مجلة الدراسات التربوية والعلمية - كلية التربية - الجامعة العراقية
العدد السابع والعشرون - المجلد التاسع - علوم الفيزياء - نيسان 2026 م
doi.org/10.52866/esj.2026.09.27.10

تأثير التشويب بأوكسيد الالمنيوم على الخصائص البصرية لأغشية أوكسيد الزنك الرقيقة المحضرة باستخدام تقنية الرش الكيميائي الحراري

ضحى خالد عبدالرزاق[1*] ، إبراهيم خلف سلمان[2]
[1 و 2]. قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة تكريت، تكريت، العراق.
* البحث مستل من رسلة ماجستير الباحث الأول
الايميل: DKAueps80@st.tu.edu.iq

مستخلص:

تم في هذا البحث تحضير أغشية رقيقة من أوكسيد الزنك (ZnO) النقي والمشوب بأوكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) بنسب مختلفة ٪(0,1,2,3,4) باستخدام تقنية الرش الكيميائي الحراري على ركائز زجاجية أظهرت القياسات البصرية أن الامتصاصية تكون مرتفعة عند الأطوال الموجية القصيرة، إذ بلغت أعلى قيمة لها عند طول موجي ≈ (328 nm) لتصل إلى امتصاصية عالية للعينة المشوبة بنسبة ٪4 مقارنة بالعينة النقية التي أظهرت أقل امتصاص، ثم تبدأ الامتصاصية بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى قيم منخفضة وثابتة تقريباً ضمن المدى (700–1100 nm) بسبب انخفاض طاقة الفوتونات الساقطة عن قيمة فجوة الطاقة للأغشية.

أما النفاذية فقد أظهرت سلوكاً معاكساً للامتصاصية، إذ سجلت العينة النقية أعلى نفاذية بلغت ٪ (97.08) عند الأطوال الموجية الكبيرة، وانخفضت عند الطول الموجي القصير إلى ٪ (68.08)، بينما انخفضت النفاذية بوضوح عند زيادة نسب التشويب لتصل إلى ٪ (60.13) عند نسبة تشويب ٪4 نتيجة زيادة التشتت الضوئي وارتفاع كثافة الحالات الإلكترونية ضمن البنية البلورية.

اما فجوة الطاقة البصرية للعينة النقية كانت 3.18)eV)، بينما انخفضت فجوة الطاقة تدريجياً مع زيادة التشويب لتصل إلى 2.76)eV) عند التشويب بنسبة ٪4، ويعود سبب الانخفاض إلى إدخال مستويات طاقة إضافية داخل فجوة الطاقة ناتجة عن إحلال أيونات (Al^{3+}) مكان (Zn^{2+})، مما يؤدي إلى تقليل عرض فجوة الطاقة البصرية وحدوث انزياح للحافة البصرية نحو الأطوال الموجية الأكبر.

الكلمات المفتاحية: أوكسيد الزنك، أوكسيد الالمنيوم، الرش الكيميائي الحراري، الخصائص البصرية.

Effect of aluminum oxide doping on the optical properties of zinc oxide thin films prepared using the spray pyrolysis technique

Dhuha Khalid Abdulrazaq[1*] , Ibrahim. k. Salman[2]
[1,2] Department of Physics, College of Education for Pure Sciences, Tikrit University, Tikrit, Iraq.
Email: DKAueps80@st.tu.edu.iq

Abstract:

In this research, thin films of pure zinc oxide (ZnO) and aluminum oxide (Al_2O_3) doped with varying percentages (0, 1, 2, 3, and 4%) were prepared using the thermochemical spray technique on glass substrates. Optical measurements showed that the absorbance is high at short wavelengths, reaching its highest value at a wavelength of approximately 328 nm. The 4% doped sample exhibited high absorbance compared to the pure sample, which showed lower absorbance. The absorbance then gradually decreased to relatively low and stable values within the range of 700–1100 nm due to the incident photon energy being below the energy gap of the films.

Transmittance exhibited behavior opposite to that of absorbance. The pure sample recorded the highest transmittance of 97.08% at longer wavelengths, decreasing to 68.08% at shorter wavelengths. Transmittance decreased significantly with increasing doping levels, reaching 60.13% at a 4% doping concentration, due to increased light scattering and a higher density of electronic states within the crystal structure.

The optical gap of the pure sample was 3.18 eV, while it gradually decreased with increasing doping, reaching 2.76 eV at a 4% doping concentration. This decrease is attributed to the introduction of additional energy levels within the gap, resulting from the substitution of Al^{3+} ions for Zn^{2+}. This substitution narrows the optical gap and shifts the optical edge towards longer wavelengths.

Keywords: Zinc oxide, aluminum oxide, chemical spray pyrolysis, optical properties.

1- المقدمة:

يُعد أوكسيد الزنك (ZnO) أحد الأكاسيد شبه الموصلة ذات فجوة طاقة واسعة تتراوح تقريباً بين (3.2–3.4 eV)، ويمتلك نفاذية ضوئية عالية في المجال المرئي إضافة إلى طاقة ربط إكسايتونية مرتفعة تبلغ حوالي (60 meV)، مما يسمح باستقراره البصري عند درجة حرارة الغرفة. ويتبلور (ZnO) ببنية سداسية من نوع (Wurtzite) ذات انتظام بلوري جيد، الأمر الذي يساهم في تحسين خصائصه البصرية والإلكترونية مثل الامتصاصية ومعامل الانكسار، وقد أدى ذلك إلى استخدامه في التطبيقات الكهروضوئية والبصرية المتقدمة [1,2].

يُعد أوكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) من المواد العازلة ذات فجوة طاقة واسعة جداً تصل إلى حوالي eV (8.7–9.0)، مما يجعله مادة شفافة عبر نطاق واسع من الطيف الكهرومغناطيسي، فضلاً عن امتلاكه ثباتاً كيميائياً وحرارياً مرتفعاً ومقاومة ممتازة للتآكل. وعلى الرغم من أن Al_2O_3 ليس شبه موصل في حالته النقية، إلا أن إدخاله كمشوب داخل الشبكة البلورية لـ ZnO يؤدي إلى إحلال أيونات (Al^{3+}) محل (Zn^{2+})، الأمر الذي يزيد من كثافة الحاملات الحرة داخل ZnO ويحسن من التوصيلية الكهربائية من دون التأثير سلباً على النفاذية البصرية. لذلك، يُستخدم Al_2O_3 كعامل تشويب فعال في تحسين الخواص البصرية والإلكترونية لأغشية ZnO، وبشكل خاص في التطبيقات التي تتطلب مزيجاً من الشفافية والتوصيلية الكهربائية مثل الأجهزة الكهروضوئية والطبقات الشفافة الموصلة [4,3].

ويُعد التشويب (Doping) من أكثر الطرق شيوعاً لتحسين الخواص الفيزيائية للأغشية الرقيقة، إذ يؤدي إدخال أيونات (Al^{3+}) محل (Zn^{2+}) إلى زيادة كثافة الحاملات الحرة وإدخال مستويات طاقة إضافية داخل فجوة الطاقة، الأمر الذي ينعكس على انخفاض فجوة الطاقة البصرية وتحسين الامتصاصية في المنطقة فوق البنفسجية، إضافةً إلى تحسين بنية الغشاء وتقليل العيوب السطحية. ويتيح التشويب التحكم بسلوك ZnO بما يتناسب مع متطلبات التطبيقات الوظيفية المختلفة [4].

وبفضل هذه الخصائص المحسّنة، فإن الأغشية الرقيقة المعتمدة على ZnO المشوب بـ Al_2O_3 تُعد مناسبة لمجالات واسعة من التطبيقات التقنية، ومنها الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة، الحساسات الضوئية والغازية، الثنائيات الباعثة للضوء في المنطقة فوق البنفسجية (UV-LEDs)، الأغشية الشفافة الموصلة المستخدمة في شاشات العرض، وأجهزة التحويل الكهروضوئي التي تعتمد على تحسين الانتقالات الإلكترونية والبصرية [5,6].

تهدف هذه الدراسة إلى تحضير أغشية رقيقة من ZnO مشوبة بنسب مختلفة من أوكسيد الألمنيوم Al_2O_3 باستخدام تقنية الرش الكيميائي الحراري، ودراسة تأثير التشويب على الخصائص البصرية للأغشية، ولا سيما الامتصاصية، النفاذية، معامل الامتصاص، وفجوة الطاقة البصرية، بهدف تقييم مدى ملاءمة هذه الأغشية للاستخدام في التطبيقات الكهروضوئية والبصرية المتقدمة.

2- الجانب النظري:

تعرف الإمتصاصية (A) بأنها النسبة بين شدة الإشعاع الذي يمتصه الغشاء(I_A) إلى شدة الإشعاع الساقط على الغشاء (I_0)، وهي كمية خالية من

وحدات القياس، وتعطى بالعلاقة الآتية [7]:

$$A = \frac{I_A}{I_o} \quad (1)$$

حيث ان: A الامتصاصية؛ I_A شدة الإشعاع الذي يمتصه الغشاء؛ I_0 شدة الإشعاع الساقط على الغشاء.

اما النفاذية (T) (Transmittance) التي يمكن تعريفها بانها النسبة بين الطاقة الضوئية التي تنفذ من السطح الى الطاقة الضوئية الساقطة على السطح وترتبط بعلاقة مع الامتصاصية كما موضح بالعلاقة ادناه [8]:

$$T = e^{-2.303A} \quad (2)$$

حيث ان : T النفاذية؛ A الامتصاصة.

أما معامل الامتصاص (α) الذي يقاس بوحدة (cm^{-1}) يمكن حسابه من خلال طيف النفاذية الذي يعطى بالمعادلة الاتية[9]:

$$\alpha = (2.303)\ \frac{A}{t} \quad (3)$$

حيث ان: α معامل الامتصاص؛ A الامتصاصية؛ t سمك الغشاء.

كما وقد تم حساب فجوة الطاقة البصرية للانتقالات الالكترونية المباشرة المسموحة للاغشية المحضرة بتطبيق المعادلة (4) والتي عندها تكون قيمة الثابت r =1 /2 ويمكن كتابتها بالشكل التالي[10]:

$$(\alpha h\nu) = B(h\nu - E_g)^n \quad (4)$$

حيث ان: α: معامل الامتصاص؛ B: ثابت؛ E_g: فجوة الطاقة البصرية؛ n: ثابت يأخذ القيمتين ½ او 2 ويعتمد على نوع الانتقالات الالكترونية؛ h: ثابت بلانك.

3- طريقة العمل:

3-1 تهيئة الارضيات وتنظيفها:

من الضروري إلى الانتباه عندما نحضر أغشية رقيقة على ركائز من الزجاج إلى أهمية تنظيف الركائز والعمل ضمن جو معقم، كما أن اختيار نوعية الركيزة يعد من بين العوامل التي تساهم في نجاح عملية ترسيب المحلول على شكل طبقات رقيقة، حيث اعتمدنا في بحثنا هذا على استخدام – ركائز زجاجية من نوع (MICROSCOPE SLIDE) صينية المنشأ ذو الأبعاد cm^2 (2.5x2.5) حيث تم تنظيف القواعد الزجاجية للتخلص من الشوائب التي تؤثر في خواص الأغشية المحضرة ولتكون جاهزة الاستعمال يجب اتباع الخطوات التالية : غسل الركائز الزجاجية جيداً بالماء المقطر المغلي بدرجة حرارة (70 c^o) للتخلص من العوالق الناتجة عن العوامل الجوية، ونغمرها في وعاء يحتوى على الإيثانول ثم بعد ذلك نغمرها في محلول الميثانول لإزالة أية آثار دهنية أو عوالق متبقية على سطحها ثم بعد ذلك نعيد غسلها بالماء المقطر المغلي بدرجة حرارة (70 c^o)، و نقوم بتجفيفها بواسطة مجفف شعر يعطي هواءً حاراً.

3-2 تحضير المحاليل:

1. تحضير محلول اوكسيد الزنك النقي:

لتحضير محلول مادة أوكسيد الزنك (ZnO) النقية يتم ذلك باستخدام كلوريدات الزنك المائية وهو مادة بشكل مسحوق ابيض فاتح رمزها الكيميائي ($ZnCl_2.2H_2O$) هندي المنشأ والمجهز من قبل شركة (THOMAS BAKER) ووزنها الجزيئي (172.34)gm /mol ولتحضير محلول تركيزه مساوي لـ(0.1)M وبدرجة حرارة الغرفة

يتم اذابة gm(1.7234) من كلوريد كلوريدات الزنك المائية ولحساب كتلة مادة كلوريدات الزنك المائية استخدم ميزان الكتروني من نوع (Mettler AE-160) حساس تبلغ حساسيته gm(10^{-4}). في mL(100) من الماء المقطر ومن ثم يتم خلط المادة بشكل جيد وذلك باستخدام الخلاط المغناطيسي Magnetic stirrer ولمدة min(30) وذلك لضمان تجانس المحلول فنحصل على محلول شفاف اللون وللحصول على الوزن المراد اذابته نستخدم العلاقة التالية[16]:

$$M = \frac{M_t}{M_{wt}} * \left(\frac{1000}{V}\right) \quad \ldots\ldots\ldots (5)$$

إذ ان:

M: التركيز المولاري.

M_t: كتلة مادتي كلوريدات الزنك المائية وكلوريد الالمنيوم المائي على التوالي.

M_{tw}: الوزن الجزيئي لمادتي كلوريدات الزنك المائية وكلوريد الالمنيوم المائي على التوالي.

V: حجم الماء المقطر Lm(100).

2. تحضير محلول المادة الشائبة:

ولتحضير محلول مادة أوكسيد الالمنيوم (Al_2O_3) الشائبة يتم ذلك من خلال استخدام كلوريد الالمنيوم المائي وهو مادة بشكل مسحوق ابيض رمزها الكيميائي ($2AlCl_3.6H_2O$) هندي المنشأ والمجهز من قبل شركة (THOMAS BAKER) ووزنها الجزيئي mol/gm(133.34) ولتحضير محلول تركيزه مساوي لM(0.1) وبدرجة حرارة الغرفة يتم اذابة gm(1.3334) من كلوريد الالمنيوم المائي في mL(100) من الماء المقطر ومن ثم يتم خلط المحلول بشكل جيد وذلك باستخدام الخلاط المغناطيسي Magnetic stirrer ولمدة min(30) أيضا وذلك لضمان تجانس المحلول وللحصول على الوزن المراد اذابته نستخدم العلاقة (1) المذكورة انفا[16].

الجدول (1): يبين النسب الحجمية لكل من (ZnO, Al_2O_3) النقية والمشوبة الداخلة في تحضير الغشاء.

النسبة الحجمية للشائبة	Al_2O_3(mL)	ZnO(mL)
0%	0	100
1%	1	99
2%	2	98
3%	3	97
4%	4	96

3-3 ترسيب الاغشية الرقيقة:

بعد اكتمال عملية التنظيف للارضيات الزجاجية يتم تهيأتها للترسيب وذلك من خلال وضعها على سطح السخان الكهربائي والذي يتم تشغيله حسب شروط التشغيل البينة ادناه والمبينة في الجدول (2)، للحصول على اغشية رقيقة متجانسة، ومتماسكة مع القاعدة الزجاجية.

الجدول (2): شروط التشغيل الخاصة بمنظومة الرش الكيميائي الحراري.

درجة الحرارة	C^o 400±2%	
الضغط	bar 2	
المسافة بين النوزل والقاعدة	30±1cm	
زمن الرش وزمن التوقف	رش(3sec)	توقف (10sec)
عدد الرشات	15 رشة	
معدل الرش	mL/min(6)	

3-4 قياس سمك الاغشية الرقيقة :

بعد ان تم ترسيب جميع الاغشية الرقيقة على القواعد الزجاجية اعيد وزن القواعد من جديد وذلك لغرض الحصول على سمك الاغشية المحضرة حيث تم استخدام الطريقة الوزنية في قياس سمك الاغشية والتي نفذت باستخدام نفس الميزان انف الذكر ومن خلال المعادلة التالية[9]:

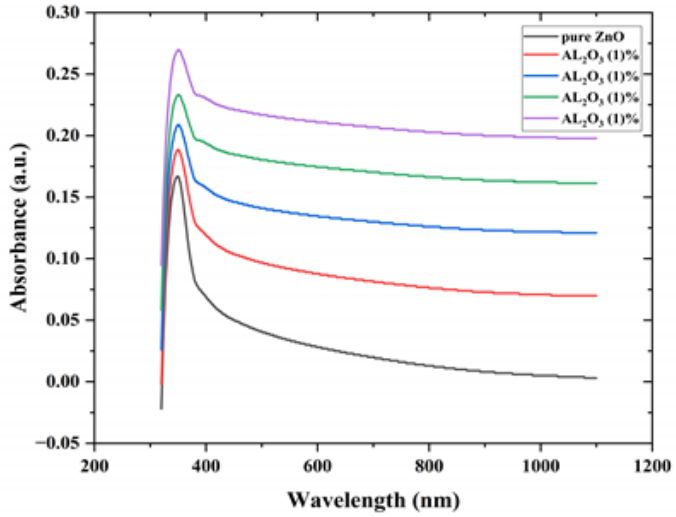
$$t = \frac{\Delta W}{\rho * A} = \frac{W_2 - W_1}{\rho * A} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

حيث ان:t سمك الغشاء؛ ΔW: الفرق في الوزن قبل وبعد الرش؛ ρ : كثافة مادة الغشاء (gm/cm^3)؛ A مساحة الغشاء (cm^2).

ومن خلال إيجاد الفرق في الوزن والقسمة على حاصل ضرب كثافة مادة الغشاء ومساحته وكما مبين في المعادلة (2) تبين ان سمك الاغشية المحضرة كان بحدود nm(300±50) تقريبا، كما تمت جميع القياسات البصرية باستخدام جهاز المطياف البصري المعروف ب (UV – 1800) والمجهز من قبل شركة (Shimadzu) والذي يعمل في نطاق الاطوال الموجية nm(1100-190).

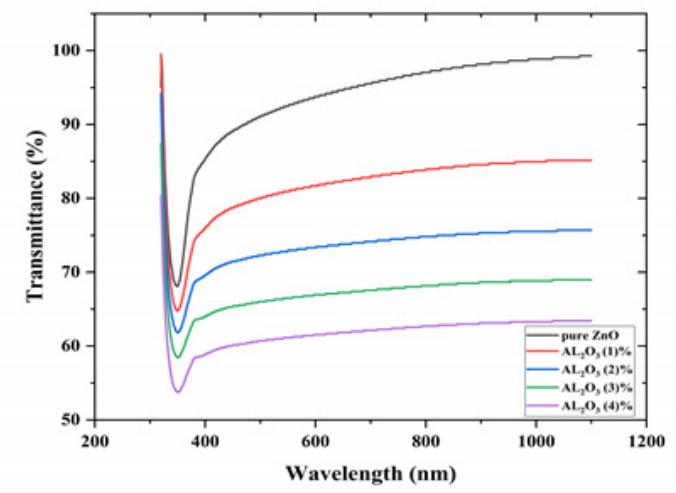
4- النتائج والمناقشة:

تم حساب قيم طيف الامتصاصية لأغشية اوكسيد الزنك (ZnO) للأطوال الموجبة ضمن المدى nm(320-1100) وتظهر أن الامتصاصية تتغير مع الطول الموجي، اذ نلاحظ أن الامتصاصية تسلك سلوك معاكس للنفاذية، اذ تبدأ بأعلى قيمة لها عند الطول الموجي nm(328) ومن ثم يبدأ طيف الامتصاصية بالانحلال الأسي مع زيادة الطول الموجي إلى أن يصل إلى أدنى قيمة عند الطول الموجي nm(700)، وبعدها يلاحظ أن قيمة طيف الامتصاصية تكون ثابتة ضمن المدى nm(700-1100) كما موضح بالشكل (1). بسبب قلة طاقة الفوتونات الساقطة وعدم قدرتها على رفع الالكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل، اذ تكون العلاقة عكسية ما بين الطول الموجي وطاقة الفوتون، وتفسير ذلك فيزيائياً هو أن الفوتون الساقط لم يستطع تهيج الإلكترون ونقله من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل، لأن طاقة الفوتون الساقط اقل من قيمة فجوة الطاقة للاغشية المحضرة ولهذا تقل الامتصاصية بزيادة الطول الموجي [11]. نلاحظ أيضاً زيادة الامتصاصية بزيادة نسب التشويب وإن أعلى نسبة للامتصاصية للأغشية كانت عند نسبة تشويب ٪(4) واقل نسبة للعينة النقية.



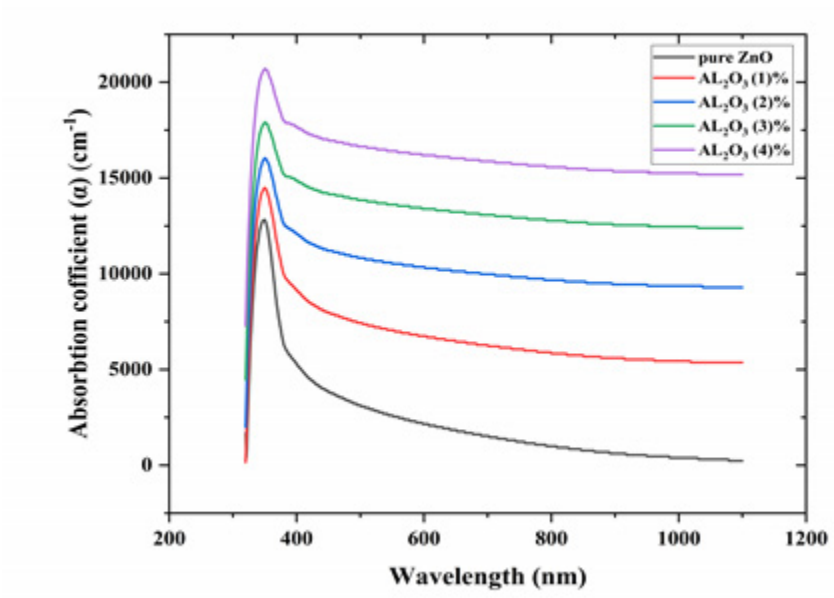
الشكل (1): يوضح الامتصاصية كدالة للطول الموجي للعينات المحضرة.

يوضح الشكل (2) طيف النفاذية لجميع الأغشية المُحضرة على ركائز زجاجية، والتي تم الحصول عليها عند أطوال موجية تتراوح من nm(1100-320). ينقسم طيف النفاذية إلى مكونين. ويشير إلى أن النفاذية الضوئية للاغشية غير المشوبة منخفضة، بقيمة ٪(68.08) عند طول موجي nm(350). ويزداد هذا بشكل كبير عند الأطوال الموجية الأطول، ليصل إلى ٪(97.08). ويُعد الانخفاض في الامتصاص في هذه المنطقة هو سبب زيادة النفاذية عند هذه الأطوال الموجية، حيث أن النفاذية تتناسب عكسياً مع الامتصاص [9]. كما يوضح الشكل تأثير التشويب، حيث تقل النفاذية مع زيادة نسبة التشويب، وتبلغ ذروتها بقيمة٪(60.13) في منطقة I_R عند نسبة تشويب ٪4.



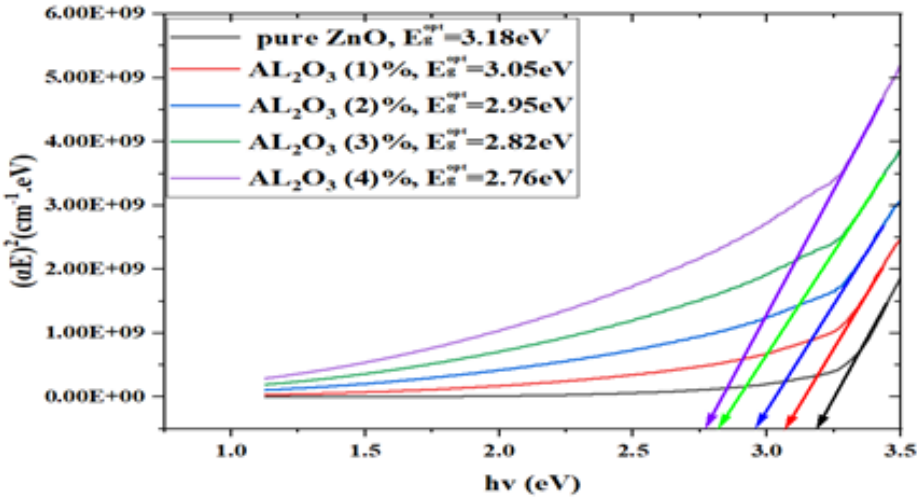
الشكل (2): يوضح النفاذية كدالة للطول الموجي للاغشية المحضرة.

وبالنسبة لمعامل الامتصاص الشكل (3) يدل على احتمالية كبيرة لحدوث الانتقالات الإلكترونية المباشرة، حيث ($\alpha>10^4\ cm^{-1}$) وإن سلوك معامل الامتصاص مشابه جداً لسلوك الامتصاصية للأغشية، فنجد أن قيم معامل الامتصاص تتناسب طرديا مع الطول الموجي إلى منطقة فجوة الطاقة المحضورة (E_g) فتكون قليلة عند الطاقات الواطئة، ثم يبدأ (α) بالزيادة مع زيادة طاقة الفوتونات الساقطة على الغشاء [12].



الشكل (3): يوضح معامل الامتصاص كدالة للطول الموجي للعينات المحضرة.

يتم حساب فجوة الطاقة وحسب الشكل(4) حيث توضح علاقة $(\alpha h\nu)^2$ مع قيم ($h\nu$) لطاقة الفوتون الساقط، ومن خلال رسم أفضل امتداد لخط مستقيم بعد حافة الامتصاص الأساسية ليقطع محور طاقة الفوتون عند $(\alpha h\nu)^2=(0)$ يتم حساب فجوة الطاقة للانتقالات الالكترونية المباشرة لـ (ZnO) النقية والمطعمة بـ(Al_2O_3)، حيث وجد ان قيم فجوة الطاقة للأغشية النقية (3.18 eV) اما تأثير التطعيم على فجوة الطاقة فقد وجد انها تقل بزيادة نسب التطعيم حتى تصل الى (2.76eV) عند التطعيم بنسبة ٪(4) ويعود السبب للنقصان في قيم فجوة الطاقة إلى أنْ تكون مستويات لشوائب Al_2O_3 داخل فجوة الطاقة ويزداد عرض هذه المستويات بزيادة نسب التشويب مما يؤدي الى تناقص عرض الفجوة ، وهذا يتفق مع ماتوصل إليه .[12]



الشكل (4): يوضح فجوة الطاقة البصرية المحسوبة للاغشية المحضرة.

5- الاستنتاجات:

يتضح من النتائج أن تشويب أغشية ZnO بأوكسيد الألمنيوم أدى إلى تغيرات واضحة في الخصائص البصرية؛ حيث ازدادت الامتصاصية عند الأطوال الموجية القصيرة نتيجة إدخال مستويات طاقة جديدة داخل فجوة الطاقة، في حين انخفضت النفاذية تدريجياً مع زيادة مقدار التشويب بسبب ارتفاع كثافة الحالات الإلكترونية. كما أظهرت قياسات فجوة الطاقة انخفاضاً من (3.18)eV للعينة النقية إلى (2.76)eV عند نسبة تشويب 4٪، مما يدل على تضييق فجوة الطاقة وتحسين الانتقالات الإلكترونية المباشرة. تشير هذه النتائج إلى فعالية التشويب بـ Al_2O_3 في تحسين الاستجابة البصرية للـ ZnO، مما يجعل هذه الأغشية مناسبة للتطبيقات في الخلايا الشمسية والأجهزة الكهروضوئية.

المصادر:

[1] Z. L. Wang, "Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications," J. Phys. Condens. Matter, vol. 16, pp. R829–R858, 2004.

[2] M. S. Khan et al., "Optical and structural properties of ZnO thin films fabricated by sol–gel method," Mater. Sci. Appl., vol. 2, no. 5, pp. 340–345, 2011.

[3] H. A. Rahoma et al., "Enhanced Optical Properties of Al-Doped ZnO Thin Films," Materials Chemistry and Physics, vol. 263, p. 124379, 2021.

[4] S. Singh et al., "Effect of Al_2O_3 Incorporation on ZnO Thin Films for Optoelectronic Applications," Ceramics International, vol. 49, pp. 20555–20563, 2023.

[5] T. Babeva, "Optical Thin Films and Structures," Coatings, vol. 10, p. 1140, 2020.

lation method for degradation of methylene blue dyes. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 627, 127204.

[6] R. Kaur and A. Kumar, "Bandgap Engineering in ZnO via Al Doping," Applied Surface Science, vol. 589, p. 152991, 2022.

[7].Khelladi, N. B., & Sari, N. E. C. (2014). Optical properties of ZnO thin films prepared by Sol-gel method. In 2014 North African Workshop on Dielectic Materials for Photovoltaic Systems (NAWDMPV) (pp. 1-3). IEEE.

[8[].A. M. H. Al-Alyan, S. J. Mohammed, and W. M. M. Amin. (2022) "Investigation of the structural, optical, and electrical characteristics of $SnO_{2x}(Bi_2O_3)_\gamma$ films and their sensing applications," Ph.D. dissertation, Coll. of Education for Pure Sciences, Tikrit Univ., p. 93.

[9].Benelmadjat, H.; Boudine, B. and Halimi. (2009). Fabrication and Characterization of pure and Sn/Sb doped ZnO thin Films deposited by Sol-gel method. Optics & Laser Technology, 167(243).

[10].Nour Mohammed Ali Al-Karkhi. (2012). "Study of Structural and Optical Properties of (ZnO:Sn) Thin Films Prepared by Chemical Spray Pyrolysis," M.Sc. thesis, University of Diyala, Iraq.

[11].F. S. Alamro, A. M. Mostafa, H. A. Ahmed, and A. Toghan. (2021). "Zinc oxide/carbon nanotubes nanocomposite: Synthesis, characterization and catalytic reduction of 4-nitrophenol via laser assistant method," .Surfaces and Interfaces. vol. 26, p. 101406.

[12].Mostafa, A. M., Mwafy, E. A., & Toghan, A. (2021). ZnO nanoparticles decorated carbon nanotubes via pulsed laser ab-