

Chế tạo và nghiên cứu tính chất vật lý của màng dẫn trong suốt ZnO pha tạp Ag bằng phương pháp phún xạ r.f. magnetron

Preparation and investigation into the characteristics of transparent conducting Ag doped ZnO thin films by r.f. magnetron sputtering

Trần Thị Ngọc Anh^a, Phạm Nguyên Hải^a, Nguyễn Việt Tuyền^a, Hồ Khắc Hiếu^{b,c},
Nguyễn Thị Thu Hằng^d, Trần Thị Hà^{a,d*}
Tran Thi Ngoc Anh^a, Pham Nguyen Hai^a, Nguyen Viet Tuyen^a, Ho Khắc Hieu^{b,c},
Nguyen Thi Thu Hang^d, Tran Thi Ha^{a,d*}

^aKhoa Vật lý, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc Gia Hà Nội,
334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

^aFaculty of Physics, University of Science, Vietnam National University,
334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

^bKhoa Khoa học Tự nhiên và Môi trường, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^bDepartment of Environment and Natural Science, Duy Tan University, Danang, Vietnam

^cViện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^cInstitute of Research and Development, Duy Tan University, Danang, Vietnam

^dTrường Đại học Mỏ - Địa chất, 18 Phố Viên, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

^dHanoi University of Mining and Geology, 18 Vien Street, North Tu Liem District, Hanoi, Vietnam

(Ngày nhận bài: 16/8/2022, ngày phản biện xong: 18/8/2022, ngày chấp nhận đăng: 28/10/2022)

Tóm tắt

Màng mỏng ZnO pha tạp Ag được chế tạo bằng phương pháp phún xạ r.f. magnetron. Ảnh hưởng của nồng độ pha tạp và công suất phún xạ lên cấu trúc, tính chất quang và tính chất điện được nghiên cứu chi tiết bằng các phép đo nhiễu xạ tia X, phép đo truyền qua, hấp thụ và phép đo hiệu ứng Hall. Các kết quả nghiên cứu cho thấy công suất phún xạ ảnh hưởng mạnh đến độ kết tinh của màng thu được trong khi nồng độ pha tạp quyết định độ dẫn. Nồng độ pha tạp 1% cho màng có độ dẫn cao nhất (điện trở suất $\sim 8 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$) và có xu hướng giảm ở các nồng độ pha tạp cao hơn. Độ truyền qua của các màng mỏng ZnO:Ag trong vùng nhìn thấy bị giảm đi khi tăng nồng độ pha tạp nhưng vẫn đáp ứng yêu cầu để làm màng dẫn trong suốt trong các linh kiện quang điện tử.

Từ khóa: Màng dẫn trong suốt; ZnO pha tạp Ag; phún xạ; phép đo Hall.

Abstract

Ag doped ZnO thin films were successfully prepared by r.f. magnetron sputtering. The effects of doping concentration and sputtering power on the structure, optical and electrical properties were studied thoroughly by X-ray diffraction, UV-Vis (ultraviolet-visible) spectroscopy and Hall measurement. The results show that sputtering power has a clear effect on the crystallinity of the thin films while the doping concentration plays a key role on tuning conductivity of the films. Doping concentration of 1% atm offers the highest conductivity, corresponding to the resistivity of $8 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$

* Corresponding Author: Tran Thi Ha, Khoa Vật lý, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc Gia Hà Nội, 334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam; Trường Đại học Mỏ - Địa chất, 18 Phố Viên, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

Email: nongthihoa@duytan.edu.vn

and tends to decrease at higher concentrations. The transparency of ZnO:Ag thin films in the visible region decreases with increasing doping concentration but still meets the requirement of transparent conducting thin films in optoelectronics applications.

Keywords: Transparent conductive oxide; Ag doped ZnO; sputtering; Hall measurement.

1. Đặt vấn đề

Trong thời gian gần đây, màng oxit dẫn điện trong suốt (Transparent Conductive Oxide - TCO) được sử dụng rộng rãi và là thành phần quan trọng trong các thiết bị điện tử như tấm nền chiếu sáng tinh thể lỏng (LCD), tấm nền cảm ứng (touch screen), điốt phát quang (LED) hay trong các ứng dụng sử dụng hiệu ứng quang điện (photovoltaic). Khi được sử dụng để làm điện cực, yêu cầu của màng oxit dẫn điện trong suốt TCO là phải có điện trở suất thấp, đồng thời phải cho ánh sáng trong những miền bước sóng định trước truyền qua. Thực tế, các chất được dùng để làm nền trong công nghệ chế tạo màng oxit dẫn điện trong suốt chủ yếu là hỗn hợp indium ôxít và ôxít thiếc - ITO, hỗn hợp indium ôxít pha flo (FTO) hay kẽm ôxít (ZnO). Màng ITO có các tính chất khá ấn tượng như điện trở suất thấp cỡ $\sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ và độ truyền qua lớn hơn 80%. Mặc dầu vậy, giá thành của loại màng ITO này lại khá cao do Indium là nguyên tố hiếm và đắt, độ bền của sản phẩm chưa cao và độc hại. Do đó, màng mỏng ZnO dẫn điện khi pha tạp các nguyên tố như Al, Cu, P, v.v... [1–3] được nhiều phòng thí nghiệm tập trung nghiên cứu để thay thế loại màng ITO nhờ các ưu thế như độ rộng vùng cấm lớn (cỡ 3,37eV ở nhiệt độ phòng), nguồn cung cấp dồi dào, giá thành rẻ và đặc biệt là thân thiện với môi trường.

Trong các nghiên cứu gần đây, ZnO được pha tạp nhiều nguyên tố tùy thuộc vào mục đích sử dụng. ZnO không pha tạp thường là bán dẫn loại n do các sai hỏng nội tại (nút khuyết của Oxy, Zn điền kẽ,...) là các tâm donor đóng góp điện tử ở vùng dẫn. Để tăng độ dẫn điện, các nguyên tố nhóm III như Al [4], Ga [5] hay In [6,7] cũng được sử dụng để pha tạp. Mặt khác, các ứng

dụng trong quang điện tử yêu cầu phải chế tạo bán dẫn ZnO loại p, trong khi giống như hầu hết các bán dẫn có độ rộng vùng cấm lớn, việc tạo ra ZnO pha tạp loại p là khá khó khăn, do có sự bù trừ bởi tạp thuần hoặc do khả năng hòa tan của tạp là thấp. Các nguyên tố thuộc nhóm I và V như Na [8], Li [9], K [10], Cu [11], Ag [12,13], N [14], P [15] hay Sb [16] có thể được dùng nhằm tạo ra bán dẫn loại p. Tuy nhiên, thực tế cho thấy các sản phẩm tạo ra có tính ổn định chưa cao, cơ chế hình thành các tâm tạp chưa rõ ràng, cần phải tiếp tục nghiên cứu sâu hơn.

Các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm trong thời gian vừa qua cho thấy tạp kim loại Ag làm tăng tính dẫn của màng tinh thể ZnO, có thể tạo ra tính dẫn loại n hoặc loại p, tùy thuộc điều kiện chế tạo mẫu để tạo ra tạp Ag ở vị trí thay thế Zn hay điền kẽ trong mạng tinh thể ZnO. Đây là tính chất đặc biệt của tạp Ag trong vật liệu ZnO. Từ những thực trạng trên, chúng tôi đã chọn vật liệu ZnO pha tạp Ag là đối tượng nghiên cứu trong bài báo này nhằm chế tạo màng trong suốt có điện trở suất thấp và cho ánh sáng trong vùng khả kiến truyền qua.

2. Thực nghiệm

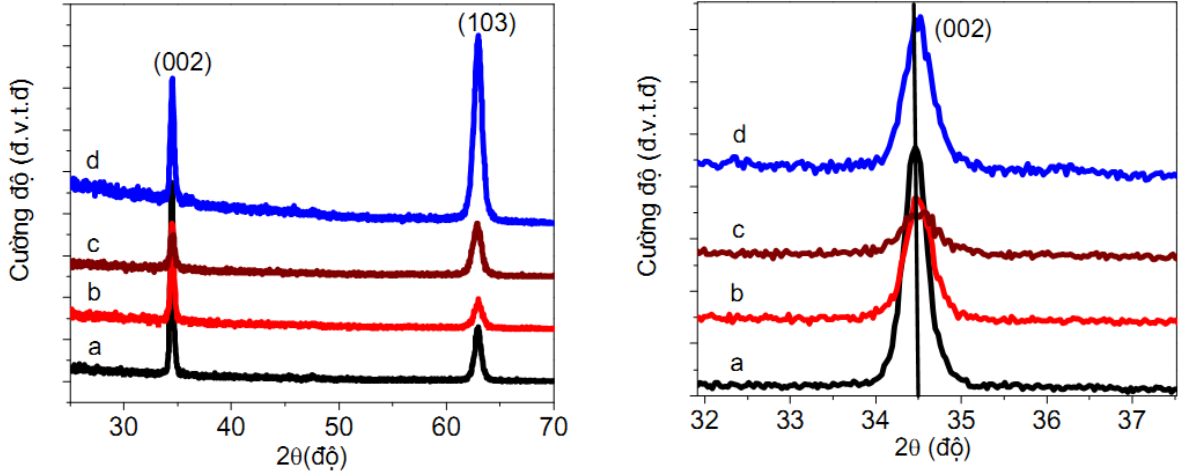
Trong bài báo này, các màng mỏng ZnO:Ag (0%, 1%, 2%, 4% mol) được chế tạo bằng phương pháp phun xạ r.f. magnetron. Thiết bị phun xạ được sử dụng là hệ mini Sputter (ULVAC - Nhật Bản) tại Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Ban đầu hệ được hút chân không đến áp suất 10^{-4} Pa. Ở giai đoạn tiếp theo áp suất trong buồng mẫu được duy trì cỡ 1 Pa bằng cách bơm thêm khí Ar. Áp suất này được duy trì ổn định trong quá trình phun xạ. Các màng được chế tạo với 3 công suất phun xạ khác nhau: 125W, 150W, 175W với thời gian phun xạ được giữ trong 20 phút và

không gia nhiệt để. Độ dày các màng thu được tăng dần từ 800 nm lên 1000 nm khi tăng công suất phún xạ từ 125W lên 175W.

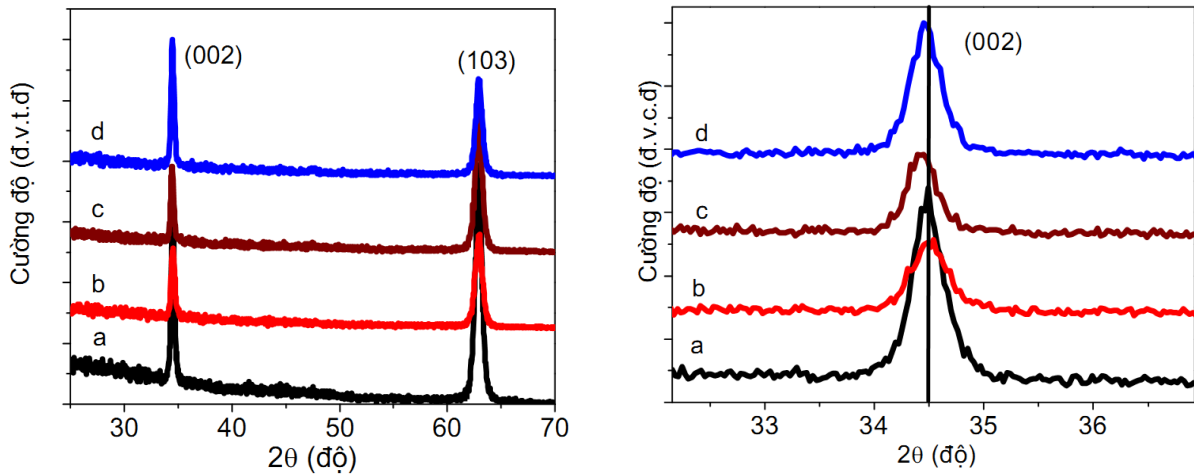
3. Kết quả và thảo luận

Các tính chất cấu trúc, tính chất quang và tính chất điện của các màng ZnO:Ag được khảo sát sau khi chế tạo thành công với các nồng độ pha tạp Ag khác nhau bằng phương pháp phún

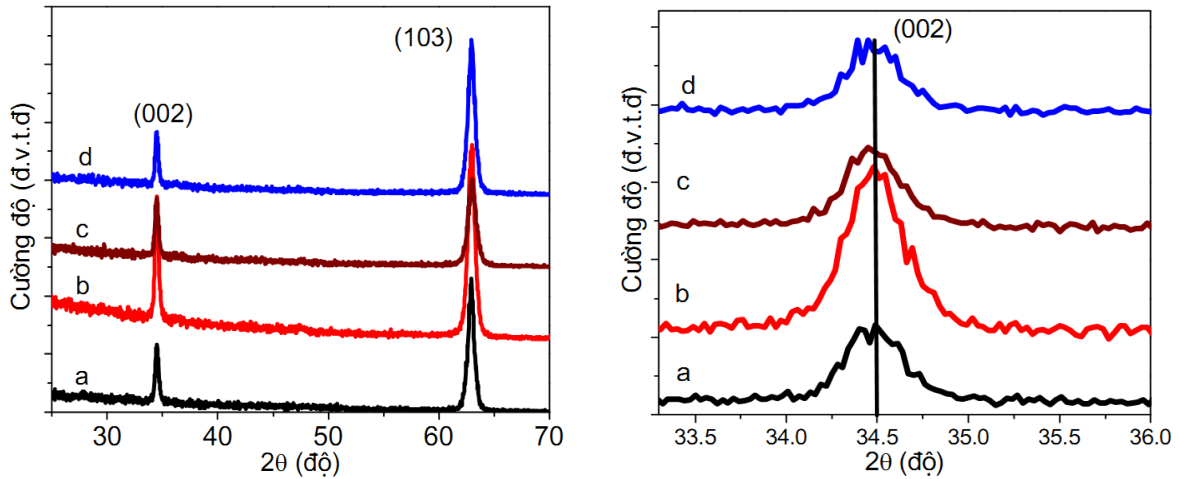
xạ tại các công suất khác nhau (125W, 150W, 175W) trong thời gian 20 phút. Giảm độ nhiễu xạ tia X các mẫu màng ZnO:Ag (trên đế thủy tinh không gia nhiệt khi tạo màng) chế tạo với các nồng độ Ag trong bia khác nhau 0%, 1%, 2% và 4% ở áp suất khí Ar 1Pa và công suất phún xạ 125W, 150W và 175W được trình bày trên các Hình 1, 2, 3.



Hình 1: Giảm độ nhiễu xạ tia X (hình trái) và phóng đại vùng đỉnh (002) (hình phải) của mẫu màng ZnO (a) và ZnO pha tạp Ag: 1% (b); 2% (c) và 4% (d) phún xạ ở công suất 125W.



Hình 2: Giảm độ nhiễu xạ tia X (bên trái) và phóng đại vùng đỉnh (002) (bên phải) của mẫu màng ZnO (a) và ZnO pha tạp Ag: 1% (b); 2% (c) và 4% (d) phún xạ ở công suất 150W.

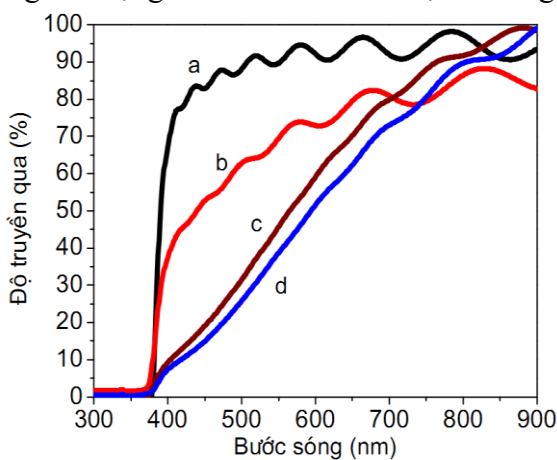


Hình 3: Giản đồ nhiễu xạ tia X (hình trái) và phóng đại vùng đỉnh (002) (hình phải) của mẫu màng ZnO (a) và ZnO pha tạp Ag: 1% (b); 2% (c) và 4% (d) phún xạ ở công suất 175W.

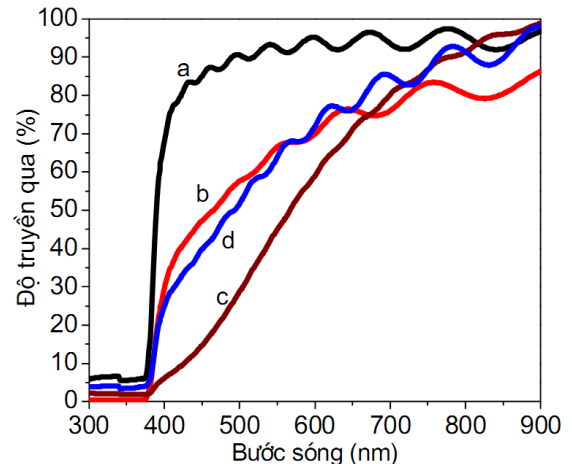
Sự dịch mạnh về phía góc thấp của đỉnh nhiễu xạ của mặt (002) trên các mẫu màng ZnO:Ag có nồng độ 2% và 4% xảy ra khi phún xạ tạo màng ở công suất nguồn RF 150W, có thể hiểu là do tạp Ag đã làm thay đổi hằng số mạng khi được khuếch tán vào tinh thể ZnO. Tuy vậy, sự dịch đỉnh nhiễu xạ ứng với mặt (002) của tinh thể ZnO rất nhỏ khi phún xạ tạo màng ở công suất nguồn RF 125W và 175W trên các mẫu màng ZnO:Ag. Các nghiên cứu XRD tiếp theo sẽ phải thực hiện tiếp trong điều kiện chủ động được việc thay đổi nhiệt độ để lắng đọng để làm sáng tỏ vấn đề trên. Tuy nhiên các mẫu đều có giá trị hằng số mạng gần với giá trị hằng số mạng của ZnO ở điều kiện thường

($c = 5,206\text{\AA}$, $c = 3,249\text{\AA}$) chứng tỏ pha tạp không làm biến dạng quá nhiều mạng tinh thể của ZnO. Kích thước tinh thể trung bình của các màng ZnO pha Ag với nồng độ khác nhau được ước tính thông qua độ rộng ở nửa cực đại của đỉnh (002) bằng cách sử dụng công thức Debye Sherrer. Kích thước này thay đổi trong khoảng từ 20nm đến 28nm, tùy điều kiện tạo mẫu.

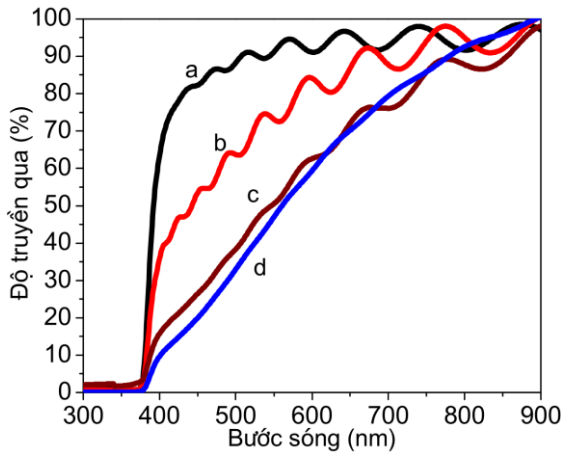
Hình 4, 5, 6 thể hiện kết quả đo phổ truyền qua trong vùng ánh sáng nhìn thấy của màng ZnO:Ag (1%, 2%, 4%) phún xạ ở các công suất khác nhau. Các vân giao thoa xuất hiện trong phổ chứng tỏ các màng tạo ra có độ phẳng cao và đồng đều tốt.



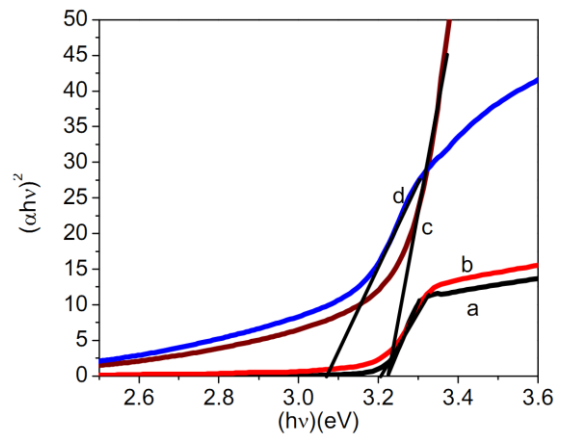
Hình 4: Phổ truyền qua của mẫu màng ZnO (a) và ZnO pha tạp Ag: 1% (b); 2% (c) và 4% (d) phún xạ ở công suất 125W.



Hình 5: Phổ truyền qua của mẫu màng ZnO (a) và ZnO pha tạp Ag: 1% (b); 2% (c) và 4% (d) phún xạ ở công suất 150W.



Hình 6: Phổ truyền qua của mẫu màng ZnO (a) và ZnO pha tạp Ag: 1% (b); 2% (c) và 4% (d) phún xạ ở công suất 175W [17].

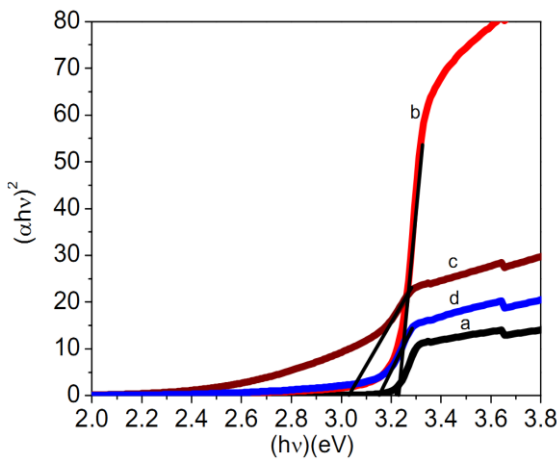


Hình 7: Đồ thị Tauc của mẫu màng ZnO (a) và ZnO pha tạp Ag: 1% (b); 2% (c) và 4% (d) phún xạ ở công suất 125W.

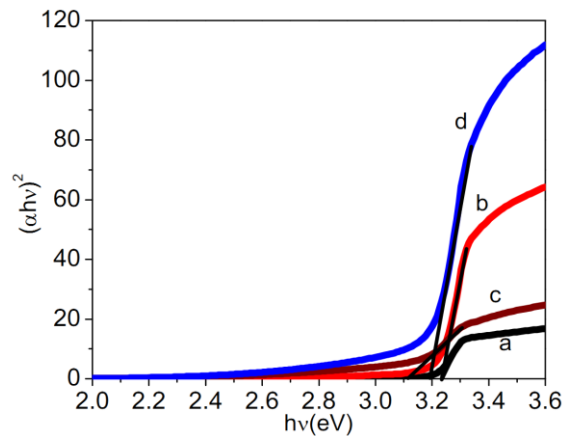
Độ truyền qua của các màng ZnO là trên 90%, trong khi độ truyền qua của các màng ZnO:Ag bị giảm đi khi tăng nồng độ Ag pha tạp vào mạng ZnO. Tuy nhiên, độ truyền qua vẫn đạt khoảng 70% cho màng pha tạp 1%. Khi lượng Ag pha tạp tăng, bờ vùng hấp thụ dịch về phía bước sóng dài, độ rộng vùng cấm nhỏ lại.

Do cấu trúc vùng năng lượng của tinh thể ZnO là vùng cấm thẳng nên khi biểu diễn sự phụ thuộc của $(\alpha h\nu)^2$ vào $h\nu$ ta có thể tính được năng lượng vùng cấm của màng ZnO và

ZnO:Ag (Hình 7, 8, 9). Giá trị độ rộng vùng cấm E_g của các màng ZnO và ZnO:Ag giảm so với E_g của mẫu khối ở nhiệt độ phòng là 3,37eV (Bảng 1), tương tự như kết quả thu trên mẫu màng của R.K. Gupta [18]. Giá trị độ rộng vùng cấm của E_g mẫu màng ZnO:Ag phụ thuộc vào công suất phún xạ và lượng Ag pha tạp ban đầu: độ rộng vùng cấm E_g của màng ZnO:Ag pha tạp mạnh có xu hướng giảm hơn so với E_g của màng ZnO, trong khi E_g của màng ZnO không thay đổi theo công suất phún xạ.



Hình 8: Đồ thị Tauc của mẫu màng ZnO (a) và ZnO pha tạp Ag: 1% (b); 2% (c) và 4% (d) phún xạ ở công suất 150W.



Hình 9: Đồ thị Tauc của mẫu màng ZnO (a) và ZnO pha tạp Ag: 1% (b); 2% (c) và 4% (d) phún xạ ở công suất 175W.

Bảng 1. Giá trị độ rộng vùng cấm E_g của mẫu màng ZnO:Ag với các nồng độ khác nhau (0%, 1%, 2%, 4%) phún xạ ở các công suất 125W, 150W và 175W.

E_g (eV)	Mẫu	ZnO	ZnO:1%Ag	ZnO:2%Ag	ZnO:4%Ag
	Công suất				
	125W	3,23	3,21	3,23	3,07
	150W	3,22	3,22	3,03	3,15
	175W	3,23	3,23	3,12	3,20

Tính chất điện với các thông số như độ linh động, nồng độ hạt tải, điện trở suất... là tính chất quan trọng của một màng bán dẫn, giúp ta đánh giá được khả năng ứng dụng mẫu chế tạo trong công nghệ linh kiện bán dẫn. Kết quả đo hiệu ứng Hall của mẫu màng ZnO pha 1%, 2%, 4% Ag phún xạ ở các công suất 125W, 150W, 175W được trình bày trong Bảng 2.

Tất cả các mẫu màng ZnO:Ag đều là loại n, dẫn điện tốt $\rho \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$. Màng có điện trở suất nhỏ nhất là $\rho = 8 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ khi pha 1% Ag và phún xạ ở công suất 125W. Giá trị điện trở suất thấp này tương đương với điện trở suất thu được trên màng ZnO:Ag chế tạo bằng phương pháp lắng đọng bằng chùm xung laze [18], bốc bay chùm điện tử [12], phún xạ RF [19]. Tạp Ag là tạp lưỡng tính, có thể tạo ra các mức acceptor hay donor trong vùng cấm của ZnO, tùy thuộc Ag thay thế Zn hay ở vị trí điền kẽ [18,19]. Tùy thuộc vào nồng độ acceptor hay donor do Ag tạo ra trong ZnO nhiều hay ít mà vật liệu ZnO:Ag thể hiện tính dẫn loại p hay n. Ngoài ra, nồng độ acceptor do Ag tạo ra còn bị bù trừ bởi các donor tạo do các sai hỏng nội tại của mạng ZnO (nút khuyết, điền kẽ Oxi,...).

Bản thân sự khuếch tán Ag vào ZnO cũng có thể làm tăng cường nồng độ sai hỏng của mạng ZnO. Do vậy, phương pháp phún xạ RF và các điều kiện thực nghiệm tạo màng ZnO:Ag sử dụng trong bài báo này chỉ tạo ra được màng dẫn ZnO:Ag tốt loại n với hạt tải điện chủ yếu là các điện tử. Điều này một lần nữa khẳng định tính dẫn của tạp Ag trong vật liệu ZnO bị chi phối mạnh bởi điều kiện chế tạo mẫu (nguồn bia ZnO:Ag, chế độ phún xạ, cấu hình hệ phún xạ, nhiệt độ đế,...). Trong bài báo này, sự hạn chế về việc chủ động thiết lập nhiệt độ đế trong quá trình lắng đọng đã không giúp giải thích được tường minh sự thay đổi điện trở suất của màng khi thay đổi nồng độ Ag trên bia và công suất phún xạ. Các nghiên cứu tiếp theo là cần thiết để làm sáng tỏ hơn vấn đề này. Khi tăng nồng độ pha tạp, nhìn chung nồng độ hạt tải có xu hướng đạt cực đại ở giá trị pha tạp 2% dẫn đến giá trị độ dẫn cực đại ở nồng độ pha tạp này. Ở nồng độ pha tạp cao hơn, các nguyên tử Ag có thể không ở vị trí thay thế cho Zn mà vào các vị trí sai hỏng như điền kẽ làm giảm độ linh động điện tử cũng như độ dẫn của màng.

Bảng 2. Giá trị các tính chất điện mẫu màng ZnO:Ag (1%, 2%, 4%) tại công suất phún xạ 125W, 150W, 175W.

Công suất phún xạ	Màng	Nồng độ hạt tải ($\times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)	Độ linh động ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	Điện trở suất ($\times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$)
125W	ZnO :Ag (1%)	8,6	18,2	0,8
	ZnO :Ag (2%)	18,8	9,6	17,9
	ZnO :Ag (4%)	0,5	6,6	17,4
150W	ZnO :Ag (1%)	1,4	9,2	9,7
	ZnO :Ag (2%)	2,2	27,8	3,0
	ZnO :Ag (4%)	4,1	12	1,9

175W	ZnO :Ag (1%)	1,9	18,9	3,1
	ZnO :Ag (2%)	4,9	13,7	1,8
	ZnO:Ag (4%)	0,2	5,5	59,7

4. Kết luận

Các màng mỏng ZnO và ZnO:Ag được chế tạo bằng phương pháp phun xạ r.f. magnetron với các công suất khác nhau 125W, 150W, 175W. Các tính chất cấu trúc, quang và điện của màng dẫn trong suốt được nghiên cứu chi tiết để tìm ra chế độ tạo màng dẫn có độ dẫn điện tốt nhất. Tính chất điện của màng ZnO:Ag bị ảnh hưởng bởi công suất phun xạ và nồng độ Ag pha tạp. Các màng đều dẫn điện tốt, trong đó màng có điện trở suất nhỏ nhất là màng ZnO pha tạp 1% Ag phun xạ ở công suất 125W có điện trở suất $\rho = 8 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, có thể ứng dụng làm điện cực dẫn trong suốt trên các linh kiện quang điện tử.

Lời cảm ơn

NCS Trần Thị Hà được tài trợ bởi Tập đoàn Vingroup - Công ty CP và hỗ trợ bởi Chương trình học bổng thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), Viện Nghiên cứu Dữ liệu lớn, mã số VINIF.2021.TS.160.

Tài liệu tham khảo

- [1] P. Mbule, D. Wang, R. Grieseler, P. Schaaf, B. Muhsin, H. Hoppe, B. Mothudi, M. Dhlamini, *Aluminum-doped ZnO thin films deposited on flat and nanostructured glass substrates: Quality and performance for applications in organic solar cells*, Sol. Energy. 172 (2018) 219–224.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.007>.
- [2] F. Dabir, H. Esfahani, F. Bakhtiargonbadi, Z. Khodadadi, *Study on microstructural and electro-optical properties of sol-gel derived pure and Al/Cu-doped ZnO thin films*, J. Sol-Gel Sci. Technol. 96 (2020) 529–538.
<https://doi.org/10.1007/s10971-020-05269-0>.
- [3] N.T. Huong, N.V. Tuyen, N.H. Hong, *Structural properties of P-doped ZnO*, Mater. Chem. Phys. 126 (2011) 54–57.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.12.012>.
- [4] M.L. Lin, J.M. Huang, C.S. Ku, C.M. Lin, H.Y. Lee, J.Y. Juang, *High mobility transparent conductive Al-doped ZnO thin films by atomic layer deposition*, J. Alloys Compd. 727 (2017) 565–571.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.207>.
- [5] C. Moditswe, C.M. Muiva, A. Juma, *Highly conductive and transparent Ga-doped ZnO thin films deposited by chemical spray pyrolysis*, Optik (Stuttg). 127 (2016) 8317–8325.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.06.033>.
- [6] N.V. Tuyen, N.N. Long, T.T.Q. Hoa, N.X. Nghia, D.H. Chi, K. Higashimine, T. Mitani, T.D. Canh, *Indium-doped zinc oxide nanometre thick disks synthesised by a vapour-phase transport process*, J. Exp. Nanosci. 4 (2009) 243–252.
<https://doi.org/10.1080/17458080802627482>.
- [7] S. Dev, P. Kumar, A. Rani, A. Agarwal, R. Dhar, *Development of indium doped ZnO thin films for highly sensitive acetylene (C₂H₂) gas sensing*, Superlattices Microstruct. 145 (2020) 106638.
<https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106638>.
- [8] Y.F. Lu, K.W. Wu, Y.J. Zeng, Z.Z. Ye, J.Y. Huang, L.P. Zhu, B.H. Zhao, *Local p-type conduction of Na-doped ZnO thin films grown by MOCVD*, Chem. Phys. Lett. 582 (2013) 82–85.
<https://doi.org/10.1016/j.cplett.2013.04.026>.
- [9] D.Y. Wang, J. Zhou, G.Z. Liu, *Effect of Li-doped concentration on the structure, optical and electrical properties of p-type ZnO thin films prepared by sol-gel method*, J. Alloys Compd. 481 (2009) 802–805.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.03.111>.
- [10] W. Jun, Y. Yintang, *Deposition of K-doped p type ZnO thin films on (0001) Al₂O₃ substrates*, Mater. Lett. 62 (2008) 1899–1901.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.10.035>.
- [11] M. Suja, S.B. Bashar, M.M. Morshed, J. Liu, *Realization of Cu-doped p-type ZnO thin films by molecular beam epitaxy*, ACS Appl. Mater. Interfaces. 7 (2015) 8894–8899.
<https://doi.org/10.1021/acsami.5b01564>.
- [12] I.S. Kim, E.K. Jeong, D.Y. Kim, M. Kumar, S.Y. Choi, *Investigation of p-type behavior in Ag-doped ZnO thin films by E-beam evaporation*, Appl. Surf. Sci. 255 (2009) 4011–4014.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.10.117>.
- [13] M.A. Myers, J.H. Lee, H. Wang, *Highly stable non-polar p-type Ag-doped ZnO thin films grown on r-cut sapphire*, Mater. Lett. 100 (2013) 78–81.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.02.115>.
- [14] Y.J. Zeng, Z.Z. Ye, W.Z. Xu, B. Liu, Y. Che, L.P. Zhu, B.H. Zhao, *Study on the Hall-effect and*

- photoluminescence of N-doped p-type ZnO thin films*, Mater. Lett. 61 (2007) 41–44.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.04.001>.
- [15] X.H. Pan, J. Jiang, Y.J. Zeng, H.P. He, L.P. Zhu, Z.Z. Ye, B.H. Zhao, X.Q. Pan, *Electrical and optical properties of phosphorus-doped p -type ZnO films grown by metalorganic chemical vapor deposition*, J. Appl. Phys. 103 (2008) 1–5.
<https://doi.org/10.1063/1.2828017>.
- [16] S.K. Pandey, S. Kumar Pandey, V. Awasthi, M. Gupta, U.P. Deshpande, S. Mukherjee, *Influence of in-situ annealing ambient on p-type conduction in dual ion beam sputtered Sb-doped ZnO thin films*, Appl. Phys. Lett. 103 (2013) 1–6.
<https://doi.org/10.1063/1.4818819>.
- [17] T.T. Ngoc Anh, T. Thi Ha, N. Viet Tuyen, P. Nguyen Hai, *Characteristics of Ag Doped ZnO Thin Films Prepared by Sputtering Method*, VNU J. Sci. Math. - Phys. 35 (2019) 87–92.
<https://doi.org/10.25073/2588-1124/vnumap.4365>.
- [18] R.K. Gupta, K. Ghosh, P.K. Kahol, *Effect of substrate temperature on structural and optoelectrical properties of silver doped zinc oxide thin films*, Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures. 42 (2010) 2000–2004.
<https://doi.org/10.1016/j.physe.2010.03.010>.
- [19] D.R. Sahu, *Studies on the properties of sputter-deposited Ag-doped ZnO films*, Microelectronics J. 38 (2007) 1252–1256.
<https://doi.org/10.1016/j.mejo.2007.09.025>.