

TÍNH CHẤT QUANG VÀ ĐIỆN CỦA MÀNG ITO ĐỊNH HƯỚNG TINH THỂ [222] TRÊN ĐỂ THỦY TINH

Trần Cao Vinh, Tạ Thị Kiều Hạnh, Cao Thị Mỹ Dung,
Lê Thụy Thanh Giang, Phạm Duy Phong
Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM

TÓM TẮT: Màng ITO đơn hướng tinh thể [222] được chế tạo bằng phương pháp phun xạ magnetron dc trên lớp đệm mỏng ITO. Khảo sát nhiễu xạ tia X cho thấy màng phát triển gần đơn hướng [222] với độ dày lên đến 750nm. Điện trở suất, nồng độ và độ linh động của điện tử tự do của màng ITO trên lớp đệm lần lượt là $1.2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, 10^{21} cm^{-3} và $50 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Độ truyền qua trung bình trong vùng khả kiến 400 – 700 nm là 80%. Các thông số quang học của màng ITO được xác định bằng cách dựa trên hàm điện môi Drude mở rộng và Lorentz, mô hình hóa phổ truyền qua đo thực nghiệm. Chiết suất tính toán của màng ITO ở bước sóng $0.55 \mu\text{m}$ là 1.8, trong khi bờ hấp thụ là 4.3 eV. Khối lượng hiệu dụng của điện tử trong vùng dẫn được xác định là $\sim 0.33m_e - 0.35m_e$.

Từ khóa: màng ITO, phun xạ magnetron, tinh thể [222].

1. GIỚI THIỆU

Những năm gần đây, sự phát triển mạnh các ứng dụng của ITO trong công nghệ cao như linh kiện phát quang, linh kiện điện tử trong suốt, đòi hỏi một sự quan tâm sâu và đầy đủ hơn về vật liệu ITO nhằm tối ưu hóa hiệu suất và độ bền của linh kiện. Ngoài các đặc tính ưu việt của màng ITO là dẫn điện tốt và truyền qua cao trong vùng khả kiến, các tính chất khác như tính chất tinh thể, trạng thái bề mặt có ảnh hưởng lớn lên tính năng hoạt động của các thiết bị quang điện có sử dụng ITO: điện cực phun lỗ trống trong điốt phát quang hữu cơ (OLED) [1,2], các tiếp xúc bán dẫn không đồng chất trong pin mặt trời [3]. Nghiên cứu ứng dụng ITO trong OLED của Nakaya [4] cho thấy với ITO có định hướng tinh thể ưu tiên (texture) [222] dùng làm điện cực trong suốt thì ít bị lão hóa hơn ở tiếp giáp với lớp màng hữu cơ, làm tăng hiệu suất phát sáng và thời gian sống của linh kiện. Trong nghiên cứu này tác giả cũng kết luận rằng trong những điều kiện chế tạo ITO thông thường bằng phương pháp phun xạ magnetron, rất khó để có hướng [222] phát triển ưu tiên. Hơn nữa, theo tác giả để đạt điện trở suất tối ưu với các điều kiện về nhiệt độ đế, công suất phun xạ, độ dày thích hợp, màng luôn tăng trưởng theo hướng [400] [5]. Trong một báo cáo trước [6], chúng tôi đã đề cập việc giải quyết vấn đề trên bằng cách tạo màng ITO trên lớp đệm ZnO theo kiểu heteroepitaxy. Trong báo cáo này, chúng tôi trình bày một cách thức khác để chế tạo màng ITO [222] bằng cách tạo màng ITO trên chính lớp đệm ITO giàu ôxi theo kiểu homoepitaxy. Kết quả cho thấy không những màng ITO phát triển mạnh định hướng [222] mà độ dẫn điện và độ trong suốt hoàn toàn tương tự như trong các điều kiện chế tạo tối ưu với định hướng [400].

2. THỰC NGHIỆM

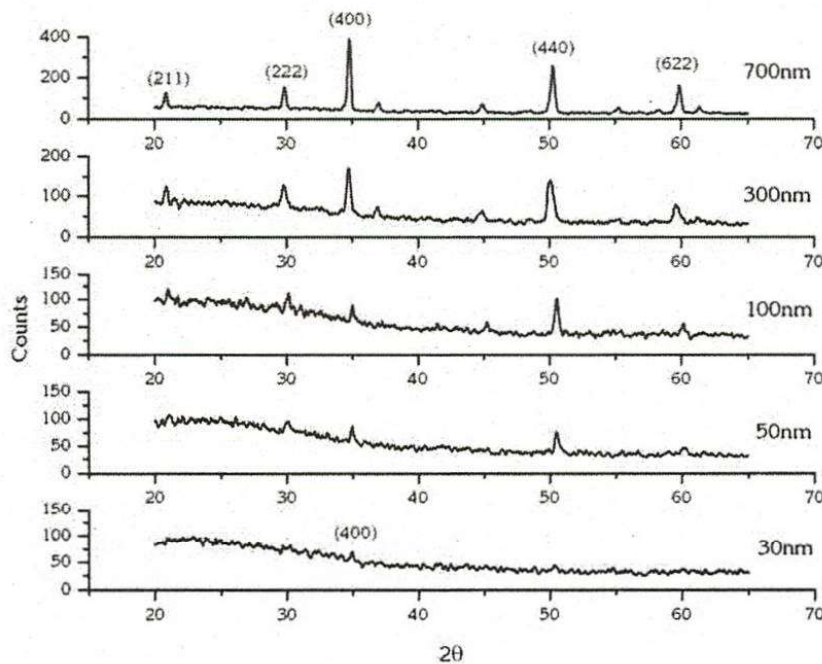
Màng ITO được tạo bằng phương pháp phun xạ magnetron dc từ bia gồm ITO với thành phần khối lượng $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2 = 9:1$, độ tinh khiết 99.99%, trong hệ tạo màng Univex 450, với áp suất nền 6×10^{-6} torr, khoảng cách bia đế 5 cm. Phun xạ được thực hiện với khí Ar (99.999%) và O_2 (99.999%). Đế phủ là thủy tinh soda-lime Marienfeld (Germany). Quá trình tạo màng ITO chia làm hai giai đoạn. Giai đoạn thứ nhất, màng ITO được phủ trong điều kiện nhiệt độ đế 350°C , trong môi trường Ar + O_2 với áp suất riêng phần ôxi $\sim 10^{-4}$ torr, độ dày lớp

đệm ~ 15 nm. Giai đoạn thứ hai, nguồn ôxi được ngắt, quá trình tạo màng tạm dừng, buồng được hút chân không sâu đến áp suất nền 6×10^{-6} torr. Sau đó màng ITO tiếp tục được phủ trên lớp ITO ban đầu với điều kiện công suất 50 W, trong môi trường Ar 4×10^{-3} torr, nhiệt độ để 350°C. Nồng độ và độ linh động của điện tử tự do được xác định bằng phép đo hiệu ứng Hall trên máy HMS3000. Định hướng tinh thể của màng được xác định bằng nhiễu xạ tia X với phương pháp $\theta - 2\theta$ (bước sóng Cu K_{α} 1.5406 Å) trên máy Siemens D5. Phổ truyền qua trong vùng từ 0.2 – 1.8 μm được đo bằng máy UV-Vis Jasco V-530 và FTIR Bruker Equinox 55. Độ dày màng được xác định bằng phương pháp Stylus với máy Dektak 6M.

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1 Định hướng tinh thể:

Hình 1 là giản đồ nhiễu xạ tia X của màng ITO theo độ dày từ 300 nm đến 700 nm trên đế thủy tinh. Quan sát cho thấy màng có cấu trúc đa tinh thể, nhiều định hướng và tăng trưởng mạnh theo hướng [400] khi tăng độ dày. Trong khi đó, giản đồ nhiễu xạ trên hình 2 của các màng ITO theo độ dày trên cùng lớp đệm (O-ITO) và trong cùng điều kiện chế tạo cho thấy màng ITO phát triển mạnh hướng [222] trong khoảng độ dày đến hơn 750 nm.

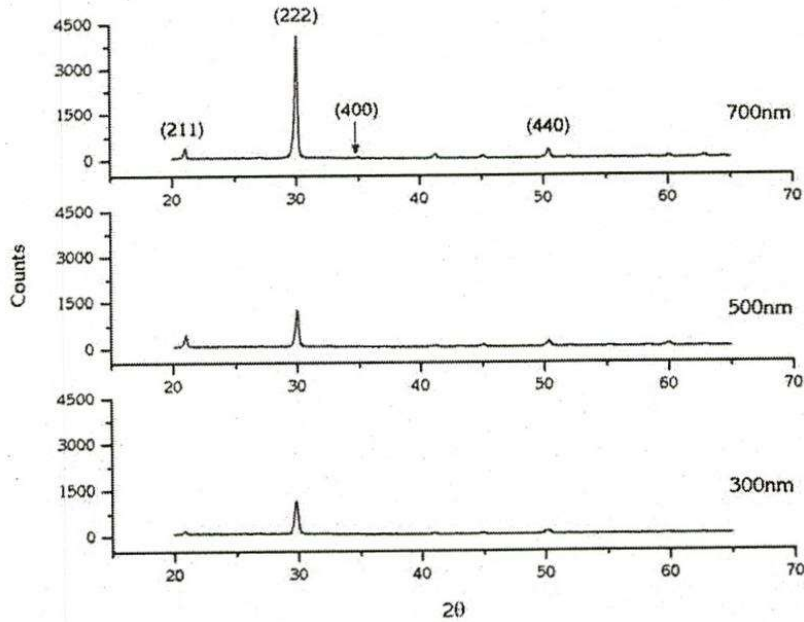


Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ của màng ITO theo độ dày khi không có lớp đệm

Mô hình phát triển homoepitaxy được đưa ra để giải thích cho sự phát triển của màng ITO trên lớp đệm. Khi tăng trưởng trên đế thủy tinh trong điều kiện nhiệt độ cao và độ dày tăng, ITO có khuynh hướng phát triển hướng [400] do thuận lợi về mặt năng lượng. Nghiên cứu [7] cho thấy năng lượng biến dạng tích lũy trong quá trình tăng trưởng màng có vai trò quyết định đến sự phát triển định hướng ưu tiên của các mặt tinh thể. Năng lượng toàn phần trong màng chủ yếu bao gồm năng lượng riêng bề mặt và năng lượng biến dạng. Trong quá trình tăng trưởng màng, mặt tinh thể có năng lượng toàn phần thấp sẽ ưu tiên phát triển. Trong trường hợp ITO với cấu trúc lập phương bixbyte, mặt (222) là mặt xếp chặt nên suất Young Y_{222} lớn hơn so với mặt (400) và các mặt khác. Biểu thức cho năng lượng biến dạng đàn hồi có dạng [7]:

$$U_{\varepsilon} = \left(\frac{Y}{1-\nu} \right)_{(hkl)} \varepsilon_{xy}^2 h \quad (1)$$

với ν - hệ số Poisson, ε_{xy} - độ biến dạng song song bề mặt màng, h - độ dày màng. Biểu thức (1) cho thấy trong điều kiện tăng trưởng trên thủy tinh vô định hình, mặt (222) khó phát triển vì có biến dạng và suất Young lớn. Khi có lớp đệm O-ITO (222), sự tăng trưởng homoepitaxy giúp giảm thiểu tối đa độ biến dạng của màng trên mặt (222) nên năng lượng biến dạng tích lũy là thấp, điều đó giúp màng phát triển mặt (222) dễ dàng hơn so với các mặt khác. Điều này giải thích cho sự phát triển hướng [222] rất mạnh của ITO/O-ITO.



Hình 2. Giảm độ nhiễu xạ của màng ITO theo độ dày khi có lớp đệm O-ITO

3.2 Tính chất quang học:

Tính chất quang học của ITO được mô tả bởi hàm điện môi $\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \tilde{\chi}_{FC} + \tilde{\chi}_{VE}$ phụ thuộc vào tần số của ánh sáng (trường điện từ với tần số ω) và được đóng góp từ 3 thành phần:

Điện tử tự do:

$$\tilde{\chi}_{FC} = - \frac{\omega_N^2}{(\omega^2 + \gamma^2)} + i \frac{\gamma}{\omega} \frac{\omega_N^2}{(\omega^2 + \gamma^2)}$$

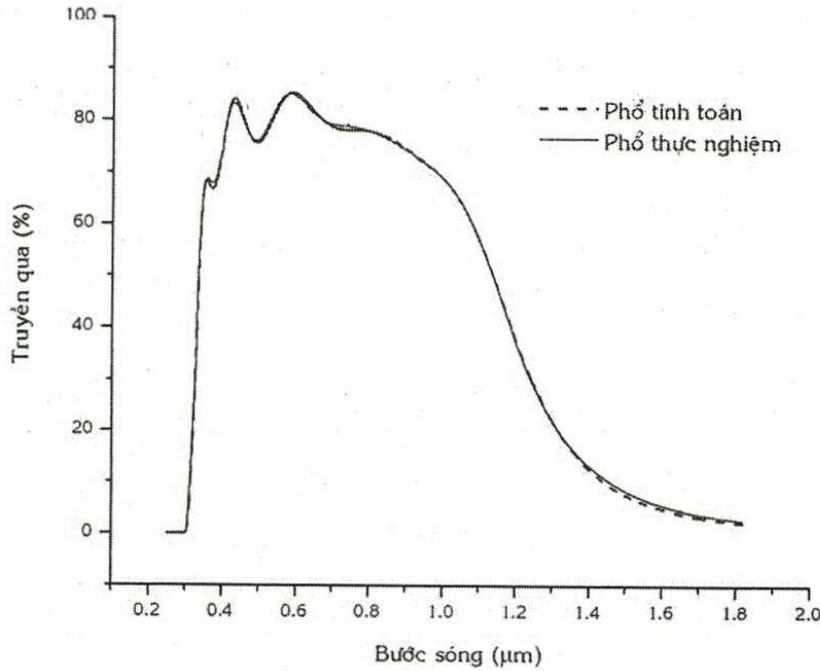
là độ cảm điện gây bởi điện tử tự do từ lý thuyết Drude^[8]. Đại lượng này đóng vai trò quan trọng cho sự hấp thụ mạnh trong vùng hồng ngoại gần. Tần số Drude

$$\omega_N = \sqrt{\frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m_c^*}} \quad (2)$$

phụ thuộc vào nồng độ điện tử tự do N trong màng, m_c^* là khối lượng hiệu dụng của điện tử trong vùng dẫn, ε_0 và e lần lượt là độ điện thẩm của chân không và điện tích của điện tử. γ là tần số va chạm, đặc trưng cho sự tán xạ của điện tử trong vùng dẫn. Với mô hình lý thuyết Drude mở rộng, tần số va chạm γ của điện tử tự do phụ thuộc vào tần số kích thích ω , được biểu diễn theo biểu thức^[9,10]:

$$\gamma(\omega) = \gamma_L - \frac{(\gamma_L - \gamma_H)}{\pi} \left[\arctan\left(\frac{\omega - \omega_{\text{Cross}}}{\Delta\omega}\right) + \frac{\pi}{2} \right] \quad (3)$$

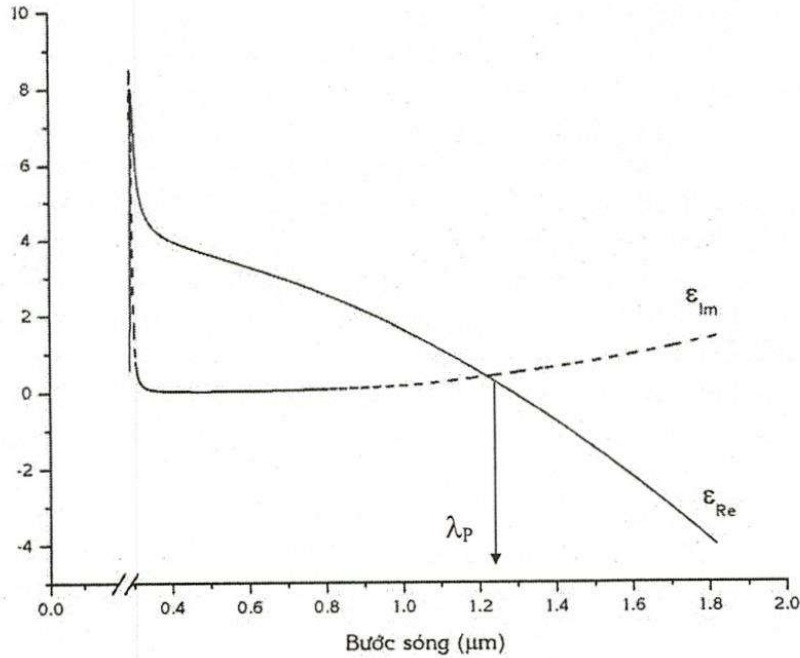
Trong đó γ_L và γ_H lần lượt là giá trị γ ở tần số thấp ($\omega \ll \omega_{\text{cross}}$) và ở tần số cao ($\omega \gg \omega_{\text{cross}}$), ω_{Cross} được gọi là tần số chuyển tiếp, đó là tần số mà ở đó γ chuyển giá trị từ γ_L xuống γ_H ($\gamma_L > \gamma_H$) và $\Delta\omega$ là độ rộng của vùng chuyển tiếp. Biểu thức (3) biểu diễn sự giảm của tần số va chạm điện tử γ theo tần số ω của trường kích thích.



Hình 3. Phổ truyền qua tính toán và thực nghiệm của màng ITO với độ dày 330 nm khi có lớp Điện tử liên kết:

$$\tilde{\chi}_{VE} = \frac{\omega_{Nc}^2}{\omega_c^2 - \omega^2 - i\gamma_c \omega}$$

là độ cảm điện gây bởi các điện tử liên kết từ lý thuyết điện tử Lorentz ^[11], là đóng góp chủ yếu cho hàm điện môi gần bờ hấp thụ trong vùng tử ngoại. ω_c , γ_c và ω_{Nc} lần lượt là tần số dao động riêng, hệ số tắt và cường độ dao động của điện tử liên kết trong vùng hóa trị. Mô hình này xem sự hấp thụ quang học của ITO là sự hấp thụ cộng hưởng với tần số ω_c của điện tử liên kết.

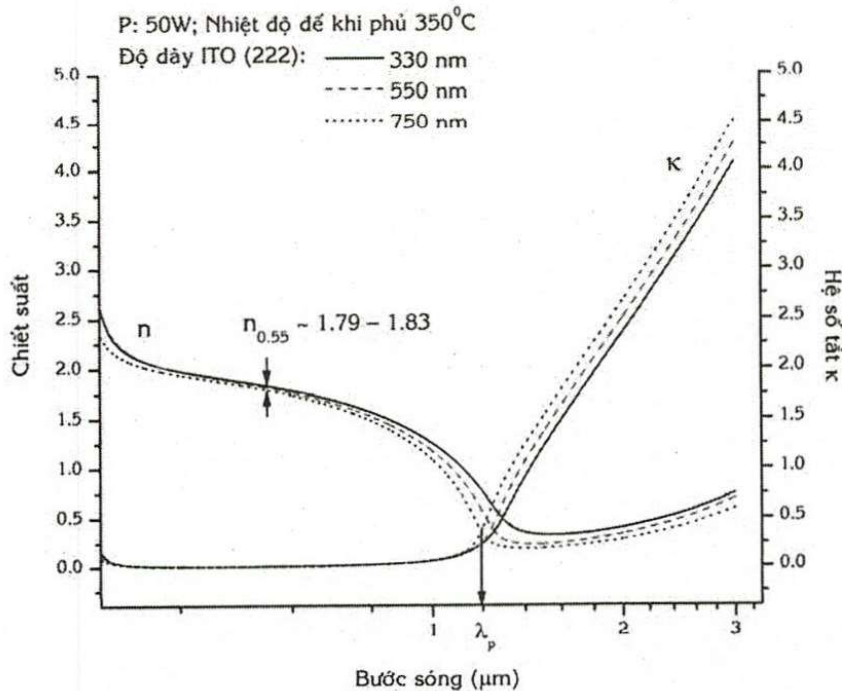


Hình 4. Phần thực và phần ảo của hàm điện môi của ITO

Lỗi điện môi ϵ_∞ : là hằng số, biểu diễn cho đóng góp của tất cả các ion và điện tử còn lại trong mạng tinh thể ở vùng tần số khảo sát từ vùng hồng ngoại gần đến vùng tử ngoại gần.

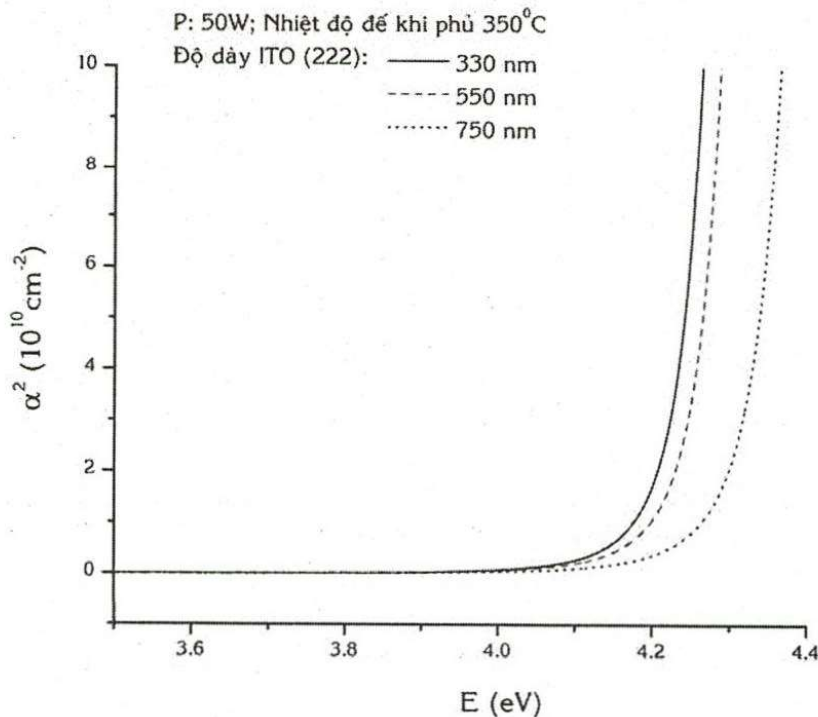
Từ mô hình điện môi ở trên, chiết suất và hệ số tắt được tính toán theo biểu thức:

$$n = \sqrt{\frac{1}{2}(\epsilon_r + \sqrt{\epsilon_r^2 + \epsilon_i^2})} \quad \text{và} \quad \kappa = \sqrt{\frac{1}{2}(-\epsilon_r + \sqrt{\epsilon_r^2 + \epsilon_i^2})}$$



Hình 5. Chiết suất và hệ số tắt của ITO/O-ITO/glass

Để xác định các thông số quang học của màng ITO từ mô hình hàm điện môi, phần mềm Scout^[12] được sử dụng để tính toán. Phổ truyền qua tính toán từ hàm điện môi được khớp với phổ thực nghiệm để tìm ra các thông số quang học như chiết suất n , hệ số tắt κ và hệ số hấp thụ α . Các thông số biến đổi của mô hình là $\omega_N, \gamma_L, \gamma_H, \omega_{Cross}, \Delta\omega, \omega_c, \omega_{Nc}, \gamma_c$, và độ dày màng d . Phổ tính toán và phổ thực nghiệm trên hình 3 rất trùng khớp cho mẫu ITO 330 nm trên lớp đệm O-ITO. Hình 4 biểu diễn hàm điện môi của ITO thu được từ việc khớp phổ tính toán với phổ thực nghiệm trong vùng bước sóng từ 0.3 đến 1.8 μm . Phần thực ϵ_{Re} giảm nhanh khi tăng bước sóng và bằng không ở bước sóng plasma $\lambda_p \sim 1.24 \mu\text{m}$. Trong khi đó phần ảo $\epsilon_{Im} \sim 0$ ở vùng khả kiến và tăng chậm theo bước sóng. Ở gần vùng bờ hấp thụ, phần thực và phần ảo của hàm điện môi tăng nhanh. Khi $\lambda > \lambda_p$, $\epsilon_{Re} < 0$ thể hiện đặc tính phản xạ mạnh của ITO trong vùng hồng ngoại tương tự kim loại. Với $\lambda < \lambda_p$, $\epsilon_{Im} \sim 0$, ITO thể hiện tính trong suốt trong vùng khả kiến. Hình 5 trình bày sự thay đổi của chiết suất n , hệ số tắt κ theo bước sóng tính từ hàm điện môi thu được như trên hình 4. Chiết suất ở bước sóng 0.55 μm xấp xỉ 1.8 và giảm mạnh về phía hồng ngoại. Trong vùng hồng ngoại khi $\lambda > \lambda_p$, hệ số tắt $\kappa \gg n$, thể hiện tính phản xạ mạnh. Hình 6 trình bày kết quả tính toán bình phương hệ số hấp thụ theo bước sóng cho việc xác định độ rộng vùng cấm quang học. ITO là vật liệu có dịch chuyển thẳng cho phép nên có thể xác định E_g từ ngoại suy vùng tuyến tính của đường cong α^2 trên hình 6. Giá trị của bờ hấp thụ của ITO thu được lớn hơn 4.2 eV. Giá trị vùng cấm cơ bản E_g của ôxít In_2O_3 không pha tạp là 3.75 eV. Giá trị cao hơn (~ 0.5 eV) của bờ hấp thụ quang học của ITO so với giá trị E_g của ôxít In_2O_3 là do hiệu ứng Burstein-Moss.



Hình 6. Dạng của bờ hấp thụ quang học của ITO/O-ITO/glass

Với hiệu ứng này, nồng độ điện tử dẫn cao của ITO tạo ra sự suy biến tại lân cận đáy vùng dẫn của ôxít In_2O_3 , các mức donor mở rộng sâu vào vùng dẫn. Lúc này các trạng thái ở đáy vùng dẫn không còn trống. Các điện tử ở vùng hóa trị muốn chuyển lên vùng dẫn phải hấp thụ các photon có năng lượng cao hơn E_g của ôxít In_2O_3 . Biểu thức dịch chuyển Burstein-Moss có dạng^[13]:

$$\Delta E_g = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m_{cv}^*} \quad (4)$$

Trong đó \hbar là hằng số Planck và k_F là véctơ sóng Fermi cho bởi công thức $k_F = (3\pi^2 N)^{1/3}$ và m_{cv}^* là khối lượng hiệu dụng rút gọn, được tính bởi biểu thức $\frac{1}{m_{cv}^*} = \frac{1}{m_c^*} + \frac{1}{m_v^*}$ với m_c^* và m_v^* lần lượt là khối lượng hiệu dụng của điện tử trong vùng dẫn và vùng hóa trị. Biểu thức (4) cho thấy sự dịch chuyển tăng theo nồng độ điện tử trong vùng dẫn $\Delta E_g \sim N^{2/3}$. Có thể thấy $m_{cv}^* < m_c^*$, nếu thay các giá trị bằng số vào trong biểu thức (4) ta có:

$$\Delta E_g \text{ (eV)} > 0.363 \times 10^{-14} \frac{N^{2/3} \text{ (cm}^{-3}\text{)}}{m_c^* / m_e}$$

Với giá trị của $N \sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ và $m_c^* \sim (0.33 - 0.35) m_e$ cho ITO, thì $\Delta E_g > 1 \text{ eV}$. Giá trị của ΔE_g thu được trong thực nghiệm này là $0.5 \text{ eV} - 0.6 \text{ eV}$, nhỏ hơn giá trị ước tính, nguyên nhân là do ngoài sự mở rộng bờ hấp thụ do hiệu ứng Burstein-Moss còn có sự thu hẹp bờ hấp thụ bởi sự tán xạ của điện tử - điện tử và điện tử - tạp ion hóa. Ở nồng độ pha tạp tương đối lớn như trong ITO, sự tán xạ làm mở rộng đáy vùng dẫn và đỉnh vùng hóa trị vào trong vùng cấm, làm giảm tác động của hiệu ứng Burstein-Moss^[14].

3.3 Các tính chất khác:

Các tính chất điện của màng ITO là điện trở mặt R_s , điện trở suất ρ , mật độ N và độ linh động μ của điện tử tự do được xác định bằng phép đo hiệu ứng Hall. Bảng 1 liệt kê các giá trị R_s , ρ , N và μ của màng ITO trên lớp đệm O-ITO với các độ dày khác nhau và cho thấy tính chất điện N và μ thay đổi không đáng kể theo độ dày màng. Sự kết hợp giữa phép đo Hall và phân tích phổ bằng mô hình hàm điện môi cho phép xác định khối lượng hiệu dụng của điện tử trong vùng dẫn trong màng ITO/O-ITO từ biểu thức (2):

$$\frac{m_c^*}{m_e} \sim \frac{N \text{ (cm}^{-3}\text{)}}{1.12 \times 10^{13} \omega_N^2 \text{ (cm}^{-1}\text{)}}$$

Giá trị tính toán của $m_c^* \sim (0.33 - 0.35) m_e$, xấp xỉ giá trị 0.35 của tác giả Hamberg^[13]. Khảo sát của Ohhata^[15] đưa ra kết luận khối lượng hiệu dụng phụ thuộc vào nồng độ điện tử, giá trị thay đổi từ $(0.31 - 0.43) m_e$ khi nồng độ tăng từ 1.0×10^{19} đến $8.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Sự khác nhau về trị số của khối lượng hiệu dụng là do trong mỗi trường hợp màng được chế tạo với phương pháp và điều kiện khác nhau. Ngoài ra, giá trị của lỗi điện môi ϵ_∞ của ITO cũng được xác định trong khoảng 3.5 - 3.7, so với giá trị 3.95 được chế tạo bằng phương pháp bay hơi chùm điện tử của tác giả Hamberg^[13].

Bảng 1. Tính chất điện của màng ITO/ZnO/glass và ITO/O-ITO/glass

Các chỉ số	ITO/ZnO/glass ^[6]	ITO/O-ITO/glass		
Độ dày (nm)	312	330	550	750
ϵ_∞	3.58	3.63	3.53	3.67
E_g (eV)	3.94	4.25	4.27	4.35
R_s (Ω/\square)	5	3.9	2.2	1.6

ρ ($10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$)	1.55	1.3	1.2	1.2
N (10^{20} cm^{-3})	10.2	10.1	10.3	10.5
μ_{dc} ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	40	48.1	50.6	49.6
m_c^*/m_e	0.34	0.35	0.34	0.33

Bảng 1 tổng hợp các tính chất điện của màng ITO trên lớp đệm O-ITO và so sánh với màng ITO trên lớp đệm ZnO [6] với cùng điều kiện chế tạo. Kết quả cho thấy ITO/O-ITO cho tính chất điện tốt hơn so với ITO/ZnO, đặc biệt là giá trị cao hơn của độ linh động điện tử do sự tăng trưởng ITO trên O-ITO là homoepitaxy trong khi ITO trên ZnO là heteroepitaxy.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đưa ra cách thức chế tạo màng ITO đơn hướng [222] với lớp đệm mỏng ITO giàu ôxi 15 nm. Cơ chế tăng trưởng homoepitaxy được đưa ra để giải thích cách thức chế tạo. Màng có độ truyền qua trung bình trên 80% trong vùng khả kiến, điện trở suất có giá trị $\sim 1.2 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ với độ dày lên đến 750 nm. Tính chất quang học của màng ITO [222] được tính toán từ phân tích phổ truyền qua bằng mô hình Drude mở rộng và Lorentz cho hàm điện môi.

OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF HIGHLY [222] TEXTURED ITO ON GLASS

Tran Cao Vinh, Ta Thi Kieu Hanh, Cao Thi My Dung,
Le Thuy Thanh Giang, Pham Duy Phong

University of Sciences, VNU-HCM

ABSTRACT: Thin ITO films on glass having single crystalline direction [222] were deposited by magnetron dc sputtering. The high-texture ITO films [222] were obtained by using thin ITO buffers that were sputtered in oxygen-rich O+Ar mixture at early stage. X-ray patterns showed that ITO films had single direction [222] with film thickness up to 750nm. The resistivity, electron density and mobility of ITO/buffer/glass films were $1.2 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$, 10^{21} cm^{-3} and $50 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$, respectively. The average transmittance in visible region (400-700nm) was 80%. The optical properties of the films were determined by using (extended Drude + Lorentz) dielectric function as a base to model the measured transmission spectra. The calculated refraction index at $0.55 \mu\text{m}$ was 1.8 and band gap was 4.3 eV. Furthermore, the value of the electron effective mass in conduction band was also deduced and had value in the range of $0.33m_e - 0.35m_e$.

Keywords: ITO film, magnetron dc sputtering, direction [222].

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. M. Tadayyon, "Work function modification of indium-tin-oxide used in organic light emitting devices", *J. Vac. Sci. Tech.* A17, 1773 (1999)
- [2]. H. Kim, "Indium tin oxide thin films for organic light-emitting devices", *Appl. Phys. Lett.* 74, 3444 (1999)
- [3]. M. Losurdo, "Modifications of c-Si/a-Si:H/indium tin oxide heterostructures upon thermal annealing", *J. Appl. Phys.* 90, 6505 (2001)
- [4]. Nakaya, "Organic electroluminescent device and preparation method with ITO electrode (111) orientation", *United State Patent*, No. 6188176, (2001)
- [5]. Yeon Sik Jung, "Development of indium tin oxide film texture during DC magnetron sputtering deposition", *Journal of Crystal Growth* 259, 343 (2003)
- [6]. Trần Cao Vinh, Nguyễn Hữu Chí, Cao Thị Mỹ Dung, Đinh Thị Mộng Cẩm, "Tạo màng mỏng ITO trên thủy tinh có lớp đệm ZnO", *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ - ĐHQG Tp. HCM*, Tập 8, Số 4, 21 (2005)
- [7]. Trần Cao Vinh, Nguyễn Hữu Chí, Cao Thị Mỹ Dung, Tạ Thị Kiều Hạnh, "Sự tăng trưởng tinh thể với định hướng ưu tiên của màng mỏng ITO trong phương pháp phun xạ magnetron", *Tuyển tập Báo cáo Hội nghị Vật lý Chất rắn Toàn quốc - Lần V*, Tháng 11/2007, 325 - 328 (2008)
- [8]. Edwards P. P., "Basic materials physics of transparent conducting oxides", *Dalton Trans.*, The Royal Society of Chemistry UK, 2995 (2004)
- [9]. D. Mergel, "Dielectric modeling of optical spectra of thin $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ films", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35, 794 (2002)
- [10]. Solieman, "Modeling of optical and electrical properties of $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ coatings made by various techniques", *Thin Solid Films* 502, 205 (2006)
- [11]. Reitz J. R., *Foundation of electromagnetic theory*, 4th Ed., Addison - Wesley, USA, (1993)
- [12]. Theiss W., *Hard and Software for Optical Spectroscopy*, Dr. Bernhard-Klein-Str. 110, 52078 Aachen, Germany, www.mtheiss.com.
- [13]. Hamberg, "Evaporated Sn- In_2O_3 film: Basic optical properties and applications to energy - efficient windows", *J. Appl. Phys.* 60, R123 (1986)
- [14]. Lata Gupta, "Band gap narrowing and the band structure of tin-doped indium oxide films", *Thin Solid Films* 176, 33 (1989)
- [15]. Ohhata Y. (1978), "Optical properties of rf reactive sputtered tin-doped In_2O_3 films", *Thin Solid Films* 59, pp. 255 - 261.