

# Ảnh hưởng của nhiệt độ ủ lên tính chất nhiệt điện của màng mỏng ZnO pha tạp Ga

Nguyễn Hồng Ngọc, Lê Nguyễn Bảo Thư, Phan Bách Thăng

**Tóm tắt**—Màng ZnO pha tạp Ga (GZO) chế tạo bằng phương pháp phun xạ Dc magnetron, tiếp theo được ủ nhiệt trong không khí tại 400 và 500°C trong 5 giờ. Khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ ủ lên cấu trúc tinh thể và tính chất nhiệt điện của màng mỏng GZO cho thấy quá trình ủ nhiệt đã có tác dụng tích cực lên tính chất nhiệt điện của màng: (1) Hệ số công suất nhiệt điện tăng do độ dẫn điện tăng nhờ độ linh động tăng khi màng GZO được tái kết tinh ở nhiệt độ cao; (2) Hệ số chuyển đổi nhiệt điện ZT của màng được ủ ở 500°C tăng 1 bậc ( $ZT = 0,114$ ) so với màng chưa ủ nhiệt ( $ZT = 0,012$ ). Kết quả khảo sát phổ quang phát quang cho thấy sự cải thiện về tính chất nhiệt điện có liên quan đến sự hình thành các loại khuyết tật trong quá trình phun xạ cũng như quá trình ủ nhiệt, trong đó khuyết tật VO và Zni chiếm ưu thế.

**Từ khoá**—màng mỏng ZnO pha tạp Ga, tính chất nhiệt điện, khuyết tật

## 1 MỞ ĐẦU

Vật liệu nhiệt điện là loại vật liệu có khả năng chuyển đổi nhiệt năng thành điện năng dựa trên hiệu ứng vật lý Seebeck: Sự chênh lệch nhiệt độ được duy trì ở hai đầu của vật liệu sẽ sinh ra một điện thế. Hiệu suất chuyển đổi nhiệt năng thành điện năng được gọi là hệ số phẩm chất nhiệt điện (figure of merit)  $Z$  ( $K^{-1}$ ) được xác định thông qua công thức sau [1-5]

Received: 29-05-2017; Accepted: 10-12-2017; Published: 15-10-2018.

Tác giả: Nguyễn Hồng Ngọc<sup>1,2</sup>, Lê Nguyễn Bảo Thư<sup>3</sup>, Phan Bách Thăng<sup>2,4\*</sup> - <sup>1</sup>Khoa Khoa học và Công nghệ Vật liệu, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM; <sup>2</sup> Phòng thí nghiệm Vật liệu Kỹ thuật cao, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM; <sup>3</sup>Bộ môn Toán Lý, Trường Đại học Công nghệ Thông tin – ĐHQG-HCM; <sup>4</sup>Trung tâm nghiên cứu Vật liệu cấu trúc nano và Phân tử - ĐHQG-HCM.

(Email: pbthang@inomar.edu.vn)

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{\kappa} = \frac{\alpha^2 T}{\rho \kappa} \quad (1)$$

Trong đó,  $S$  là hệ số seebeck (V/K),  $\sigma$  là độ dẫn điện (S/m),  $\kappa$  là độ dẫn nhiệt (W/mK). Vật liệu nhiệt điện có hệ số độ phẩm chất ZT cao cần có hệ số Seebeck  $S$ , độ dẫn điện  $\sigma$  cao nhưng độ dẫn nhiệt  $\kappa$  phải thấp. Tuy nhiên 3 tham số trên không độc lập mà phụ thuộc nhau, đặc biệt là đều phụ thuộc vào nồng độ hạt tải điện  $n$ :  $S$  và  $\sigma$  biến thiên nghịch với nhau theo nồng độ hạt tải nhưng  $\sigma$  và  $\kappa$  lại biến thiên giống nhau theo nồng độ hạt tải. Do sự liên kết chặt chẽ giữa hệ số Seebeck  $S$ , độ dẫn điện  $\sigma$  cao và độ dẫn nhiệt  $\kappa$  mà các nghiên cứu về vật liệu nhiệt điện có hệ số phẩm chất nhiệt điện ZT cao đã không có sự đột phá đáng kể nào trong thời gian dài do cải thiện độ dẫn điện cũng làm gia tăng độ dẫn nhiệt.

Độ dẫn điện và độ dẫn nhiệt trong công thức (1) đều phụ thuộc vào cấu trúc tinh thể của vật liệu. Độ dẫn điện của vật liệu phụ thuộc vào nồng độ hạt tải và độ linh động của hạt tải. Nồng độ hạt tải của vật liệu có thể được điều khiển bằng pha tạp đối với chất bán dẫn. Độ linh động của hạt tải phụ thuộc vào chất lượng của cấu trúc tinh thể và các sai hỏng tồn tại bên trong cấu trúc tinh thể. Các sai hỏng vốn tồn tại bên trong cấu trúc tinh thể sẽ gây ra tán xạ, làm giảm độ linh động của hạt tải, độ dẫn điện của vật liệu giảm. Đồng thời, các tán xạ này cũng làm giảm độ dẫn nhiệt cho vật liệu. Đây chính là lý do khiến việc chế tạo vật liệu nhiệt điện có hệ số phẩm chất ZT cao gặp nhiều khó khăn.

Vật liệu màng mỏng ZnO với dải nhiệt độ hoạt động rộng và cao nên được nghiên cứu nhằm cho ứng dụng nhiệt điện [1-5] Tính chất nhiệt điện của màng mỏng ZnO có thể được điều khiển thông qua quá trình pha tạp và cải thiện cấu trúc tinh thể của mẫu. Yamaguchi đã công bố giá trị ZT của

vật liệu khối AZO:Ni và AZO:Sm tại 1073 K là 0,126 và 0,102 [6] Nhóm tác giả Takemoto thu được ZT của vật liệu khối  $(\text{Ga}_{0,002}, \text{In}_{0,002})\text{Zn}_{0,996}\text{O}$  là 0,19 ở 773 K [7].

Trong các nghiên cứu trước, chúng tôi đã chế tạo màng mỏng ZnO thuần khiết, ZnO pha tạp Ga, ZnO pha tạp đồng thời Ga và In. Các kết quả XRD, EDX và FESEM thể hiện rõ ảnh hưởng của nguyên tố pha tạp Ga, In lên cấu trúc tinh thể và độ kết tinh của màng mỏng ZnO. Ở cùng điều kiện chế tạo, màng mỏng ZnO pha tạp Ga có cấu trúc tinh thể tốt nhất [2, 3]. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiếp tục khảo sát tính chất nhiệt điện của màng mỏng ZnO pha tạp Ga theo nhiệt độ  $\varnothing$ .

## 2 THỰC NGHIỆM

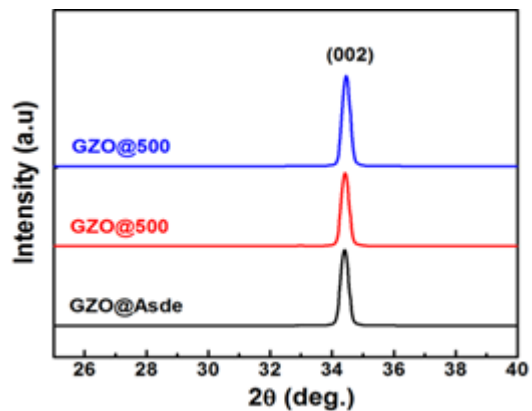
Màng mỏng ZnO pha tạp Ga được lắng đọng trên đế silic bằng phương pháp phun xạ magnetron DC trên hệ phun xạ Univex 450. Bia phun xạ được sử dụng là bia gồm ZnO pha tạp 5 % n.t. Ga. Bia gồm phun xạ được chế tạo từ hỗn hợp bột ZnO và  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  có độ tinh khiết 99,999 %. Áp suất nền là  $6 \times 10^{-6}$  (chuyển sang Pa), áp suất làm việc là  $4,5 \times 10^{-3}$ , khoảng cách bia đế là 5 cm, công suất phun xạ là 60 W và lưu lượng khí Ar là 20 sccm. Màng mỏng ZnO pha tạp Ga xác định bằng phương pháp dao động thạch anh và phương pháp Stylus với máy Dektak 6M có độ dày xấp xỉ 1100 nm. Sau khi chế tạo màng được tiếp tục ủ nhiệt ở 400 và 500 °C trong không khí, thời gian ủ 5 giờ. Cấu trúc tinh thể của các màng được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ tia X trên máy D8 Advance–Bruker. Các khuyết tật trong các màng được khảo sát bằng phương pháp quang phát quang. Tính chất nhiệt điện của màng được khảo sát bằng thiết bị ZEM-3 (ULVAC) và kỹ thuật nhiệt phản xạ (Temperature-dependent time-domain thermoreflectance - TDTR).

## 3 KẾT QUẢ

### Cấu trúc tinh thể của màng mỏng GZO theo nhiệt độ $\varnothing$

Giản đồ nhiễu xạ tia X của cả ba màng mỏng chưa ủ (GZO@Asde) và ủ (GZO@400 và GZO@500) chỉ xuất hiện một đỉnh nhiễu xạ ở vị trí góc  $2\theta$  khoảng  $34,4^\circ$ , đặc trưng cho mặt mạng (002) trong mạng tinh thể lục giác wurtzite của

vật liệu ZnO. Điều này cho thấy quá trình ủ nhiệt vẫn duy trì cấu trúc tinh thể wurtzite đặc trưng. Đặc biệt, nhiệt độ  $\varnothing$  cao đã làm biến đổi chất lượng tinh thể thể hiện ở sự cải thiện cường độ đỉnh XRD - thông số quan trọng để đánh giá mức độ tinh thể hóa của các màng mỏng. Từ cường độ của các đỉnh nhiễu xạ ở hình 1, nhận thấy cường độ đỉnh XRD của màng mỏng GZO@500 là cao nhất, chứng tỏ mẫu có độ tinh thể hóa tốt nhất. Giản đồ nhiễu xạ tia X chỉ xuất hiện duy nhất một đỉnh nhiễu xạ của mặt mạng (002) thuộc ZnO nên có thể kết luận không tồn tại các pha ôxide  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  bên trong màng.



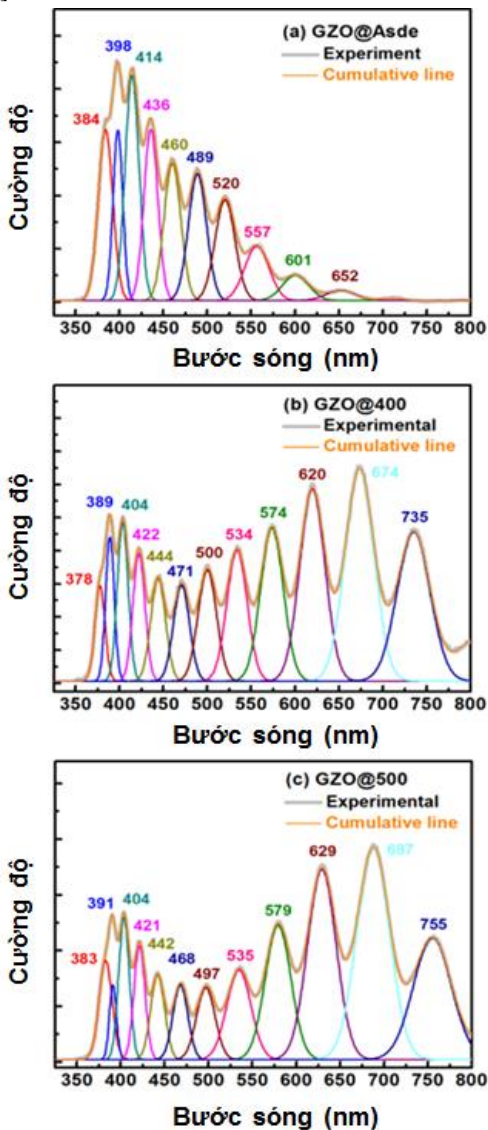
Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của các màng mỏng GZO theo nhiệt độ  $\varnothing$

### Tính chất phát quang của màng mỏng GZO theo nhiệt độ $\varnothing$

Trên các phổ quang phát quang (PL) ở Hình 2 đều xuất hiện nhiều đỉnh phát quang, đặc biệt số lượng đỉnh phát quang và cường độ các đỉnh khi nhiệt độ  $\varnothing$  tăng. Sự xuất hiện các đỉnh phát quang ở các vị trí bước sóng khác nhau chứng tỏ có sự tồn tại nhiều loại khuyết tật trong các mẫu. Vị trí các đỉnh phát quang cho phép xác định mức năng lượng của các khuyết tật trong vùng cấm, cường độ các đỉnh này cho phép xác định một cách gần đúng mật độ các loại khuyết tật tương ứng [9,10]

Các đỉnh phát quang có bước sóng 378 – 384 nm ứng với dịch chuyển vùng-vùng (Near-band edge NBE), đặc trưng của vật liệu ZnO [23 – 27]. Các đỉnh phát quang 389 – 398 nm xác định sự tồn tại của khuyết tật Zn ở vị trí xen kẽ [23 – 26, 31, 32]. Các đỉnh phát quang trong vùng 400 – 700 nm được xác định thuộc các loại khuyết tật là nút khuyết Zn ( $V_{\text{Zn}}$ ), Ga thay thế Zn ( $\text{Ga}_{\text{Zn}}$ ), Zn

xen kẽ ( $Zn_i$ ), nút khuyết ôxy ( $V_O$ ), ôxy xen kẽ ( $O_i$ ), ôxy tại vị trí của Zn ( $O_{Zn}$ ) và  $Zn_i \rightarrow O_i$  [11-25].



Hình 2. Phổ quang phát quang PL của các màng mỏng GZO theo nhiệt độ ủ

Ảnh hưởng của nhiệt độ ủ lên cấu trúc và tính chất của màng GZO được thể hiện rõ qua sự xuất hiện của 2 đỉnh phát quang tại dải bước sóng 442 – 444 nm và 735 – 755 nm, ứng với khuyết tật Zn xen kẽ và  $V_{Zn} \rightarrow O_i$ . Các khuyết tật trên được hình thành trong quá trình hình thành màng, pha tạp và quá trình ủ nhiệt.

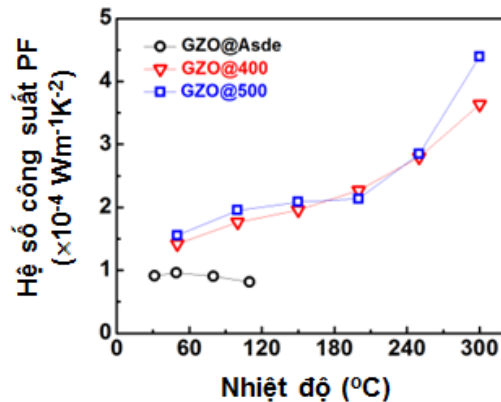
Các khuyết tật  $V_O$  và  $Zn_i$  đóng góp vào mật độ điện tử dẫn. Ngược lại, các khuyết tật  $V_{Zn}$  và  $O_i$

làm giảm mật độ đó. Các kết quả đã công bố của nhóm xác định hạt tải chính trong các màng GZO là điện tử, do đó các khuyết tật  $V_O$  và  $Zn_i$  có thể có nồng độ cao hơn.

Các loại khuyết tật trong các màng mỏng và mức năng lượng tương ứng được trình bày chi tiết trong bảng 1.

### Tính chất nhiệt điện của màng mỏng GZO theo nhiệt độ ủ

Hình 3 thể hiện hệ số công suất nhiệt điện ( $PF = \alpha^2 \sigma$ ) của các màng mỏng GZO theo nhiệt độ ủ được khảo sát trong khoảng nhiệt độ đo từ 30 – 300°C. Các màng mỏng GZO@400 và GZO@500 có giá trị PF tăng theo nhiệt độ (hình 3). Đặc biệt, màng mỏng GZO@500 có  $PF = 4,39 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$  ở 300 °C, cao hơn giá trị của cấu trúc siêu mạng  $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_m$  báo cáo bởi nhóm tác giả [26]. Hệ số công suất tăng có thể do độ dẫn điện tăng: độ linh động tăng vì độ kết tinh của màng mỏng tốt hơn khi được ủ ở nhiệt độ cao.

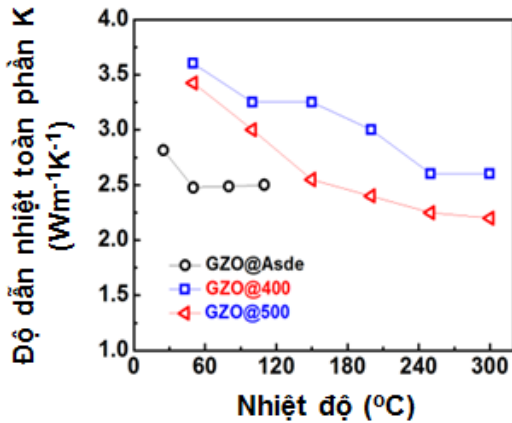


Hình 3. Hệ số công suất nhiệt điện của các màng mỏng GZO theo nhiệt độ ủ

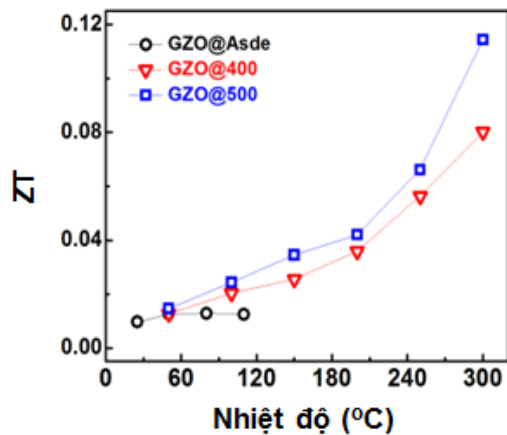
Độ dẫn nhiệt toàn phần K được trình bày ở Hình 4. Quá trình ủ nhiệt làm tăng độ dẫn nhiệt của các màng mỏng GZO. Tuy vậy, độ dẫn nhiệt của các màng mỏng GZO đều giảm theo nhiệt độ đo.

Bảng 1. Các loại khuyết tật tồn tại trong các màng mỏng GZO theo nhiệt độ

GZO@Asde			GZO@400			GZO@500		
Bước sóng (nm)	Khuyết tật	Năng lượng (eV)	Bước sóng (nm)	Khuyết tật	Năng lượng (eV)	Bước sóng (nm)	Khuyết tật	Năng lượng (eV)
384	NBE	3.22	378	NBE	3.28	383	NBE	3.24
398	$Zn_i$	3.12	389	$Zn_i$	3.18	391	$Zn_i$	3.17
414	$V_{Zn}$	3.00	404	$V_{Zn}$	3.06	404	$V_{Zn}$	3.06
436	$Ga_{Zn}^+$	2.84	422	$Ga_{Zn}^+$	2.93	421	$Ga_{Zn}^+$	2.94
			444	$Zn_i^+$	2.79	442	$Zn_i^+$	2.80
460	$V_{Zn}''$	2.69	471	$V_{Zn}''$	2.63	468	$V_{Zn}''$	2.65
489	$V_O'$	2.54	500	$V_O'$	2.48	497	$V_O'$	2.50
520	$O_{Zn}$	2.38	534	$O_{Zn}$	2.32	535	$O_{Zn}$	2.32
557	$V_O''$	2.23	574	$V_O''$	2.16	579	$V_O''$	2.14
601	$Zn_i \rightarrow O_i$	2.06	620	$Zn_i \rightarrow O_i$	2.00	629	$Zn_i \rightarrow O_i$	1.97
652	$O_i$	1.90	674	$O_i$	1.83	687	$O_i$	1.80
			735	$V_{Zn} \rightarrow O_i$	1.68	755	$V_{Zn} \rightarrow O_i$	1.64



Hình 4. Độ dẫn nhiệt toàn phần của các màng mỏng GZO theo nhiệt độ



Hình 5. Hệ số chuyển đổi nhiệt điện ZT của các màng mỏng GZO theo nhiệt độ

Hình 5 cho thấy hệ số chuyển đổi nhiệt điện ZT của các màng mỏng GZO đều tăng theo nhiệt độ đo. Quá trình ủ nhiệt cải thiện đáng kể giá trị ZT. Màng mỏng GZO@500 có ZT ~ 0,114 ở 300 °C, giá trị này cao hơn đáng kể so với các giá trị ZT đã công bố về vật liệu khối ZnO pha tạp Fe (ZT ~ 0,005 ở 400°C), vật liệu khối ZnO pha tạp Al (ZT ~ 0,01 ở 600 K) [28] và vật liệu khối ZnO đồng pha tạp Al và Ga (ZT ~ 0,01 ở 400 K) [29].

#### 4 KẾT LUẬN

Màng mỏng ZnO pha tạp Ga (GZO) được lắng đọng trên đế Si bằng phương pháp phun xạ DC magnetron. Quá trình ủ nhiệt trong không khí có ảnh hưởng tích cực lên tính chất nhiệt điện của màng mỏng GZO. Cụ thể là: Hệ số công suất nhiệt điện tăng nhờ màng được tái kết tinh tốt hơn ở nhiệt độ cao dẫn đến độ dẫn điện của màng tăng; Hệ số chuyển đổi nhiệt điện ZT của màng được ủ ở 500 °C tăng một bậc (ZT = 0,114) so với

màng chưa ủ nhiệt ( $ZT = 0,012$ ). Kết quả khảo sát phổ quang phát quang của các mẫu GZO cho thấy tính chất nhiệt điện được cải thiện là do sự hình thành các khuyết tật trong màng phun xạ và trong quá trình ủ nhiệt, trong đó khuyết tật  $V_O$  và Zn chiếm ưu thế.

**Lời cảm ơn:** Nhóm tác giả chân thành cảm ơn Quỹ NAFOSTED (103.02-2015.105) đã tài trợ cho nghiên cứu này.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. N.H.N. Tran, T.H. Nguyen, Y. Liu, M. Aminzare, A.T. T. Pham, S. Cho, D.P. Wong, K.H. Chen, T. Seetawan, N.K. Pham, H.K.T. Ta, V.C. Tran, T.B. Phan, Thermoelectric Properties of Indium and Gallium dually doped ZnO thin films, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8, 49, 33916–33923, 2016.
- [2]. Michitaka Ohtaki, Recent aspects of oxide thermoelectric materials for power generation from mid-to-high temperature heat source, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 119, 770–775, 2011.
- [3]. N.T.H. Nhật, T.C. Vinh, P.B. Thắng, Chế tạo và khảo sát cấu trúc tinh thể và hình thái học của màng mỏng ZnO pha tạp (Ga và In), *Journal of Science & Technology Development - VNUHCM*, 19, 3, 84, 2016.
- [4]. A. Nag, V. Shubha, Oxide Thermoelectric materials: a structure–property relationship, *Journal of Electronic Materials*, 43, 4, 962, 2014.
- [5]. G. Ren, J. Lan, C.C. Zeng, L. Yaochun, B. Zhan, S. Butt, L.H. Yuan, C.W. Nan, High performance oxides-based thermoelectric materials, *JOM*, 67, 1, 211, 2015.
- [6]. H. Yamaguchi, Y. Chonan, M. Oda, T. Komiyama, T. Aoyama, S. Sugiyama, Thermoelectric Properties of ZnO Ceramics Co-Doped with Al and Transition Metals. *J. Electron. Mater.*, 40, 723–727, 2011.
- [7]. H. Takemoto, K. Fugane, P. Yan, J. Drennan, M. Saito, T. Mori, H. Yamamura, Reduction of thermal conductivity in dually doped ZnO by design of three-dimensional stacking faults. *RSC Adv.* 4, 2661–2672, 2014.
- [8]. J. Zhu, D. Tang, W. Wang, J. Liu, K.W. Holub, R. Yang, Ultrafast thermoreflectance techniques for measuring thermal conductivity and interface thermal conductance of thin films. *J. Appl. Phys.* 108, 094315, 2010.
- [9]. C.V. Manzano, D. Alegre, O.C. Calero, B. Alén, M.S. González, Synthesis and luminescence properties of electrodeposited ZnO films. *J. Appl. Phys.* 110, 043538, 2011.
- [10]. U.S. Kyu, W.S. Seung, A.V. Moholkar, H.Y. Jae, H.M. Jong, H.K. Jin, Effects of dopant (Al, Ga, and In) on the characteristics of ZnO thin films prepared by RF magnetron sputtering system, *Curr. Appl. Phys.* 10, S463–S467, 2010.
- [11]. C.H. Ahn, Y.Y. Kim, D.C. Kim, S.K. Mohanta, H.K. Cho, A comparative analysis of deep level emission in ZnO layers deposited by various methods, *J. Appl. Phys.* 105, 013502, 2009.
- [12]. D. Das, P. Mondal, Photoluminescence phenomena prevailing in c-axis oriented intrinsic ZnO thin films prepared by RF magnetron sputtering. *RSC Adv.* 4, 35735–35743, 2014.
- [13]. Vempati, S.; Mitra, J.; Dawson, P. One-step synthesis of ZnO nanosheets: a blue-white fluorophore. *Nanoscale Res. Lett.* 7, 470, 2012.
- [14]. B. Lin, Z. Fu, Y. Jia, Green luminescent center in undoped zinc oxide films deposited on silicon substrates. *Appl. Phys. Lett.* 79, 7, 943, 2011.
- [15]. M.C. Jun, S.U. Park, H.J. Koh, Comparative studies of Al-doped ZnO and Ga-doped ZnO transparent conducting oxide thin films, *Nanoscale Res. Lett.* 7, 639, 2012.
- [16]. A.B. Djuriscic, W.C.H. Choy, V.A.L. Roy, H.Y. Leung, C.Y. Kwong, K.W. Cheah, T.K.G. Rao, W.K. Chan, H.T. Lui, C. Surya, Photoluminescence and Electron Paramagnetic Resonance of ZnO Tetrapod Structures. *Adv. Func. Mater.* 14, 9, 856-864, 2004.
- [17]. K.J. Chen, F.Y. Hung, S.J. Chang, Z.S. Hu., Microstructures, optical and electrical properties of In-doped ZnO thin films prepared by sol–gel method. *Appl. Sur. Sci.* 255, 6308–6312, 2009.
- [18]. J.D. Ye, S.L. Gu, F. Qin, S.M. Zhu, S.M. Liu, X. Zhou, W. Liu, L.Q. Hu, R. Zhang, Y. Shi, Y.D. Zheng, Correlation between green luminescence and morphology evolution of ZnO films. *Appl. Phys. A.* 81, 759–762, 2005.
- [19]. S.K. Mishra, S. Bayan, R. Shankar, P. Chakraborty, R.K. Srivastava., Efficient UV photosensitive and photoluminescence properties of sol–gel derived Sn doped ZnO nanostructures. *Sensors and Actuators A.* 211, 8–14, 2014.
- [20]. A.K. Srivastava, J. Kumar, Effect of zinc addition and vacuum annealing time on the properties of spin-coated low-cost transparent conducting 1 at% Ga–ZnO thin films. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 14, 065002, 2013.
- [21]. B. Panigrahy, M. Aslam, D.S. Misra, M. Ghosh, D. Bahadur, Defect-Related Emissions and magnetization properties of zno nanorods. *Adv. Funct. Mater.* 20, 1161–1165, 2010.
- [22]. M.S. Wang, Y. Zhou, Y. Zhang, E.J. Kim, S.H. Hahn, S.G. Seong, Near-infrared photoluminescence from ZnO, *Appl. Phys. Lett.* 100, 101906, 2012.
- [23]. H.Q. Wang, G.Z. Wang, L.C. Jia, C.J. Tang, G.H. Li, Polychromatic visible photoluminescence in porous ZnO nanotubes. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40, 6549–6553, 2007.
- [24]. A.B. Djuriscic, Y.H. Leung, Optical Properties of ZnO Nanostructures. *Small.* 2, 8–9, 944–961, 2006.
- [25]. J.P. Xu, S.S. Bo.; L. Li, X.S. Zhang, Y.X. Wang, X.M. Chen. Effects of annealing temperature on structural and optical properties of zno thin films. *Chin. Phys. Lett.* 27, 4, 047803, 2010.
- [26]. D.K. Seo, S.W. Shin, H.H. Cho, B.H. Kong, D.M. Whang, H.K. Cho, Drastic improvement of oxide thermoelectric performance using thermal and plasma treatments of the InGaZnO thin films grown by sputtering. *Acta. Mater.* 59, 6743–6750, 2011.
- [27]. X. Liang, Thermoelectric Transport Properties of Fe-Enriched ZnO with High-Temperature Nanostructure

- Refinement. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 7, 7927–7937, 2015.
- [28]. L. Han, N.V. Nong, L.T. Hung, T. Holgate, N. Pryds, M. Ohtaki, S. Linderoth, The influence of  $\alpha$ - and  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  phases on the thermoelectric properties of Al-doped ZnO. *J. Alloys Compd.* 555, 291–296, 2013.
- [29]. H. Li, T.H. Le, V.N. Ngo, P. Nini, L. Søren, The Influence of spark plasma sintering temperature on the microstructure and thermoelectric properties of Al,Ga dual-doped ZnO. *J. Elec. Mater.* 42, 7, 1573–1581, 2013.

# Effects of the thermal annealing on the thermoelectric properties of Ga-doped ZnO thin films

Nguyen Hong Ngoc<sup>1,2</sup>, Le Nguyen Bao Thu<sup>3</sup>, Phan Bach Thang<sup>2,4,\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Advanced Materials, University of Science, VNU-HCM

<sup>2</sup>Faculty of Materials Science and Technology, University of Science, VNU-HCM

<sup>3</sup>Department of Mathematics and Physics, University of Information Technology, VNU-HCM

<sup>4</sup>Center for Innovative Materials and Architectures, VNU-HCM

\*Corresponding author: pbthang@inomar.edu.vn

*Received: 29-5-2017; Accepted: 10-12-2017; Published: 15-10-2018.*

**Abstract**—We deposited successfully Ga-doped ZnO (GZO) thin films by using magnetron DC-sputtering technique, followed by annealing. The effects of the thermal annealing on thermoelectric properties of GZO films were investigated. The obtained results showed that due to annealing, the thermoelectric properties of the GZO films were significantly enhanced: (1) power factor increased with an increase of electron mobility due to high

film crystallinity; (2) The figure of merit ZT values of the GZO film annealed at 500 °C ( $ZT = 0.114$ ) was one order higher than the as-deposited GZO film ( $ZT = 0.012$ ). The room temperature photoluminescence (PL) spectra depicted various kinds of point defects which controlled thermoelectric properties and both oxygen vacancies VO and zinc interstitial Zn played an important role.

**Index Terms**— Ga-doped ZnO thin films, thermoelectric properties, point defects.