

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO MÀNG DẪN ĐIỆN TRONG SUỐT LOẠI n SnO_2 PHA TẬP Ta TRÊN ĐỂ THẠCH ANH BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHÚN XẠ MAGNETRON DC

NGÔ NGỌC HÙNG¹; ĐẶNG HỮU PHÚC¹; NGUYỄN THỊ MỸ HẠNH²; LÊ TRẦN³,
TRẦN BÍCH THỦY

¹Khoa Khoa học Cơ bản, trường Đại học Công nghiệp TP. HCM;

²Khoa cơ khí, trường Đại học Công nghiệp TP. HCM;

³Khoa vật lý-vật lý kỹ thuật, trường Đại học Khoa học tự nhiên TP.HCM
danghuuphuc@iuh.edu.vn

Tóm tắt. Công trình này tập trung nghiên cứu chế tạo màng dẫn điện trong suốt SnO_2 pha tập Ta (TTO) được lắng đọng ở các nhiệt độ để khác nhau. Màng TTO được lắng đọng trên đế thạch anh bằng phương pháp phún xạ magnetron DC. Cấu trúc tinh thể và tính chất quang và điện của màng được khảo sát bằng giản đồ nhiễu xạ tia X, phổ truyền qua Uv-Vis và phép đo Hall. Kết quả cho thấy, màng có cấu trúc tứ giác rutile của SnO_2 đa tinh thể với mặt ưu tiên SnO_2 (101). Màng đạt giá trị điện trở suất thấp nhất ở điều kiện tối ưu ở 300°C là $4,50 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ với nồng độ hạt tải và độ linh động lần lượt là $5,51 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $3,08 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ đồng thời độ truyền qua trung bình của màng trong vùng khả kiến trên 80%. Đặc trưng I-V của tiếp xúc dị thể n-TTO/p-Si được khảo sát ở điều kiện được chiếu sáng và không chiếu sáng.

Từ khóa. màng loại n SnO_2 :Ta, phún xạ, magnetron DC, X-ray, Hall, I-V.

STUDYING, FABRICATING AND INVESTIGATING THE INFLUENCE OF DOPANTS ON ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF SnO_2 :In (TIO) AND SnO_2 :Zn (ZTO) PREPARED BY DC MAGNETRON SPUTTERING

Abstract. This report focuses on studying and fabricating Ta-doped SnO_2 (TTO) films following various depositing temperatures. TTO films were deposited on quartz glass substrates using a direct current (DC) magnetron sputtering method. Structure and opto-electrical properties were investigated by X-ray patterns, Uv-Vis spectra and Hall measurement. These results show a tetragonal rutile structure of the SnO_2 in which the preferred (101) was dominant. The best conductivity of TTO film was achieved at the optimum depositing temperature of 300°C with resistivity, hole concentration, and mobility of $4,50 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$, $5,51 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $3,08 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, respectively. Furthermore, the average transmittance of the films was above 80%. The I-V characteristics of the n-TTO/p-Si was investigated in the dark and illumination.

Keywords. n-type SnO_2 :Ta, sputtering, magnetron DC, X-ray, Hall, I-V.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, nghiên cứu màng dẫn điện trong suốt (TCOs) được quan tâm nghiên cứu cho các vật liệu ứng dụng trong các thiết bị quang điện như màng hình tinh thể lỏng, pin mặt trời, LED, OLED [1-6]. Trong đó, màng In_2O_3 pha tập Sn (ITO) được sử dụng rộng rãi làm màng bởi vì dẫn điện tốt ($\sim 2 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$) đồng thời có độ truyền qua cao (80 – 90 %) trong vùng ánh sáng khả kiến [7]. Tuy nhiên, số lượng Indium trong tự nhiên rất là hiếm và đắt dẫn đến chi phí sản xuất rất cao. Vì vậy nhu cầu tìm kiếm vật liệu thay thế In rất cần thiết, so với ITO SnO_2 cũng có các ưu điểm tương đồng như độ rộng vùng cấm lớn 3.87 – 4.3 eV, độ truyền qua trong vùng ánh sáng khả kiến cao, độ dẫn cao, bền hóa và nhiệt [9]. Các phương pháp chế tạo màng SnO_2 và SnO_2 pha tập có thể kể đến như lắng đọng hơi hóa học (CVD) [10-11], phun nhiệt phân [12-13], bốc bay [14], phún xạ [17]. Trong đó, phương pháp phún xạ magnetron DC được lựa chọn bởi vì những ưu điểm về kinh tế, triển khai trong công nghiệp so với phún xạ magnetron RF, PLD và không cần phải xử lý nhiệt so với phương pháp như Sol-gel. Vì vậy, trong công trình này, tính chất cấu trúc, quang điện của màng dẫn điện trong suốt SnO_2 loại n pha tập Ta (TTO) được lắng đọng trên đế thạch anh bằng phương pháp phún xạ magnetron DC sẽ được nghiên cứu.

2. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

Màng TTO được chế tạo bằng phương pháp phun xạ magnetron DC từ bia gồm hỗn hợp (SnO₂ và Ta₂O₅), với 6 phần trăm khối lượng (% wt) Ta₂O₅, trong hệ tạo màng Univex 450. Để được làm sạch bằng dung dịch NaOH 10% và acetone để loại bỏ tạp bẩn, rồi được rửa bằng nước cất và được sấy khô trước khi được đưa vào buồng chân không. Trước khi tiến hành phun xạ tạo màng, bia vật liệu được tẩy bề mặt bằng phóng điện plasma trong môi trường khí Argon ở áp suất khoảng 10⁻³ Torr trong thời gian 15 phút. Áp suất khí nền ban đầu đạt 10⁻⁵ torr, áp suất làm việc 4 x 10⁻³ Torr, công suất phun xạ là 15W và khoảng cách giữa bia và đế 7cm. Độ dày màng được xác định bằng phần mềm mô phỏng Scout bằng làm khớp phổ truyền qua UV-VIS với mô hình được xây dựng. Các màng có bề dày khoảng 460 nm. Cấu trúc tinh thể của màng được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ tia X trên máy D8-ADVANCE. Phổ truyền qua trong vùng từ 200÷1100 nm được đo bằng máy UV-Vis Jasco V-530. Tính chất điện được xác định bằng phép đo Hall Van der Pauw trên máy đo HMS3000. Các màng TTO được lắng đọng ở các nhiệt độ để khác nhau được ký hiệu TTO – x (x = tp, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C). Đặc trưng I-V của tiếp xúc p-n dị thể n-TTO/p-Si được khảo sát bằng máy Keithley 240. Tiếp xúc n-TTO/p-Si được khảo sát đặc trưng sáng sử dụng đèn giả phổ mặt trời AM 1.5 với công suất 100 mW/cm².

Bảng 1. Kết quả đo Hall của các màng TTO được lắng đọng từ bia chứa 6% Ta₂O₅ theo nhiệt độ để.

Tên mẫu	T (°C)	Nồng độ hạt tải (cm ⁻³)	Độ linh động (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	Điện trở suất (Ωcm)
TTO – tp	tp	-	-	-
TTO – 200	200	-4,51 x 10 ²⁰	3,08	4,50 x 10 ⁻³
TTO – 300	300	-5,51 x 10 ²⁰	5,64	2,01 x 10 ⁻³
TTO – 400	400	-5,83 x 10 ²⁰	5,25	2,04 x 10 ⁻³
TTO – 500	500	-7,34 x 10 ²⁰	0,71	1,20 x 10 ⁻²

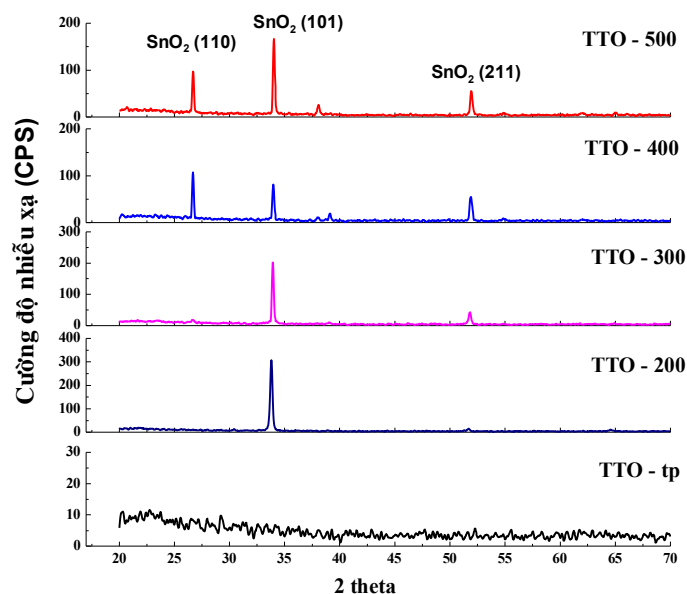
3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1 Tính chất điện của màng TTO được lắng đọng ở các nhiệt độ khác nhau

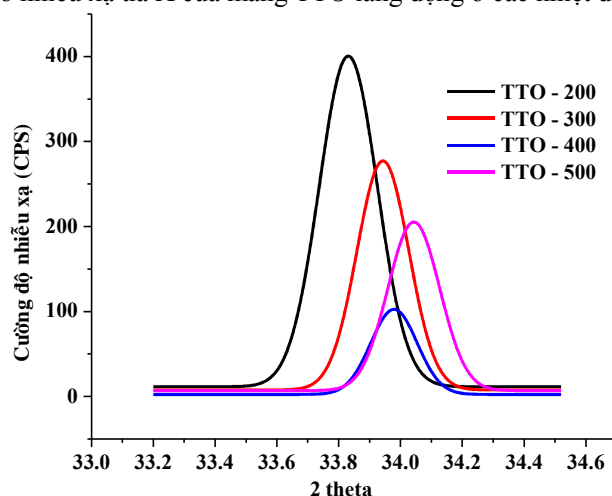
Kết quả tính chất điện của màng dẫn điện trong suốt TTO được khảo sát theo nhiệt độ lắng đọng ở áp suất làm việc 4 x 10⁻³ torr từ bia chứa 6% pha tạp Ta₂O₅ trình bày ở bảng 1. Kết quả cho thấy màng TTO có điện trở vô cùng lớn khi được lắng đọng ở nhiệt độ phòng do hiện tượng bù giữa hai loại hạt tải âm được đóng góp bởi các donor như và hạt tải dương được đóng góp bởi acceptor Sn²⁺. Khi nhiệt độ để trong khoảng từ 200 °C - 300 °C, màng TTO có tính chất điện loại n và điện trở suất thấp đạt được là 2,01 x 10⁻³ Ωcm tương ứng nồng độ hạt tải và độ linh động lần lượt là 5,51 x 10²⁰ cm⁻³, 5,64 cm²V⁻¹s⁻¹ ở nhiệt độ lắng đọng 300 °C. Tuy nhiên, điện trở suất của màng tăng khi nhiệt độ lắng đọng trên 400°C do độ linh động giảm, kết quả trên được giải thích do hiện tượng tán xạ giao động mạng khi nồng độ hạt tải lớn [5].

3.2 Tính cấu trúc của màng TTO được lắng đọng ở các nhiệt độ khác nhau

Hình 1 trình bày giản đồ nhiễu xạ tia X của màng TTO lắng đọng theo nhiệt độ. Kết quả cho thấy, màng TTO có cấu trúc vô định hình khi được lắng đọng ở nhiệt độ phòng và màng bắt đầu tính thể cấu trúc tứ giác rutile (JCPDS No. 41-14445) với mặt mạng ưu tiên là SnO₂ (101) ở nhiệt độ để 200°C và cường độ đỉnh SnO₂ (101) giảm khi nhiệt độ lắng đọng tăng. Sự xuất hiện của đỉnh SnO₂ (101) cũng được quan sát ở các công trình SnO₂ pha tạp Sb hay F [18,19]. Ngoài ra, sự xuất hiện và phát triển của đỉnh SnO₂ (101) được giải thích dựa vào công trình mô phỏng lý thuyết [20] do sự đóng góp của khuyết oxy. Ngoài ra, cường độ của đỉnh SnO₂ (101) giảm và sự xuất hiện SnO₂ (110) và (200) được giải thích dựa vào công trình [7], mặt SnO₂ (101) (mặt SnO₂ (101) là mặt khử chứa nhiều ion Sn²⁺) chuyển sang mặt SnO₂ (110) (mặt SnO₂ (110) là mặt oxy hóa chứa nhiều Sn⁴⁺) khi áp suất riêng phần oxy tăng. Trong công trình này, áp suất riêng phần oxy tăng do oxy nhả ra từ thiết bị trong buồng chân không khi nhiệt độ lắng đọng tăng như đã đề cập trong công trình [21].



Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của màng TTO lắng đọng ở các nhiệt độ để khác nhau.

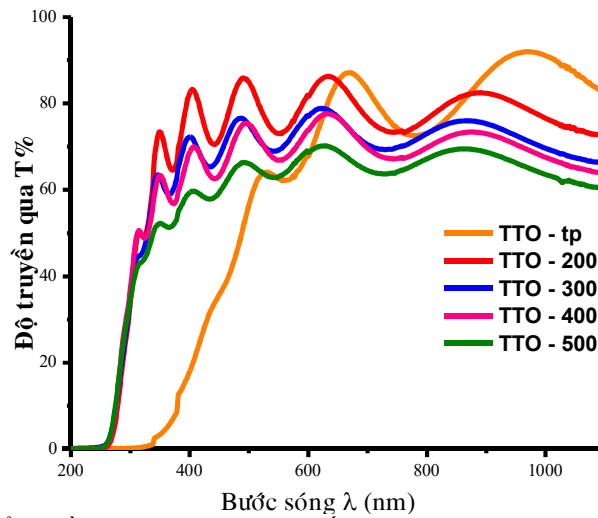


Hình 2. Đỉnh (101) được làm khớp hàm Gauss của các màng TTO lắng đọng ở các nhiệt độ khác nhau.

Ngoài ra, đỉnh SnO_2 (101) của các màng TTO lắng đọng theo nhiệt độ được làm khớp bằng hàm Gauss cho thấy 2θ dịch về phía góc nhỏ chứng tỏ Ta thay thế Sn tăng theo nhiệt độ lắng đọng, do bán kính nguyên tử Ta (64 Å) nhỏ hơn so với Sn (69 Å).

3.3 Tính quang của màng TTO được lắng đọng ở các nhiệt độ khác nhau

Hình 3 biểu diễn phổ truyền qua trong vùng bước sóng từ 200 – 1100 nm của các màng TTO được lắng đọng ở các nhiệt độ khác nhau. Kết quả cho thấy màng TTO được lắng đọng ở nhiệt độ phòng có bờ hấp thụ ở vùng ánh sáng khả kiến. Kết quả trên cũng đã được quan sát ở màng SnO_2 pha tạp Sb hay Ga [7, 11] và được giải thích do sự tồn tại của pha SnO. Pha này hấp thụ một phần ánh sáng do đó độ rộng vùng cấm của màng TTO được chế tạo ở điều kiện này nhỏ ($E_g = 3,36$ eV). Khi nhiệt độ lắng đọng trên 200°C , bờ hấp thụ dịch về vùng bước sóng ngắn do pha SnO nhận được năng lượng nhiệt từ đó chuyển thành pha SnO_2 và độ rộng vùng cấm đạt được là 4,57 eV.



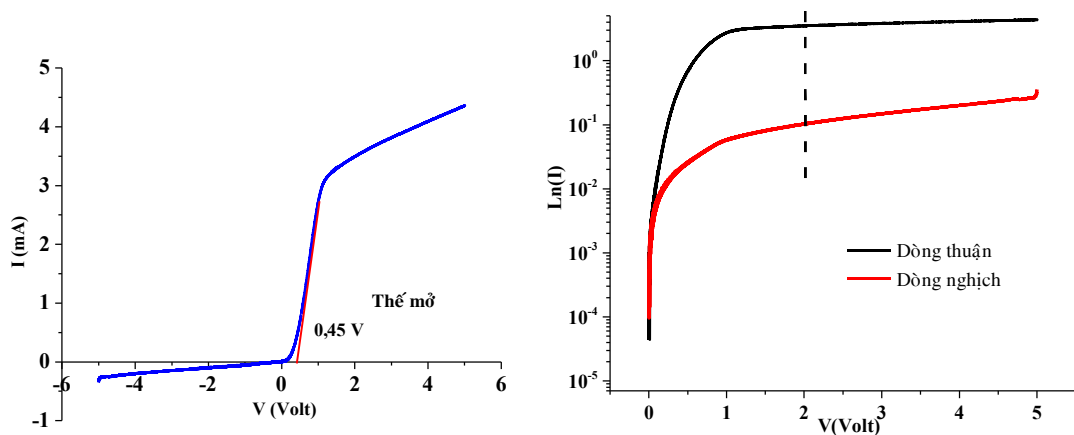
Hình 3. Phổ truyền qua của màng TTO lắng đọng ở các nhiệt độ khác nhau.

Bảng 2. Kết quả giá trị thông số figure of merit của màng TTO-x lắng đọng ở các nhiệt độ khác nhau.

Mẫu	T	Điện trở mặt $R_s (\Omega/\square)$	Độ truyền qua tại bước sóng 550 nm T_{550}	Hệ số giá trị bản chất figure of merit $\Phi (\Omega/\square)^{-1}$
TTO – 200	200	8,99	0,73	0,08
TTO – 300	300	4,02	0,69	0,17
TTO – 400	400	4,08	0,66	0,16
TTO – 500	500	23,96	0,63	0,02

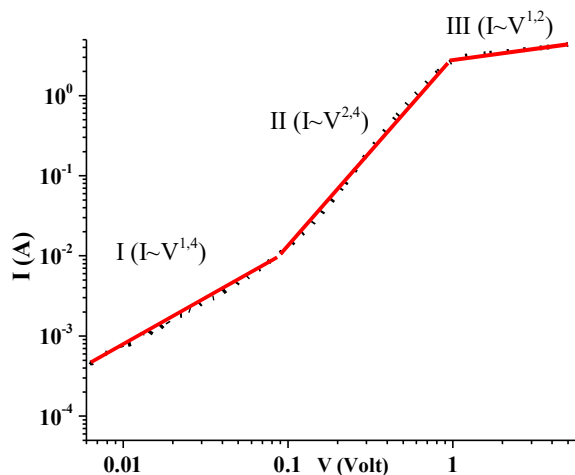
Bên cạnh các thông số tính chất điện và quang như điện trở suất, nồng độ hạt tải, độ linh độ và truyền qua quang học, hệ số giá trị bản chất (figure of merit (Φ)) cũng là thông số quan trọng để đánh giá chất lượng màng TTO có đáp ứng sử dụng làm điện cực trong suốt. (Φ) được xác định bằng tỷ số TR_{10} trên R_s (TR_{10}/R_s , trong đó TR và R_s là giá trị độ truyền qua ở bước sóng 550 nm và điện trở mặt tương ứng [22-24]. Giá trị (Φ) của màng TTO – x được trình bày ở Bảng 2. Trong tất cả các màng TTO – x, màng TTO – 300 có giá trị lớn nhất 0,17 và giá trị này đáp ứng được tiêu chuẩn của màng dẫn điện trong suốt.

3.4 Tính cấu trúc của màng TTO được lắng đọng ở các nhiệt độ khác nhau



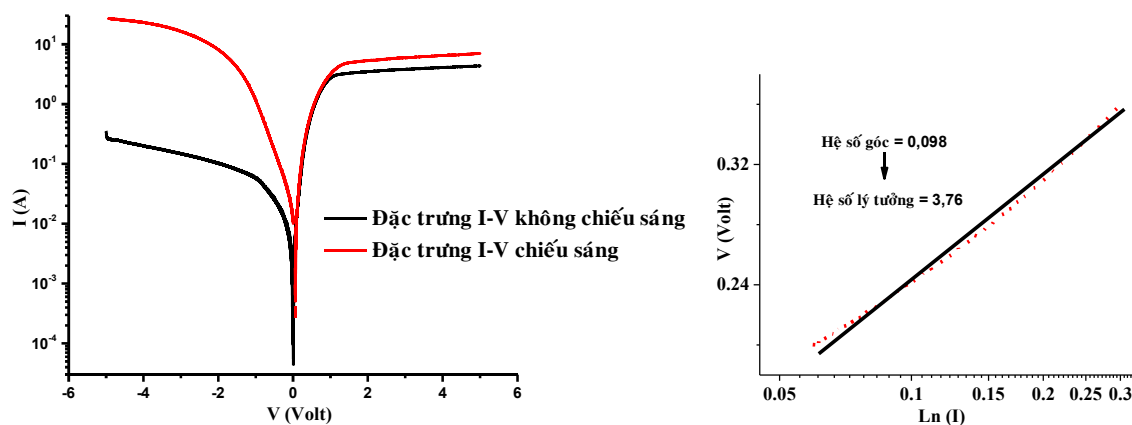
Hình 4.A) Đặc trưng I-V của tiếp xúc dị thể n-TTO-300/p-Si. B) Đồ thị bán-log của đặc trưng I-V của tiếp xúc dị thể n-TTO-300/p-Si. Giá trị tỷ số cường độ dòng thuận (I_F) và dòng nghịch (I_R) tại ± 2 V.

Để đánh giá khả năng ứng dụng màng TTO trong thiết bị quang điện, màng TTO được lắng đọng trên nền Si loại n (để thương mại với điện trở suất và nồng độ hạt tải lần lượt là $1-5 \Omega \text{ cm}$ and $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). Đặc trưng $I-V$ của cấu trúc tiếp xúc dị thể n-TTO-300/p-Si được trình bày ở Hình 4. Hình 4A cho thấy đặc trưng chỉnh lưu của diode của n-TTO-300/p-Si (khảo sát trong điều kiện không chiếu sáng). Thế mở của tiếp xúc đạt được 0,45 V và cường độ dòng rò 0,35 mA ở thế nghịch -5 V. Tỷ số cường độ dòng phân cực thuận và phân cực nghịch (đồ thị bán-logarith) của tiếp xúc là 35 ở $\pm 2.0 \text{ V}$, và được trình bày ở Hình 4B.



Hình 5. Đồ thị log-log của đặc trưng $I-V$ tiếp xúc n-TTO-300/p-Si.

Để xác định cơ chế dịch chuyển điện tích của tiếp xúc dị thể n-TTO-300/p-Si, đặc trưng $I-V$ của tiếp xúc thể hiện đồ thị $\log(I/I_0)-V$ sử dụng mối quan hệ $(I \sim V^m)$. Kết quả đặc trưng ba vùng tuyến tính khác nhau và được trình bày ở Hình 5. Vùng 1, vùng thế thấp có giá trị hệ số góc là 1,2 ($I \sim V^{1.2}$) thể hiện tính chất đặc trưng ohmic. Hệ số góc ở vùng 2 có giá trị lớn hơn 2 ($\sim 2,4$), đặc trưng dòng do sự đóng góp của dòng giới hạn điện tích không gian (SCLC) với sự hiện diện những bẫy ở gần mức fermi của lớp p-Si. Sự hiện diện của dòng SCLC chiếm ưu thế của đặc trưng dòng thể ($I-V$) thường được quan sát thấy ở các bán dẫn có độ rộng vùng cấm lớn [26]. Ở vùng thế cao (vùng 3) giá trị của đặc trưng log-log cho giá trị hệ số góc là 1,4 ($I \sim V^{1.4}$), có thể lý giải rằng cơ chế vùng nghèo là trội, có nghĩa là hạt tải đa số (electron) khuếch tán qua tiếp giáp do sự bơm hạt tải từ lớp bán dẫn n sang lớp p và các bẫy đã được lấp đầy.



Hình 5. A) Đồ thị bán-log của đặc trưng $I-V$ tiếp xúc n-TTO-300/p-Si chiếu sáng (màu đỏ) và không chiếu sáng (màu đen). B) Đồ thị đặc trưng V và $\ln(I)$ của tiếp xúc dị thể n-TTO-300/p-Si.

Để đánh giá khả năng ứng dụng của tiếp giáp làm cảm biến quang học tiếp xúc được khảo sát ở điều kiện chiếu sáng. Kết quả cho thấy cường độ dòng ở điều kiện phân cực nghịch tăng (27 mA) ở -5 V (Hình 5A). Kết quả trên được giải thích: khi ánh sáng được chiếu vào cấu trúc tiếp xúc n-TTO-300/p-Si, ánh sáng được hấp thụ bởi lớp Si, hệ quả hiện tượng quang sinh xảy ra và số lượng lỗ trống trôi về lớp TTO -300 như được đề cập trong công trình [25], vì thế cường độ dòng rò tăng đáng kể. Bên cạnh đó, hệ số lý tưởng của tiếp xúc cũng được xác định $\eta = \frac{q}{KT} \left(\frac{dV}{d \ln(I)} \right)$ [26] bằng cách xác định hệ số góc của đồ thị phân cực thuận V- Ln(I) (Hình 5). Kết quả thu được hệ số lý tưởng của diode là 3,76 đáp ứng được tiêu chuẩn của diode lý tưởng.

KẾT LUẬN

Trong công trình này, chúng tôi nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ đế đến cấu trúc tinh thể và tính chất quang điện của màng TTO. Màng đạt được tính chất điện loại n tốt nhất ở 300°C với điện trở suất, nồng độ hạt tải và độ linh động lần lượt là $4,50 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$, $5,51 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, $3,08 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$. Màng TTO được chế tạo có cấu trúc đa tinh thể rutilite với mặt ưu tiên SnO₂ (101). Độ truyền qua của màng trong vùng khả kiến trên 80%, và hệ số giá trị bản thân (figure of merit) $0,17 (\Omega/\square)^{-1}$, kết quả này đáp ứng được tiêu chuẩn của màng dẫn điện trong suốt. Đặc trưng I-V của màng TTO được chế tạo trên đế loại p Sillic cho đặc trưng chính lưu với hệ số lý tưởng 3,76 và thế mở 0,45 V.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 103.03-2017.302

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K.L. Chopra, S. Major, D.K. Pandya, Transparent conductors—a status review, *Thin Solid Films*. 102 (1983) 1–46.
- [2] T.J. Coutts, D.L. Young, X. Li, Characterization of transparent conducting oxides, *Mrs Bull.* 25 (2000) 58–65.
- [3] K. Ravichandran, K. Thirumurugan, Type Inversion and Certain Physical Properties of Spray Pyrolysed SnO₂:Al Films for Novel Transparent Electronics Applications, *J. Mater. Sci. Technol.* 30 (2014) 97–102.
- [4] K.-Y. Park, G.-W. Kim, Y.-J. Seo, S.-N. Heo, H.J. Ko, S.-H. Lee, T.K. Song, B.H. Koo, Effect of annealing temperature on properties of p-type conducting Al/SnO₂/Al multilayer thin films deposited by sputtering, *J. Ceram. Process. Res.* 13 (2012) s385–s389.
- [5] Y. Huang, Z. Ji, C. Chen, Preparation and characterization of p-type transparent conducting tin-gallium oxide films, *Appl. Surf. Sci.* 253 (2007) 4819–4822.
- [6] T. Yang, X. Qin, H. Wang, Q. Jia, R. Yu, B. Wang, J. Wang, K. Ibrahim, X. Jiang, Q. He, Preparation and application in p–n homojunction diode of p-type transparent conducting Ga-doped SnO₂ thin films, *Thin Solid Films*. 518 (2010) 5542–5545.
- [7] H.P. Dang, Q.H. Luc, V.H. Le, T. Le, The influence of deposition temperature and annealing temperature on Ga-doped SnO₂ films prepared by direct current magnetron sputtering, *J. Alloys Compd.* 687 (2016) 1012–1020.
- [8] C.-Y. Tsay, S.-C. Liang, Fabrication of p-type conductivity in SnO₂ thin films through Ga doping, *J. Alloys Compd.* 622 (2015) 644–650.
- [9] S. Sujatha Lekshmy, K. Joy, Structural and optoelectronic properties of indium doped SnO₂ thin films deposited by sol gel technique, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 25 (2014) 1664–1672.
- [10] Z. Ji, Z. He, Y. Song, K. Liu, Z. Ye, Fabrication and characterization of indium-doped p-type SnO₂ thin films, *J. Cryst. Growth*. 259 (2003) 282–285.

- [11] H.P. Dang, Q.H. Luc, T. Le, V.H. Le, The Optimum Fabrication Condition of p-Type Antimony Tin Oxide Thin Films Prepared by DC Magnetron Sputtering, *J. Nanomater.* 2016 (2016) 1–11.
- [12] J. Ni, X. Zhao, X. Zheng, J. Zhao, B. Liu, Electrical, structural, photoluminescence and optical properties of p-type conducting, antimony-doped SnO_2 thin films, *Acta Mater.* 57 (2009) 278–285.
- [13] J.M. Wu, A room temperature ethanol sensor made from p-type Sb-doped SnO_2 nanowires, *Nanotechnology*. 21 (2010) 235501.
- [14] S. Yu, W. Zhang, L. Li, D. Xu, H. Dong, Y. Jin, Fabrication of p-type SnO_2 films via pulsed laser deposition method by using Sb as dopant, *Appl. Surf. Sci.* 286 (2013) 417–420.
- [15] S.S. Pan, G.H. Li, L.B. Wang, Y.D. Shen, Y. Wang, T. Mei, X. Hu, Atomic nitrogen doping and p-type conduction in SnO_2 , *Appl. Phys. Lett.* 95 (2009) 222112.
- [16] S.S. Pan, S. Wang, Y.X. Zhang, Y.Y. Luo, F.Y. Kong, S.C. Xu, J.M. Xu, G.H. Li, p-type conduction in nitrogen-doped SnO_2 films grown by thermal processing of tin nitride films, *Appl. Phys. A.* 109 (2012) 267–271.
- [17] J.M. Ni, X.J. Zhao, J. Zhao, Structural, Electrical and Optical Properties of p-Type Transparent Conducting SnO_2 :Zn Film, *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.* 22 (2012) 21–26.
- [18] J. Montero, C. Guillén, C.G. Granqvist, J. Herrero, G.A. Niklasson, Preferential orientation and surface oxidation control in reactively sputter deposited nanocrystalline SnO_2 :Sb films: electrochemical and optical results, *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 3 (2014) N151–N153.
- [19] M.B. Mohagheghia, N. Shahtahmasebi, M.R. Alinejad, A. Youssefi, M. ShokoohSaremi, Fe-doped SnO_2 transparent semi-conducting thin films deposited by spray pyrolysis technique: thermoelectric and p-type conductivity properties, *Solid State Sci.* 11 (2009) 233–239.
- [20] G. Qin, D. Li, Z. Feng, S. Liu, First principles study on the properties of p-type conducting In: SnO_2 , *Thin Solid Films.* 517 (2009) 3345–3349.
- [21] A. Rabis, D. Kramer, E. Fabbri, M. Worsdale, R. Kötz, T.J. Schmidt, Catalyzed SnO_2 Thin Films: Theoretical and Experimental Insights into Fabrication and Electrocatalytic Properties, *J. Phys. Chem. C.* 118 (2014) 11292–11302.
- [22] V. Fauzia, M.N. Yusnidar, L.H. Lalasari, A. Subhan, A.A. Umar, High figure of merit transparent conducting Sb-doped SnO_2 thin films prepared via ultrasonic spray pyrolysis, *J. Alloys Compd.* 720(2017) 79–85.
- [23] K. Ravichandran, K. Thirumurugan, Type inversion and certain physical properties of spray pyrolyzed SnO_2 :Al films for novel transparent electronics applications, *J. Mater. Sci. Technol.* 30 (2014) 97–102.
- [24] A.A. Yadav, Influence of film thickness on structural, optical, and electrical properties of spray deposited antimony doped SnO_2 thin films, *Thin Solid Films* 591 (2015) 18e24, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.08.013>.
- [25] T.T.A. Tuan, D.-H. Kuo, A.D. Saragih, G.-Z. Li, Electrical properties of RF-sputtered Zn-doped GaN films and p -Zn-GaN/ n -Si hetero junction diode with low leakage current of 10^{-9} A and a high rectification ratio above 10^5 , *Mater. Sci. Eng.: B* 222 (2017) 18–25.
- [26] M. Dutta, D. Basak, p-ZnO/n-Si heterojunction: sol-gel fabrication, photoresponse properties, and transport mechanism, *Appl. Phys. Lett.* 92 (2008) 212112.

Ngày nhận bài: 19/03/2019

Ngày chấp nhận đăng: 16/08/2019