

HIỆU ỨNG CỨNG HÓA CỦA GÓM ÁP ĐIỆN KHÔNG CHÌ BaTiO₃

ĐỒNG PHA TẠP CẶP ION Li⁺-Al³⁺

Đỗ Viết Ôn, Lê Ngọc Minh, Võ Thanh Tùng, Trương Văn Chương

Khoa Vật lý-Trường Đại học Khoa học-Đại học Huế,

77 Nguyễn Huệ, Thành phố Huế, Việt Nam

*Email: dovietonphysic@gmail.com

TÓM TẮT

Hệ gốm không chì Ba_(1-2x)Li_xAl_xTiO₃ với x = (0 - 2 %mol) được chế tạo bằng phương pháp pha rắn từ bột tổng hợp thủy nhiệt kết tại nhiệt độ 1200°C. Kết quả nghiên cứu cho thấy nồng độ cặp tạp (Li⁺-Al³⁺) ảnh hưởng mạnh đến tính chất điện môi và áp điện của hệ gốm. Hệ gốm BaTiO₃ có cấu trúc perovskite khi đồng pha tạp (Li-Al) thể hiện tính chất nhiệt ổn định, hằng số áp điện tương đối lớn d₃₃ ~ 280 pC/N và hệ số phẩm chất Q_m ~850. Kết quả cho thấy các ion Li⁺ và Al³⁺ có xu hướng chiếm vị trí A trong mạng và là lưỡng cực sai hỏng (cặp ion) tạo ra hiệu ứng ghim các đô men sắt điện và cứng hóa gốm mềm BaTiO₃.

Từ khóa: BaTiO₃, Gốm áp điện không chì, Tính chất áp điện/sắt điện.

1. MỞ ĐẦU

Đối với các ứng dụng công suất cao như động cơ siêu âm, máy biến thế áp điện và máy siêu âm công suất cao, yêu cầu có độ tỏa nhiệt thấp và công suất phát cực đại. Gốm áp điện cứng với tổn hao cơ học thấp (hệ số phẩm chất cơ Q_m cao) và tổn hao điện thấp là ứng viên tiềm năng cho các ứng dụng công suất cao. Tổn hao cơ học và điện môi thấp trong vật liệu áp điện tránh sự tỏa nhiệt quá mức và tăng hiệu suất của thiết bị tại tần số cộng hưởng và phản cộng hưởng [1]. Các gốm áp điện PZT cứng bao gồm PZT4 và PZT8 được sử dụng rộng rãi cho các ứng dụng công suất cao. Tuy nhiên, do độc tính của chì trong gốm PZT, cần thiết phải phát triển gốm áp điện không chì với hiệu suất tương đương để thay thế vật liệu trên nền chì [2]. Trong các hệ không chì, gốm trên nền K_{0,5}Na_{0,5}NbO₃ (KNN) và Bi_{0,5}Na_{0,5}TiO₃ (BNT) đã được nghiên cứu cho gốm áp điện cứng [3-4]. Các nghiên cứu chỉ ra rằng hệ số phẩm chất cơ học Q_m được nâng cao bằng pha tạp acceptor trong hệ không chì. Trong gốm trên nền KNN với pha trực thoi giá trị Q_m cao tới 1000-2000 đạt được khi thêm CuO [5], K₄CuNb₈O₂₃ [6], hoặc K_{5,4}Cu_{1,3}Ta₁₀O₂₉ [7]. Mặt khác, hệ số phẩm chất Q_m cao khoảng 500-1000 đạt được khi pha tạp acceptor (ion dương Mn, Fe, hoặc Co) [8] vào hệ gốm trên nền BNT với pha mặt thoi. Bên cạnh Q_m cao, gốm áp điện cứng trên nền KNN và BNT đều có hệ số áp điện d₃₃ và hằng số điện môi ε_r thấp với d₃₃ <100 pC/N và ε_r <400.

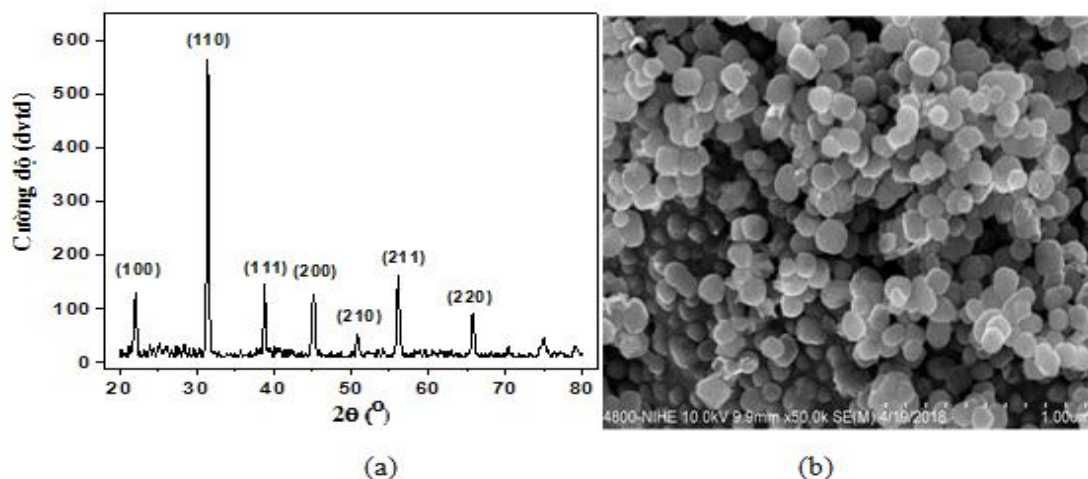
Trong những năm gần đây, gốm không chì trên nền BT được xem xét và nghiên cứu cho các ứng dụng áp điện. Giá trị d_{33} khoảng 338-519 pC/N được báo cáo cho gốm BT tinh khiết tổng hợp bằng công nghệ truyền thống, vi sóng và phương pháp nung hai bước, các nghiên cứu chỉ ra tính chất áp điện có thể nâng cao bằng cách điều khiển kích thước hạt [9, 10]. Đối với BT phản ứng pha rắn, một số nguyên tố (ví dụ Ca, Zr, Sn, và Hf) được sử dụng để cải thiện tính chất áp điện bằng cách điều khiển tại các thành phần biên pha khác nhau [1]. Hệ số áp điện d_{33} cao tới 530 pC/N và 625 pC/N có được trong $0,5\text{Ba}(\text{Zr}_{0,2}\text{Ti}_{0,8})\text{O}_3-0,5(\text{Ba}_{0,3}\text{Ca}_{0,7})\text{TiO}_3$ và $0,7\text{Ba}(\text{Sn}_{0,12}\text{Ti}_{0,88})\text{O}_3-0,3(\text{Ba}_{0,3}\text{Ca}_{0,7})\text{TiO}_3$. Tuy nhiên, trong trường hợp này, giá trị d_{33} lớn là do chuyển tiếp tại pha đa hình và điều này biểu hiện hiệu ứng nhiệt độ và điện giao [11].

Gần đây, Yao và cộng sự đã trình bày trên hệ gốm BaTiO_3 được pha tạp bởi $\text{Na}^+/\text{Er}^{3+}$ cùng thay thế tại vị trí A có đặc tính áp điện tuyệt vời (hệ số áp điện, hệ số liên kết điện cơ và hệ số phẩm chất cơ học) [12]. Với sự gia tăng nồng độ Na^+ và Er^{3+} , thông số mạng và thể tích ô cơ sở sẽ bị giảm do bán kính nhỏ hơn của Na^+ và Er^{3+} . Nghiên cứu gần đây của Yu Feng và cộng sự đã chỉ ra rằng sự thay thế của Ba^{2+} bởi các ion Li^+ và Al^{3+} nhỏ hơn tại các vị trí A cũng có thể cải thiện các tính chất áp điện của gốm trên nền BaTiO_3 [13,14]. Mối quan hệ áp điện cao hơn ($d_{33} = 378$ pC/N) được tìm thấy trong gốm BaTiO_3 được pha tạp bởi LiAlSiO_4 . Các tác giả cho rằng thay thế Li^+ , Al^{3+} và Si^{4+} tại vị trí A, A và B tương ứng [14]. Với sự gia tăng nồng độ LiAlSiO_4 , thông số mạng (c) và tỉ lệ tứ giác giảm đáng kể, phù hợp với kết quả được đưa ra trong hệ BaTiO_3 (NaEr) [12]. Để nghiên cứu ảnh hưởng thay thế vị trí A của (Li^+ và Al^{3+}) thay vì thay thế vị trí B (Si^{4+}) đến các tính chất áp điện của BaTiO_3 , gốm $\text{Ba}_{1-2x}\text{Li}_x\text{Al}_x\text{TiO}_3$ (viết tắt BLAT) được chế tạo thông qua phản ứng trạng thái rắn thông thường và các tính chất áp điện đã được nghiên cứu. Cả hai giá trị d_{33} cao (>300 pC/N) và Q_m lớn (>2000) thu được trong gốm $\text{Ba}_{0,98}\text{Li}_{0,01}\text{Al}_{0,01}\text{TiO}_3$. Điều này chứng minh rằng hệ gốm BLAT là một ứng cử viên tiềm năng cho vật liệu áp điện không chì trong các ứng dụng công suất cao [14]. Bên cạnh đó, các tính chất sắt điện và áp điện của gốm PZT(52/48) pha tạp Li^+ và Al^{3+} đã được nghiên cứu. Pha tạp cũng có thể nâng cao tính chất áp điện của gốm PZT(52/48) [15]. Ảnh hưởng thay thế vị trí A của (Li^+ và Al^{3+}) đến hiệu suất nâng cao áp điện của BaTiO_3 và PZT(52/48) được xác nhận là đáng kể.[16]

Trong nghiên cứu này, hệ gốm không chì BaTiO_3 được cứng hóa bằng kỹ thuật pha tạp (Al-Li) vào vị trí A của cấu trúc mạng nền BaTiO_3 nano. Một cách tiếp cận nhằm mục đích nâng cao nhiệt độ ổn định của hiệu suất áp điện trong gốm được đề xuất bằng cách sử dụng các hiệu ứng ghim các lưỡng cực sai hỏng. Đáng chú ý nhất, hệ số áp điện cao $d_{33} = 250$ pC/N và $Q_m = 850$ thu được trong gốm $\text{Ba}_{0,98}\text{Li}_{0,01}\text{Al}_{0,01}\text{TiO}_3$ có thể thay thế các hệ PZT cứng và được sử dụng trong các ứng dụng công suất cao.

2. THỰC NGHIỆM

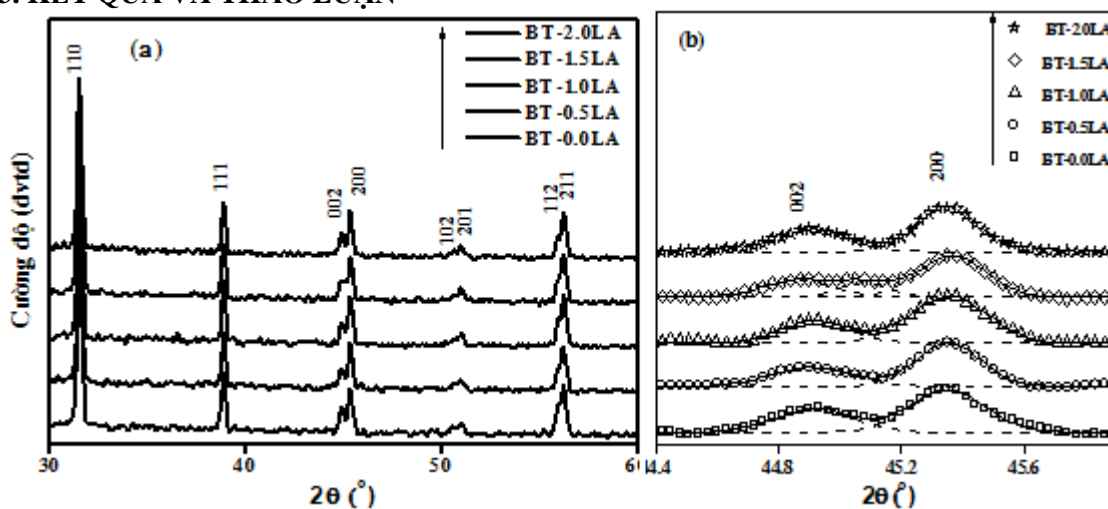
Bột BaTiO_3 nano có kích thước hạt khoảng 110 nm được chế tạo bằng phương pháp thủy nhiệt làm nguyên liệu đầu. Vi cấu trúc, hình thái và kích thước hạt của vật liệu đầu như mô tả ở hình 1.

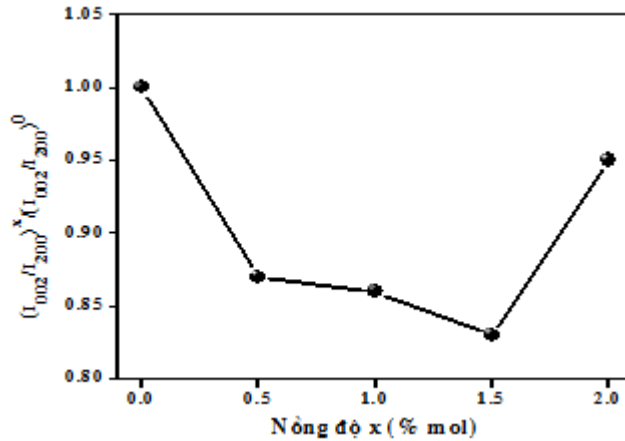


Hình 1. a) Phổ nhiễu xạ tia X và b) ảnh SEM của bột BaTiO₃ thủy nhiệt.

Bột BaTiO₃ nano sau đó được nghiền 12 giờ với các tỷ lệ % mol của cặp tạp (Al-Li) theo công thức Ba_{1-2x}Li_xAl_xTiO₃ được viết tắt BT-xLA với x = (0 đến 2 % mol). Bột sau khi nghiền được sấy khô ở nhiệt độ 100°C trong 6 giờ và được ép thành hình đĩa có đường kính 12 mm và dày 1,5 mm tại áp lực 100 MPa. Mẫu sau khi ép được thiêu kết ở 1200°C trong 2 giờ. Các điện cực bạc đã được phủ lên bề mặt trên và dưới của các mẫu thiêu kết và nung ở 500°C trong 30 phút. Phân cực được thực hiện dưới một điện trường 3 kV/mm trong dầu cao áp ở nhiệt độ 100°C trong 30 phút. Cấu trúc tinh thể của các mẫu đã phân cực được xác định bằng cách sử dụng nhiễu xạ tia X (D8-Advanced, BRUKER AXS). Tỷ trọng của các mẫu gốm được xác định bằng phương pháp Archimedes. Hằng số áp điện d₃₃ được đo sử dụng thiết bị kiểm tra áp (ZJ-4AN, Viện Âm học Trung Quốc). Tính chất điện môi thu được từ phép đo điện dung và góc pha theo nhiệt độ (HIOKI 3532). Hệ số liên kết điện cơ (k_p, k_t) và áp điện (d₃₃, d₃₁) được xác định sử dụng phương pháp cộng hưởng (HIOKI 3532) và tính toán theo chuẩn IEEE.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

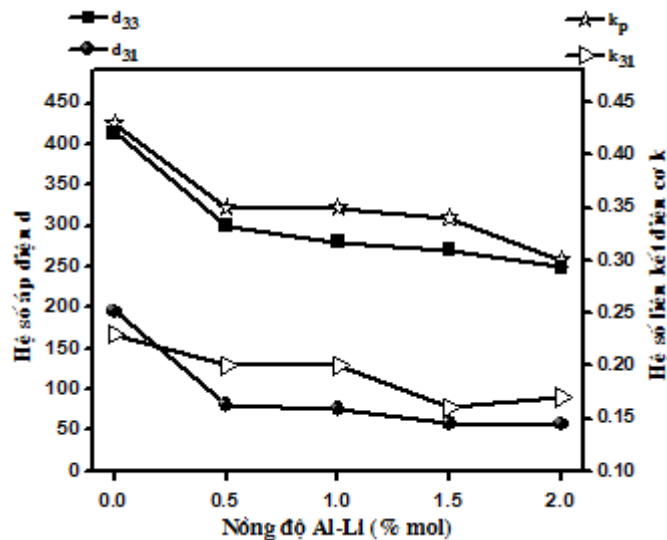




Hình 2. (a) Phổ XRD của gốm BaTiO₃ theo nồng độ (Li-Al), (b) XRD của gốm BaTiO₃ theo góc 2θ từ 44,4 ÷ 44,8 độ, (c) tỷ lệ cường độ đỉnh $(I_{002} / I_{200})^x / (I_{002}/I_{200})^0$

Hình 1 cho thấy phổ nhiễu xạ XRD và ảnh SEM của bột BaTiO₃ được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt. Kết quả vi cấu trúc bột ban đầu có cấu trúc perovskite đơn pha, tồn tại pha lập phương và có độ tinh khiết cao. Hình 1b cho thấy cấu trúc của bột BaTiO₃ với hình thái hạt đồng đều và có kích thước khoảng 110 nm theo tính toán từ phần mềm Lince.

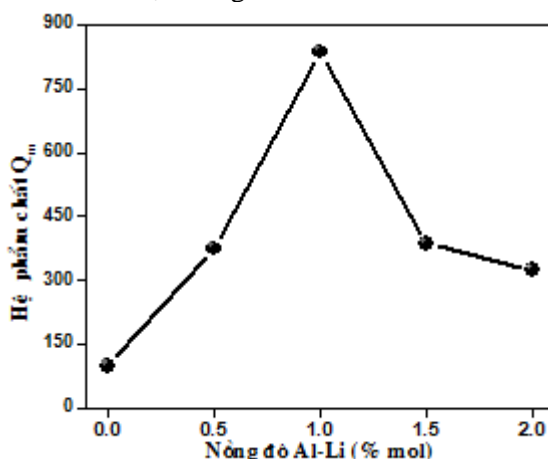
Hình 2(a) cho thấy phổ XRD của hệ gốm Ba_{1-2x}Li_xAl_xTiO₃ với x = 0 - 2 % mol thiêu kết ở 1200°C. Kết quả cho thấy tất cả các mẫu đều đơn pha, tồn tại cấu trúc perovskite với pha đối xứng tứ giác. Cấu trúc cho thấy sự tách đỉnh ở góc 2θ ≈ 45° ở các nồng độ (Li-Al) khác nhau. Sự tách đỉnh ở 2θ ≈ 45° là sự dịch chuyển pha từ lập phương sang tứ giác, cường độ đỉnh (002) giảm khi nồng độ tăng từ 0 % mol đến 1,5 % mol và sau đó tăng khi nồng độ tăng đến 2 % mol. Đồng thời, các mẫu gốm nồng độ 1,0 % mol và 1,5 % mol đỉnh (002) mở rộng ra và có xu hướng dịch chuyển về phía góc bé.



Hình 3. Hệ số liên kết điện cơ k_p, k₃₁ và hệ số áp điện d₃₃, d₃₁ của hệ gốm BLAT.

Các dịch chuyển về phía trái của đỉnh (002) được quan sát thấy trong hình 2 (b), bởi vì bán kính ion nhỏ của Li^+ và Al^{3+} vào các vị trí A ($R[\text{Li}^+] = 0,060 \text{ nm}$ và $R[\text{Al}^{3+}] = 0,050 \text{ nm}$) so với Ba^{2+} ($R[\text{Ba}] = 0,134 \text{ nm}$) làm giảm nhẹ các thông số mạng trong mạng tinh thể, trong đó một lần nữa khẳng định rằng Li^+ và Al^{3+} có vào trong chất nền BaTiO_3 . Điều đáng chú ý rằng, phương thức pha tạp ảnh hưởng đến hình dạng của đỉnh (002) cao hơn (200) như thể hiện trong hình 2(b). Một sự thay đổi rõ ràng trong các tỷ lệ cường độ tương đối của các đỉnh 002/200 (I_{002}/I_{200}) được quan sát thấy trong hình 2(b) cho dạng bột gốm BLAT sau khi đưa vào của Li^+ và Al^{3+} . Các giá trị $(I_{002}/I_{200})^x / (I_{002}/I_{200})^0$ (x là nồng độ tạp chất và 0 kí hiệu bột BT tinh khiết) có xu hướng ban đầu giảm và sau đó tăng với hàm lượng pha tạp, như thể hiện trong hình 2(c).

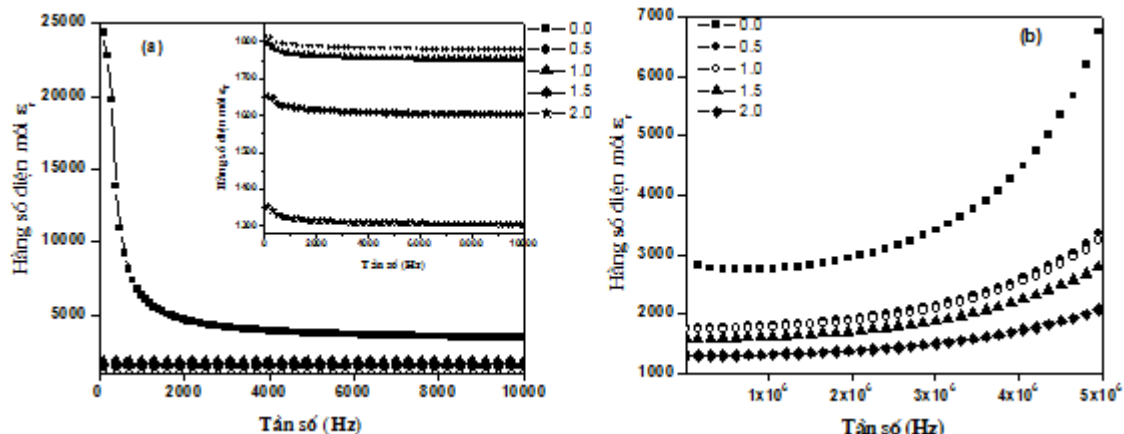
Hình 3 trình bày các giá trị hệ số liên kết điện cơ k_p , k_{31} và hằng số áp điện d_{33} , d_{31} của cả hệ gốm BaTiO_3 pha tạp ($\text{Li}^+ - \text{Al}^{3+}$). Đối với gốm BaTiO_3 tinh khiết $d_{33} = 414 \text{ pC/N}$ và sau đó d_{33} giảm khi nồng độ pha tạp tăng và cuối cùng tại $x = 2 \text{ \% mol}$ (Li-Al) hệ số áp điện khoảng 250 pC/N . Các hệ số k_{31} và d_{31} giảm nhẹ khi tăng nồng độ pha tạp. Nguyên nhân giảm tính chất áp điện của gốm BLAT gây ra bởi sự hiệu ứng ghim chặt của lưỡng cực cặp ion ($\text{Li}^+ - \text{Al}^{3+}$). Vì vậy, hiệu ứng cứng hóa được quan sát thấy trong hệ gốm BLAT như hình 4. Hệ số phẩm chất Q_m tăng dần khi nồng độ pha tạp tăng và đạt cực đại tại $x = 1\% \text{ mol}$ (Li-Al) khoảng 850, tiếp tục tăng nồng độ tạp Q_m giảm như thể hiện trong hình 4.



Hình 4. Hệ số phẩm chất Q_m hệ gốm BLAT theo nồng độ khác nhau.

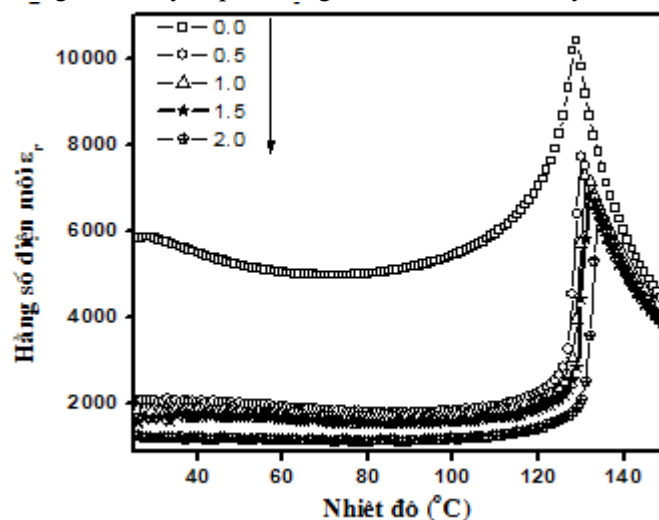
Sự phụ thuộc của hằng số điện môi vào tần số đo ở nhiệt độ phòng được thể hiện trong hình 5. Đối với gốm BaTiO_3 hằng số điện môi lớn thu được ở tần số thấp khoảng 24429 và sau đó giảm nhanh ở khoảng tần số từ 200 Hz đến 1000 Hz xuống khoảng 6500 thể hiện ở hình 5(a). Sau đó, hằng số điện môi giảm nhẹ đến khoảng tần số cao khoảng 1 MHz, cuối cùng hằng số điện môi tăng khi tần số tăng đến 5 MHz như thể hiện trong hình 5(b). Đối với gốm BLAT, hằng số hằng số điện môi ở tần số thấp khoảng 1800 đến 1300 khi nồng độ pha tạp tăng từ 0,5 đến 2,0 % mol (Al-Li) và sau đó hằng số điện môi giảm nhẹ khi tần số tăng đến 10 kHz ở tất cả nồng độ tạp thể hiện ở hình mở rộng góc phải hình 5(a). Tần số tăng đến tần số cao hơn hằng số

điện môi tăng lên với các giá trị 6774, 3392, 3225, 2847, 2090 tương ứng nồng độ từ 0,5 đến 2 % mol (Li-Al) như hình 5(b). Từ hình 5, hằng số điện môi của gốm BLAT khá ổn định từ tần số thấp đến tần số khoảng 1 MHz do hiệu ứng của cặp ion Li^+ và Al^{3+} .



Hình 5. Ảnh SEM của hệ gốm BaTiO₃ nung tại các nhiệt độ khác nhau.

Sự phụ thuộc nhiệt độ của hằng số điện môi được đo ở 10 kHz được thể hiện trong hình 6. Đối với gốm BaTiO₃, một đỉnh điện môi được quan sát ở khoảng 129°C đặc trưng cho quá trình chuyển pha từ phản sắt điện lập phương đến sắt điện tứ giác. Từ hình 6, hằng số điện môi tối đa (ϵ_m) của gốm BLAT giảm khi Li^+ và Al^{3+} tăng lên. Hơn nữa, nhiệt độ Curie tăng lên và đạt giá trị cực đại trong khoảng 130° đến 136° ở các nồng độ $x = 0,5 \div 2,0$ % mol. Ngoài ra, sự biến đổi hằng số điện môi và hình dạng đỉnh xung quanh T_C đã thay khi đưa Li^+ và Al^{3+} vào BT, cho thấy rằng trạng thái chuyển pha của gốm BT có thể đã thay đổi.



Hình 6. Hằng số điện môi phụ thuộc nhiệt độ đo ở 10 kHz của hệ gốm BLAT.

Như vậy, Q_m và T_C tăng lên cho thấy vai trò quan trọng của lưỡng cực khiếm khuyết trong quá trình "cứng hóa" của gốm BLAT, các lưỡng cực sai hỏng được hình thành bởi cặp tạp acceptor-donor, dẫn đến hiệu ứng "cứng hóa" áp điện bằng cách ổn định và gắn chặt chuyển

động của vách đô men. Hiệu ứng rõ ràng của bột nano BaTiO₃ góp phần giảm nhiệt độ thiêu kết của hệ gồm từ 1350°C đối với bột thô kích thước hạt khoảng vài μm xuống 1200°C và thu được tính chất áp điện khá lớn. Mặc dù có sự suy giảm của áp điện nhưng sự gia nhiệt độ ổn định và Q_m lớn (850) và d₃₃ = 250 pC/N của thành phần x=1 % mol (Li-Al) có thể đáp ứng vào ứng dụng thực tiễn.

4. KẾT LUẬN

Hằng số áp điện cao cùng với hệ số phẩm chất cơ lớn có thể đạt khi đồng pha tạp donor (ion Al³⁺) và acceptor (ion Li⁺) vào cấu trúc BaTiO₃, tạo thành hợp thức hóa học là Ba_{1-2x}Li_xAl_xTiO₃. Kết quả XRD chứng minh sự phân bố thích hợp hơn của cặp ion thay thế vào vị trí A trong mạng tinh thể. Kết quả quan trọng nhất của việc thay thế cặp ion là hệ số áp điện cao và tính ổn định nhiệt kết hợp hiệu ứng cứng hóa có hệ số phẩm chất cao Q_m = 850. Do đó, nghiên cứu của chúng tôi cung cấp một con đường mới để thu được tính ổn định nhiệt độ, tính chất áp điện cao trong vật liệu sắt điện ABO₃ bằng kỹ thuật sai hỏng và trình bày phát hiện hấp dẫn có ý nghĩa đối với việc sử dụng gốm không chì BLAT trong các ứng dụng công suất.

LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi xin chân thành cảm ơn Đề tài nghiên cứu Khoa học và phát triển công nghệ Quốc gia “Nghiên cứu phát triển biến tử áp điện dùng để chế tạo các thiết bị siêu âm- thủy âm” Mã số: ĐTĐLCN.10/18, đã tài trợ kinh phí để thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. L. Chen, H. Fan, S. Zhang (2017). Investigation of MnO₂-doped (Ba, Ca)TiO₃ lead-free ceramics for high power piezoelectric applications, *Journal The American Ceramic Society*, pp. 1-9.
- [2]. M. Acosta, N. Novak, V. Rojas, S. Patel, R. Vaish, J. Koruza, G. A. Rossetti, and J. Rödel (2017). BaTiO₃-based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives, *Appl. Phys. Rev.*, Vol. 4, pp. 041305-53.
- [3]. E. Taghaddos, M. Hejazi, A. Safari (2014). Electromechanical properties of acceptor-doped lead-free piezoelectric ceramics, *J Am Ceram Soc*, Vol. 97, pp. 1756-1762.
- [4]. D. Lin, K. W. Kwok, H. L. W. Chan (2008). Piezoelectric properties and hardening behavior of K_{5.4}Cu_{1.3}Ta₁₀O₂₉-doped K_{0.5}Na_{0.5}NbO₃ ceramics, *J Appl Phys*, Vol. 103, pp. 64105-64110.
- [5]. H. J. Lee, S. O. Ural, L. Chen, K. Uchino, S. J. Zhang (2012). High power characteristics of lead-free piezoelectric ceramics. *J Am Ceram Soc*, Vol. 95, pp. 3383-3386.
- [6]. J. B. Lim, S. J. Zhang, J. H. Jeon, T. R. Shrout (2010). (K, Na)NbO₃-based ceramics for piezoelectric “hard” lead-free materials, *J Am Ceram Soc*, Vol. 93, pp. 1218-1220
- [7]. D. Lin, K. W. Kwok, H. L. W. Chan (2008). Piezoelectric properties and hardening behavior of K_{5.4}Cu_{1.3}Ta₁₀O₂₉-doped K_{0.5}Na_{0.5}NbO₃ ceramics. *J Appl Phys*, Vol. 103, pp. 64105-64110.
- [8]. E. Taghaddos, M. Hejazi, A. Safari (2014). Electromechanical properties of acceptor-doped lead-free piezoelectric ceramics, *J Am Ceram Soc*, Vol. 97, pp. 1756-1762.
- [9]. M. Acosta, N. Novak, W. Jo (2014). Relationship between the electromechanical properties and phase diagram in the Ba(Zr_{0.2}Ti_{0.8})O_{3-x}(Ba_{0.7}Ca_{0.3})TiO₃ lead-free piezoceramic, *Acta Mater*, Vol. 80, pp. 48-53.

- [10]. X. Liu, X. Tan (2013). Crystal structure and electrical properties of lead free $(1-x)\text{BaTiO}_3 - x(\text{Bi}_{1/2}\text{A}_{1/2})\text{TiO}_3$ (A = Ag, Li, Na, K, Rb, Cs) ceramics, *J Am Ceram Soc*, Vol. 96, pp. 3425-3429.
- [11]. S. Zhang, R. Xia, H. Hao, H. Liu, T. Shrout (2008). Mitigation of thermal and fatigue behavior in $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$ -based lead free piezoceramics, *Appl Phys Lett*, Vol. 92, pp. 152904-152907.
- [12]. J. Li, X. Chai, D. Peng, H. Zou, X. Wang, and X. Yao (2014). Largely enhanced electromechanical properties of BaTiO_3 - $(\text{Na}_{0.5}\text{Er}_{0.5})\text{TiO}_3$ lead-free piezoelectric ceramics, *Applied Physics Letters*, Vol. 105, pp. 082901-5.
- [13]. D. Xu, W. L. Li, L. D. Wang, W. Wang, W. P. Cao, and W. D. Fei (2014). Large piezoelectric properties induced by doping ionic pairs in BaTiO_3 ceramics, *Acta Mater*, Vol. 79, pp. 84-92.
- [14]. Y. Feng, W. L. Li, D. Xu, Y. L. Qiao, Y. Yu, Y. Zhao, and W. D. Fei (2016). Defect Engineering of Lead-Free Piezoelectrics with High Piezoelectric Properties and Temperature-Stability, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 8, pp. 9231-22.
- [15]. Y. Feng, W. L. Li, D. Xu, W. P. Cao, Y. Yu, and W. D. Fei (2016). Enhanced piezoelectric properties and constricted hysteresis behaviour in PZT ceramics induced by $\text{Li}^+ - \text{Al}^{3+}$ ionic pairs, *RSC Adv*, Vol. 6, pp. 36118-7.
- [16]. Y. Feng, W. L. Li, Y. Yu, H. N. Jia, Y. L. Qiao and W. D. Fei (2017). Enhanced piezoelectricity in ABO_3 ferroelectrics via intrinsic stress-driven flattening of the free-energy profile, *Physical Review Materials*, Vol. 1, pp. 64405.

Họ tên tác giả chính: Đỗ Viết Ổn

Cơ quan công tác: Khoa Vật Lý, Trường Đại học Khoa Học-Đại học Huế

Địa chỉ email: dovietonphysic@gmail.com

Số điện thoại liên hệ: 0366605869.