

# Ảnh hưởng của độ dày lên độ linh động điện tử của màng mỏng ZnO đồng pha tạp galium và hydrogen

Phạm Thanh Tuấn Anh, Hoàng Văn Dũng, Nguyễn Hữu Trương,  
Phan Bách Thắng, Trần Cao Vinh

**Tóm tắt**—Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của độ dày lên độ linh động điện tử của màng mỏng ZnO đồng pha tạp galium và hydrogen (HGZO) được khảo sát. Màng HGZO được chế tạo trên đế thủy tinh bằng phương pháp phun xạ magnetron từ bia gồm ZnO pha tạp Ga (GZO) trong môi trường hỗn hợp khí Ar và H<sub>2</sub>. Từ phép đo Hall, độ linh động tăng nhanh từ 44,6 đến 53,4cm<sup>2</sup>/Vs tương ứng với độ dày màng tăng từ 350 đến 900 nm, sau đó có xu hướng bão hòa ~55cm<sup>2</sup>/Vs khi tăng độ dày hơn nữa. Phần lớn các màng đạt được độ linh động >50cm<sup>2</sup>/Vs, đây là một giá trị rất cao đối với màng mỏng TCOs chế tạo bằng phương pháp phun xạ magnetron. Sự phụ thuộc của độ dày lên độ linh động được giải thích theo cơ chế tán xạ biên hạt. Chất lượng tinh thể tăng làm giảm tán xạ biên hạt, dẫn đến độ linh động tăng nhanh trong khoảng độ dày 350–900nm. Tuy nhiên, ở những độ dày lớn hơn 900 nm, sự xuất hiện các sai hỏng làm tăng số lượng tâm tán xạ và bão hòa độ linh động. Hơn nữa, kết quả cho thấy màng HGZO ở độ dày tối ưu 800 nm đạt giá trị điện trở suất thấp ( $5,3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ ), độ truyền qua trung bình cao (83,3%) trong dải bước sóng rộng 400 – 1100 nm và chỉ số phẩm chất “figure of merit” cao nhất ( $10,3 \times 10^3 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ ) tương ứng với độ linh động cao (51,5cm<sup>2</sup>/Vs).

**Từ khóa** – Độ dày, độ linh động điện tử, màng mỏng ZnO pha tạp, phun xạ magnetron, tán xạ biên hạt

## 1 GIỚI THIỆU

Các oxide trong suốt dẫn điện có độ linh động điện tử cao (High Mobility Transparent

Conducting Oxide – HMTCOs) là một loại TCOs đặc biệt đã và đang được nghiên cứu rộng rãi, nhằm tăng cường hiệu suất và tốc độ đáp ứng của các ứng dụng quang điện tử. Chúng được ứng dụng nhiều làm điện cực trong các màn hình cảm ứng, màn hình phẳng hay các lớp tiếp xúc trước và sau của pin mặt trời đa tiếp giáp [1, 2]. Nhờ vào độ linh động cao thay vì nồng độ hạt tải, các màng mỏng HMTCOs không chỉ dẫn điện tốt mà độ trong suốt cũng được cải thiện do sự hấp thụ hạt tải tự do thấp. Hệ quả là phẩm chất của màng được tăng cường.

ZnO pha tạp H (HZO) được biết đến là một trong những vật liệu HMTCOs. Màng mỏng HZO đạt giá trị độ linh động cao (>40cm<sup>2</sup>/Vs) ở tỷ lệ hydrogen xác định [3, 4]. Bên cạnh đó, nhiều công trình nghiên cứu về màng HZO pha tạp thêm các nguyên tố nhóm IIIA (như Al, Ga, In) cũng đã được công bố [5-7]. Việc kết hợp hydrogen và các nguyên tố nhóm IIIA nhằm nâng cao độ dẫn điện và tính trong suốt của màng mỏng ZnO pha tạp. Tuy nhiên, kết quả đạt được của các nghiên cứu trong và ngoài nước vẫn cho thấy giá trị thấp về độ linh động vì phương pháp cũng như điều kiện chế tạo chưa tối ưu. Điển hình như tỷ lệ khí hydrogen [5, 6, 8]; tỷ lệ tạp chất galium [9]; quá trình xử lý nhiệt [10] và nhiệt độ đế [8, 9]. Trong số đó, ảnh hưởng của độ dày lên các màng mỏng ZnO pha tạp hydro, đặc biệt là độ linh động điện tử cao chưa được khảo sát đầy đủ. Do đó, nội dung này sẽ được làm rõ hơn trong quá trình khảo sát.

Trong nghiên cứu này, vật liệu ZnO đồng pha tạp Ga và H (HGZO) được chọn làm đối tượng nghiên cứu. Trong đó, thành phần tạp chất Ga tương đối nhỏ để hạn chế sự biến dạng cấu trúc tinh thể của màng. Màng mỏng HGZO được

Ngày nhận bản thảo 03-7-2017; Ngày chấp nhận đăng 21-3-2018; Ngày đăng 30-8-2018

Phạm Thanh Tuấn Anh<sup>1,\*</sup>, Hoàng Văn Dũng<sup>1</sup>, Nguyễn Hữu Trương<sup>1</sup>, Phan Bách Thắng<sup>1,2</sup>, Trần Cao Vinh<sup>1</sup> – <sup>1</sup>Trường Đại học Khoa học Tự nhiên – ĐHQG HCM, <sup>2</sup> Trung tâm Nghiên cứu Vật liệu cấu trúc Nano và Phân tử, ĐHQG-HCM

\*Email: pttanh@hcmus.edu.vn

lắng đọng bằng phương pháp phun xạ magnetron DC trong môi trường hỗn hợp khí Ar và H<sub>2</sub>. Ảnh hưởng của độ dày lên các tính chất, đặc biệt là độ linh động của màng sẽ được tập trung khảo sát. Từ đó, thông số tối ưu về độ dày màng cho loại vật liệu này sẽ được xác định.

## 2 VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

### Vật liệu

Phương pháp phun xạ magnetron được sử dụng để chế tạo màng mỏng HGZO trên đế thủy tinh trong môi trường plasma hydrogen với tỷ lệ áp suất riêng phần H<sub>2</sub>/(H<sub>2</sub>+Ar) = 1,7%. Vật liệu gồm ZnO pha tạp 0,25% Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (theo khối lượng) dung kết ở 1500°C trong không khí được sử dụng làm bia phun xạ. Áp suất và công suất phun xạ được lần lượt cố định ở 5×10<sup>-3</sup>torr và 60W. Nhiệt độ để được duy trì ở 200°C trong suốt quá trình lắng đọng và dao động khoảng 10°C do nhiệt plasma. Thời gian phun xạ được điều chỉnh tương ứng với độ dày màng cần khảo sát.

### Phương pháp

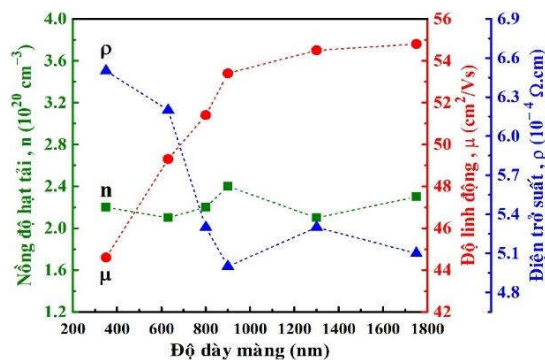
Các thông số điện cơ bản của màng như nồng độ hạt tải (n), độ linh động (μ) và điện trở suất (ρ) được xác định thông qua phép đo Hall (Ecopia HMS-3000) ở nhiệt độ phòng. Trong khi đó, điện trở mặt (R<sub>s</sub>) được đo bằng phương pháp bốn mũi dò (four-point probes) và so sánh với giá trị R<sub>s</sub> thu được từ công thức: R<sub>s</sub> = ρ/d, trong đó d là độ dày màng. Mặt khác, tính chất quang của màng thể hiện qua phổ truyền qua quang học được phân tích trong vùng quang phổ từ 300 đến 1100 nm bằng phổ kế UV-Vis (Jasco V-530).

Cấu trúc tinh thể và hình thái học của màng HGZO được đặc biệt quan tâm. Phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD, Bruker D8 Advance) cho phép xác định các thông tin về tinh thể học của màng. Bên cạnh đó, bề mặt của màng được quan sát dưới kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FESEM, Joel JMS-6700). Bằng kỹ thuật chụp mặt cắt (cross-sectional) trên cùng thiết bị này, độ dày của màng thay đổi trong khoảng 350–1750nm. Để đảm bảo độ tin cậy và chính xác, kết quả về độ dày màng còn được kiểm tra, so sánh bằng phương pháp Stylus (Veeco DEKTAK-6M) với kết quả sai lệch không quá 10% so với độ dày màng từ ảnh FESEM.

## 3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### Tính chất điện

Hình 1 mô tả sự thay đổi của nồng độ hạt tải, độ linh động và điện trở suất của màng HGZO như là những hàm của độ dày. Những kết quả đạt được cho thấy màng HGZO có giá trị độ linh động vượt trội so với nhiều nghiên cứu khác dựa trên vật liệu ZnO pha tạp hydrogen [3–10]. Độ linh động của màng tăng liên tục khi độ dày màng tăng, trong khi đó, nồng độ hạt tải thay đổi không đáng kể và đạt giá trị trung bình khoảng 2,2×10<sup>20</sup>cm<sup>-3</sup>. Tuy nhiên, điều đáng chú ý ở đây là tỷ lệ tăng độ linh động trong khoảng độ dày 350–900nm cao hơn nhiều so với ở những độ dày lớn hơn 900nm. Cụ thể, độ linh động tăng nhanh từ 44,6 lên 53,4cm<sup>2</sup>/Vs trong khoảng 350–900nm, sau đó có xu hướng bão hòa ở khoảng 55cm<sup>2</sup>/Vs nếu tiếp tục tăng độ dày màng. Bên cạnh đó, điện trở suất của màng giảm dần từ 6,5×10<sup>-4</sup> xuống 5×10<sup>-4</sup>Ωcm ứng với độ dày tăng từ 350 đến 900nm, sau đó tăng nhẹ nếu độ dày tăng hơn nữa. Rõ ràng, sự suy giảm của điện trở suất được quyết định chủ yếu bởi độ linh động hơn là nồng độ hạt tải theo độ dày màng.

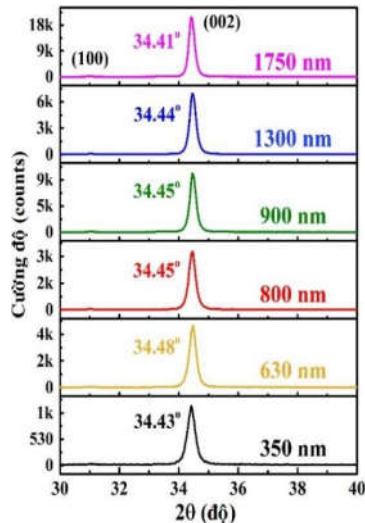


Hình 1. Kết quả Hall của màng HGZO ở các độ dày khác nhau

Về cơ bản, độ linh động của điện tử trong màng mỏng bị chi phối thông qua sự tán xạ của điện tử trên các tạp chất, dao động mạng và các biên hạt. Đầu tiên, tán xạ dao động mạng chỉ đóng vai trò quyết định trong các cấu trúc đơn tinh thể thuần nhất, như ZnO, SnO<sub>2</sub> ở hàm lượng pha tạp thấp (~10<sup>16</sup>cm<sup>-3</sup>) [11]. Do đó, tán xạ dao động mạng có thể được bỏ qua khi xem xét trong màng đa tinh thể HGZO với nồng độ hạt tải trong bậc 10<sup>20</sup>cm<sup>-3</sup>. Thứ hai, các màng HGZO được chế tạo dưới điều kiện, môi trường như

nhau với giá trị nồng độ hạt tải thay đổi không đáng kể theo độ dày màng. Điều này cho thấy sự ảnh hưởng của các tạp chất lên màng ở các độ dày khác nhau là tương đương nhau. Từ đó, tán xạ tạp chất có thể xem là như nhau trong các màng có độ dày khác nhau. Như vậy, độ linh động cũng như tính chất của màng sẽ phụ thuộc vào sự thay đổi cấu trúc tinh thể theo độ dày.

### Cấu trúc tinh thể



Hình 2. Giản đồ nhiễu xạ X theo độ dày của màng HGZO

Bảng 1. Một số thông tin về tinh thể học của màng HGZO ở các độ dày khác nhau

Độ dày màng (nm)	$I_{(002)} / I_T$	Độ bán rộng (độ)	$2\theta$ (độ)	Kích thước tinh thể (nm)
350	0,73	0,3023	34,43	27,5
630	0,85	0,2684	34,48	31,0
800	0,86	0,2599	34,45	32,0
900	0,90	0,2410	34,45	34,5
1300	0,88	0,2491	34,44	33,4
1750	0,94	0,2243	34,41	37,1

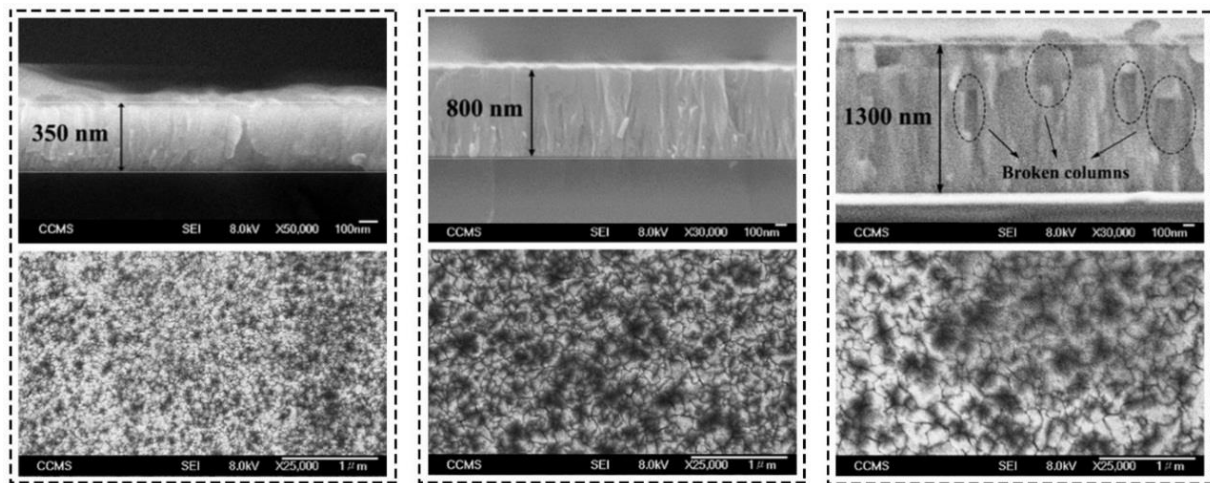
Qua đó, cường độ tương đối  $I_{(002)}/I_T$  có xu hướng tăng, trong khi độ bán rộng lại có xu hướng giảm khi độ dày màng tăng. Điều này phản ánh sự tốt dần lên của độ tinh thể theo chiều tăng của độ dày màng, cụ thể là kích thước tinh thể trung bình tăng từ 27,5 lên 37,1nm. Một điều đáng chú ý khác là hầu hết các màng có đỉnh nhiễu xạ (002) dịch về những góc  $2\theta$  lớn hơn  $34,42^\circ$  của vật liệu ZnO khối (JCPDS 36-1451). Điều này tương ứng với sự giảm khoảng cách giữa các mặt tinh thể ( $d_{hkl}$ ) theo định luật Bragg. Như đã đề cập ở trên, sự ảnh hưởng của tạp chất được xem là như nhau ở tất cả các màng. Do đó, sự thay đổi góc lệch  $2\theta$  của đỉnh (002) ở

Cấu trúc tinh thể của màng HGZO ở các độ dày khác nhau được khảo sát thông qua giản đồ nhiễu xạ tia X ở Hình 2. Các màng đều có cấu trúc đa tinh thể với hai định hướng phát triển theo mặt mạng (100) và (200). Trong đó, mặt (002) song song với trục c có năng lượng bề mặt thấp nhất là định hướng ưu tiên hơn [12, 13]. Đây là đặc trưng cho cấu trúc lục giác wurtzite của ZnO. Ngoài ra không quan sát thấy các pha tinh thể của các hợp chất hydrogen và galium. Để thuận tiện trong việc so sánh, tỷ số cường độ tương đối của đỉnh (002) so với toàn phổ ( $I_{(002)}/I_T$ ) được trình bày ở Bảng 1. Bên cạnh đó, kích thước tinh thể trung bình (D) theo định hướng (002) của màng HGZO cũng được xác định theo công thức Debye-Scherrer:  $D = 0,9\lambda / (B \cos\theta)$ ; trong đó  $\lambda = 0,154$  nm là bước sóng của tia X, B là độ bán rộng và  $\theta$  là góc nhiễu xạ Bragg.

các màng ít bị ảnh hưởng của tạp chất, mà bị chi phối bởi chất lượng tinh thể trong quá trình phát triển của màng. Trong khoảng độ dày từ 350 đến 630nm, màng có độ tinh thể kém, độ chặt còn thấp, thể hiện qua cường độ nhiễu xạ thấp, đỉnh phổ rộng và màng có xu hướng căng ( $2\theta$  tăng). Khi độ dày màng tăng trên 630nm, độ tinh thể cũng như độ xếp chặt của màng tăng nhanh và màng có xu hướng phục hồi ứng suất ( $2\theta$  giảm). Sự tăng cường chất lượng độ tinh thể làm giảm các biên hạt, giảm tán xạ và tăng cường độ linh động, đặc biệt thể hiện rõ trong khoảng độ dày 350–900nm.

Tuy nhiên, từ dữ liệu phổ XRD, các phân tích này chưa đủ để lý giải quá trình bão hòa độ linh động khi độ dày màng vượt quá 900nm. Từ đó,

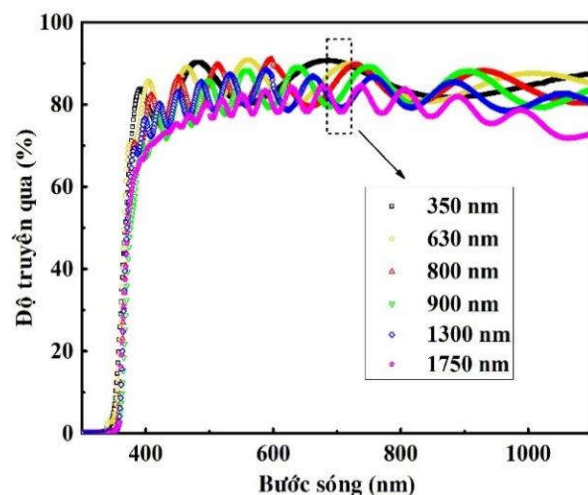
hình ảnh bề mặt và mặt cắt của màng HGZO ở các độ dày khác nhau là sự bổ sung quan trọng và được thể hiện ở Hình 3.



**Hình 3.** Ảnh FESEM mặt cắt và bề mặt của màng HGZO ở các độ dày 350nm, 800nm và 1300nm

Qua ảnh mặt cắt, độ dày của các màng HGZO được xác định và thảo luận trong nghiên cứu này. Các ảnh này còn cho thấy các màng có xu hướng phát triển theo cấu trúc cột. Các cột tinh thể có thể quan sát càng rõ ràng khi độ dày màng càng tăng. Điều này phản ánh cấu trúc màng xếp chặt hơn khi độ dày tăng. Bên cạnh đó, ảnh bề mặt cũng thể hiện xu hướng tinh thể hóa tốt hơn của màng với kích thước hạt tăng khi tăng độ dày. Những điều này hoàn toàn phù hợp với những nhận định từ phổ XRD khi giải thích sự cải thiện của độ linh động theo độ dày. Tuy nhiên, khi độ dày màng vượt quá 900nm, ảnh mặt cắt còn cho thấy sự xuất hiện của các cột tinh thể bị đứt gãy. Nguyên nhân có thể là do sự phục hồi ứng suất lớn của màng dưới dạng các sai hỏng như sai hỏng điểm (point defects), sự lệch mạng (dislocations), .... Các sai hỏng này mặc dù chưa đủ để làm giảm độ tinh thể của màng, nhưng góp phần làm tăng các tâm tán xạ. Trong khi độ linh động không ngừng được cải thiện do sự tinh thể hóa theo độ dày màng, thì sự gia tăng ngày càng nhiều của các tâm tán xạ lại kìm hãm sự tăng độ linh động. Từ đó, tỷ lệ tăng độ linh động giảm và độ linh động có xu hướng bão hòa ở những độ dày màng lớn.

### Tính chất quang



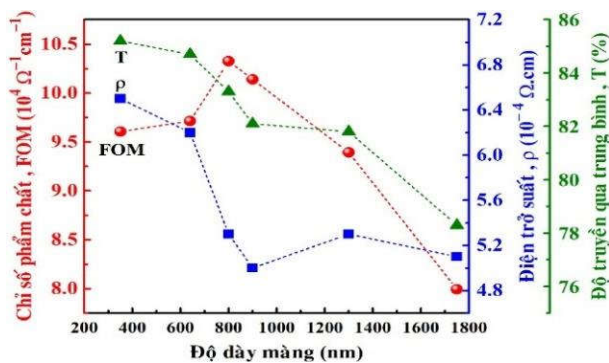
**Hình 4.** Phổ truyền qua quang học của màng HGZO ở các độ dày khác nhau

Hình 4 biểu diễn sự truyền qua quang học theo độ dày của các màng HGZO trong vùng bước sóng từ 300–1100nm. Hầu hết các màng đều đảm bảo độ truyền qua trung bình trên 80% trong vùng khả kiến và cận hồng ngoại, ngoại trừ màng có độ dày 1750nm. Độ chênh lệch giữa cực đại và cực tiểu của các màng tăng khi độ dày tăng từ 350 đến 900nm, và có xu hướng giảm ở những độ dày màng lớn hơn. Màng càng dày,

hấp thụ và tán xạ càng tăng, dẫn đến cực đại và cực tiểu gần nhau hay nói cách khác là vân giao thoa không rõ nét. Ngoài ra, sự truyền qua trong vùng cận hồng ngoại chịu ảnh hưởng mạnh mẽ bởi hiệu ứng hấp thụ hạt tải tự do. Trong nghiên cứu này, độ truyền qua trong vùng cận hồng ngoại chênh lệch không lớn ở các màng, hoàn toàn phù hợp với sự thay đổi không đáng kể của giá trị nồng độ hạt tải thu được từ kết quả Hall.

### Tính chất quang điện

Trên thực tế, quy luật thay đổi của độ dẫn điện và độ trong suốt của màng diễn ra theo hai chiều hướng trái ngược nhau. Điều này có thể thấy rõ qua đồ thị biểu diễn mối liên hệ giữa điện trở suất và độ truyền qua trung bình trong vùng bước sóng 400–1100nm của màng HGZO ở Hình 5. Qua đó, khi độ dày tăng, độ truyền qua trung bình của màng giảm trong khi độ dẫn điện (hay nghịch đảo của điện trở suất) tăng.



**Hình 5.** Quy luật thay đổi của điện trở suất, độ truyền qua trung bình và chỉ số phẩm chất của màng HGZO ở các độ dày khác nhau

Để đánh giá phẩm chất quang điện của màng ở các độ dày khác nhau, chỉ số phẩm chất (FOM) của màng được tính toán thông qua công thức [14]:

$$\text{FOM} = \frac{1}{\rho \ln(1/T)} \quad (1)$$

Trong đó,  $\rho$  là điện trở suất, T là độ truyền qua trung bình trong vùng phổ rộng 400–1100 nm. Từ Hình 5, giá trị FOM tăng từ  $9,6 \times 10^3$  đến  $10,3 \times 10^3 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  khi độ dày màng tăng từ 350 đến 800 nm, sau đó giảm xuống  $8,0 \times 10^3 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  ở độ dày 1750nm. Vì vậy, màng HGZO ở độ dày tối ưu 800nm có phẩm chất quang điện tốt nhất, đồng thời độ linh động đạt trên  $50 \text{cm}^2/\text{Vs}$ . Những kết quả khả quan này có thể cung cấp các

điện cực ứng dụng với phẩm chất quang điện tốt và khả năng đáp ứng cao.

### 4 KẾT LUẬN

Qua nghiên cứu này, màng mỏng HGZO được chế tạo thành công trên đế thủy tinh trong môi trường hỗn hợp khí Ar và  $\text{H}_2$  bằng phương pháp phun xạ magnetron DC. Màng HGZO thể hiện đặc trưng của màng HMTCO với độ linh động đạt được trên  $50 \text{cm}^2/\text{Vs}$ . Đặc biệt, sự ảnh hưởng của độ dày màng lên độ linh động được giải thích theo cơ chế tán xạ biên hạt.

Nghiên cứu cũng tìm ra điều kiện độ dày tối ưu của màng HGZO là 800nm. Với độ dày này, màng đạt được những kết quả khả thi như: điện trở suất thấp ( $5,3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ ), độ truyền qua trung bình cao (83,3%) trong vùng bước sóng 400–1100nm và chỉ số phẩm chất cao nhất ( $10,3 \times 10^3 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ ). Hơn nữa, màng cũng đạt được giá trị độ linh động vượt trội ( $51,5 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ), có tiềm năng rất lớn cho những ứng dụng đòi hỏi tốc độ đáp ứng cao.

*Lời cảm ơn:* Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ Đề tài cấp trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM năm 2016 – 2017 với mã số quản lý T2016-24. Ngoài ra, nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Tiến sĩ Lê Trần, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM về những thảo luận khoa học hữu ích.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Calnan, A.N. Tiwari, "High mobility transparent conducting oxides for thin film solar cells", *Thin Solid Films*, vol. 518, no. 7, pp. 1839–1849, 2010.
- [2] S. Calnan, H.M. Uphadhyaya, S. Buecheler, G. Khrypunov, A. Chirila, A. Romeo, R. Hashimoto, T. Nakada, A.N. Tiwari, "Application of high mobility transparent conductors to enhance long wavelength transparency of the intermediate solar cell in multi-junction solar cells", *Thin Solid Films*, vol. 517, no. 7, pp. 2340–2343, 2009.
- [3] L.Y. Chen, W.H. Chen, J.J. Wang, F.C.N. Hong, Y.K. Su, "Hydrogen-doped high conductivity ZnO films deposited by radio-frequency magnetron sputtering", *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 23, pp. 5628–5630, 2004.
- [4] D. Gaspar, L. Pereira, K. Gehrke, B. Galler, E. Fortunato, R. Martins, "High mobility hydrogenated zinc oxide thin films", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 163, pp. 255–262, 2017.
- [5] M.C. Li, C.C. Kuo, S.H. Peng, S.H. Chen, C.C. Lee, "Influence of hydrogen on the properties of Al and Ga-

- doped ZnO films at room temperature”, *Applied Optics*, vol. 50, no. 9, pp. C197–C200, 2011.
- [6] S.H. Lee, T.S. Lee, K.S. Lee, B. Cheong, Y.D. Kim, W.M. Kim, “Characteristics of hydrogen co-doped ZnO: Al thin films”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, no. 9, pp. 095303, 2008.
- [7] A. Singh, S. Chaudhary, D.K. Pandya, “On the temperature dependence of mobility in hydrogenated indium-doped ZnO thin films”, *Acta Materialia*, vol. 77, pp. 125–132, 2014.
- [8] B.L. Zhu, M. Xie, J. Wang, X.W. Shi, J. Wu, D.W. Zeng, C.S. Xie, “Comparative study on effects of H<sub>2</sub> flux on structure and properties of Al-doped ZnO films by RF sputtering in Ar+H<sub>2</sub> ambient at two substrate temperatures”, *Ceramics International*, vol. 40, no. 8, pp. 12093–12104, 2014.
- [9] D.H. Kim, S.H. Lee, G.H. Lee, H.B. Kim, K.H. Kim, Y.G. Lee, T.H. Yu, “Effects of deposition temperature on the effectiveness of hydrogen doping in Ga-doped ZnO thin films”, *Journal of Applied Physics*, vol. 108, no. 2, pp. 023520, 2010.
- [10] N.F. Shih, C.C. Lin, S.L. Young, C.Y. Kung, “Hydrogen/argon annealing on Al-doped ZnO films by low temperature magnetron direct current sputtering”, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 12, no. 5, pp. 745–750, 2015.
- [11] R.G. Gordon, “Criteria for choosing transparent conductors”, *MRS Bulletin*, vol. 25, no. 8, pp. 52–57, 2000.
- [12] S. Rahmane, M.S. Aida, M.A. Djouadi, N. Barreau, “Effects of thickness variation on properties of ZnO:Al thin films grown by RF magnetron sputtering deposition”, *Superlattices and Microstructures*, vol. 79, pp. 148–155, 2015.
- [13] T.P. Rao, M.C.S. Kumar, N.S. Hussain, “Effects of thickness and atmospheric annealing on structural, electrical and optical properties of GZO thin films by spray pyrolysis”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 541, pp. 495–504, 2012.
- [14] J.H. Gu, L. Long, Z. Lu, Z.Y. Zhong, “Optical, electrical and structural properties of aluminum-doped nano-zinc oxide thin films deposited by magnetron sputtering”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 26, no. 2, pp. 734–741, 2015.

# Impacts of the thickness on the electron mobility of gallium and hydrogen co-doped zinc oxide thin films

Anh Thanh Tuan Pham<sup>1,\*</sup>, Dung Van Hoang<sup>1</sup>, Truong Huu Nguyen<sup>1</sup>,  
Thang Bach Phan<sup>1,2</sup>, Vinh Cao Tran<sup>1</sup>

<sup>1</sup> University of Science, VNUHCM; <sup>2</sup> Center for Innovative Materials and Architectures, VNUHCM

\*Corresponding author: pttanh@hcmus.edu.vn

Received: 03-07-2017; Accepted: 21-03-2018; Published: 30-8-2018

**Abstract**—this work, impacts of the thickness on electron mobility of Ga and H<sub>2</sub> co-doped ZnO (HGZO) thin films were investigated. The HGZO films were prepared on glass substrate by using magnetron sputtering from ceramic Ga-doped ZnO (GZO) target in the gas mixture of argon and hydrogen. Based on the Hall measurement, the mobility enhanced fastly from 44.6 to 53.4cm<sup>2</sup>/Vs with the increasing thickness from 350 to 900 nm, then tends to be saturated at ~55cm<sup>2</sup>/Vs with further thickness. Most of the films achieve the mobility of >50cm<sup>2</sup>/Vs, which is very high value for sputtered TCOs thin films. The thickness-dependent mobility is explained in term of grain

boundary scattering. The improvement of crystalline quality reduced grain boundary scattering, which lead to the fast increase in mobility of the films with 350–900nm in thickness. When the thickness increased more than 900nm, however, the appearance of many defects increased scattering centers and saturates the mobility. Furthermore, the results showed the HGZO films with optimum thickness of 800nm obtained low resistivity (5.3×10<sup>-4</sup>Ωcm), high average transmittance (83.3%) in the wide wavelength range of 400–1100nm, and the highest figure of merit (10.3×10<sup>3</sup>Ω<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>) corresponding to high mobility (51.1cm<sup>2</sup>/Vs).

**Keywords**—Carrier mobility, doped ZnO thin films, grain boundary scattering, magnetron sputtering, thickness