

SỰ PHÁT TRIỂN HETEROEPITAXY CỦA MÀNG WO_3 TRÊN BỀ MẶT ITO(400) VÀ ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ DÀY LỚP ITO TRÊN ĐỀ THỦY TINH LÊN HƯỚNG PHÁT TRIỂN CỦA MÀNG WO_3

Lê Văn Ngọc⁽¹⁾, Trần Cao Vinh⁽¹⁾, Trần Tuấn⁽¹⁾, Huỳnh Thành Đạt⁽²⁾,
Đương Ái Phương⁽¹⁾, Lê Quang Toại⁽³⁾, Bạch Văn Hòa⁽⁴⁾

(1) Trường Đại học Khoa học Tự Nhiên, ĐHQG-HCM

(2) ĐHQG-HCM

(3) Trường Đại học Tổng Hợp Voronezh, CHLB Nga.

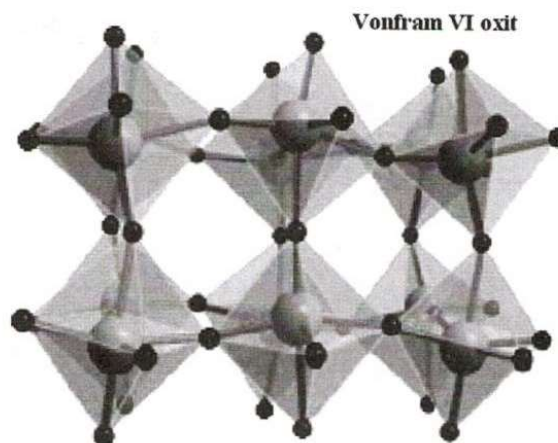
(4) Trường THPT Gò Vấp, Tp.HCM.

TÓM TẮT: Màng WO_3 được lắng đọng bằng phương pháp phun xạ magnetron RF trên lớp phủ ITO(400) của thủy tinh. Thực nghiệm cho thấy rằng hướng phát triển của mạng tinh thể WO_3 phụ thuộc vào độ dày của lớp ITO. Trong bài báo này sự phụ thuộc đó sẽ được thảo luận sâu hơn.

Keywords: $WO_3(200)$ plan, WO_3 /ITO/glass, WO_3 structure.

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay màng WO_3 đã và đang được nhiều phòng thí nghiệm quan tâm nghiên cứu rộng rãi với nhiều tính chất lý hóa thú vị như là: Tính điện sắc [1]; tính khí sắc [2]; tính cảm biến khí [3], tính lưu trữ ion và lưu trữ điện tích... [4]. Cơ chế cho phần lớn các tính chất này là có sự khuếch tán vào ra một cách thuận nghịch của các hạt nguyên tử hoặc các ion thích hợp vào các kênh rỗng (ống rỗng) của mạng tinh thể WO_3 [5]. Trên hình 1 là ảnh minh họa các kênh rỗng của mạng tinh thể Perovskit của WO_3 . Các kênh rỗng này do các khối bát diện WO_6 tạo thành dọc theo các trục cơ bản của ô mạng. Điều này cho thấy rằng khi màng WO_3 có cấu trúc tinh thể với các kênh rỗng hướng dọc theo phương vuông góc với bề mặt màng và có mật độ điện tích của các “ống rỗng” càng cao thì hệ số khuếch tán của các hạt ion hoặc nguyên tử (có kích thước phù hợp) vào trong các ống hoặc khuếch tán ra khỏi chúng sẽ càng lớn. Kết quả là màng đáp ứng tốt tính thuận nghịch đối với sự khuếch tán theo hai chiều nêu trên và như vậy các tính chất của màng WO_3 có liên quan đến cơ chế khuếch tán nêu trên sẽ thể hiện càng nhạy.



Hình 1: Sự hình thành các kênh rỗng trong mạng tinh thể Perovskit của WO_3 .
(theo www.webelements.com)

Một đặc điểm khá lý thú đã được làm rõ ở công trình này là việc màng WO_3 được tạo trên lớp điện cực trong suốt ITO cho trạng thái kết tinh tốt hơn so với trên thủy tinh. Ngoài ra định hướng phát triển tinh thể của màng WO_3 còn bị ảnh hưởng bởi mật mạng ITO(400) và độ dày của lớp ITO. Điều này cũng được giải thích rằng có sự hợp mạng WO_3 /ITO do có sự tương đồng về khoảng cách giữa các nút mạng oxy trên mặt ITO(400) với khoảng cách giữa các nút mạng vonfram trên các mặt (001); (020) và (200) của mạng tinh thể WO_3 dạng monoclinic ($m\text{-WO}_3$) hoặc dạng orthorhombic ($o\text{-WO}_3$). Sự “hợp mạng không đồng nhất” (heteroepitaxi) này đã tạo ra sự định hướng đối với các kênh rỗng của mạng peropskit WO_3 trong đó có sự cạnh tranh giữa các kênh dọc trục a và c nhận phương vuông góc với bề mặt màng.

2. THỰC NGHIỆM

Trong công trình này, các màng ITO, WO_3 được chế tạo bằng phương pháp phun xạ magnetron trong môi trường hỗn hợp khí làm việc $\text{Ar} + \text{O}_2$. Các khí thành phần O_2 và Ar có độ tinh khiết là 99,999%. Hệ bơm chân không tạo màng có thể đạt được chân không ban đầu là khoảng 10^{-7} torr nhờ hệ bơm Turbovac 1000. Lớp ITO được lắng đọng trên đế thủy tinh thường bằng phương pháp phun xạ magnetron DC từ bia gồm ITO 90% In_2O_3 10% SnO_2 (theo khối lượng) ở nhiệt độ đế trong khoảng $300^\circ\text{C} \div 350^\circ\text{C}$. Màng WO_3 được phủ trên lớp ITO bằng phương pháp phun xạ magnetron RF với công suất phun xạ là 100 W. Thời gian phun xạ là 30 phút. Một hạn chế lớn mang tính nguyên tắc của quy trình phun xạ magnetron RF là quá trình cấp nhiệt của bếp không được hoạt động đồng thời với quá trình phun xạ. Do vậy sau khi lắng đọng lớp WO_3 , hệ màng được ủ nhiệt trong không khí ở 400°C trong bốn giờ để màng đạt được hợp thức và trạng thái kết tinh tốt [6]. Sau khi các hệ màng được chế tạo xong, cấu trúc của chúng cũng được khảo sát dựa trên các phổ XRD của chúng.

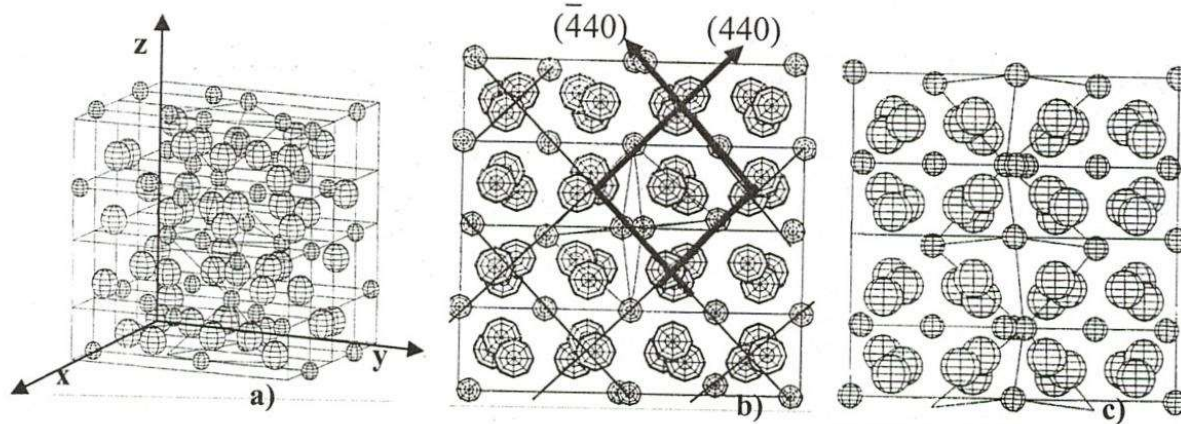
Đề màng WO_3 có thể phát triển “hợp mạng” tốt, lớp ITO cần phải có pha tinh thể phát triển theo hướng mặt mạng ITO(400). Mặt khác từ kết quả khảo sát phổ XRD của công trình [7] cho thấy rằng để chế tạo lớp ITO phát triển cấu trúc ưu tiên theo hướng mặt mạng (400), màng ITO cần được chế tạo ứng với độ dày cao và ở áp suất oxy riêng phần thấp. Khi độ dày màng ITO tăng trên 100nm thì cường độ đỉnh XRD ITO(400) của màng tăng nhanh hơn so với các đỉnh khác. Mặt khác với áp suất oxy riêng phần cao, phổ XRD cho đỉnh ITO(222) là chủ yếu. Ngoài ra, để khảo sát ảnh hưởng do các biến dạng của màng ITO [8] gây ra đối với lớp WO_3 , chúng tôi chế tạo các lớp ITO với các độ dày khác nhau và được chọn lần lượt là 150, 200, 250, 300 và 350 nm với áp suất oxy riêng phần khá thấp khoảng $5 \cdot 10^{-6}$ torr.

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1 Cấu trúc tinh thể ITO và mặt mạng ITO(400)

ITO (Indium Tin Oxide) là hợp chất oxit Indium pha tạp SnO_2 với tỷ lệ tạp từ 3% đến 15%. Khi có sự tham gia của tạp Sn, các nút Sn^{2+} sẽ thay thế vào vị trí của các ion In^{3+} trong mạng tinh thể bixbyite của In_2O_3 . Trên hình 2 [9-10] là mô hình cấu trúc mạng tinh thể bixbyite của In_2O_3 . Hình 2a là mô hình cấu trúc lập phương của ô cơ sở ở đó các hình cầu nhỏ là các ion In^{3+} hoặc ion Sn^{2+} còn các hình cầu lớn là các ion O^{2-} . Hằng số mạng của tinh thể In_2O_3 là khoảng 1,012nm [8,11]. Tuy nhiên hằng số mạng này có thể thay đổi từ 1,012nm đến 1,024nm tùy thuộc vào lượng tạp Sn được thêm vào màng [12-13]. Sự tăng lên của hằng số mạng này được giải thích rằng khi có sự thay thế của các ion Sn^{2+} có bán kính lớn (0,093nm) vào vị trí của các ion In^{3+} có bán kính nhỏ hơn (0,079nm) [12,14]. Từ hình chiếu của ô đơn vị dọc theo trục Oz (hình 2b) và dọc theo trục Ox (hình 2c) cho thấy rằng các mặt mạng (800); (080) và (008) của In_2O_3 chỉ chứa các nút oxy. Khoảng cách giữa các nút oxy kề nhau trong mặt (008) bằng 25% hằng số mạng và với trường hợp có tạp Sn (trong mạng tinh thể ITO) thì

khoảng cách đó là khoảng $0,253\text{nm} \div 0,256\text{nm}$ [8]. Khoảng cách này cũng bằng với khoảng cách giữa các mặt ITO(004) hay ITO(400).



Hình 2: Cấu trúc mạng tinh thể bixbyite của In_2O_3 :
a) ô đơn vị; b) mặt chiếu đứng; c) mặt chiếu trước.

Từ thực nghiệm khảo sát phổ XRD của màng ITO trong công trình này, khoảng cách mạng ứng với đỉnh ITO(400) được xác định là khoảng $0,256\text{nm} \div 0,257\text{nm}$ tùy thuộc vào điều kiện tạo màng. Cũng từ hình 2b, trên giao tuyến giữa các mặt chéo (440) với mặt (008), khoảng cách các nút oxy liên tiếp cách nhau khoảng $0,358\text{nm} \div 0,362\text{nm}$. Khoảng cách này gấp hai lần khoảng cách giữa các mặt mạng (440). Điều này cũng xác định được từ phổ XRD khoảng cách giữa các mặt mạng (440) là khoảng $0,180\text{nm} \div 0,181\text{nm}$ tức là khoảng cách giữa các nút oxy trên giao tuyến chéo là $0,360\text{nm} \div 0,363\text{nm}$. Kích thước này tương đối gần với khoảng cách giữa các nút W-W trong mạng tinh thể WO_3 .

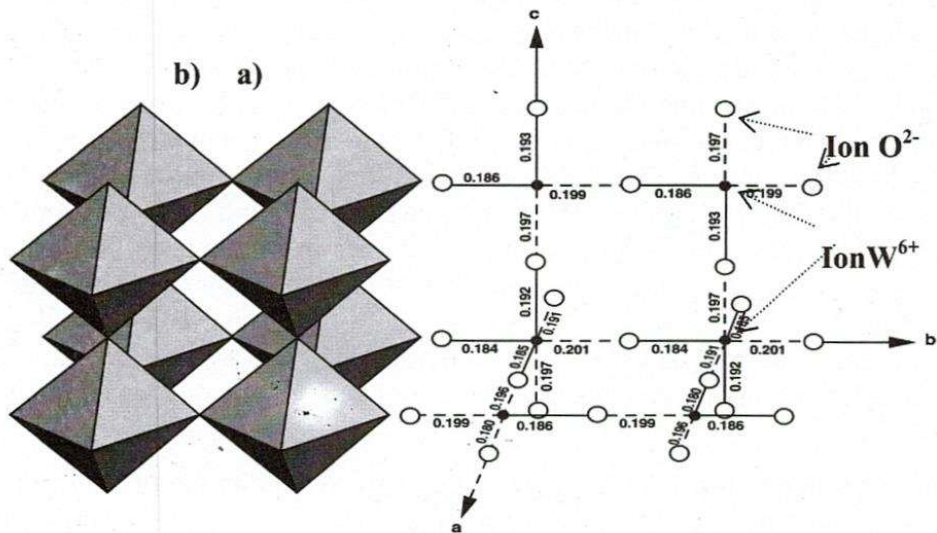
3.2 Cấu trúc tinh thể của WO_3 và sự hợp mạng của màng WO_3 trên mặt ITO(400).

Một đặc trưng của sự hình thành cấu trúc vật liệu vonfram oxít là việc dựa vào sự kết nối của các khối bát diện WO_6 . Ở vật liệu khối, WO_3 có cấu trúc Peropskit hình thành trên cơ sở các khối bát diện WO_6 chung đỉnh. Trong trường hợp lý tưởng, các khối bát diện chung đỉnh sắp xếp theo trật tự đối xứng với góc liên kết W-O-W là 180° . Tuy nhiên thông thường thì trong mạng có sự dịch chuyển của các nút nguyên tử cũng như có sự quay của các khối bát diện tùy thuộc vào nhiệt độ của mạng. Do vậy cấu trúc mạng tinh thể được tìm thấy có các dạng như tetragonal, orthorhombic, monoclinic hoặc triclinic. Hình 3a là mô hình sắp xếp các khối bát diện của mạng peropskit lý tưởng. Hình 3b mô tả các kích thước tính theo nanomet của cấu trúc monoclinic do K. Bange đưa ra [15]. Trên bảng 1 là thông tin về một số dạng cấu trúc tinh thể của vật liệu khối WO_3 .

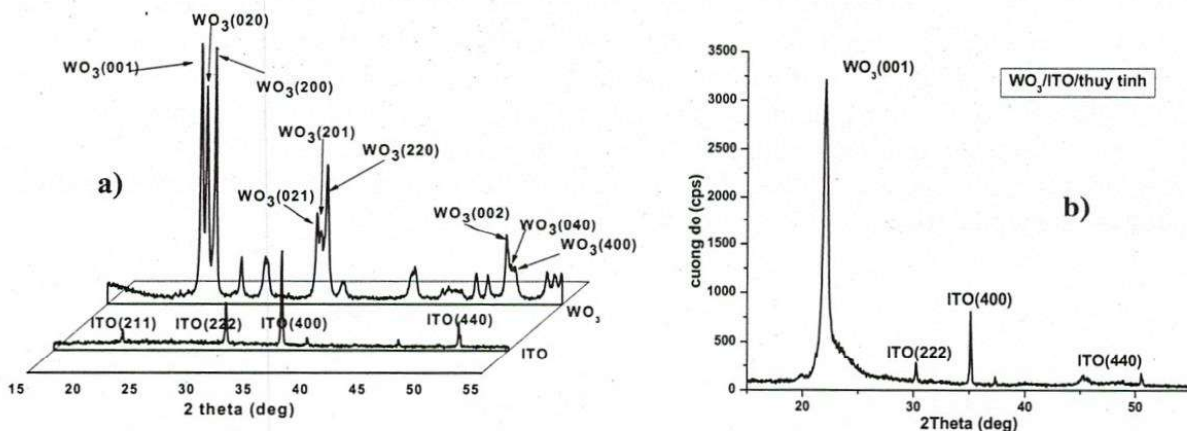
Bảng 1: Một số pha cấu trúc tinh thể mạng peropskit của WO_3 .

Cấu trúc	a (nm)	b (nm)	c (nm)	α ($^\circ$)	β ($^\circ$)	γ ($^\circ$)	Tham khảo
Triclinic	0,730	0,752	0,769	88,83	90,92	90,93	[13,16]
Triclinic	0,7310	0,7524	0,7685	88,85	90,91	90,93	[17]
Monoclinic	0,730	0,753	0,768	90	90,90	90	[13,16]
Monoclinic	0,7285	0,7517	0,3835	90	90,15	90	[17]
Orthorhombic	0,735	0,756	0,387	90	90	90	[13,16]

Orthorhombic	0,7341	0,7570	0,7754	90	90	90	[17]
Tetragonal	0,525	0,525	0,392	90	90	90	[13,16]
Cubic	0,371	0,371	0,371	90	90	90	[13,16]



Hình 3: Mô hình cấu trúc mạng tinh thể WO₃ lý tưởng:
 a) các khối bát diện WO₆ chung đỉnh;
 b) khoảng cách (nm) các nút mạng W-O của cấu trúc monoclinic [15].



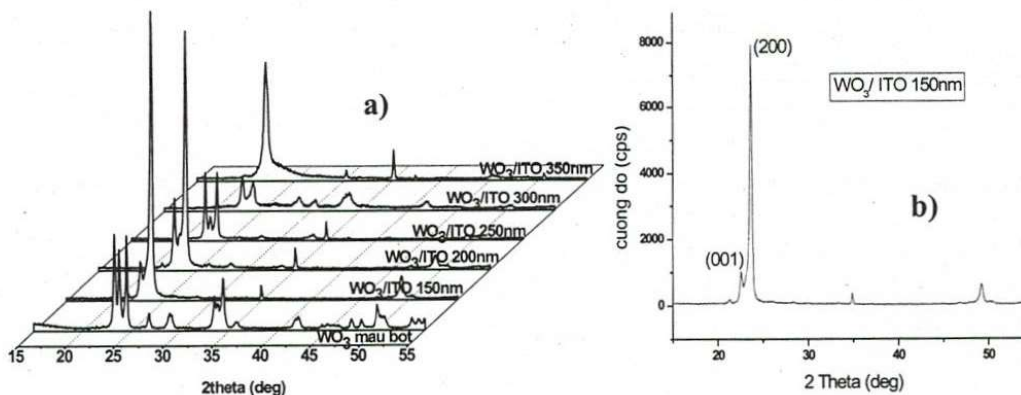
Hình 4: Phổ XRD a) của bột WO₃ và màng ITO/thủy tinh và b) của WO₃/ITO/thủy tinh.

Các thông tin này cũng cho thấy khoảng cách giữa các nút W kề nhau trong mạng WO₃ vào khoảng từ 0,364nm đến 0,392nm. Kích thước này lớn hơn so với khoảng cách giữa các nút oxy theo các phương của các đường chéo trên mặt ITO(400). Với khoảng cách giữa các nút oxy trên mặt ITO(400) đã tính trên là 0,363nm thì sai lệch này khoảng từ 0,27% (so với trục a) đến 7,99%(so với trục c). Mặt khác cũng từ các số liệu của bảng 1 cho thấy các kênh rỗng dọc theo trục a của mạng WO₃ có kích thước lớn nhất. Như vậy việc tạo màng WO₃ với định hướng phát triển theo hướng (200) sẽ cho tổng diện tích các kênh rỗng lớn hơn so với hướng mặt (001). Tuy nhiên với kết quả tính toán trên, sự hợp mạng giữa bề mặt ITO(400) với các nút W trên các trục a và b của mạng WO₃ sẽ dễ dàng hơn so với các trục b và c. Như vậy việc tạo màng phát triển theo hướng của mặt (200) sẽ khó khăn hơn so với trường hợp màng phát triển theo hướng mặt (001).

Trên hình 4a là phổ XRD của mẫu bột WO_3 dạng $m-WO_3$ và màng ITO trên đế thủy tinh. Một đặc điểm đáng lưu ý là vị trí góc nhiễu xạ của đỉnh ITO(440) ở $2\theta = 50^\circ$ trùng với vị trí của nhóm ba đỉnh nhiễu xạ dính sát nhau $WO_3(002)$; $WO_3(040)$; $WO_3(400)$. Kết quả thực nghiệm này cũng cho thấy rằng khoảng cách giữa các mặt ITO(440) rất gần với khoảng cách W-O trong mạng $m-WO_3$ như đã tính toán ở trên. Tuy nhiên khoảng cách giữa các mặt ITO(440) này không hoàn toàn nhỏ hơn khoảng cách W-O trong mạng $m-WO_3$ mà nó vẫn có thể lớn hơn khoảng cách giữa các mặt $WO_3(400)$. Hình 4b là phổ XRD của màng WO_3 được phủ trên lớp ITO 350nm. Từ hình 4b cho thấy lớp ITO cho đỉnh (400) mạnh nhất chứng tỏ màng phát triển chủ yếu theo hướng mặt mạng (400). Màng WO_3 hầu như chỉ cho một đỉnh rất mạnh là (001) cho thấy màng phát triển chủ yếu theo hướng mặt mạng $WO_3(001)$. Tuy nhiên đường phông của đỉnh XRD $WO_3(001)$ này ở vị trí ứng với các đỉnh (020) và (200) cho thấy có sự xuất hiện của các pha tinh thể có định hướng theo các mặt này nhưng có kích thước rất nhỏ. Một đặc trưng nổi bật của sự hợp mạng WO_3/ITO trong công trình này là nhiệt độ tinh thể hóa của màng WO_3 khá thấp. Ở nhiệt độ đế khoảng $250^\circ C$ trong giai đoạn lắng đọng màng, màng WO_3 kết tinh khá tốt trên đế ITO tuy nhiên trên đế thủy tinh thì chỉ cho dấu hiệu có sự kết tinh trên phổ XRD với những đỉnh nhỏ không rõ ràng trên “đường đôi” của vùng góc nhiễu xạ 20° đến 25° .

3.3 Ảnh hưởng của độ dày lớp ITO lên định hướng phát triển của màng WO_3 .

Trên hình 5 là phổ XRD của các màng WO_3 được phủ trên các lớp đệm ITO với các độ dày khác nhau: 150; 200; 250; 300 và 350nm. Với lớp ITO khoảng 350nm sự phát triển màng hầu như là đơn hướng theo mặt mạng (001) nhưng với khoảng cách giữa các mặt mạng khá lớn 0,400nm. Với lớp ITO khoảng 300nm sự phát triển màng WO_3 có sự bất thường về tính định hướng so với các màng khác do có sự xuất hiện của một số đỉnh ở vùng góc nhiễu xạ lớn. Với độ dày của lớp ITO giảm dần: 250, 200, 150 (nm), phổ XRD của các màng này cho thấy có sự giảm dần cường độ của đỉnh (001) và đồng thời tăng mạnh dần của đỉnh (200). Riêng đỉnh (020) nằm xen giữa hai đỉnh (001) và (200) không xuất hiện rõ ràng mà “nấp” vào chân của đỉnh (200) hoặc xuất hiện nhưng rất yếu trên lớp ITO 250nm. Hình 5b là phổ XRD của màng WO_3 trên lớp ITO dày 150nm. Phổ cho đỉnh (200) rất mạnh và đỉnh (001) tương đối yếu chứng tỏ màng phát triển cấu trúc ưu tiên theo hướng mặt mạng (200).



Hình 5: a) Phổ XRD của các màng WO_3 trên các lớp ITO có độ dày khác nhau;
b) Màng WO_3 phát triển theo hướng mặt mạng (200)

Trong sự hợp mạng phát triển màng WO_3 trên ITO này, sự chuyển hướng phát triển ưu tiên từ hướng mặt (001) ứng với độ dày lớp ITO 350nm sang hướng mặt (200) ứng với độ dày lớp ITO 150nm không thể giải thích được nếu chỉ dựa vào các lập luận về các kích thước mạng

cho phép sự hợp mạng trên. Tuy nhiên điều này cũng có thể giải thích được nếu ta kết hợp thêm sự biến dạng dư bên trong lớp ITO cũng như sự giãn nở nhiệt của đế thủy tinh ($\alpha_{\text{thủy tinh}} = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) và màng ITO ($\alpha_{\text{ITO}} = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [12,18].

Ở nhiệt độ 400°C đế màng WO_3 chuyển từ pha vô định hình sang tinh thể, đế thủy tinh có hệ số nở dài lớn hơn nên giãn nở nhiều hơn ITO. Khi đó ở mặt tiếp giáp với bề mặt thủy tinh mạng tinh thể ITO bị kéo căng ra, kích thước mạng trên các mặt song song bề mặt màng do đó cũng tăng và trong màng xảy ra ứng suất căng. Ứng suất căng gây nên biến dạng dư trong màng ITO đồng thời làm cho các mặt mạng song song với đế thủy tinh có xu hướng co về kích thước riêng của nó. Kết quả là các mặt mạng càng xa đế thủy tinh thì chịu ứng suất căng càng nhỏ và bị kéo giãn càng ít. Một yếu tố khác cũng góp phần rất đáng kể vào sự giảm ứng suất căng trên bề mặt màng chính là các sai hỏng bên trong màng [18]. Màng càng dày thì đóng góp này càng đáng kể và nhờ vậy khoảng cách giữa các nút oxy trên bề mặt ở màng ITO dày sẽ nhỏ hơn so với ở màng ITO mỏng.

Ở lớp ITO mỏng 150nm, khoảng cách giữa các nút oxy trên mặt ITO giãn rộng đến giá trị gần với khoảng cách giữa các nút W trên trục c hơn so với trục a nên sự hợp mạng xảy ra theo cách ưu tiên liên kết với các trục b và c của WO_3 . Do vậy màng phát triển ưu tiên theo hướng mặt mạng (200). Ở lớp ITO dày 350nm, khoảng cách giữa các nút oxy trên mặt ITO giãn ra kém hơn và gần với khoảng cách giữa các nút W trên trục a hơn so với trục c nên sự hợp mạng xảy ra theo cách ưu tiên liên kết với các trục a và b của WO_3 . Do vậy màng phát triển ưu tiên theo hướng mặt mạng (001). Ở các lớp ITO có độ dày trong khoảng từ 150nm đến 350nm, khoảng cách giữa các nút oxy trên mặt ITO kém dần khi độ dày tăng. Sự hợp mạng không đồng nhất giữa bề mặt ITO với các nút W sẽ tạo ra sự biến dạng bề mặt màng ITO. Mạng lưới oxy của bề mặt ITO sẽ bị biến dạng do sự chèo kéo của các nút W kết hợp với sự tồn tại của các vị trí khuyết oxy cũng như sự phát triển các sai hỏng bên trong lớp ITO. Kết quả là màng WO_3 được tạo thành có cấu trúc đa tinh thể với sự xuất hiện của cả ba hướng phát triển (001); (020); (200) ở đó sự phát triển theo hướng mặt (020) là khá yếu.

4. KẾT LUẬN

Công trình này đã phát hiện được sự “hợp mạng không đồng nhất của màng WO_3 trên ITO” và cũng đã tiến hành thực nghiệm trên đế thủy tinh thường. Kết quả cho thấy có sự phù hợp khá tốt giữa thực nghiệm với nhận định đã đưa ra ban đầu.

Kết quả thực nghiệm cũng cho thấy rằng trong phạm vi độ dày lớp ITO từ khoảng 150nm đến 350nm, có sự ảnh hưởng rất đáng kể của độ dày của ITO lên sự hợp mạng của WO_3 trên nó. Sự ảnh hưởng này cũng đã được giải thích dựa trên sự khác biệt giữa hệ số nở nhiệt của đế thủy tinh so với của màng ITO kết hợp với sự ảnh hưởng của các sai hỏng trong màng ITO trong khoảng độ dày này.

Màng WO_3 được phủ trên ITO có cấu trúc tinh thể định hướng theo hướng của mặt $\text{WO}_3(200)$ hoặc $\text{WO}_3(001)$. Với độ dày của lớp ITO thấp (cỡ lân cận dưới 150nm), màng WO_3 phát triển chủ yếu theo hướng mặt mạng (200), khi đó các kênh rỗng có kích thước lớn nhất dọc theo trục a của mạng tinh thể WO_3 hướng vuông góc với màng. Ở độ dày lớp ITO lớn (cỡ lân cận 350nm), màng WO_3 phát triển chủ yếu theo hướng mặt mạng (001).

Khi phủ trên các lớp ITO có độ dày trong khoảng từ 150nm đến 350nm, màng WO_3 nhìn chung có cấu trúc đa tinh thể với ba hướng phát triển chủ yếu là (001); (020) và (200). Tuy nhiên trong khoảng độ dày của lớp ITO đã nêu trên, màng WO_3 khi phát triển trên các lớp ITO có độ dày lớn hơn thì sự phát triển màng theo hướng mặt mạng (200) sẽ giảm đi và sự phát triển theo hướng mặt mạng (001) sẽ tăng lên.

HETEROEPITAXIAL GROWTH OF WO₃ FILMS ON ITO(400) SURFACES AND THE EFFECT OF THICKNESS OF ITO LAYER, COATED ON GLASS SUBSTRATES ON GROWTH ORIENTATION OF WO₃ LATTICE

**Le Van Ngoc⁽¹⁾, Tran Cao Vinh⁽¹⁾, Tran Tuan⁽¹⁾, Huynh Thanh Dat⁽²⁾,
Duong Ai Phuong⁽¹⁾, Le Quang Toai³, Bach Van Hoa⁴**

(1) University of Science, VNU-HCM

(2) VNU-HCM

(3) Voronezh State University, Russia.

(4) Go Vap High School, Ho Chi Minh city.

ABSTRACT: *WO₃ films were deposited by rf magnetron sputtering method onto ITO(400)-coated glass substrates. Experiments showed that the growth orientation of WO₃ crystalline lattice depends on the thickness of ITO layer. In this paper, this dependence will be discussed further.*

Keywords: *WO₃(200) plan, WO₃/ITO/glass, WO₃ structure.*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Lê Văn Ngọc, Lê Quang Trí, Trần Tuấn, Huỳnh Thành Đạt, Dương Ái Phương, Nguyễn Văn Đến, Tạp chí phát triển khoa học và công nghệ, ĐHQG Tp.HCM, Tập 11, Số 06-2008, 67-72.
- [2]. Nguyen Thi Bao Ngoc, Nguyen Van Nha, Nguyen Van Minh, Proc. 2nd IWOMS 1995, 341-344.
- [3]. Nguyen Van Nha, Nguyen Thi Bao Ngoc, Nguyen Van Hung, Thin Solid Film 334 (1998), 113.
- [4]. K. Bange, Solar Energy Materials & Solar Cells 58 (1999) 1-131.
- [5]. Le Van Ngoc, Tran Cao Vinh, Le Quang Toai, Nguyen Duc Thinh, Huynh Thanh Dat, Tran Tuan, Duong Ai Phuong, VNU Journal of science, Mathematics – Physics 25, (2009), 47-55.
- [6]. Lê Văn Ngọc, Trần Tuấn, Nguyễn Văn Đến, Dương Ái Phương, Huỳnh Thành Đạt, Trần Cao Vinh, Cao Thị Mỹ Dung. Tạp chí Phát Triển Khoa Học & Công Nghệ ĐHQG Tp.HCM, Tập 8, Số 08-2005, 29-33.
- [7]. Trần Cao Vinh, Nguyễn Hữu Chí, Cao Thị Mỹ Dung, Tạ Thị Kiều Hạnh, Proc. HNVLCR toàn quốc - Vũng Tàu (2007), trang 325-328.
- [8]. R.W.G. Wyckoff, in "Crystall Structure", 2nd ed., vol. 2, Krieger, Malaba, FL, 1986.
- [9]. M. Marezio, Acta Crystallogr., 20 (1966) 273.
- [10]. Elfallal, R. D. Pilkington, A. E. Hill, Thin solid films 223 (1993) 304.
- [11]. K.L. Chopra, S. Major, and D.K. Pandya, Thin Solid film 102, 1 (1983).
- [12]. H. Kim, C.M. Gilmore, A. Piqué, J.S. Horwitz, H. Mattoussi, H. Murata, Z.H. Kafafi, and D.B. Chrisey, J. Appl. Phys. 86, 6451 (1999).
- [13]. JCPDS, JCPDS diffraction tables, International Centre for Diffraction Data, 1997.
- [14]. W.-F. Wu, B.-S. Chiou, and S.-T. Hsieh, Semicond. Sci. Technol. 9, 1242 (1994).

- [15]. K. Bange, Solar Energy Materials & Solar Cells 58 (1999) 28–30.
- [16]. S.C. Moulzolf, L.J. LeGore, R.J. Lad, Thin solid films, 400 (2001) 56-63.
- [17]. Praise Sibuyi, Magister Scientiae, Faculty of Science University of Western Cape (2006), 22-24.
- [18]. Hari Singh Nalwa, Handbook of Thin film Materials, Vol.1, Academic Press (2002), 180.