



Original Article

# Effects of Some Factors on the Electrical Properties of Cu<sub>2</sub>O/ZnO Double Films Fabricated by Chemical Vapor Deposition Method

Trieu Thi Nguyet<sup>1,\*</sup>, Do Huy Hoang<sup>1</sup>, Nguyen Manh Hung<sup>2</sup>,  
Vu Thi Bich Ngoc<sup>1</sup>, Pham Anh Son<sup>1</sup>

<sup>1</sup>VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Z121 Factory, Vietnam Defence Industry, Ministry of National Defence, Hanoi, Vietnam

Received 08<sup>th</sup> May 2024

Revised 23<sup>rd</sup> May 2024; Accepted 04<sup>th</sup> July 2024

**Abstract:** The Cu<sub>2</sub>O/ZnO double films were fabricated using a chemical vapor deposition technique from zinc pivalate and copper(II) acetylacetonate precursors. The crystalline phase composition of the films was examined by powder X-ray diffraction. The film surface morphology was studied by scanning electron microscope and atomic force microscope. Film thickness was measured on a surface profilometer. The electrical properties of the fabricated films, such as mobility, carrier concentration, and resistivity, are determined by the Hall effect measurement method. The obtained results showed that the double film consisted of a Cu<sub>2</sub>O crystal layer with a cubic structure grown on a ZnO crystal layer, with an uneven surface. Cu<sub>2</sub>O/ZnO double film with Cu<sub>2</sub>O layer deposited at 240 °C had the best electrical properties. Increasing the thickness of the Cu<sub>2</sub>O layer reduced the resistivity, in which the carrier concentration of the double film was the highest, and the carrier mobility was the lowest when the Cu<sub>2</sub>O layer was 474 nm thick.

**Keywords:** Double film, Cu<sub>2</sub>O, ZnO, CVD, sublimation, semiconductor.

\* Corresponding author.

E-mail address: [trieuthinguyet@hus.edu.vn](mailto:trieuthinguyet@hus.edu.vn)

<https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5676>

# Ảnh hưởng của một số yếu tố đến tính chất điện của màng kép Cu<sub>2</sub>O/ZnO chế tạo bằng phương pháp lắng đọng hơi hóa học

Triệu Thị Nguyệt<sup>1,\*</sup>, Đỗ Huy Hoàng<sup>1</sup>, Nguyễn Mạnh Hùng<sup>2</sup>  
Vũ Thị Bích Ngọc<sup>1</sup>, Phạm Anh Sơn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,  
334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Nhà máy Z121, Tổng cục Công nghiệp Quốc Phòng, Bộ Quốc phòng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 08 tháng 5 năm 2024

Chỉnh sửa ngày 23 tháng 5 năm 2024; Chấp nhận đăng ngày 04 tháng 7 năm 2024

**Tóm tắt:** Màng kép Cu<sub>2</sub>O/ZnO được chế tạo bằng phương pháp lắng đọng hóa học pha hơi (CVD) từ các tiền chất zinc pivalate và copper(II) acetylacetonate. Thành phần pha tinh thể của màng được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ tia X đa tinh thể; Hình thái bề mặt màng được nghiên cứu bằng kính hiển vi điện tử quét và kính hiển vi lực nguyên tử; Chiều dày màng được xác định trên máy đo biên dạng bề mặt; Tính chất điện của màng như nồng độ, độ linh động của hạt tải, điện trở suất được xác định bằng phương pháp đo hiệu ứng Hall. Kết quả thu được cho thấy màng kép gồm lớp tinh thể Cu<sub>2</sub>O có cấu trúc lập phương mọc ghép trên lớp tinh thể ZnO, có bề mặt không nhẵn. Tính chất điện của màng Cu<sub>2</sub>O/ZnO tốt nhất khi nhiệt độ lắng đọng của lớp Cu<sub>2</sub>O là 240 °C. Việc tăng độ dày của lớp Cu<sub>2</sub>O làm giảm điện trở suất. Nồng độ hạt tải của màng kép cao nhất và độ linh động của hạt tải thấp nhất khi lớp Cu<sub>2</sub>O dày 474 nm.

**Từ khóa:** Màng kép, Cu<sub>2</sub>O, ZnO, CVD, thăng hoa, bán dẫn.

## 1. Mở đầu

Oxide ZnO và Cu<sub>2</sub>O tương đối phổ biến, giá thành rẻ và không có độc tính nên nhận được nhiều sự quan tâm trong nhiều ứng dụng khác nhau, đặc biệt trong lĩnh vực điện quang. ZnO là chất bán dẫn loại *n*, có độ rộng vùng cấm lớn (3,3 eV), khá phổ biến trong các linh kiện điện tử và đặc biệt có ý nghĩa với ứng dụng chế tạo thiết bị trong suốt [1, 2] như điện cực cho ánh sáng truyền qua, cửa sổ trong các pin mặt trời và các transistor màng mỏng trong suốt. Cu<sub>2</sub>O là chất bán dẫn loại *p* có chi phí sản xuất thấp, thân thiện với môi trường với độ rộng vùng cấm vừa phải 2,17 eV [3], hệ số hấp thụ cao trong vùng bức xạ khả kiến, có nhiều tiềm năng ứng dụng làm lớp hấp thụ ánh sáng trong các pin mặt trời với ưu điểm như hạt tải có độ linh động

cao, chiều dài khuếch tán hạt tải phụ khá lớn. Các hệ màng chứa lớp chuyển tiếp dị thể *p*-Cu<sub>2</sub>O và *n*-ZnO có tiềm năng ứng dụng làm pin mặt trời có hiệu suất chuyển hóa năng lượng theo lý thuyết cao (khoảng 20%), nhưng trên thực tế hiệu suất chuyển hóa của loại pin này thấp hơn 4% [4, 5]. Điều đó được lý giải do giới hạn về chất lượng bề mặt mỗi màng riêng biệt tại lớp tiếp xúc dị thể cũng như bản chất điện, quang của mỗi lớp và điều kiện, phương pháp chế tạo. Các màng oxide kim loại có thể được chế tạo bằng một số phương pháp khác nhau như epitaxy chùm phân tử, phún xạ, lắng đọng hóa học pha hơi (Chemical Vapor Deposition, CVD),... Đặc biệt, phương pháp CVD đã được sử dụng để chế tạo nhiều vật liệu khác nhau, trong đó có các oxid kim loại.

CVD là phương pháp phổ biến trên thế giới để chế tạo các màng mỏng cho ngành công nghiệp vi điện tử. Các phương pháp CVD thông thường đòi hỏi các điều kiện thiết bị thí nghiệm hiện đại và phức tạp, điều kiện phản ứng

\* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: trieuthinguyet@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5676>

nghiêm ngặt, dẫn đến tăng giá thành sản phẩm và thiếu tính thực tế khi nghiên cứu tại Việt Nam. Nhóm nghiên cứu đã phát triển phương pháp chế tạo vật liệu màng oxide hai lớp bằng hệ thiết bị đơn giản, điều kiện phản ứng không khắc nghiệt. Bên cạnh đó, tính mới của nghiên cứu còn được thể hiện qua việc lựa chọn chất đầu vào, ứng với hai phức chất copper(II) acetylacetonate và zinc pivalate, có nhiệt độ thăng hoa thấp, nhiệt độ phân hủy không quá cao, dễ dàng tự điều chế tại phòng thí nghiệm.

Trong một số công trình trước, chúng tôi đã nghiên cứu một số điều kiện ảnh hưởng đến cấu trúc và tính chất quang, điện của màng ZnO [6-8] và màng Cu<sub>2</sub>O [9, 10], tính chất quang của màng kép Cu<sub>2</sub>O/ZnO [11]. Trong công trình này, chúng tôi nghiên cứu tính chất điện của màng kép Cu<sub>2</sub>O/ZnO được chế tạo bằng phương pháp lắng đọng hóa học pha hơi với sự có mặt của hơi nước như là tác nhân oxy hóa, cụ thể là ảnh hưởng của nhiệt độ lắng đọng Cu<sub>2</sub>O và độ dày lớp Cu<sub>2</sub>O đến tính chất điện của màng kép.

## 2. Thực nghiệm

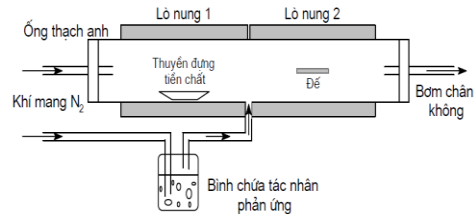
### 2.1. Hóa chất

CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, Zn(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, acetylacetonate, pivalic acid, khí nitrogen N<sub>2</sub>. Các hóa chất đều có độ tinh khiết PA, để thủy tinh microscope slide 7101, nguồn gốc Trung Quốc.

### 2.2. Chế tạo vật liệu

Phức chất copper(II) acetylacetonate được tổng hợp từ CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O và acetylacetonate theo

quy trình [12]. Phức chất zinc pivalate được tổng hợp từ Zn(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O và pivalic acid theo quy trình [13]. Sơ đồ hệ thống tạo màng bằng phương pháp CVD được miêu tả trong Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ thiết bị CVD

Cho một lượng tiền chất xác định vào thuyền sứ rồi đưa thuyền vào ống thạch anh sao cho thuyền sứ nằm ở khoảng giữa của lò nung 1; Đưa đế tạo màng vào khoảng giữa của lò nung 2 (vùng lắng đọng). Bật máy hút chân không để giảm áp suất trong hệ cho đến khi đạt độ chân không ổn định (~125 mmHg), sau đó bật lò nung 1 và lò nung 2. Điều chỉnh nhiệt độ của lò nung 1 và lò nung 2 đến nhiệt độ thăng hoa tiền chất trong thuyền sứ và phân hủy hơi tiền chất đã thăng hoa để tạo thành sản phẩm mong muốn lắng đọng trên đế.

Dòng khí mang N<sub>2</sub> thứ nhất có tác dụng lôi cuốn hơi tiền chất đã thăng hoa sang vùng đặt đế. Dòng khí mang N<sub>2</sub> thứ hai đi qua dung dịch chứa tác nhân phản ứng để đưa tác nhân phản ứng vào vùng lắng đọng màng.

Màng kép Cu<sub>2</sub>O/ZnO được chế tạo bằng phương pháp CVD qua hai bước với các thông số được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Các điều kiện chế tạo màng Cu<sub>2</sub>O/ZnO.

Điều kiện	Màng ZnO	Màng Cu <sub>2</sub> O
Tiền chất (khối lượng)	Zn(Piv) <sub>2</sub> (0,5 gam)	Cu(acac) <sub>2</sub> (0,8 gam)
Nhiệt độ lò nung 1 (°C)	175 - 180	165 - 170
Nhiệt độ lò nung 2 (°C)	500	240; 280; 320
Lưu lượng dòng N <sub>2</sub> thứ nhất (ml/phút)	275	650
Lưu lượng dòng N <sub>2</sub> thứ hai (ml/phút)	50	50
Áp suất (mmHg)	125	125
Thời gian thực hiện (phút)	6,5	10,0-40,0

Bước 1: tạo màng ZnO trên đế thủy tinh microscope slide từ tiền chất zinc pivalate,  $Zn(Piv)_2$ , với tác nhân phản ứng là hơi nước, chiều dày màng ~350 nm. Bước 2: tạo màng  $Cu_2O$  trên đế ZnO/thủy tinh từ tiền chất copper(II) acetylacetonate,  $Cu(acac)_2$ , với tác nhân phản ứng là hơi nước.

### 3. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nhiễu xạ tia X dạng bột (XRD) được thực hiện tại khoa Hóa học - Trường đại học Khoa học Tự nhiên - Đại học Quốc gia Hà Nội trên thiết bị D8 Advance với nguồn tia X tại điều kiện làm việc 40 kV-40 mA,  $CuK\alpha$  0,15406 nm,  $2\theta = 10^\circ - 70^\circ$ , 0,03°/giây để xác định thành phần pha và cấu trúc tinh thể và kích thước tinh thể trung bình dựa trên công thức Debye-Scherrer.

Kính hiển vi điện tử quét (SEM) Hitachi S4800 Scanning Microscope (Nhật Bản) để đánh giá bề mặt và mặt cắt của các màng mỏng, thực hiện tại Phòng hiển vi điện tử - Viện vệ sinh dịch tễ Trung ương.

Kính hiển vi lực nguyên tử (AFM) Agilent Technologies tại Phòng thí nghiệm trọng điểm - Viện Khoa học vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, trên thiết bị Park Systems XE-100 để xác định hình thái bề mặt các màng mỏng.

Thiết bị đo biên dạng bề mặt Dektak 150 của hãng Veeco để xác định chiều dày màng, tại Trung tâm Khoa học Vật liệu - Khoa Vật lý -

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - Đại học Quốc gia Hà Nội.

Hệ nghiên cứu Van der Pauw (Ecopia HMS-3000) đánh giá các tính chất điện của màng mỏng  $Cu_2O$  và ZnO như: nồng độ hạt tải, độ linh động, điện trở suất qua phương pháp đo hiệu ứng Hall ở nhiệt độ 25 °C và từ trường  $B = 0,550$  T, tại Khoa Khoa học vật liệu - Trường đại học Khoa học Tự nhiên - Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh. Các mẫu nghiên cứu kích thước 1 cm x 1cm được xử lý tạo điện cực tại 4 góc bằng hợp kim InSn (95% indium về khối lượng).

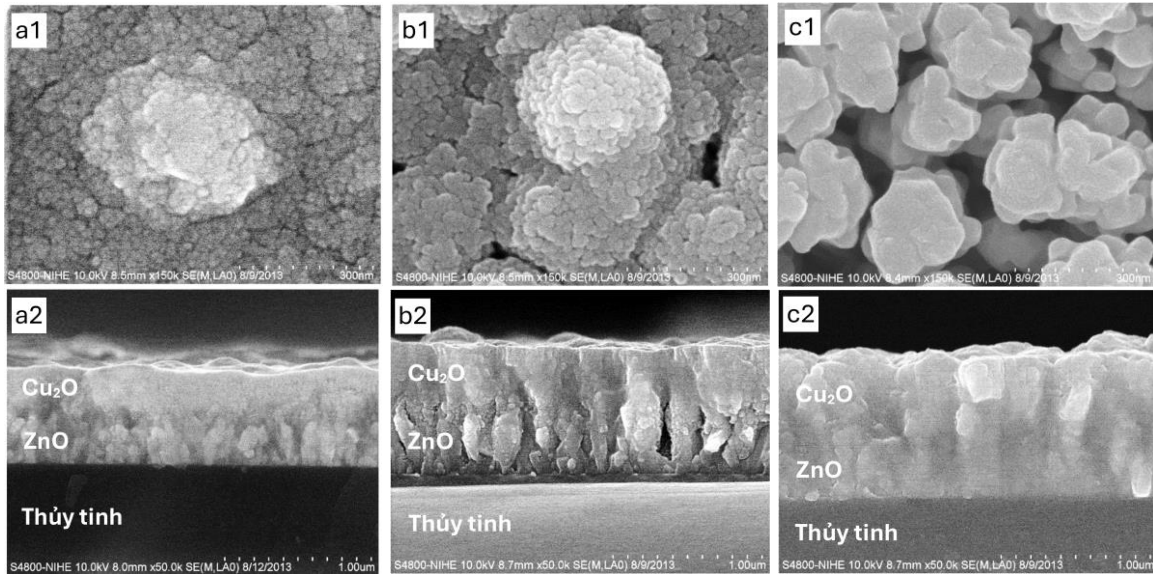
### 4. Kết quả và thảo luận

#### 4.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ lắng đọng $Cu_2O$

Bảng 2 trình bày tính chất điện của các màng kép  $Cu_2O/ZnO$ . Số liệu ở Bảng 2 cho thấy nồng độ hạt tải giảm và điện trở suất tăng khi tăng nhiệt độ lắng đọng. Tính chất điện của màng tốt nhất khi nhiệt độ lắng đọng lớp  $Cu_2O$  là 240 °C. Điều này có thể do sự thay đổi cấu trúc của màng khi thay đổi nhiệt độ lắng đọng. Ảnh SEM (Hình 2) cho thấy cấu trúc màng trở nên xốp hơn khi nhiệt độ lắng đọng tăng, do đó tạo ra nhiều khuyết tật ở các ranh giới hạt. Hàng rào thế năng được tạo thành ở các lớp chuyển tiếp hạt - hạt có thể làm giảm mạnh dòng các hạt tải chính và tăng số lượng các trung tâm tái hợp hiệu quả đối với các hạt tải phụ gây ra bởi hiệu ứng điện thế hấp dẫn [14].

Bảng 2. Tính chất điện của màng vật liệu được chế tạo tại nhiệt độ lắng đọng khác nhau

Nhiệt độ (°C)	Màng	Nồng độ hạt tải ( $cm^{-3}$ )	Độ linh động ( $cm^2/V.s$ )	Điện trở suất ( $\Omega.cm$ )
240	$Cu_2O/ZnO$	$2,577 \times 10^{15}$	10,7	$2,268 \times 10^2$
	$Cu_2O$	$5,172 \times 10^{13}$	85,4	$1,413 \times 10^3$
280	$Cu_2O/ZnO$	$2,254 \times 10^{13}$	90,1	$3,074 \times 10^3$
	$Cu_2O$	$1,554 \times 10^{13}$	113,0	$3,555 \times 10^3$
320	$Cu_2O/ZnO$	$8,093 \times 10^{12}$	41,2	$1,873 \times 10^4$
	$Cu_2O$	$1,182 \times 10^{13}$	139,9	$3,774 \times 10^3$



Hình 2. Ảnh SEM bề mặt (1) và mặt cắt (2) của các màng kép có màng Cu<sub>2</sub>O lắng đọng ở: 240 °C (a1, a2); 280 °C (b1, b2); 320 °C (c1, c2).

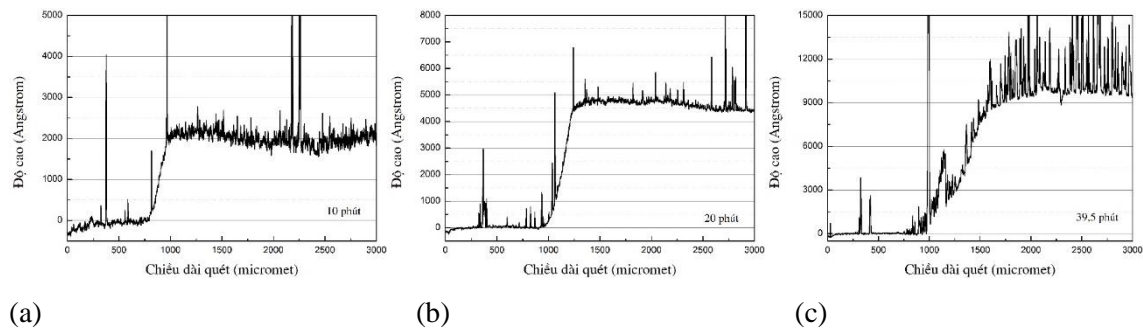
So với màng Cu<sub>2</sub>O được lắng đọng ở cùng điều kiện [15], thấy màng kép Cu<sub>2</sub>O/ZnO có tính chất điện tốt hơn, cụ thể màng kép có giá trị nồng độ hạt tải khá cao hơn và điện trở suất thấp hơn màng đơn.

4.2. Ảnh hưởng của chiều dày lớp Cu<sub>2</sub>O

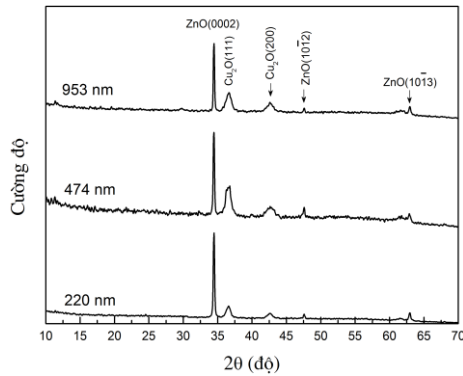
Nghiên cứu này được thực hiện ở nhiệt độ 240 °C, chiều dày lớp Cu<sub>2</sub>O được kiểm soát thông qua việc thực hiện quá trình lắng đọng trong các khoảng thời gian khác nhau, kết quả được trình bày trên Hình 3. Đồ thị biên dạng bề

mặt của các màng cho thấy, lớp màng Cu<sub>2</sub>O có chiều dày là 220 nm sau 10 phút lắng đọng, 475 nm sau 20 phút và 953 nm sau 39,5 phút.

Giản đồ XRD của các màng kép khá giống nhau, trong đó đỉnh nhiễu xạ (111) có cường độ lớn nhất (Hình 4). Tất cả các màng đều chứa hai pha tinh thể: pha Cu<sub>2</sub>O thuộc hệ lập phương ứng với các họ mặt (111) và (200) tại các giá trị 2θ bằng 36,6° và 42,6°; pha ZnO ứng với các họ mặt (0002), (10 $\bar{1}$ 2) và (10 $\bar{1}$ 3) tại các vị trí 2θ bằng 34,5°, 47,6° và 63,0°.



Hình 3. Đồ thị biên dạng bề mặt của các màng Cu<sub>2</sub>O/ZnO với thời gian lắng đọng lớp Cu<sub>2</sub>O khác nhau: (a) 10 phút; (b) 20 phút; (c) 39,5 phút .



Hình 4. Giải đồ XRD của các màng Cu<sub>2</sub>O/ZnO.

Kích thước tinh thể Cu<sub>2</sub>O trong hệ màng Cu<sub>2</sub>O/ZnO được tính theo đỉnh đặc trưng có cường độ lớn nhất (đỉnh 111) và được trình bày trên Bảng 3. Kết quả cho thấy xu hướng giảm kích thước tinh thể khi tăng độ dày của màng. Hằng số mạng *a* của tinh thể Cu<sub>2</sub>O nhỏ nhất khi lớp Cu<sub>2</sub>O dày 474 nm.

Bảng 3. Các thông số cấu trúc tinh thể của màng Cu<sub>2</sub>O trong màng kép Cu<sub>2</sub>O/ZnO

Chiều dày (nm)	2θ (°)	<i>d</i> (Å)	FWHM (°)	<i>d</i> (nm)	<i>a</i> (Å)
220	36,577	2,455	0,729	12	4,252
474	36,790	2,441	0,868	10	4,228
953	36,700	2,447	0,955	9	4,238

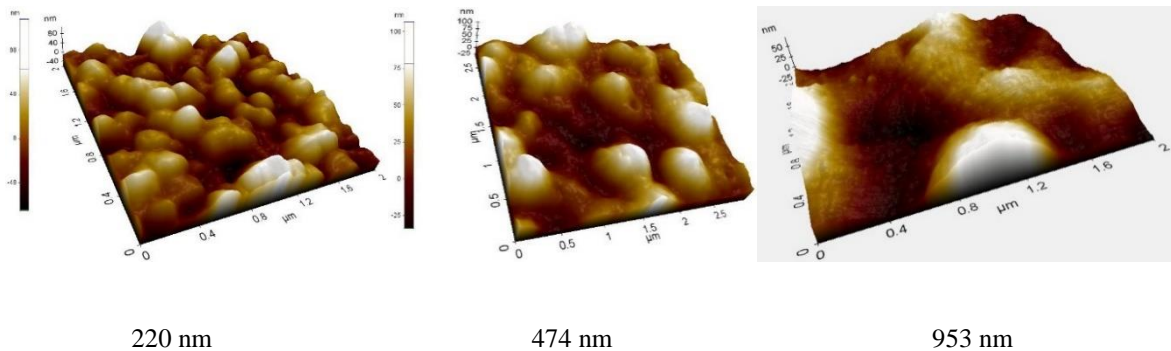
Phương pháp đo hiệu ứng Hall được sử dụng để nghiên cứu tính chất điện của màng

được trình bày trên Bảng 4. Tính chất điện của màng kép Cu<sub>2</sub>O/ZnO thay đổi khi thay đổi chiều dày lớp Cu<sub>2</sub>O. Khi tăng chiều dày lớp Cu<sub>2</sub>O, điện trở suất của màng kép giảm. Màng với lớp Cu<sub>2</sub>O dày 474 nm có nồng độ hạt tải cao nhất và độ linh động của hạt tải thấp nhất, điện trở suất tương đối thấp.

Bảng 4. Tính chất điện của màng Cu<sub>2</sub>O/ZnO với độ dày lớp Cu<sub>2</sub>O khác nhau

Chiều dày Cu <sub>2</sub> O (nm)	Nồng độ hạt tải (cm <sup>-3</sup> )	Độ linh động (cm <sup>2</sup> /V.s)	Điện trở suất (Ω.cm)
220	3,17×10 <sup>14</sup>	57,8	341,40
474	4,77×10 <sup>15</sup>	16,1	81,09
953	3,61×10 <sup>14</sup>	773,5	22,35

Sự thay đổi tính chất điện của màng khi chiều dày lớp Cu<sub>2</sub>O thay đổi có thể do sự thay đổi chiều dày lớp Cu<sub>2</sub>O làm thay đổi hằng số mạng tinh thể Cu<sub>2</sub>O. Sự thay đổi không có quy luật của hằng số mạng có thể là nguyên nhân giải thích cho sự thay đổi không có quy luật của nồng độ hạt tải. Hằng số mạng *a* tăng làm giảm nồng độ hạt tải và ngược lại. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với công bố của các tác giả [16, 17] khi nghiên cứu màng kép Cu<sub>2</sub>O/ZnO được chế tạo bằng phương pháp lắng đọng hơi hóa học các hợp chất cơ kim (Metalorganic Chemical Vapor Deposition, MOCVD).



Hình 5. Ảnh AFM bề mặt màng Cu<sub>2</sub>O/ZnO có chiều dày lớp Cu<sub>2</sub>O khác nhau.

Hình 5 là ảnh AFM bề mặt màng kép Cu<sub>2</sub>O/ZnO có lớp Cu<sub>2</sub>O ở các chiều dày khác nhau. Bề mặt màng gần như không thay đổi khi thay đổi chiều dày lớp Cu<sub>2</sub>O: không nhẵn, gồm các hạt khá nhỏ bám đặc khít. Bề mặt màng không nhẵn có thể do bề mặt lớp đế ZnO gồ ghề.

Kết quả Hình 5 cho thấy kích thước hạt của màng Cu<sub>2</sub>O tăng lên khi tăng nhiệt độ lắng đọng, dẫn đến sự tăng ứng suất để duy trì sự mọc ghép trên nền ZnO. Trong các mẫu nghiên cứu có độ dày của màng Cu<sub>2</sub>O lớn hơn, các hạt nhỏ và màng có bề mặt nhám hơn dẫn đến các ứng suất dư trong màng giảm. Điều này thể hiện sự mối tương quan tương đối giữa chiều dày của màng kép và tính chất điện của chúng.

## 5. Kết luận

Màng kép Cu<sub>2</sub>O/ZnO được chế tạo bằng phương pháp lắng đọng hơi hóa học từ các tiền chất zinc pivalate và copper(II) acetylacetonate bao gồm hai lớp tinh thể ZnO và Cu<sub>2</sub>O, giữa hai lớp tạo thành lớp chuyển tiếp dị thể. Tính chất điện của màng kép Cu<sub>2</sub>O/ZnO ( $2,268 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ ) tốt hơn màng đơn Cu<sub>2</sub>O ( $1,413 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ ) được chế tạo ở cùng điều kiện. Nhiệt độ lắng đọng Cu<sub>2</sub>O và chiều dày lớp Cu<sub>2</sub>O ảnh hưởng đến tính chất điện của màng kép. Tính chất điện của màng tốt nhất khi nhiệt độ lắng đọng Cu<sub>2</sub>O thấp nhất (240 °C) và lớp Cu<sub>2</sub>O dày 474 nm.

## Tài liệu tham khảo

- [1] D. K. Sharma, S. Shukla, K. K. Sharma, V. Kumar, A Review on ZnO: Fundamental Properties and Applications, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 49, Part 8, 2022, pp. 3028-3035, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.238>.
- [2] R. D. Vispute, S. S. Hullavarad, D. E. Pugel, V. N. Dhar, S. Kulkarni, I. Takeuchi, T. Venkatesan, Wide Band Gap Zn and ZnMgO Heterostructures for Future Optoelectronic Devices, *Thin Films and Heterostructures for Oxide Electronics*, 2006, pp. 303-312, [https://doi.org/10.1007/0-387-26089-7\\_10](https://doi.org/10.1007/0-387-26089-7_10).
- [3] B. A. Koikia, O. A. Arotiba, Cu<sub>2</sub>O as an Emerging Semiconductor in Photocatalytic and Photoelectrocatalytic Treatment of Water Contaminated with Organic Substances: A Review, *RSC Advances*, Vol. 10, 2020, pp. 36514-36525, <https://doi.org/10.1039/D0RA06858F>.
- [4] A. Sekkat, D. Bellet, G. Chichignoud, D. Muñoz-Rojas, A. K Cachopo, Unveiling Key Limitations of ZnO/Cu<sub>2</sub>O All-Oxide Solar Cells through Numerical Simulations, *ACS Applied Energy Materials*, Vol. 5, 2022, pp. 5423-5433, <https://doi.org/10.1021/acsaem.1c03939>.
- [5] T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, J. Nomoto, High-efficiency Oxide Solar Cells with ZnO/Cu<sub>2</sub>O Heterojunction Fabricated on Thermally Oxidized Cu<sub>2</sub>O Sheets, *Applied Physics Express*, Vol. 4, 2011, pp. 062301(1)-062301(3), <https://doi.org/10.1143/APEX.4.062301>.
- [6] N. M. Hung, T. T. Nguyet, N. H. Huy, The Effect of Temperature on the Structure and the Electrical Properties of Chemical-Vapor Deposited ZnO thin Film from Zinc Pivalate, *Vietnamese Journal of Chemistry*, Vol. 51, No. 6ABC, 2013, pp. 216-219 (in Vietnamese).
- [7] N. M. Hung, T. T. Nguyet, N. H. Huy, D. X. Chat, The Effect of Thickness on the Structure and the Electrical Properties of ZnO thin Film, *Vietnamese Journal of Chemistry*, Vol. 53, No. 3e12, 2015, pp. 123-127 (in Vietnamese).
- [8] N. M. Hung, T. T. Nguyet, N. H. Huy, P. A. Son, The Effect of Temperature on the Structure and the Electrical Properties of Chemical-Vapor Deposited ZnO thin Film from Zinc Acetylacetonate, *Vietnamese Journal of Analytical Science*, Vol. 20, 2015, pp. 64-69 (in Vietnamese).
- [9] N. M. Hung, T. T. Nguyet, N. H. Huy, P. A. Son, The Effect of Temperature on the Structure and the Optic-Electrical Properties of Chemical-Vapor Deposited Cu<sub>2</sub>O thin Film from Cu(II) acetylacetonate, *Vietnamese Journal of Analytical Science*, Vol. 20, 2015, pp. 74-79 (in Vietnamese).
- [10] N. M. Hung, T. T. Nguyet, N. H. Huy, N. T. Tho, The Effect of Thickness on the Structure and the Electrical Properties of Cu<sub>2</sub>O Film, *Vietnamese Journal of Chemistry*, Vol. 53, No. 3e12, 2015, pp. 119-122 (in Vietnamese).
- [11] N. M. Hung, T. T. Nguyet, N. H. Huy, N. H. Le, The Effect of Thickness on the Structure and the Optical Properties of Chemical-Vapor Deposited Cu<sub>2</sub>O on ZnO/glass from Copper Acetylacetonate,

- Vietnamese Journal of Chemistry, Vol. 51, No. 6ABC, 2013, pp. 220-224 (in Vietnamese).
- [12] N. M. Hung, Synthesis and Properties of Some Transition Metal  $\beta$ -dicetonate Complex, Master Science Thesis, Hanoi University of Science - VNU, Vietnam, 2010 (in Vietnamese).
- [13] P. X. Hung, Synthesis and Properties of Some Transition Metal Cacboxylate Complex, Master Science Thesis, Hanoi University of Science - VNU, Vietnam, 2010 (in Vietnamese).
- [14] F. Greutert, G. Blatter, Electrical Properties of Grain Boundaries in Polycrystalline Compound Semiconductors, Semiconductor Science and Technology, Vol. 5, No. 2, 1990, pp. 111-137, <https://doi.org/10.1088/0268-1242/5/2/001>.
- [15] J. Y. Oh, J. H. Lim, D. K. Hwang, H. S. Kim, R. Navamathavan, K. K. Kim, S. J. Park, Growth of Buffer-Free High-Quality ZnO Epilayer on Sapphire (0001) using Radio-Frequency Magnetron Sputtering, Journal of Electrochemical Society, Vol. 151, 2004, pp. G623-G626, <https://doi.org/10.1149/1.1779151>.
- [16] S. H. Jeong, E. S. Aydi, Structural and Electrical Properties of Cu<sub>2</sub>O thin Films Deposited on ZnO by Metal Organic Chemical Vapor Deposition, Journal Vacuum Science and Technology, Vol. 28, 2010, pp. 1338-1343, <https://doi.org/10.1116/1.3491036>.
- [17] C. Alper, U. Gokhan, Preparation and Characterization of Electrochemically Deposited Cu<sub>2</sub>O/ZnO Heterojunctions on Porous Silicon, ACS Omega, Vol. 8, No. 23, 2023, pp. 20801-20809, <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01438>.