



TẠP CHÍ KHOA HỌC ĐẠI HỌC ĐỒNG THÁP
Dong Thap University Journal of Science

Chuyên san Khoa học Tự nhiên

ISSN 0866-7675 | e-ISSN 2815-567X



DOI: <https://doi.org/10.52714/dthu.ns.2674.1869>

ẢNH HƯỞNG CỦA NỒNG ĐỘ OXY ĐẾN ĐẶC TÍNH QUANG HỌC VÀ CẤU TRÚC TINH THỂ CỦA MÀNG ZnO PHA TẠP INDIUM CHẾ TẠO BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHÚN XẠ

Nguyễn Khắc Bình^{1,2}, Trần Bảo Quân³, La Phan Phương Hạ^{1,2} và Ngô Hải Đăng^{3*}

¹Khoa Khoa học và Công nghệ vật liệu, Trường Đại học Khoa học tự nhiên, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Khoa Khoa học ứng dụng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ, Email: dangnh@hcmute.edu.vn

Lịch sử bài báo

Ngày nhận: 25/8/2025; Ngày nhận chỉnh sửa: 22/9/2025; Ngày duyệt đăng: 07/10/2025

Tóm tắt

Trong nghiên cứu này, màng mỏng ZnO pha tạp Indium được chế tạo trên đế thủy tinh bằng phương pháp phun xạ phản ứng RF magnetron. Ảnh hưởng của nồng độ oxy trong quá trình lắng đọng đến đặc tính quang học, hình thái bề mặt và vi cấu trúc của màng đã được khảo sát. Kết quả phân tích nhiễu xạ tia X cho thấy tất cả các mẫu IZO đều có cấu trúc đa tinh thể kiểu wurtzite với mặt mạng ưu tiên (002) định hướng vuông góc với bề mặt đế. Quan sát bằng hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FE-SEM) cho thấy màng có cấu trúc hạt đồng đều, trong đó mẫu lắng đọng tại nồng độ oxy 10% đạt kích thước hạt trung bình khoảng 74,2 nm. Phổ truyền qua UV-Vis cho thấy các màng IZO có năng lượng vùng cấm quang học khoảng 3,4 eV và độ truyền qua trong vùng ánh sáng khả kiến đạt tới 85% đối với mẫu IZO 10% O₂. Ngoài ra, năng lượng Urbach giảm dần khi tăng nồng độ oxy trong quá trình lắng đọng. Những kết quả này chứng tỏ nồng độ oxy là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến cấu trúc và đặc tính quang học của màng IZO chế tạo bằng phương pháp phun xạ phản ứng RF magnetron.

Từ khóa: màng mỏng IZO, nồng độ khí Oxy, phun xạ RF-magnetron, TCO, tính chất quang, vi cấu trúc.

Trích dẫn: Nguyễn, K. B., Trần, B. Q., La, P. P. H., & Ngô, H. Đ. (2026). Ảnh hưởng của nồng độ oxy đến đặc tính quang học và cấu trúc tinh thể của màng ZnO pha tạp Indium chế tạo bằng phương pháp phun xạ. *Tạp chí Khoa học Đại học Đồng Tháp*, 15(8), 1-12. <https://doi.org/10.52714/dthu.ns.2674.1869>

Copyright © 2026 The author(s). This work is licensed under a CC BY-NC 4.0 License.

EFFECT OF OXYGEN CONCENTRATION ON THE OPTICAL AND CRYSTAL STRUCTURE OF SPUTTERED INDIUM-DOPED ZnO THIN FILMS

Nguyen Khac Binh^{1,2}, Tran Bao Quan³, La Phan Phuong Ha^{1,2}, and Ngo Hai Dang³

¹*Faculty of Materials Science and Technology, University of Science,
227 Nguyen Van Cu Street, District 5, Ho Chi Minh City, Vietnam*

²*Vietnam National University, Ho Chi Minh City (VNU-HCM), Vietnam*

³*Faculty of Applied Sciences, Ho Chi Minh City University of Technology and Education,
Ho Chi Minh City, Vietnam*

**Corresponding author, Email: dangnh@hcmute.edu.vn*

Article history

Received: 25/8/2025; Received in revised form: 22/9/2025; Accepted: 07/10/2025

Abstract

Indium-doped ZnO (IZO) thin films were deposited on glass substrates by RF magnetron reactive sputtering, and the influence of oxygen partial pressure during deposition on their optical, morphological, and structural properties was systematically investigated. X-ray diffraction (XRD) confirmed that all IZO films crystallized in the wurtzite structure with a strong (002) preferred orientation. This indicates that the (002) lattice planes are aligned approximately perpendicular to the substrate surface. Field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM) revealed a dense, homogeneous grain structure in the samples and showed that the film deposited at 10% O₂ exhibited the smallest average grain size (≈ 74.2 nm). UV-Vis spectroscopy indicated a direct band gap of approximately 3.4 eV for all samples, while the IZO film deposited at 10% O₂ exhibited the highest average transmittance of about 85% in the visible region (380–750 nm). Moreover, the Urbach energy decreased monotonically with increasing oxygen partial pressure, indicating reduced structural disorder in the films. These results demonstrate that oxygen partial pressure is a critical parameter controlling the microstructural evolution and optical performance of IZO films prepared by RF magnetron reactive sputtering.

Keywords: *IZO thin film, microstructure, optical properties, oxygen concentration, RF-magnetron sputtering, TCO.*

1. Giới thiệu

Các oxit dẫn điện trong suốt (TCOs) là vật liệu có độ dẫn điện cao đồng thời có khả năng truyền qua ánh sáng tốt (>80%) trong vùng khả kiến. Nhờ những đặc tính nổi bật này, TCOs được ứng dụng rộng rãi trong các thiết bị quang điện tử như pin mặt trời, cửa sổ thông minh và màn hình phẳng (Granqvist, 2007). Trong số các loại TCO, màng ZnO pha tạp các nguyên tố nhóm III (Al, Ga, In, B) đang thu hút nhiều sự quan tâm như một lựa chọn tiềm năng thay thế oxit indium pha thiếc (ITO) nhờ có đặc tính quang – điện cạnh tranh, quy trình chế tạo đơn giản, không độc hại và nguồn Zn dồi dào hơn so với In (Minami, 2000). Mặc dù nhôm (Al) là nguyên tố pha tạp được nghiên cứu phổ biến nhất, gần đây gallium (Ga) cũng được sử dụng để chế tạo màng ZnO có độ dẫn điện cao (Bhosle & cs., 2006; Ma & cs., 2007; Singh & cs., 2014). Bên cạnh đó, màng ZnO pha tạp indium (IZO) được xem là vật liệu TCO đầy hứa hẹn nhờ khả năng ổn định tốt hơn trong plasma hydro so với Al-ZnO và khả năng chống oxy hóa cao (Pham & cs., 2022, 2023; Singh & cs., 2014).

Nhiều phương pháp được sử dụng để tổng hợp màng IZO như: spray pyrolysis (Benouis & cs., 2010), sol-gel (Chen & cs., 2009; Luna-Arredondo & cs., 2005), lắng đọng hơi hóa học (Babu & Hong, 2015; Lim & cs., 2013), lắng đọng xung laser (Chirakkara & cs., 2011; Kotlyarchuk & cs., 2005) và phún xạ magnetron (Shaheera & cs., 2020; Singh & cs., 2016), (Sun & cs., 2016). Trong số đó, phương pháp phún xạ magnetron tần số vô tuyến (RF) được đánh giá là đáng tin cậy nhờ các ưu điểm: nhiệt độ lắng đọng thấp, quy trình đơn giản, chi phí thiết bị thấp, chất lượng màng tốt và dễ dàng mở rộng cho sản xuất công nghiệp. B. Khalfallah và cộng sự đã chế tạo màng IZO với các mức pha tạp In khác nhau bằng phún xạ magnetron từ bia ép bột, thu được điện trở suất thấp $5,53 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, nồng độ hạt tải $7,37 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ và độ linh động điện tử $12,47 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ (Khalfallah & cs., 2015). Anil Singh và cộng sự (Singh & cs., 2016) báo cáo về màng IZO có độ dẫn cao bằng phương pháp đồng phún xạ phản ứng DC từ bia kim loại In và Zn, với hàm lượng In đo được trong màng ZnO là 1,7 at.% cho kết quả có điện trở suất thấp nhất $3,66 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, độ linh động điện tử đạt $4,9 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ và nồng độ hạt tải rất cao $3,52 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$. Nghiên cứu trước đó của chúng tôi cũng đã báo cáo ảnh hưởng của nồng độ pha tạp In vào màng ZnO được chế tạo bằng phương pháp phún xạ phản ứng RF magnetron đến tính chất nhiệt điện của màng IZO (Hang Pham & cs., 2025). Tuy nhiên, chưa nhiều nghiên cứu tập trung vào ảnh hưởng của điều kiện lắng đọng đến cấu trúc và tính chất quang học của màng mỏng IZO. Đối với phương pháp phún xạ magnetron, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng các đặc tính vi cấu trúc và tính chất quang của màng mỏng bị ảnh hưởng bởi các thông số trong quá trình lắng đọng như nhiệt độ đế (Kim & cs., 2009; Pham & cs., 2025), áp suất lắng đọng (Peng & cs., 2022), công suất phún xạ (Feng & cs., 2009; Pham & cs., 2025) và lưu lượng khí oxy (Pham & cs., 2025; Zhu & cs., 2014).

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng phương pháp phún xạ phản ứng RF magnetron từ bia hợp kim Zn–In (In 2 at.%) để khảo sát ảnh hưởng của nồng độ oxy trong quá trình lắng đọng đến vi cấu trúc và tính chất quang học của màng IZO. Các màng được phân tích bằng nhiễu xạ tia X (XRD) để xác định cấu trúc tinh thể, hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FE-SEM) để quan sát hình thái bề mặt và phổ truyền qua UV–Vis để đánh giá đặc tính quang học.

2. Phương pháp nghiên cứu

Các màng mỏng ZnO pha tạp Indium (IZO) được lắng đọng trên đế thủy tinh bằng phương pháp phún xạ magnetron phản ứng cao tần, sử dụng khí oxy làm khí phản ứng và bia hợp kim Zn và In. Bia hợp kim được chế tạo thông qua quá trình nấu chảy và đổ khuôn, sử dụng bột kim loại Zn và In có độ tinh khiết 99,99%. Trước khi lắng đọng, các đế thủy tinh được làm sạch tuần tự bằng acetone, ethanol, isopropanol và nước khử ion, toàn bộ quá trình đều được xử lý trong bể rửa siêu âm. Các đế sau đó được sấy khô bằng khí nitrogen và nung sơ bộ ở 150°C trong 15 phút trong buồng chân không với áp suất nền là 10^{-6} Torr. Quá trình

phún xạ được thực hiện ở nhiệt độ đế 250°C, áp suất phún xạ 5×10^{-3} torr, công suất phún xạ 90W, áp suất nền 2×10^{-6} torr, thời gian lắng đọng của các mẫu là 1 giờ. Áp suất riêng phần của Oxy được xác định theo công thức:

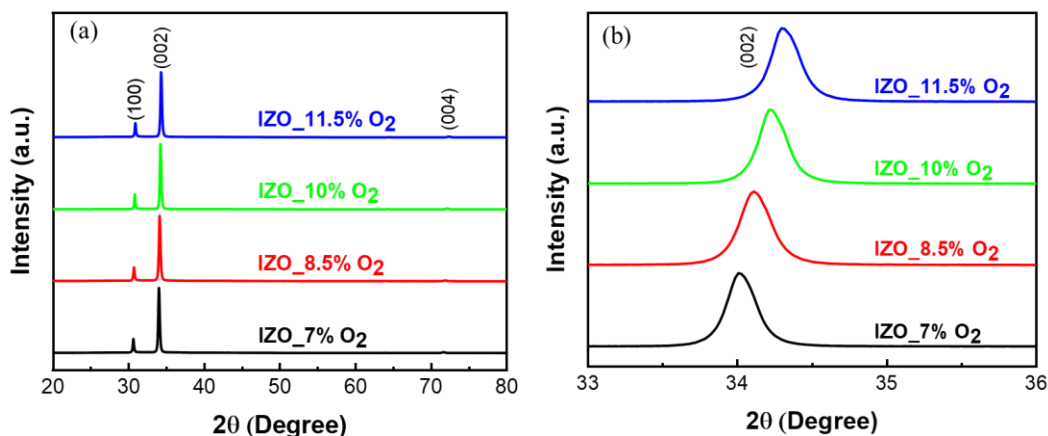
$$P_{O_2} = \frac{F_{O_2}}{F_{O_2} + P_{Ar}} \times 100\% \quad (1)$$

Với F là lưu lượng khí được tính bằng sccm, P_{O_2} là nồng độ phần trăm khí Oxy. Nồng độ khí Oxy (P_{O_2}) trong quá trình lắng đọng màng được khảo sát lần lượt là 7%, 8,5%, 10%, và 11,5% tương ứng với các mẫu IZO_7% O₂, IZO_8,5% O₂, IZO_10% O₂ và IZO_11,5% O₂.

Cấu trúc tinh thể của các màng được phân tích bằng thiết bị nhiễu xạ tia X (XRD, D8-ADVANCE ECO) với điện áp hoạt động 40kV, dòng điện 40mA và sử dụng bức xạ Cu-K α . Độ dày màng IZO được đo bằng phép đo Talorstep profilometer (Rank-taylor-Hobson, UK). Tính chất quang được phân tích bằng phổ truyền qua UV-Vis (Aligent Cary 60 UV-Vis Spectrophotometer) trong dải bước sóng 300 – 1000 nm. Hình thái của màng được khảo sát bằng kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FE-SEM, model SU-8100, Hitachi).

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Vi cấu trúc và hình thái bề mặt của màng IZO



Hình 1. (a) Phổ XRD của màng mỏng IZO với nồng độ oxygen khác nhau, (b) phổ phóng đại của đỉnh (002)

Hình 1(a) trình bày phổ nhiễu xạ tia X (XRD) của các màng IZO được lắng đọng trên đế thủy tinh với các nồng độ khí oxy lần lượt là 7%, 8,5%, 10% và 11,5%. Tất cả các mẫu đều cho thấy các đỉnh nhiễu xạ rõ rệt tại các vị trí 2θ khoảng $30,9^\circ$, $34,4^\circ$ và $71,8^\circ$. Khi đối chiếu với dữ liệu chuẩn từ thẻ PDF số 01-075-1533, các đỉnh này được xác định là đặc trưng cho cấu trúc wurtzite của ZnO (Hang Pham & cs., 2025). Không phát hiện thấy các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng cho các pha kim loại tự do như In hoặc Zn, điều này cho thấy rằng nguyên tử In đã thay thế vị trí của nguyên tử Zn trong mạng tinh thể lục giác, hoặc chiếm các vị trí xen kẽ trong mạng lưới ZnO. Bên cạnh đó, một phần nguyên tử In có thể bị đẩy ra khỏi mạng tinh thể và tập trung tại các ranh giới hạt dưới dạng vùng vô định hình, hình thành các liên kết In–O (Badadhe & Mulla, 2009; Hang Pham & cs., 2025; Peng & cs., 2009). Đáng chú ý, cường độ đỉnh (002) vượt trội so với các đỉnh (100) và (004), cho thấy cấu trúc tinh thể của màng IZO có xu hướng phát triển theo hướng trục c vuông góc với bề mặt đế (xem hình 1). Điều này có thể được lý giải bởi mặt phẳng (002) là mặt có năng lượng bề mặt thấp nhất trong cấu trúc

wurtzite của ZnO, từ đó thúc đẩy sự tăng trưởng ưu tiên theo hướng này (Benouis & cs., 2010; Ratheesh Kumar & cs., 2005). Quan sát từ phổ XRD ở Hình 1(b) có thể thấy đỉnh (002) dịch chuyển về góc 2θ lớn hơn khi tăng nồng độ oxy, cho thấy sự giảm ứng suất nén mạng theo phương trục c . Kết quả này tương tự với nghiên cứu của Zhang và cộng sự khi nghiên cứu màng Al doped ZnO (Zhang & cs., 2007). Các giá trị góc nhiễu xạ tương ứng với các nồng độ oxy khác nhau được tổng hợp trong Bảng 1. Dựa trên định luật Bragg, độ dài trục c của mạng tinh thể được tính toán thông qua phương trình xác định khoảng cách giữa các mặt phẳng trong cấu trúc lục giác (Benouis & cs., 2010):

$$\frac{4(h^2 + k^2 + hk)}{3a^2} + \frac{l^2}{c^2} = \frac{1}{d^2} \quad (2)$$

Trong đó (hkl) là chỉ số Miller biểu diễn mặt phẳng mạng tinh thể, a và c là các hằng số mạng tinh thể, d (d - spacing) là khoảng cách giữa các mặt mạng tinh thể được tính bằng công thức: $2d\sin\theta = \lambda$. Kích thước tinh thể của màng mỏng được xác định bằng công thức Debye-Scherrer (Cullity & Smoluchowski, 1957)

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta\cos\theta} \quad (3)$$

Kết quả tính toán trong Bảng 1 cho thấy độ dài trục c của tất cả các mẫu màng IZO đều lớn hơn so với ZnO tinh khiết (Hang Pham & cs., 2025). Sự gia tăng này được cho là bắt nguồn từ việc một phần ion Zn^{2+} trong mạng tinh thể ZnO bị thay thế bởi ion In^{3+} tại các nồng độ oxy khác nhau, dẫn đến sự giãn nở thông số mạng theo phương trục c (Pham & cs., 2025; Shaheera & cs., 2020). Phân tích phổ XRD cho thấy mẫu IZO được lắng đọng ở nồng độ oxy 10% cho độ kết tinh cao nhất, điều này tạo tiền đề quan trọng cho các khảo sát tiếp theo về tính chất quang học của vật liệu.

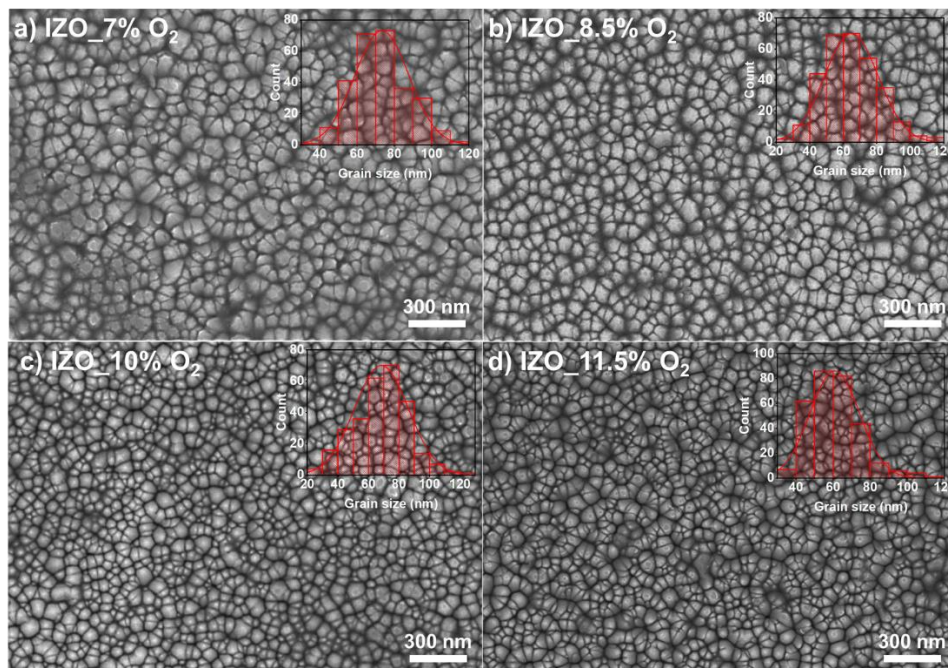
Bảng 1. Các thông số của phổ XRD của màng mỏng IZO với các nồng độ oxy khác nhau

Sample	$2\theta_{(002)}$ (deg.)	FWHM (deg.)	Grain size, D (nm)	Lattice constant, c (Å)
IZO_7% O ₂	34,02	0,251	33,16	5,26
IZO_8,5% O ₂	34,12	0,267	31,01	5,25
IZO_10% O ₂	34,23	0,239	34,68	5,23
IZO_11,5% O ₂	34,29	0,246	33,69	5,22

3.2. Hình thái bề mặt màng IZO

Hình 2(a)-(d) cho thấy màng IZO được lắng đọng có cấu trúc hạt cầu đặc trưng với sự phân bố đồng đều cùng biên hạt rõ ràng trên toàn bộ cấu trúc bề mặt. Dựa vào biểu đồ phân bố kích thước hạt cho thấy kích thước hạt tăng theo nồng độ oxy cho đến mẫu 10% O₂ và giảm ở mẫu 11,5% O₂. Ta có thể quan sát thấy mối quan hệ phi đơn điệu giữa nồng độ oxy và kích thước hạt ở mẫu 7% và 10% O₂, kết quả phù hợp với tính toán kích thước tinh thể trung bình ở bảng 1. Đồng thời, kích thước hạt của các màng IZO (60-80 nm) đo được tương đối lớn, phù hợp với các nghiên cứu trước đó (Peng & cs., 2009). Khalfallah và cộng sự (Khalfallah & cs., 2015; Peng & cs., 2017) đã nghiên cứu cho thấy sự thay thế Zn^{2+} bằng In^{3+} trong cấu trúc wurtzite giúp giảm năng lượng khuyết tật và tạo nhiều vị trí mầm kết tinh hơn thúc đẩy quá trình kết tinh giúp tạo hạt có kích thước lớn hơn. Đối với ứng dụng IZO vào làm điện cực trong

suốt (TCO), kích thước hạt lớn giúp giảm tán xạ điện tử biên hạt, cải thiện độ linh động điện tử (Lee & cs., 2025). Kết quả phân tích XRD và hình thái bề mặt cho thấy màng IZO được lắng đọng ở nồng độ 10% O₂ có chất lượng kết tinh tối ưu so với các mẫu khác. Việc tối ưu nồng độ oxy trong phún xạ phản ứng để đạt chất lượng tinh thể tốt giúp cải thiện tính chất quang học của màng IZO sẽ được thảo luận ở phần tiếp theo.



Hình 2. Ảnh FE-SEM và biểu đồ phân bố kích thước hạt của màng IZO được lắng đọng ở a) 7% O₂, b) 8,5% O₂, c) 10% O₂, d) 11,5% O₂

3.3. Tính chất quang của màng IZO

Hình 3(a) trình bày phổ truyền qua quang học trong vùng tử ngoại–khả kiến (UV–Vis) của các màng mỏng IZO được lắng đọng với các nồng độ oxy khác nhau. Tất cả các mẫu màng đều thể hiện khả năng hấp thụ mạnh trong vùng tử ngoại, trong khi độ truyền qua trong vùng ánh sáng khả kiến (400–800 nm) có sự thay đổi rõ rệt tùy theo nồng độ oxy. Các thông số về độ dày màng và độ truyền quang trung bình trong dải 400–800 nm được tổng hợp trong Bảng 2. Vị trí bờ hấp thụ của các mẫu IZO_7% O₂, IZO_8,5% O₂ và IZO_10% O₂ nằm xung quanh 350 nm, trong khi mẫu IZO_11,5% O₂ cho thấy bờ hấp thụ dịch chuyển rõ rệt về phía bước sóng dài hơn, khoảng 390 nm. Xu hướng dịch chuyển bờ hấp thụ về phía đỏ (*red-shift*) khi tăng nồng độ oxy đã được ghi nhận trong các nghiên cứu trước về màng ZnO và AZO, phản ánh sự thay đổi trong cấu trúc điện tử của vật liệu dưới ảnh hưởng của điều kiện lắng đọng (Kamble & cs., 2018; Zhu & cs., 2010).

Ở nồng độ oxy thấp (7%), sự pha tạp của ion In³⁺ thay thế cho ion Zn²⁺ trong mạng tinh thể ZnO làm tăng đáng kể mật độ hạt tải tự do. Đồng thời, sự thiếu hụt oxy trong mạng tinh thể cũng góp phần tạo ra các mức khuyết tật, dẫn đến sự hấp thụ mạnh của các hạt tải này, từ đó làm giảm độ truyền qua của màng (Radjehi & cs., 2019). Khi nồng độ oxy trong quá trình lắng đọng tăng dần, lượng khuyết tật oxy giảm, chất lượng tinh thể được cải thiện. Điều này góp phần làm giảm các khuyết tật cục bộ liên quan đến sự hấp thụ photon và bề mặt màng mịn hơn giúp giảm hiệu ứng tán xạ, cải thiện độ truyền quang của màng (Binh & cs., 2024). Kết quả quan sát được cho thấy độ truyền qua trong khoảng bước sóng 400 nm – 800 nm tăng dần từ 57% lên 92% tương ứng với nồng độ oxy tăng từ 7% lên đến 11,5%. Các dao động dạng

sóng trong phổ truyền qua UV-Vis của các mẫu IZO là kết quả của hiện tượng giao thoa ánh sáng giữa bề mặt màng và không khí, cho thấy độ nhám bề mặt thấp và độ đồng nhất cao, điều này được xác nhận qua ảnh SEM của màng (Potlog & cs., 2019).

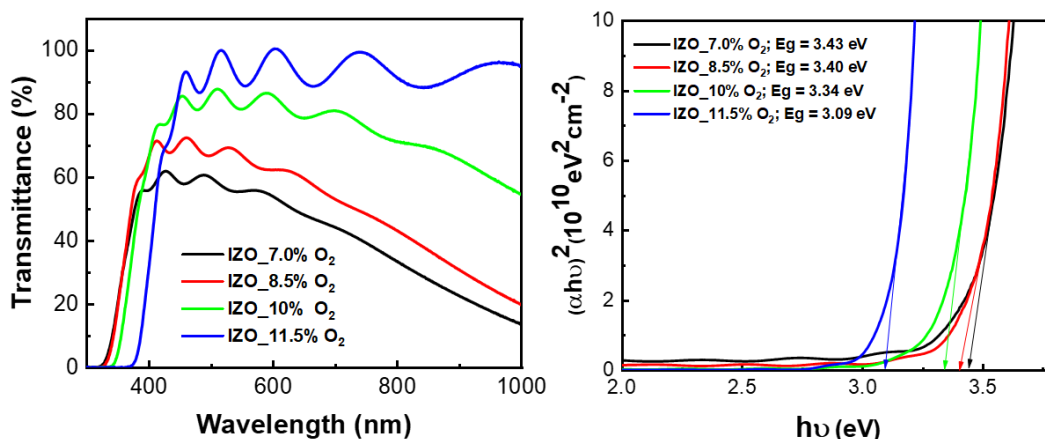
Hiện tượng tương tự cũng được ghi nhận trong vùng cận hồng ngoại, các mẫu màng được lắng đọng tại nồng độ oxy thấp có hiện tượng hấp thụ mạnh trong vùng cận hồng ngoại và độ truyền qua thấp được cho là do sự ảnh hưởng của mật độ hạt tải cao (D. Singh & cs., 2014). Nhìn chung, kết quả cho thấy xu hướng cải thiện rõ rệt độ truyền qua trong vùng ánh sáng khả kiến (400 – 800 nm) khi nồng độ oxy trong quá trình lắng đọng tăng lên. Điều này phản ánh sự suy giảm mật độ khuyết tật và hạt tải tự do trong màng, góp phần nâng cao tính trong suốt quang học của vật liệu. Hệ số hấp thụ quang học (α) được tính toán từ dữ liệu phổ truyền qua (T) theo công thức (Shi & cs., 2013):

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{T}{100} \right) \quad (4)$$

Trong đó d là độ dày màng. Ngoài ra, độ truyền quang trong vùng tử ngoại cũng liên quan trực tiếp đến năng lượng vùng cấm E_g . Mối quan hệ giữa E_g và α được mô tả theo phương trình (Poddar & Mukherjee, 2019):

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^n \quad (5)$$

Trong đó α là hệ số hấp thụ, A là hằng số, $h\nu$ là năng lượng photon, E_g là năng lượng vùng cấm, $n=1/2$ đối với chất bán dẫn có vùng cấm trực tiếp.

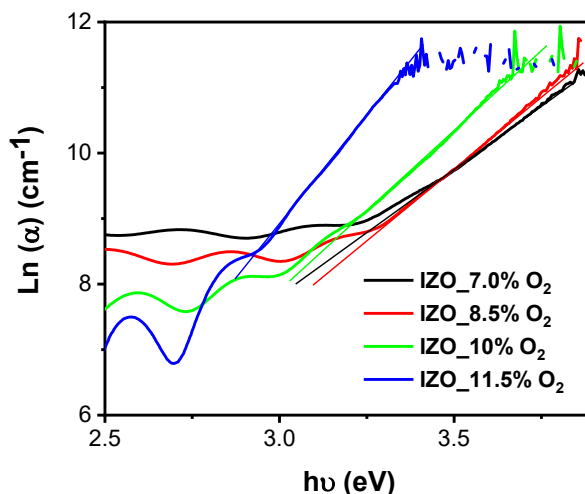


Hình 3. (a) Phổ truyền qua quang học trong vùng tử ngoại–khả kiến (UV–Vis) ở nồng độ oxy khác nhau: phổ truyền qua và (b) đồ thị ngoại suy Tauc được sử dụng để xác định năng lượng vùng cấm quang học (E_g) của các mẫu màng IZO.

Hình 3(b) thể hiện mối quan hệ giữa $(\alpha h\nu)^2$, được sử dụng để xác định năng lượng vùng cấm quang học (E_g) của các mẫu IZO thông qua phương pháp ngoại suy Tauc. Đường thẳng được vẽ từ phần tuyến tính của đồ thị và giao điểm với trục hoành cho phép xác định giá trị E_g tương ứng với mỗi mẫu IZO có nồng độ oxy khác nhau: 7%, 8,5%, 10% và 11,5%.

Các giá trị E_g thu được được tổng hợp trong Bảng 2, cho thấy xu hướng giảm dần năng lượng vùng cấm khi nồng độ oxy tăng – từ 3,43 eV (mẫu IZO_7% O₂) xuống còn 3,09 eV (mẫu IZO_11,5% O₂). Xu hướng này phù hợp với kết quả đã được báo cáo trước đó đối với màng ZnO pha tạp In được chế tạo bằng phương pháp phun xạ magnetron, chẳng hạn như nghiên cứu của Li-Ping Peng (Peng & cs., 2022). Đáng chú ý, mẫu IZO_10% O₂ có giá trị E_g

xấp xỉ 3,34 eV, rất gần với năng lượng vùng cấm của ZnO tinh thể khối (~3,3 eV). Trong khi đó, các mẫu được lắng đọng ở nồng độ oxy thấp hơn (7% và 8,5%) lại có giá trị E_g cao hơn đáng kể, vượt khoảng 0,4 eV so với ZnO khối. Sự gia tăng này được lý giải bởi hiệu ứng Burstein–Moss: bởi vì nồng độ hạt tải tự do cao (do thiếu hụt oxy và pha tạp In^{3+}), các mức năng lượng thấp trong vùng dẫn bị lấp đầy, khiến quá trình hấp thụ quang chỉ có thể xảy ra ở mức năng lượng cao hơn, dẫn đến việc mở rộng năng lượng vùng cấm (Burstein, 1954).



Hình 4. Biểu đồ của $\ln(\alpha)$ theo năng lượng photon đối với các màng mỏng IZO lắng đọng ở nồng độ oxy khác nhau.

Độ sai hỏng cấu trúc của màng mỏng IZO được đặc trưng thông qua độ dốc của dải đuôi Urbach, hay còn gọi là năng lượng Urbach (E_u). Tham số này phản ánh mức độ sai hỏng cấu trúc gần biên vùng năng lượng của chất bán dẫn (Hassanien & Akl, 2016). Giá trị E_u được xác định theo công thức:

$$E_u = \left[\frac{d(\ln \alpha)}{d(h\nu)} \right]^{-1} \quad (6)$$

Trong đó, α là hệ số hấp thụ và $h\nu$ là năng lượng photon. Để tính E_u , phổ $\ln(\alpha)$ được biểu diễn theo $h\nu$, sau đó phân tuyến tính của đường cong được khớp bằng một đường thẳng (Hình 4). Giá trị E_u được lấy bằng nghịch đảo độ dốc của đường khớp này, và các kết quả được tổng hợp trong Bảng 2. Kết quả cho thấy, khi nồng độ oxy tăng, E_u giảm từ 261,9 meV (IZO_7% O_2) xuống 150,2 meV (IZO_11,5% O_2). Điều này cho thấy các màng IZO lắng đọng trong điều kiện thiếu oxy chứa nhiều khuyết tật hơn gần biên vùng dẫn. Ở nồng độ oxy thấp, sự hiện diện dày đặc của khuyết tật thiếu oxy V_o và Zn^{2+} , cùng với việc pha tạp In^{3+} thay thế vị trí Zn^{2+} trong mạng tinh thể, đã làm gia tăng mật độ mức khuyết tật và mở rộng đuôi Urbach.

Bảng 2. Các giá trị đo được cho độ dày màng cùng tính chất quang của màng gồm độ truyền quang trong vùng khả kiến, độ rộng năng lượng vùng cấm và năng lượng Urbach.

Sample	T (%)	d (nm)	E_g (eV)	E_u (meV)
IZO_7% O_2	57	392	3,43	261,9
IZO_8,5% O_2	68	440	3,4	227,5
IZO_10% O_2	83	487	3,34	206,8
IZO_11,5% O_2	92	392	3,09	150,2

5. Kết luận

Màng mỏng IZO được chế tạo thành công bằng phương pháp phun xạ phản ứng RF magnetron. Bằng cách điều chỉnh nồng độ oxy trong quá trình lắng đọng, các đặc tính cấu trúc và quang học của màng IZO đã được đóng góp. Kết quả cho thấy, các màng thu được đều có cấu trúc wurtzite đặc trưng của ZnO, trong đó kích thước tinh thể lớn nhất (34,68 nm) đạt được ở mẫu IZO_10% O₂. Ảnh FE-SEM của mẫu này cho thấy bề mặt màng gồm các hạt tinh thể rõ ràng, với kích thước hạt chủ yếu nằm trong khoảng 60–80 nm. Về đặc tính quang học, độ truyền qua trung bình tăng từ 57% lên 97% khi nồng độ oxy tăng, trong khi năng lượng vùng cấm quang học dao động từ 3,09 eV đến 3,43 eV. Phân tích năng lượng Urbach cho thấy Eu giảm từ 261,9 meV (IZO_7% O₂) xuống 150,2 meV (IZO_11,5% O₂), chứng tỏ màng IZO lắng đọng ở nồng độ oxy thấp chứa nhiều sai hỏng cấu trúc hơn, bao gồm khuyết tật thiếu oxy V_o, Zn²⁺, và sự thay thế ion In³⁺ vào vị trí Zn²⁺ trong mạng tinh thể. Những khuyết tật này ảnh hưởng đáng kể đến tính chất quang học của màng mỏng IZO.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn TS. Phạm Thị Kim Hằng (Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh) và TS. Phạm Hoài Phương (Viện Công nghệ kỹ thuật Cao NTT, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành) đã hỗ trợ thực nghiệm và thảo luận cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- Babu, E. S., & Hong, S. (2015). Effect of indium concentration on morphology of ZnO nanostructures grown by using CVD method and their application for H₂ gas sensing. *Superlattices and Microstructures*, 82, 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.02.029>
- Badadhe, S. S., & Mulla, I. S. (2009). H₂S gas sensitive indium-doped ZnO thin films: Preparation and characterization. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 143(1), 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.08.056>
- Benouis, C. E., Benhaliliba, M., Juarez, A. S., Aida, M. S., Chami, F., & Yakuphanoglu, F. (2010). The effect of indium doping on structural, electrical conductivity, photoconductivity and density of states properties of ZnO films. *Journal of Alloys and Compounds*, 490(1–2), 62–67. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.098>
- Bhosle, V., Tiwari, A., & Narayan, J. (2006). Metallic conductivity and metal-semiconductor transition in Ga-doped ZnO. *Applied Physics Letters*, 88(3). <https://doi.org/10.1063/1.2165281>
- Binh, N. K., Yen Nhi, P. N., Quan, T. B., Tam, P. M., Phuong, N. N., Tuan, D. M., Kim Hang, P. T., & Phuong, P. H. (2024). Impact of in situ heating on the structure, morphology, and electrical and optical properties of RF-sputtered NiO thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 42(6). <https://doi.org/10.1116/6.0003939>
- Burstein, E. (1954). Anomalous optical absorption limit in InSb. *Physical Review*, 93(3), 632. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.93.632>
- Chen, K. J., Hung, F.-Y., Chang, S.-J., & Hu, Z. S. (2009). Microstructures, optical and electrical properties of In-doped ZnO thin films prepared by sol-gel method. *Applied Surface Science*, 255(12), 6308–6312. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.02.007>
- Chirakkara, S., Nanda, K. K., & Krupanidhi, S. B. (2011). Pulsed laser deposited ZnO: In as transparent conducting oxide. *Thin Solid Films*, 519(11), 3647–3652. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.01.354>
- Cullity, B. D., & Smoluchowski, R. (1957). Elements of X-ray Diffraction. *Physics Today*, 10(3), 50. <https://doi.org/10.1063/1.3060306>
- Feng, C., Yi-Ding, W., Da-Li, L., Jing-Zhi, Y., Bao-Jia, G., Lei, L., & Yu-Peng, A. (2009). Preparation and characterization of transparent conductive Nb-doped ZnO films by

- radio-frequency sputtering. *Chinese Physics Letters*, 26(3), 34210.
<https://doi.org/10.1088/0256-307X/26/3/034210>
- Granqvist, C. G. (2007). Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(17), 1529–1598.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.04.031>
- Hang Pham, T. K., Ngo, H. D., & Pham, H. P. (2025). Optimizing indium concentration in ZnO thin films for enhanced optical, electronic, and thermoelectric applications. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 43(5). <https://doi.org/10.1116/6.0004677>
- Hassanien, A. S., & Akl, A. A. (2016). Effect of Se addition on optical and electrical properties of chalcogenide CdSSe thin films. *Superlattices and Microstructures*, 89, 153–169.
<https://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.10.044>
- Kamble, S. S., Radhakrishnan, J. K., & Krishnamoorthy, R. (2018). Effect of O₂ flow rate on the characteristics of ZnO thin films deposited by RF reactive magnetron sputtering. *Materials Technology*, 33(11), 709–715.
<https://doi.org/10.1080/10667857.2018.1497834>
- Khalfallah, B., Chaabouni, F., & Abaab, M. (2015). Some physical investigations on In-doped ZnO films prepared by RF magnetron sputtering using powder compacted target. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26, 5209–5216.
<https://doi.org/10.1007/s10854-015-3053-9>
- Kim, Y. H., Lee, K. S., Lee, T. S., Cheong, B., Seong, T.-Y., & Kim, W. M. (2009). Effects of substrate temperature and Zn addition on the properties of Al-doped ZnO films prepared by magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 255(16), 7251–7256.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.03.075>
- Kotlyarchuk, B., Savchuk, V., & Oszwaldowski, M. (2005). Preparation of undoped and indium doped ZnO thin films by pulsed laser deposition method. *Crystal Research and Technology: Journal of Experimental and Industrial Crystallography*, 40(12), 1118–1123. <https://doi.org/10.1002/crat.200410502>
- Lee, Y.-S., Chang, C.-H., Le, B.-S., Nguyen, V.-T. T., Tien, T.-C., & Lin, H.-C. (2025). Effects of Deposition Power and Annealing Temperature on Indium Zinc Oxide (IZO) Film's Properties and Their Applications to the Source–Drain Electrodes of Amorphous Indium Gallium Zinc Oxide (a-IGZO) Thin-Film Transistors (TFTs). *Nanomaterials*, 15(11), 780. <https://doi.org/10.3390/nano15110780>
- Lim, S. Y., Brahma, S., Liu, C.-P., Wang, R.-C., & Huang, J.-L. (2013). Effect of indium concentration on luminescence and electrical properties of indium doped ZnO nanowires. *Thin Solid Films*, 549, 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.09.001>
- Luna-Arredondo, E. J., Maldonado, A., Asomoza, R., Acosta, D. R., Melendez-Lira, M. A., & Olvera, M. de la L. (2005). Indium-doped ZnO thin films deposited by the sol–gel technique. *Thin Solid Films*, 490(2), 132–136. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.04.043>
- Ma, Q.-B., Ye, Z.-Z., He, H.-P., Hu, S.-H., Wang, J.-R., Zhu, L.-P., Zhang, Y.-Z., & Zhao, B.-H. (2007). Structural, electrical, and optical properties of transparent conductive ZnO: Ga films prepared by DC reactive magnetron sputtering. *Journal of Crystal Growth*, 304(1), 64–68. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2007.01.037>
- Minami, T. (2000). New n-type transparent conducting oxides. *MRS Bulletin*, 25(8), 38–44.
<https://doi.org/10.1557/mrs2000.149>
- Peng, L.-P., He, A.-L., Fang, L., & Yang, X.-F. (2022). Structure and properties of indium-doped ZnO films prepared by RF magnetron sputtering under different pressures. *Rare Metals*, 41(9), 3239–3243. <https://doi.org/10.1007/s12598-015-0661-8>
- Peng, L., Fang, L., Zhao, Y., Wu, W., Ruan, H., & Kong, C. (2017). Growth and characterization of indium doped zinc oxide films sputtered from powder targets. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 32(4), 866–870.

- <https://doi.org/10.1016/j.physe.2009.07.006>
- Peng, L. P., Fang, L., Yang, X. F., Ruan, H. B., Li, Y. J., Huang, Q. L., & Kong, C. Y. (2009). Characteristics of ZnO: In thin films prepared by RF magnetron sputtering. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 41(10), 1819–1823. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2009.07.006>
- Pham, A. T. T., Le, O. K. T., Van Hoang, D., Nguyen, T. H., Chen, K.-H., Park, S., Phan, T. B., & Tran, V. C. (2022). Coupling modification of Fermi level, band flattening and lattice defects to approach outstanding thermoelectric performance of ZnO films via tuning In and Ga incorporation. *Acta Materialia*, 241, 118415. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118415>
- Pham, A. T. T., Phan, T. T. T., Nguyen, T. H., Van Hoang, D., Le, O. K. T., Doan, U. T. T., Phan, T. B., & Tran, V. C. (2023). Synergy of indium doping and hydrogenation for good-performance and high-mobility ZnO electrode films. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 8(3), 100569. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2023.100569>
- Pham, T. K. H., Ngo, H. D., & Pham, H. P. (2025). Enhancing Optical and Electronic Properties of Indium-doped ZnO Thin Films through Substrate Temperature Control. *E-Journal of Surface Science and Nanotechnology*. <https://doi.org/10.1380/ejsnt.2025-037>
- Pham, T. K. H., Pham, H. P., & Ngo, H. D. (2025). Impact of Sputtering Power on Characteristics of Indium-Doped ZnO Thin Films. *MATERIALS TRANSACTIONS*, MT-M2025077. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2025077>
- Pham, T. K. H., Tran, B. Q., Nguyen, K. B., Pham, N. Y. N., Nguyen, T. H. Y., Nguyen, A. H.-T., Nguyen, N. P., Ngo, H. D., & Pham, H. P. (2025). Oxygen partial pressure effects on nickel oxide thin films and NiO/Si diode performance. *Materials Advances*, 6(5), 1719–1725. <https://doi.org/10.1039/D4MA01113A>
- Poddar, N. P., & Mukherjee, S. K. (2019). Effect of substrates and post-deposition annealing on rf-sputtered Al-doped ZnO (AZO) thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(15), 14269–14280. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01796-x>
- Potlog, T., Ghimpu, L., Suman, V., Pantazi, A., & Enachescu, M. (2019). Influence of RF sputtering power and thickness on structural and optical properties of NiO thin films. *Materials Research Express*, 6(9), 96440. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab317d>
- Radjehi, L., Djelloul, A., Lamri, S., Slim, M. F., & Rahim, M. (2019). Oxygen effect on structural and optical properties of zinc oxide. *Surface Engineering*, 35(6), 520–526. <https://doi.org/10.1080/02670844.2018.151584>
- Ratheesh Kumar, P. M., Kartha, C. S., & Vijayakumar, K. P. (2005). Doping of spray-pyrolyzed ZnO thin films through direct diffusion of indium: Structural optical and electrical studies. *Journal of Applied Physics*, 98(2). <https://doi.org/10.1063/1.1985967>
- Shaheera, M., Girija, K. G., Kaur, M., Geetha, V., Debnath, A. K., Vatsa, R. K., Muthe, K. P., & Gadkari, S. C. (2020). Characterization and device application of indium doped ZnO homojunction prepared by RF magnetron sputtering. *Optical Materials*, 101, 109723. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109723>
- Shi, Q., Zhou, K., Dai, M., Hou, H., Lin, S., Wei, C., & Hu, F. (2013). Room temperature preparation of high performance AZO films by MF sputtering. *Ceramics International*, 39(2), 1135–1141. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.07.037>
- Singh, A., Chaudhary, S., & Pandya, D. K. (2014). On the temperature dependence of mobility in hydrogenated indium-doped ZnO thin films. *Acta Materialia*, 77, 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.05.048>
- Singh, A., Chaudhary, S., & Pandya, D. K. (2016). High conductivity indium doped ZnO films by metal target reactive co-sputtering. *Acta Materialia*, 111, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.03.012>

- Singh, D., Singh, S., Kumar, U., Srinivasa, R. S., & Major, S. S. (2014). Transparent conducting Ga-doped ZnO thin films grown by reactive co-sputtering of Zn and GaAs. *Thin Solid Films*, 555, 126–130. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.11.020>
- Sun, H., Jen, S.-U., Chen, S.-C., Ye, S.-S., & Wang, X. (2016). The electrical stability of In-doped ZnO thin films deposited by RF sputtering. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(4), 45102. <https://www.doi.org/10.1088/1361-6463/aa5002>
- Zhang, J. P., He, G., Zhu, L. Q., Liu, M., Pan, S. S., & Zhang, L. D. (2007). Effect of oxygen partial pressure on the structural and optical properties of ZnO film deposited by reactive sputtering. *Applied Surface Science*, 253(24), 9414–9421. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.06.005>
- Zhu, H., Hüpkes, J., Bunte, E., & Huang, S. M. (2010). Oxygen influence on sputtered high rate ZnO: Al films from dual rotatable ceramic targets. *Applied Surface Science*, 256(14), 4601–4605. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.02.057>
- Zhu, H., Wang, H., Wan, W., Yu, S., & Feng, X. (2014). Influence of oxygen and argon flow on properties of aluminum-doped zinc oxide thin films prepared by magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 566, 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.02.057>