

EFFECT OF OXYGEN RATIO ON THE STRUCTURE, OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF NiO THIN FILMS

Pham Viet Tung, Nguyen Dang Tuyen, Doan Quang Tri, Duong Thanh Tung, Nguyen Duy Cuong*
Hanoi University of Science and Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	15/5/2023	Nickel oxide thin films have potential applications in various fields, particularly photovoltaics. In this study, nickel oxide thin films were deposited on glass substrates by the sputtering method at 100 °C with varying oxygen ratios ($O_2/(Ar+O_2) \times 100\%$). When the oxygen ratio was changed from 30% to 70%, the film's structural, optical, and electrical properties were affected significantly. As the oxygen concentration increased, the crystallinity decreased, and the films became nearly amorphous at an oxygen concentration of 70%; the size of the crystalline particles decreased gradually. All NiO films deposited in the range of 30-70% oxygen had p-type semiconductor properties. The carrier mobility of the NiO films was relatively high, ranging from $5.384 \times 10^{19} - 4.339 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, suitable for hole transport applications. These results suggest that nickel oxide thin films have potential applications in optoelectronic devices, particularly in next-generation thin-film solar cells.
Revised:	03/7/2023	
Published:	03/7/2023	
KEYWORDS		
NiO thin film		
Sputtering		
P-type semiconductor		
Carrier concentration		
Oxygen ratio		

NGHIÊN CỨU SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA TỶ LỆ ÔXY LÊN CÁC ĐẶC TÍNH CẤU TRÚC, ĐIỆN VÀ QUANG CỦA MÀNG MỎNG NiO

Phạm Việt Tùng, Nguyễn Đăng Tuyền, Đoàn Quảng Tri, Dương Thanh Tùng, Nguyễn Duy Cường*
Đại học Bách khoa Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	15/5/2023	Màng mỏng bán dẫn ôxit niken có tiềm năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau đặc biệt là trong các tế bào quang điện. Trong nghiên cứu này, màng mỏng ôxit niken được lắng đọng trên đế thủy tinh bằng phương pháp phún xạ xoay chiều ở 100 °C với các tỷ lệ ôxy đầu vào khác nhau. Khi tỷ lệ phần trăm ôxy ($O_2/(Ar+O_2) \times 100\%$) được thay đổi từ 30% đến 70% thì các đặc tính cấu trúc, quang và điện biến đổi mạnh. Khi tăng nồng độ ôxy, độ kết tinh giảm dần và chuyển sang trạng thái gần như vô định hình ở nồng độ ôxy 70%; kích thước các hạt tinh thể giảm dần. Tất cả các màng NiO được lắng đọng trong khoảng 30-70% ôxy đều có đặc tính bán dẫn loại p. Độ linh động hạt tải của các màng NiO khá cao, nằm trong khoảng $5,384 \times 10^{19} - 4,339 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, phù hợp cho ứng dụng làm lớp vận chuyển lỗ trống. Các kết quả này cho thấy màng mỏng NiO có tiềm năng ứng dụng cho các thiết bị quang điện, đặc biệt là pin mặt trời màng mỏng thế hệ mới.
Ngày hoàn thiện:	03/7/2023	
Ngày đăng:	03/7/2023	
TỪ KHÓA		
Màng mỏng NiO		
Phún xạ		
Bán dẫn loại p		
Nồng độ hạt tải		
Tỷ lệ ôxy		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.7940>

* Corresponding author. Email: cuong.nguyenduy@hust.edu.vn

1. Giới thiệu

Nikel ôxít (NiO) là vật liệu bán dẫn có độ rộng vùng cấm nằm trong khoảng 3,6-4,0 eV [1]. Thêm nữa, NiO có độ dẫn nhiệt tốt, độ ổn định hóa học cao, giá thành thấp, không độc hại và vừa có đặc tính bán dẫn loại n hoặc loại p. Do các đặc tính thú vị này mà NiO được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu cho nhiều ứng dụng trong một số lĩnh vực như pin năng lượng mặt trời [2],[3], quang điện tử [4], điện cực trong suốt dẫn điện [5], cảm biến khí [6], pin tích trữ [7] và quang xúc tác [8], [9].

Màng mỏng NiO có thể được chế tạo bằng một số phương pháp khác nhau như: lắng đọng bằng xung laser [10], phương pháp bốc bay [11], phương pháp phun xạ [12], phương pháp phun phủ [13], quay phủ [14]. Trong các phương pháp này, phương pháp phun xạ đang là một trong những phương pháp chế tạo màng mỏng NiO được sử dụng phổ biến nhất. Phương pháp phun xạ cho phép tạo ra các lớp màng có độ dày từ vài nm đến vài μm . Việc chế tạo các màng mỏng bán dẫn loại n, hạt tải là các điện tử, khá dễ dàng. Tuy nhiên, để tổng hợp được các màng mỏng loại p, hạt tải là lỗ trống, là khá khó khăn. Như trong lĩnh vực pin năng lượng mặt trời thế hệ mới: pin perovskite, pin polyme hay pin sử dụng chất nhuộm nhạy sáng (Dye Sensitized Solar Cell: DSSC), lớp bán dẫn loại p thường được sử dụng là các polyme dẫn điện loại p (hole conducting polymer). Tính ổn định của các polyme này là khá thấp và đặc tính quang điện giảm nhanh theo thời gian. Để thay thế các polyme dẫn loại p này thì gần đây NiO được xem như là vật liệu rất tiềm năng và đang được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm.

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày những kết quả nghiên cứu của màng mỏng NiO được chế tạo bằng phương pháp phun xạ lên đế thủy tinh. Sự ảnh hưởng của tỷ lệ khí đầu vào lên các đặc tính cấu trúc, điện và quang được khảo sát một cách chi tiết. Từ đó đánh giá tiềm năng ứng dụng của vật liệu trong chế tạo pin năng lượng mặt trời.

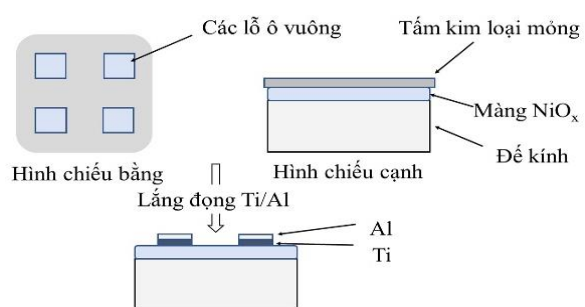
2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Chế tạo màng mỏng NiO

Các màng NiO được lắng đọng trên đế thủy tinh bằng phương pháp phun xạ. Các đế thủy tinh có bề dày 2 mm và kích thước 5 cm x 5 cm. Trước khi đưa vào phun xạ, đế thủy tinh được rung siêu âm lần lượt với cồn và nước khử ion để làm sạch và cuối cùng được nung nóng trong lò để loại bỏ hoàn toàn tạp chất trên bề mặt. Màng mỏng ôxít nikel được phun xạ bằng nguồn xoay chiều (radio frequency: rf) (Hệ phun xạ AJA của Mỹ tại Viện ITIMS, Đại học Bách khoa Hà Nội). Bia phun xạ là bia nikel kim loại có độ sạch 99,999% với đường kính 5,08 cm. Tất cả các màng NiO được lắng đọng ở điều kiện công suất nguồn là 250 W, áp suất 4 mtorr trong thời gian 30 phút. Chi tiết về điều kiện lắng đọng các màng NiO được cho bởi Bảng 1.

Bảng 1. Điều kiện phun xạ màng NiO

Điều kiện phun xạ	Thông số
Khoảng cách từ bia đến đế	7 cm
Áp suất ban đầu	5×10^{-7} torr
Áp suất phun xạ	4 mTorr
Nhiệt độ	100 °C
Nguồn phun xạ	rf
Công suất	250 W
Tỷ lệ $\text{O}_2/(\text{O}_2+\text{Ar})$	30-70%
Thời gian phun	30 phút



Hình 1. Ảnh minh họa cho quá trình lắng đọng Ti/Al hỗ trợ trong việc đo Hall

Để đo được nồng độ và độ linh động hạt tải của các màng NiO bằng phương pháp đo Hall, các điện cực Al/Ti đã được lắng đọng lên trên bề mặt của màng NiO. Cấu trúc của điện cực đo Hall được mô tả như trên Hình 1. Lớp Ti đóng vai trò là lớp đệm nhằm tăng độ bám dính; lớp này

được chế tạo bằng phương pháp phun xạ. Lớp điện cực Al được chế tạo bằng phương pháp bốc bay nhiệt trong chân không.

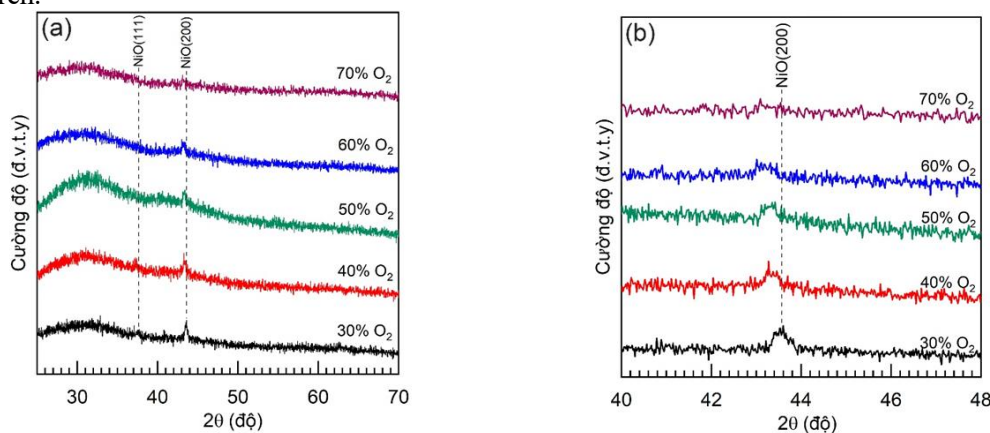
2.2. Các phép đo phân tích

Cấu trúc pha, độ kết tinh của các màng NiO được đo bằng máy nhiễu xạ tia X (D2 Phaser, Bruker) sử dụng bức xạ Cu-K α , $\lambda = 1,54178$ Å. Hình thái học bề mặt và bề dày của các màng NiO được đo bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM, JSM-7600F, JEOL). Loại bán dẫn (n hay p), độ linh động và nồng độ hạt tải được xác định bằng hệ đo Hall (DX-648 của công ty LakeShore). Phổ truyền qua của các màng NiO được đo trên hệ UV/Vis/NIR Curry 5000.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Phân tích cấu trúc của màng NiO_x

Hình 2 là giản đồ nhiễu xạ tia X của các màng NiO được phun xạ ở các tỷ lệ oxy khác nhau. Quan sát hình 2(a) ta thấy các đỉnh nhiễu xạ xuất hiện tại các vị trí góc $2\theta = 37,2$ và $43,3^\circ$. Đối chiếu với thẻ chuẩn của giản đồ nhiễu xạ tia x (JCPDS 047-1049) thì các đỉnh nhiễu xạ này tương ứng với các mặt phẳng mạng (111) và (200) của tinh thể NiO; các tinh thể này có cấu trúc lập phương tâm mặt. Cường độ của các đỉnh nhiễu xạ khá thấp, điều này cho thấy các màng NiO đã chế tạo được có độ kết tinh không cao. Nguyên nhân của độ kết tinh thấp có thể là do nhiệt độ lắng đọng thấp, 100°C . Khi tỷ lệ $\text{O}_2/(\text{O}_2+\text{Ar})$ tăng dần, sự thay đổi mạnh về cấu trúc đã xảy ra, cụ thể là cường độ đỉnh nhiễu xạ (111) giảm dần. Khi tỷ lệ đạt 60%, đỉnh (111) hoàn toàn biến mất, chỉ còn tồn tại đỉnh (200). Điều này cho thấy rằng, ở môi trường càng giàu O_2 , độ kết tinh của màng NiO càng kém đi. Sự giảm xuống của độ kết tinh khi tăng tỷ lệ oxy có thể được giải thích với hai lý do như sau. Lý do thứ nhất: oxy sau khi đi vào buồng phun xạ sẽ bị ion hóa thành O^{2-} , do đó không tham gia vào quá trình bắn phá vào bia Ni, các ion O^{2-} chỉ đóng vai trò phản ứng với các ion Ni^{2+} để hình thành nên ôxít nickel. Cho nên tăng tỷ lệ oxy đồng nghĩa với giảm hiệu suất phun xạ và do đó làm giảm độ kết tinh của màng. Lý do thứ hai: khi tăng tỷ lệ oxy dẫn tới một số nguyên tử oxy sẽ điền vào các vị trí xen kẽ trong mạng nền NiO, điều này làm cho tính trật tự của mạng nền NiO giảm dần, do đó độ kết tinh của các màng NiO cũng giảm theo. Để nghiên cứu kỹ hơn về lý do thứ hai, chúng tôi đã phóng đại đỉnh (200) như trong hình 2(b). Có thể thấy rằng khi tăng tỷ lệ oxy thì đỉnh nhiễu xạ có xu hướng dịch về phía góc 2θ bé hơn. Điều này có nghĩa là hằng số mạng tăng lên với sự tăng lên của tỷ lệ oxy đầu vào. Nguyên nhân của sự tăng hằng số mạng chỉ có thể là do các nguyên tử oxy đã điền vào các vị trí xen kẽ trong mạng nền NiO. Đây cũng chính là một trong những nguyên nhân làm giảm độ kết tinh của màng NiO như đã đề cập ở trên.



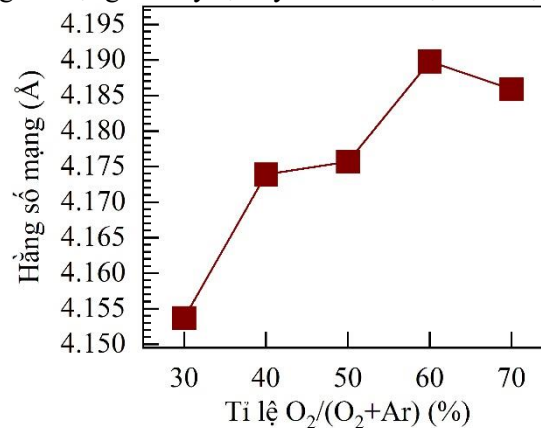
Hình 2. Giản đồ XRD của các màng NiO lắng đọng ở các tỷ lệ $\text{O}_2/(\text{O}_2+\text{Ar})$ khác nhau (a) và hình ảnh phóng đại của đỉnh (200) (b)

Để nghiên cứu sự biến đổi của mạng tinh thể khi thay đổi tỷ lệ oxy đầu, hằng số mạng được tính toán theo công thức Bragg như sau:

$$a = d^2 \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (1)$$

Trong đó: a: hằng số mạng tinh thể,
d: khoảng cách giữa hai mặt tinh thể liên tiếp,
h, k, l: chỉ số Miller của mặt tinh thể.

Kết quả tính toán hằng số mạng theo tỷ lệ oxy đầu vào được thể hiện ở trên Hình 3.



Hình 3. Sự thay đổi của hằng số mạng theo tỷ lệ oxy đầu vào

Ta thấy rằng, hằng số mạng có xu hướng tăng lên khi tăng tỷ lệ oxy đầu vào. Cụ thể, khi tăng tỷ lệ oxy từ 30-70% thì hằng số mạng tăng từ 4,154 lên 4,190 Å. Đây là bằng chứng cho thấy một lượng oxy dư đã điền vào các vị trí xen kẽ trong mạng nền NiO.

Hình ảnh bề mặt của màng NiO được phun xạ ở các tỷ lệ oxy khác nhau được trình bày ở trong Hình 4. Bề mặt của các màng NiO là khá nhẵn. Các hạt nano tinh thể ở các mẫu được phun xạ ở tỷ lệ oxy đầu vào 30 và 40% được nhìn thấy tương đối rõ ràng và có xu hướng giảm dần với sự tăng lên của tỷ lệ oxy. Tuy nhiên, khi tiếp tục tăng tỷ lệ oxy lên 50, 60 và 70% thì các hạt nano tinh thể NiO rất khó để quan sát. Nguyên nhân có thể là do các màng NiO trong trường hợp này chủ yếu là vô định hình. Thêm nữa, một số vết nứt và các đảo xuất hiện ở trên bề mặt màng. Bề dày của các màng NiO với các tỷ lệ oxy 30, 40, 50, 60 và 70% lần lượt là 78, 75, 73, 70 và 66 nm (xem ảnh SEM mặt cắt trong Hình 4). Bề dày màng giảm dần với sự tăng lên của tỷ lệ oxy. Nguyên nhân của sự giảm này là do khi oxy sau khi bị ion hóa thành O²⁻ không tham gia vào quá trình phun xạ mà chỉ là chất phản ứng; chỉ có các ion Ar⁺ tham gia vào quá trình bốc bay vật liệu từ bia phun xạ. Do đó khi tăng tỷ lệ oxy sẽ làm giảm nồng độ Ar⁺ cho nên tốc độ phun xạ giảm.

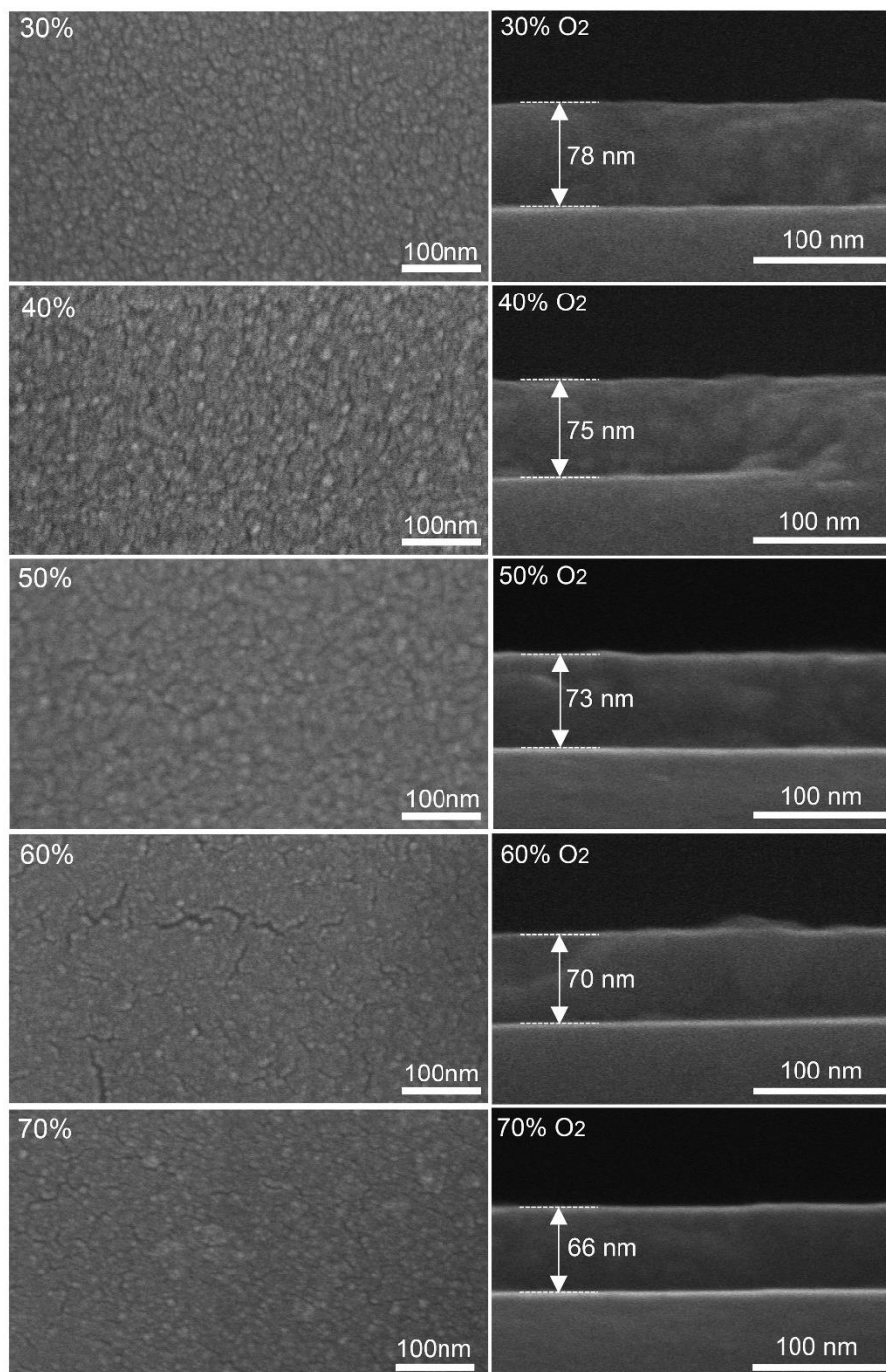
3.2. Đặc tính điện của màng NiO

Bảng 2 mô tả đặc tính điện của các màng NiO lắng đọng với hàm lượng oxy khác nhau, được đo bởi hệ đo hiệu ứng Hall. Vật liệu NiO có thể là bán dẫn loại n hoặc loại p tùy thuộc vào khuyết oxy hay khuyết nickel. Trường hợp khuyết nickel sẽ cho bán dẫn loại p; điều này thường xảy ra khi áp suất lắng đọng riêng phần oxy cao. Ngược lại, khi khuyết oxy sẽ cho bán dẫn loại n; trường hợp này xảy ra khi áp suất lắng đọng riêng phần oxy thấp [15]. Kết quả đo Hall (xem Bảng 2) cho thấy tất cả các màng được lắng đọng với tỷ lệ oxy nằm trong khoảng 30-70% đều cho bán dẫn loại p. Khi tăng tỷ lệ oxy từ 30 lên 60% thì nồng độ hạt tải tăng $4,033 \times 10^{20}$ lên $4,339 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ và độ linh động giảm từ $0,2799 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ xuống $0,0524 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Độ linh động giảm là do số lượng các điểm khuyết tật trong màng NiO tăng lên theo tỉ lệ O₂, phù hợp kết quả đo phân tích cấu trúc của XRD và SEM. Sự hình thành bán dẫn loại p của màng NiO là do sự không phù hợp về tỉ lệ hóa học được gây ra bởi các chỗ trống niken hoặc các nguyên tử oxy xen

kẽ. Vì vậy, hàm lượng oxy có sự ảnh hưởng lớn tới tính chất điện của các màng NiO. Từ nồng độ hạt và độ linh động của hạt tải chúng tôi đã tính điện trở suất của các màng NiO theo công thức (2):

$$\rho = \frac{1}{q \cdot \eta \cdot \mu} \quad (2)$$

Trong đó: ρ , q , η và μ tương ứng là điện trở suất, điện tích lỗ trống, nồng độ và độ linh động hạt tải.

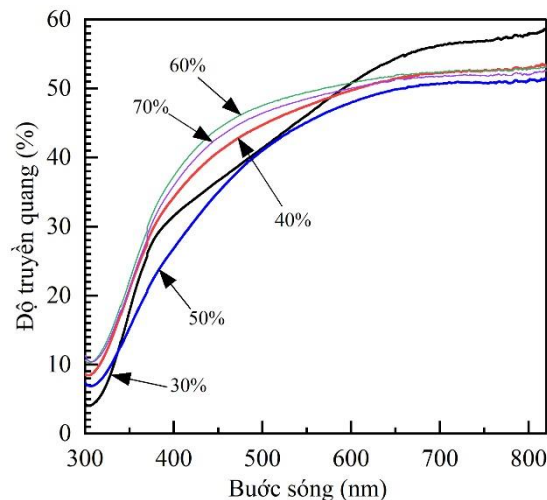


Hình 4. Ảnh FESEM bề mặt của các màng NiO được lắng đọng với các tỷ lệ $O_2/(O_2+Ar)$ khác nhau

Bảng 2. Bảng số liệu đo Hall gồm loại bán dẫn, nồng độ hạt tải và độ linh động hạt tải, và điện trở suất của các mẫu NiO được lắng đọng ở các tỷ lệ khác nhau

Tỷ lệ $O_2/(O_2+Ar)$	Loại bán dẫn	Nồng độ hạt tải cm^{-3}	Độ linh động hạt tải cm^2/Vs	Điện trở suất $\Omega.cm$
30%	p	$4,033 \times 10^{20}$	0,2799	0,055
40%	p	$9,288 \times 10^{20}$	0,17620	0,038
50%	p	$1,155 \times 10^{21}$	0,0781	0,069
60%	p	$4,339 \times 10^{21}$	0,0524	0,027
70%	p	$5,384 \times 10^{19}$	0,0102	11,381

Các kết quả tính toán được trình bày trong bảng 2. Giá trị điện trở suất của các màng NiO nằm trong khoảng 0,027-11,37 $\Omega.cm$, phù hợp cho làm lớp vận chuyển lỗ trống trong các tế bào pin mặt trời, không phù hợp cho ứng dụng làm điện cực trong suốt. Đối với lớp vận chuyển lỗ trống thì chiều dẫn điện là vuông góc với bề mặt mẫu nên quãng đường vận chuyển hạt tải là ngắn, do đó yêu cầu về điện trở suất của lớp này không cần quá thấp. Tuy nhiên, với điện cực trong suốt thì giá trị điện trở suất phải thấp vì phương vận chuyển hạt tải là song song với bề mặt mẫu. Ví dụ: điện cực trong suốt điển hình là ôxít thiếc pha tạp Indi (ITO), điện trở suất của ITO là $\sim 10^{-4}$ $\Omega.cm$ [16].



Hình 5. Phổ truyền qua của các màng NiO được lắng đọng ở các tỷ lệ ôxy khác nhau

3.3. Đặc tính quang của màng NiO

Hình 5 là phổ truyền qua của các màng NiO được chế tạo với các tỷ lệ ôxy khác nhau. Độ truyền qua của các mẫu được lắng đọng ở nồng độ ôxy thấp hơn, 30-50% O_2 , có sự thay đổi mạnh theo bước sóng ánh sáng. Tuy nhiên khi tăng lên 60% và 70% thì sự biến đổi của độ truyền qua trong vùng ánh sáng nhìn thấy có xu hướng giảm. Độ truyền qua tại bước sóng 550 nm của các màng NiO tương ứng với các tỷ lệ ôxy 30, 40, 50, 60 và 70% lần lượt là 46, 47, 45, 49 và 48%. Có thể thấy rằng độ truyền qua của các màng NiO là chưa cao, nguyên nhân có thể là do độ kết tinh của các màng NiO còn thấp và bề dày màng còn quá lớn. Để ứng dụng làm điện cực trong suốt thì độ truyền qua của các màng NiO cần phải được cải thiện thêm nữa. Từ phổ truyền qua, độ rộng vùng cấm của các màng NiO được xác định nằm trong khoảng 3,85-3,94 eV. Giá trị độ rộng năng lượng vùng cấm của các mẫu được lắng đọng ở 30, 40, 50, 60 và 70% lần lượt là 3,85; 3,95; 3,94; 3,91 và 3,90 eV. Độ rộng vùng cấm của các màng NiO được lắng đọng ở các tỷ lệ ôxy trong khoảng 30-70% không có sự thay đổi nhiều. Các giá trị độ rộng vùng cấm là tương đồng với một số kết quả đã công bố [17].

4. Kết luận

Các màng NiO loại p đã được lắng đọng bằng phương pháp phún xạ xoay chiều. Tỷ lệ ôxy đầu vào đã ảnh hưởng đến các đặc tính cấu trúc, điện, và quang của màng NiO. Tất cả các màng thu được đều có cấu trúc pha là NiO. Độ kết tinh của các màng NiO có xu hướng giảm khi tăng tỷ lệ ôxy đầu vào. Nồng độ hạt tải và độ linh động khi thay đổi tỷ lệ ôxy nằm trong khoảng 4.033×10^{18} - $5,384 \times 10^{19}$ (cm^{-3}) và 0,01-0,28 ($\text{cm}^2/\text{V.s}$). Nồng độ hạt tải chỉ ra rằng các màng NiO đã tổng hợp được phù hợp cho các ứng dụng làm điện cực dẫn điện trong suốt. Tuy nhiên, để ứng dụng làm điện cực trong suốt thì độ truyền qua của các màng NiO cần được cải thiện thêm nữa.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2022-BKA-15.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] H. Sato, T. Minami, S. Takata and T. Yamada, "Transparent conducting p-type NiO thin films prepared by magnetron sputtering," *Thin Solid Films*, vol.236, pp. 27-31, 1993.
- [2] E. A. Gibson, A. L. Smeigh, L. L. Pleux, J. Fortage, G. Boschloo, E. Blart, Y. Pellegrin, F. Odobel, A. Hagfeldt, and L. Hammarstrom, "A p-Type NiO-Based Dye-Sensitized Solar Cell with an Open-Circuit Voltage of 0.35 V," *Angew. Chem.*, vol. 121, pp. 4466 – 4469, 2009.
- [3] B. Zhang, J. Su, X. Guo, L. Zhou, Z. Lin, L. Feng, J. Zhang, J. Chang, and Y. Hao, "NiO/Perovskite Heterojunction Contact Engineering for Highly Efficient and Stable Perovskite Solar Cells," *Adv.Sci.*, vol. 7, pp. 1903044, 2020.
- [4] Y. Zhou, W. Peng, G. Xiang, Y. Liu, J. Zhang, J. Zhang, Rong Li, X. Zhu, H. Wang, and Y. Zhao, "All-inorganic green light-emitting diode based on p-NiO/CsPbBr₃/n-GaN heterojunction structure," *Journal of Luminescence*, vol. 258, pp. 119826, 2023.
- [5] J. D. Hwang and Y. J. Chiou, "Thermal treatment for enhancing performance of NiO/Ag/NiO transparent conducting electrode fabricated via magnetron radio-frequency sputtering," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 883, pp. 160892, 2021.
- [6] T. P. Mokoena, H. C. Swart, K. T. Hillie, Z. P. Tshabalala, M. Jozela, J. Tshilongo, and D. E. Motaung, "Enhanced propanol gas sensing performance of p-type NiO gas sensor induced by exceptionally large surface area and crystallinity," *Applied Surface Science*, vol. 571, 2022, Art. no. 151121.
- [7] T. R. Silva, V. D. Silva, L. S. Ferreira, A. J. M. Araujo, M. A. Morales, T. A. Simoes, C. A. Paskocimas, and D. A. Macedo, "Role of oxygen vacancies on the energy storage performance of battery-type NiO electrodes," *Ceramics International*, vol. 46, pp. 9233–9239, 2020.
- [8] J. Chen, M. Wang, J. Han, and R. Guo, "TiO₂ nanosheet/NiO nanorod hierarchical nanostructures: p–n heterojunctions towards efficient photocatalysis," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 562, pp. 313–321, 2020.
- [9] M. Usman, M. Adnan, S. Ali, S. Javed, and M. A. Akram, "Preparation and Characterization of PANI@NiO Visible Light Photocatalyst for Wastewater Treatment," *ChemistrySelect*, vol. 5, pp. 12618-12623, 2020.
- [10] S. D. Singh, A. Das, R. S. Ajimsha, M. N. Singh, A. Upadhyay, R. Kamparath, C. Mukherjee, P. Misra, S. K. Rai, A. K. Sinha, and T. Ganguli, "Studies on structural and optical properties of pulsed laser deposited NiO thin films under varying deposition parameters," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 66, pp. 186–190, 2017.
- [11] C. W. Lin, W. C. Chung, Z. D. Zhang, and M. C. Hsu, "P-channel transparent thin-film transistor using physical-vapor-deposited NiO layer," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 57, pp. 01AE01, 2018.
- [12] M. Terlemezoglu, O. Surucu, M. Isik, N. M. Gasanly, and M. Parlak, "Temperature-dependent optical characteristics of sputtered NiO thin films," *Appl. Phys. A*, vol.128, 2022, doi: 10.1007/s00339-021-05197-y.
- [13] I. L. P. Raj, S. Valanarasub, S. Vinoth, N. Chidhambaram, R. S. R. Isaac, M. Ubaidullah, S. Shaikh, and B. Pandit, "Highly sensitive ultraviolet photodetectors fabricated from rare earth metal ions doped

- NiO thin films via nebulizer spray pyrolysis method,” *Sensors and Actuators: A. Physical*, vol. 333, 2022, Art. no.113242.
- [14] S. K. Kim, H. J. Seok, D. H. Kim, D. H. Choi, S. J. Nam, S. C. Kim, and H. K. Kim “Comparison of NiO_x thin film deposited by spin-coating or thermal evaporation for application as a hole transport layer of perovskite solar cells,” *RSC Adv.*, vol. 10, pp. 43847-43852, 2020.
- [15] R. Molaei, R. Bayati, and J. Narayan, “Crystallographic Characteristics and p-Type to n-Type Transition in Epitaxial NiO Thin Film,” *Cryst. Growth Des.*, vol. 13, pp. 5459–5465, 2013.
- [16] J. B. Choi, J. H. Kim, K. A. Jeon, and S. Y. Lee, “Properties of ITO films on glass fabricated by pulsed laser deposition,” *Materials Science and Engineering: B*, vol. 102, pp. 376-379, 2003.
- [17] M. Shi, T. Qiu, B. Tang, G. Zhang, R. Yao, W. Xu, J. Chen, X. Fu, H. Ning, and J. Peng, “Temperature-Controlled Crystal Size of Wide Band Gap Nickel Oxide and Its Application in Electrochromism,” *Micromachines*, vol. 12, Art. no. 80, pp. 1-11, 2021.