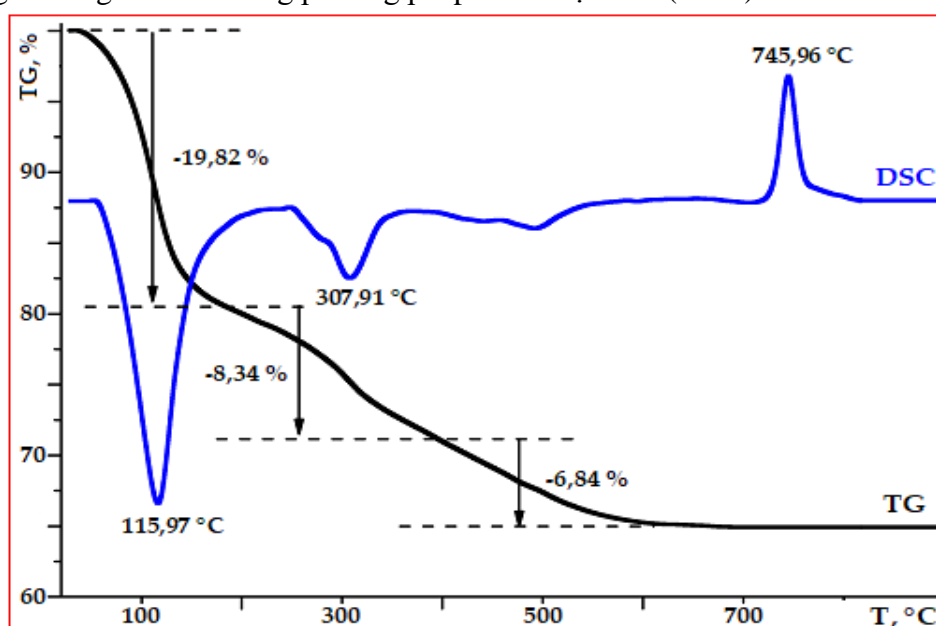
3. Kết quả và thảo luận

Giản đồ TG-DSC của mẫu bột tiền chất (Hình 1) cho thấy khối lượng mẫu giảm khoảng 35,00% khi nung từ nhiệt độ phòng đến 900°C . Chứng tỏ thành phần kết tủa thu được có công thức không chỉ đơn giản là Ho(OH)_3 và Fe(OH)_3 như ở phương trình hoá học (4). Thật vậy, phần trăm khối lượng mất từ phương trình (4) tính được là 16,73%. Sự sai lệch này được cho là kết tủa tổng hợp được có thành phần thay đổi dưới dạng công thức $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ và $\text{HoO(OH)} \cdot y\text{H}_2\text{O}$ (Pham et al., 2009) tùy thuộc vào điều kiện tổng hợp và lưu mẫu. Kết quả tương tự được trình bày trong công trình tổng hợp vật liệu nano NdFeO_3 của Nguyen và cộng sự (Nguyen et al., 2020). Sự mất khối lượng có thể được chia thành hai giai đoạn chính. Giai đoạn 1 xảy ra từ nhiệt độ phòng đến khoảng 200°C với khối lượng giảm 19,82% được gán cho quá trình mất nước ẩm và mất nước một phần trong kết tủa của Ho (III) và Fe (III). Ở giai đoạn này, trên đường DSC quan sát được một pic toả nhiệt lớn ở $115,97^{\circ}\text{C}$. Giai đoạn tiếp theo xảy ra từ 200°C đến 600°C với độ giảm khối lượng 15,18% ứng với sự thu nhiệt để nhiệt phân hoàn toàn kết tủa $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ và $\text{HoO(OH)} \cdot y\text{H}_2\text{O}$ tạo thành các oxit Fe_2O_3 và

Ho₂O₃. Kết luận này được kiểm chứng qua pic thu nhiệt trên đường DSC ở 307,91°C. Từ 600°C trở đi không quan sát thấy sự giảm khối lượng trên đường TG, chứng tỏ các oxit đã ổn định nhiệt. Trên đường DSC quan sát được pic toả nhiệt lớn bắt đầu từ khoảng 700°C và kết thúc khoảng 800°C, chứng tỏ trong khoảng nhiệt độ này xảy ra quá trình tạo pha orthoferrite HoFeO₃ từ các oxit Fe₂O₃ và Ho₂O₃ theo phương trình hoá học (5).



Từ kết quả phân tích tính chất nhiệt của mẫu tiền chất (giản đồ TG-DSC), chọn nhiệt độ nung sơ bộ mẫu bột tiền chất ở 600°C trong 30 phút, sau đó nâng lên 700, 800 và 900°C trong 1 giờ để nghiên cứu bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD).



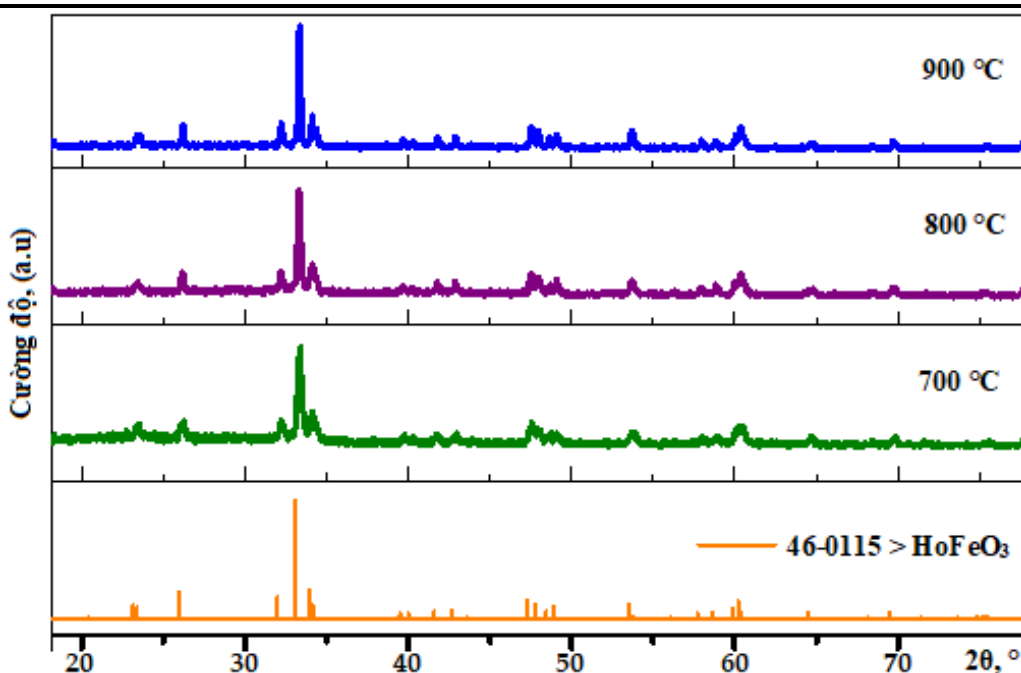
Hình 1. Giản đồ TG-DSC của mẫu tiền chất tổng hợp vật liệu nano orthoferrite HoFeO₃

Giản đồ XRD của các mẫu tiền chất sau khi nung 700, 800 và 900°C trong 1 giờ được trình bày ở Hình 2. Kết quả cho thấy cả ba mẫu đều thu được đơn orthoferrite HoFeO₃ với cấu trúc orthorhombic thuộc nhóm không gian Pbnm (62). Các pic thu được đều trùng với các pic của chất chuẩn HoFeO₃ (Số thẻ chuẩn 46-0115). Khi nhiệt độ nung tăng từ 700°C đến 900°C thì cường độ kết tinh (I) của vật liệu HoFeO₃ tăng 294,37 (a.u) đến 552,60 (a.u) và thể tích ô mạng tinh thể (V) cũng tăng từ 220,88 đến 223,01 Å³ (Bảng 1). Tuy nhiên, kích thước pha tinh thể HoFeO₃ tính theo công thức (1) lại biến đổi không tuyến tính, bé nhất đối với mẫu nung ở 800°C (D_{XRD} = 35,63 nm) và lớn nhất đối với mẫu nung ở 900°C (Bảng 1). Từ kết quả tính kích thước tinh thể, chọn mẫu nung ở 800°C để quan sát hình thái và kích thước hạt bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) và kính hiển vi điện tử truyền qua (TEM), đồng thời xác định thành phần các nguyên tố Ho, Fe và O có trong hợp chất. Kết quả được trình bày ở Hình 3.

Ảnh SEM và TEM cho thấy các hạt HoFeO_3 tổng hợp được có hình thái hạt và kích thước tương đối đồng đều như hình cầu, hình cầu phân cạnh yếu, với đường kính khoảng 30-50 nm. Bên cạnh đó, ảnh SEM và TEM cũng cho thấy các hạt có xu hướng xếp chồng lên nhau, lên kết với nhau tạo thành các cụm hạt nano hoặc liên tinh thể kéo dài. Sự liên kết giữa các hạt tạo thành cụm hoặc xếp chồng lên nhau có thể là do các hạt có từ tính nên hút lẫn nhau, gây khó khăn khi phân tán chúng trong nghiên cứu bằng phương pháp SEM và đặc biệt là phương pháp TEM. Mặc dầu có sự kết tụ, những vẫn có thể quan sát được biên hạt (biên giới hạt được quan sát khá rõ từ ảnh TEM trên Hình 3a).

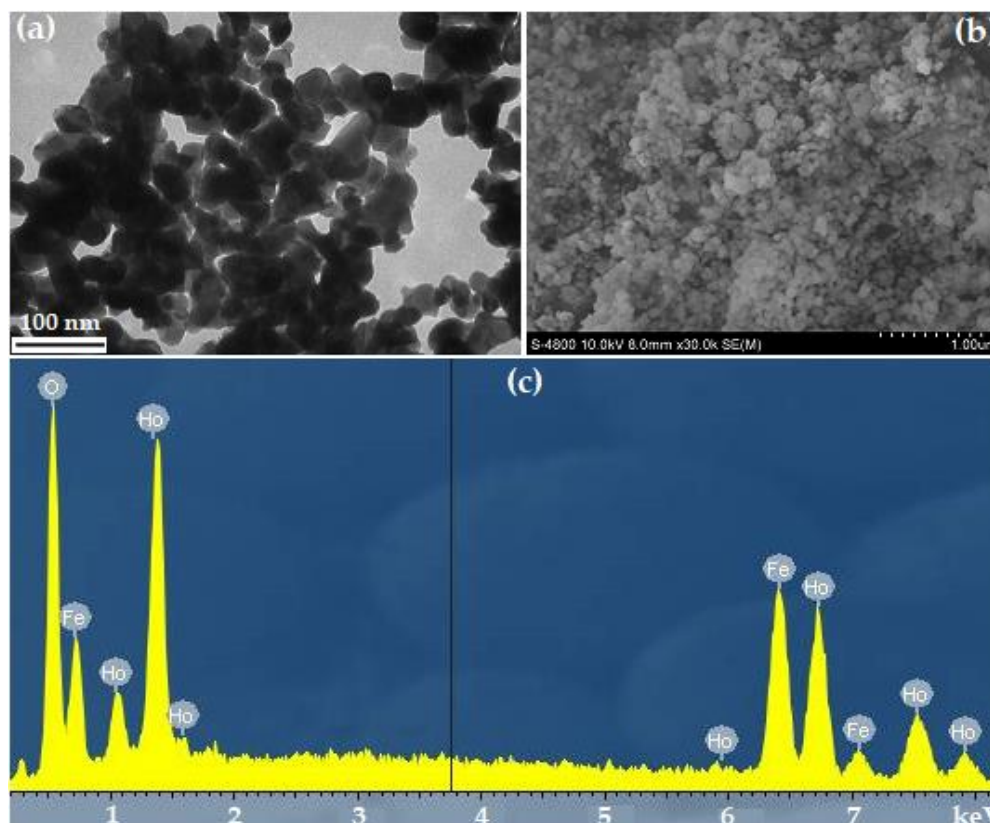
Bảng 1. Các thông số cấu trúc tinh thể của các mẫu HoFeO_3 nung ở 700, 800 và 900°C

HoFeO ₃	I, (a.u.)	FWHM, (°)	D, (nm)	Thông số mạng, (Å)			V, (Å ³)
				a	b	c	
700°C	294,37	0,2057	39,87	5,25	5,58	7,54	220,88
800°C	412,10	0,2244	35,63	5,26	5,58	7,56	221,89
800°C	552,60	0,1122	71,75	5,27	5,59	7,57	223,01



Hình 2. Giảm đồ XRD của vật liệu nano HoFeO_3 nung ở 700, 800 và 900 °C

Kết quả phân tích thành phần các nguyên tố Ho, Fe và O trong mẫu nung ở 800°C bằng phổ EDX cho thấy không xuất hiện pic của nguyên tố tạp chất nào (Hình 3c). Phần trăm khối lượng của các nguyên tố Ho, Fe và O trong mẫu thực nghiệm gần với công thức lí thuyết dự kiến ban đầu (Bảng 2). Công thức thực nghiệm của mẫu vật liệu thu được là $\text{HoFe}_{1,02}\text{O}_{3,67}$. Sự sai lệch chủ yếu quan sát thấy đối với nguyên tố oxygen. Điều này có thể là do phương pháp EDX tỏ ra không chính xác đối với nguyên tố có số hiệu $Z < 10$ ($O = 8$) (Mark et al., 2017). Ngoài ra, sự hấp phụ oxygen có trong không khí lên trên bề mặt của mẫu vật liệu nano HoFeO_3 cũng là nguyên nhân gây ra sự sai lệch nói trên (Fergus, 2007).

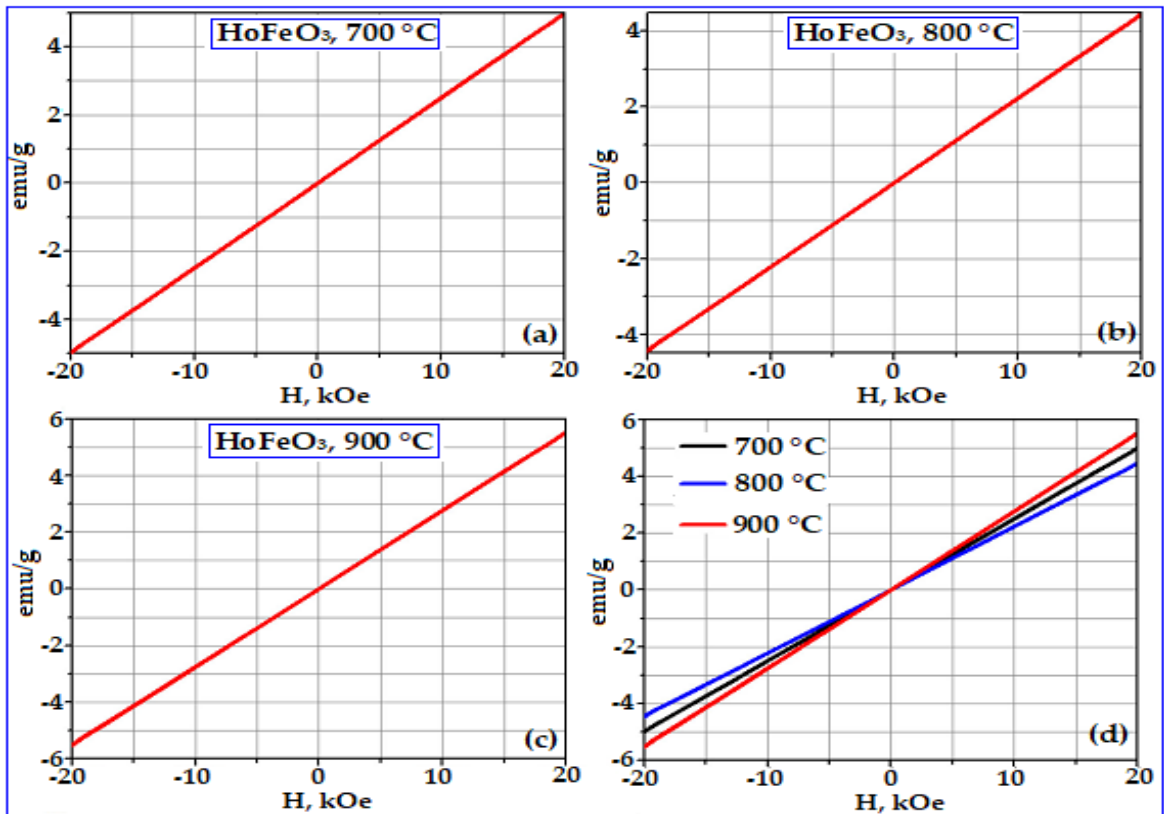


Hình 3. Ảnh TEM (a), SEM (b) và EDX (c) của mẫu vật liệu nano HoFeO_3 nung ở 800°C

Bảng 2. Thành phần các nguyên tố Ho, Fe và O trong mẫu HoFeO_3 nung ở 800°C

Nguyên tố	Phần trăm khối lượng, %	
	Lí thuyết	Thực nghiệm
Ho	61,36	58,87
Fe	20,78	20,15
O	17,86	20,98

Đo đường cong từ hoá ở nhiệt độ phòng (300 K) của các mẫu vật liệu nano HoFeO_3 nung ở 700, 800 và 900°C cho thấy độ từ hoá của cả ba mẫu tiếp tục tăng trong từ trường khảo sát (đường cong từ hoá tiếp tục đi lên thẳng đứng), trong khi giá trị lực kháng từ đo được là rất bé ($H_c < 10 \text{ Oe}$), độ từ dư M_r gần như bằng không, còn độ từ hoá ($M_s \sim 5 \text{ emu}\cdot\text{g}^{-1}$) lại rất lớn (Hình 4, Bảng 3). Giá trị lực kháng từ ($H_c = 2,68 \text{ Oe}$) và độ từ dư ($M_r = 0,61 \cdot 10^{-3} \text{ emu}\cdot\text{g}^{-1}$) của mẫu nung ở 800°C là bé nhất (Bảng 3), có thể là do kích thước tinh thể HoFeO_3 của mẫu này là bé nhất ($D_{\text{XRD}} = 35,63 \text{ nm}$, xem Bảng 1). Ngoài ra, giá trị lực kháng từ và độ từ dư của các mẫu vật liệu nano HoFeO_3 tổng hợp được trong công trình này bé hơn, nhưng độ từ hoá lại lớn hơn rất nhiều so với một số hệ perovskite đất hiếm LnFeO_3 ($\text{Ln} = \text{Pr, Ho, La, Nd}$) đã công bố trước đó (Bảng 3). Các đặc trưng từ tính tốt của vật liệu nano HoFeO_3 tổng hợp được trong công trình này có thể là do kích thước hạt nhỏ và sự kết tụ ít hơn so với các hạt nano LnFeO_3 đã công bố.



Hình 4. Đường cong từ hoá của các mẫu vật liệu nano HoFeO_3 ở 300 K

Bảng 3. Đặc trưng từ tính ở 300 K của vật liệu nano HoFeO_3 nung ở 700, 800 và 900°C

Vật liệu	$M_r, \text{emu}\cdot\text{g}^{-1}$	H_c, Oe	$M_s, \text{emu}\cdot\text{g}^{-1}$
HoFeO_3 nung ở 700°C	$1,38\cdot 10^{-3}$	5,41	4,98
HoFeO_3 nung ở 800°C	$0,61\cdot 10^{-3}$	2,68	4,43
HoFeO_3 nung ở 900°C	$1,30\cdot 10^{-3}$	4,53	4,87
LaFeO_3 (Sasikala et al., 2017)	0,0015	1217,60	0,0051
NdFeO_3 (Nguyen et al., 2020)	0,68	136,76	0,7970
HoFeO_3 (Habib et al., 2016)	-	2659	-
PrFeO_3 (Nguyen et al., 2020)	$\sim 0,0004$	10-42	0,15-0,19

4. Kết luận

Trong công trình này, đã tổng hợp thành công vật liệu nano orthoferrite HoFeO_3 bằng phương pháp kết tủa hoá học đơn giản với tác nhân kết tủa là dung dịch NaOH 5%. Các tinh thể nano đơn pha orthorhombic HoFeO_3 (kích thước trung bình $D_{\text{XRD}} = 35,63\text{-}71,75 \text{ nm}$; thể tích ô mạng $V = 220,88\text{-}223,01 \text{ \AA}^3$) thu được sau khi nung các mẫu tiền chất ở 700, 800 và 900°C trong 1 giờ. Ảnh SEM, TEM của mẫu nung ở 800°C cho thấy các hạt HoFeO_3 tạo thành có hình thái và kích thước hạt tương đối đồng nhất (kích thước hạt 30-50 nm). Các mẫu vật liệu nano orthoferrite HoFeO_3 tổng hợp được là vật liệu nghịch từ thể hiện hành vi siêu thuận từ (lực kháng từ và độ từ dư bé, độ từ hoá lớn và chưa đạt bão hoà tại từ trường 20 kOe), thể hiện tiềm năng ứng dụng làm vật liệu từ hoạt động ở từ trường cao.

- ❖ **Tuyên bố về quyền lợi:** Các tác giả xác nhận hoàn toàn không có xung đột về quyền lợi.
- ❖ **Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài khoa học và công nghệ cấp Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, mã số: CS.2020.19.21.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Fergus, J. W. (2007). Perovskite oxides for semiconductor-based gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.10.051>
- Habib, Z., Majid, K., Ikram, M., & Sultan, Kh. (2016). Influence of Ni substitution at B-site for Fe^{3+} ions on morphological, optical, and magnetic properties of $HoFeO_3$ ceramics. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0082-z>
- Kondrashkova, I. S., Martinson, K. D., Zakharova, N. V., & Popkov, V. I. (2018). Synthesis of nanocrystalline $HoFeO_3$ photocatalyst via heat treatment of products of glycine-nitrate combustion. *Russian Journal of General Chemistry*. <https://doi.org/10.1134/S1070363218120022>
- Mark, T. W., & Niel, A. Y. (2017). *Characterization methods in inorganic chemistry*. Oxford University Press.
- Nada, F. A., Ahmed, G., & Ekram, H. E.-A. (2016). *Perovskite nanomaterials: synthesis, characterization, properties and applications. 1st ed.*, Likun, P., Guang, Z. InTechOpen: London, UK. Chapter 4.
- Nguyen, A. T., Nguyen, N. T., Mittova, I. Ya., Perov, N. S., Mittova, V. O., Hoang, T. C. C., Nguyen, V. M., Nguyen, V. H., Pham, V., & Bui, X. V. (2020). Crystals structure, optical and magnetic properties of $PrFeO_3$ nanoparticles prepared by modified co-precipitation method. *Processing and Application of Ceramics*. <https://doi.org/10.2298/PAC2004255N>
- Nguyen, A. T., Pham, V., Pham, L. Th., Nguyen, T. T. L., Mittova, I. Ya., Mittova, V. O., Vo, N. L., Nguyen, T. B. T., Bui, X. V., & Viryutina, E. L. (2020). Simple synthesis of $NdFeO_3$ nanoparticles by the co-precipitation method based on a study of thermal behaviors of Fe (III) and Nd (III) hydroxides. *Crystals*. <https://doi.org/10.3390/cryst10030219>
- Pham, D. R., & Nguyen, T. N. (2009). *Chemistry of rare elements and radiochemistry*. Publisher of University of Education. Ha Noi, Viet Nam.
- Rempel, A. A. (2007). Nanotechnologies. Properties and applications of nanostructured materials. *Russian Chemical Reviews*. <http://dx.doi.org/10.1070/RC2007v076n05ABEH003674>
- Sasikala, C., Durairaj, N., Baskaran, I., Sathyaseelan, B., Henini, M., & Manikandan, E. (2017). Transition metal titanium (Ti) doped $LaFeO_3$ nanoparticles for enhanced optical structure and magnetic properties. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.133>

**THERMAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF HoFeO₃ NANOPARTICLES
PREPARED BY CHEMICAL CO-PRECIPIATION METHOD***Nguyen Anh Tien^{*}, Truong Thi Thuan, Do Hoang Phuc**Ho Chi Minh City University of Education, Vietnam**^{*}Corresponding author: Nguyen Anh Tien – Email: tienna@hcmue.edu.vn**Received: June 05, 2021; Revised: June 17, 2021; Accepted: June 21, 2021***ABSTRACT**

In this paper, HoFeO₃ orthoferrite nanoparticles with perovskite-type were successfully synthesized through a simple chemical co-precipitation method by using sodium solution 5% as a precipitating agent. After annealing the precursor at 700, 800, and 900°C for 60 minutes, a single phase HoFeO₃ orthoferrite product was formed with an average crystallite size of 35-70 nm and the particle size of 30-50 nm. The average crystal size and lattice volume of nanocrystalline HoFeO₃ increased in line with the annealing temperature. The HoFeO₃ samples showed antiferromagnetic properties with super-paramagnetic behaviour. The obtained properties are expressed as low values of coercive force ($H_c < 10$ Oe) and remanent magnetization ($M_r \sim 0$ emu·g⁻¹), high magnetization ($M_s \sim 5$ emu·g⁻¹). The magnetic parameters of the HoFeO₃ nanomaterials such as the coercive force and remanent magnetization are lower, but the saturation magnetization is higher compared to the published rare-earth perovskite orthoferrite nanomaterials LaFeO₃, NdFeO₃, PrFeO₃.

Keywords: chemical co-precipitation method; HoFeO₃; nanomaterials; thermal and magnetic properties