مجلة الدراسات التربوية والعلمية - كلية التربية - الجامعة العراقية
العدد السابع والعشرون - المجلد الحادي عشر - علوم الفيزياء - آيار 2026 م
doi.org/10.52866/esj.2026.11.27.04

دراسة الخواص التركيبية والبصرية لاغشية (ZnO: Co) الرقيقة المحضرة باستخدام تقنية الرش الحراري (Spray Pyrolysis)

عمر علي كريم[1]* ، حنان رضا عبد[2]
قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة تكريت، تكريت، العراق.
قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة تكريت، تكريت، العراق.
* البحث مستل من رسالة ماجستير الباحث الأول
Email[1] : oa230071pep@st.tu.edu.iq

مستخلص:

في هذا البحث تم تحضير أغشية أوكسيد الزنك (ZnO) النقية والمشوبة بالكوبالت (Co) بنسب وزنية مختلفة ٪(0,4) وبتركيز M(0.1) والمرسبة على قواعد زجاجية عند درجة حرارة C° (400) وبسمك nm (25± 350) باستخدام تقنية التحلل الكيميائي الحراري لغرض دراسة تاثير التطعيم بالكوبالت على الخصائص التركيبية والبصرية لاغشية (ZnO). تبين من خلال نتائج حيود الأشعة السينية ان كافة الأغشية المحضرة متعدد التبلور، ومن النوع السداسي المتراص (Hexagonal Wurtzite) ، والاتجاه السائد للتبلور هو (002)، وان حجم البلوريات قد قل من (30.90) nm للاغشية النقية إلى (16.29) nm عند التشويب بالكوبالت (٪4 Co) ، وتمت دراسة الخصائص البصرية للأغشية المحضرة من خلال تسجيل طيفي النفاذية، والامتصاصية، ولمدى الأطوال الموجبة nm(340–1100) وقد وجد ان اعظم قيمة للنفاذية هي(٪94) عند الأغشية غير المشوبة وتقل بعد التشويب على عكس الامتصاصية التي تزداد بعد التشويب، وكما وجد ان فجوة الطاقة البصرية للانتقال الالكتروني المباشر المسموح للأغشية غير المشوبة (3.28) ev، وتقل قيمتها بعد التشويب الى (3.15) ev، بينت الدراسة إن إضافة الكوبالت أدى إلى تغير في الخصائص التركيبية، والبصرية لأغشية أوكسيد الخارصين.

الكلمات المفتاحية: أوكسيد الزنك، الكوبالت، التحلل الكيميائي الحراري، الخصائص التركيبية، الخصائص البصرية.

Study of the Structural and Optical Properties of (ZnO:Co) Thin Films Prepared by the Spray Pyrolysis Technique

[1]Omar Ali Kareem* , [2]Hanan Redha Abd
Department of Physics, College of Education for Pure Sciences, Tikrit University, Tikrit, Iraq.
Department of Physics, College of Education for Pure Sciences, Tikrit University, Tikrit, Iraq.
This work is derived from the Master's thesis of the first author *
Emai[1] : **oa230071pep@st.tu.edu.iq**

Abstract :

In this study, pure and cobalt-doped zinc oxide (ZnO) thin films were prepared with different weight percentages of cobalt (Co) (0–4%), a precursor concentration of 0.1 M, and deposited on glass substrates at a substrate temperature of 400 °C, with a film thickness of nm, using the chemical spray pyrolysis technique. The effect of cobalt doping on (25±350) the structural and optical properties of the ZnO thin films was investigated.

X-ray diffraction (XRD) analysis revealed that all the prepared films exhibit a polycrystalline structure with a hexagonal wurtzite phase, and the preferred orientation was along the (002) plane. The crystallite size decreased from (30.90) nm for the undoped ZnO film to (16.29) nm for the film doped with 4% Co.

The optical properties of the prepared films were studied by recording the transmittance and absorbance spectra in the wavelength range of (340–1100) nm.The maximum optical transmittance was found to be about (94%) for the undoped films, and it decreased after cobalt doping, while the absorbance increased. Moreover, the direct allowed optical band gap decreased from (3.28) ev for the undoped (ZnO) film to (3.15) ev after doping. The results indicate that the incorporation of cobalt significantly affects the structural and optical optical properties of zinc oxide thin films.

Keywords : Zinc oxide, cobalt, chemical spray pyrolysis, structural properties, optical properties.

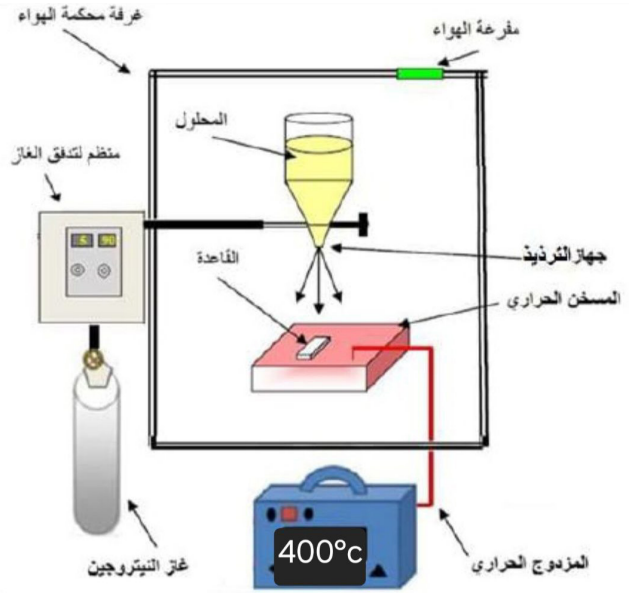
1- المقدمة

تعد تقنية الأغشية الرقيقة من أهم التقنيات التي أسهمت في معرفة ودراسة أشباه الموصلات واعطت فكرة عميقة وواضحة عن اغلب الصفات والخواص الفيزيائية والكيميائية. تستعمل الأغشية الرقيقة في مجالات عديدة وتكون لها تطبيقات عملية كثيرة حيث تم استعمالها في بناء الحاسبات والمجاهر الالكترونية لصغر حجمها وخفة وزنها وقدرتها الفائقة عند أداء عملها [1، 2].

كذلك تم إستعمال الأغشية الرقيقة في أجهزة الذاكرة المغناطيسية والدوائر المتكاملة، وفي دوائر الفتح والغلق وصناعة المقاومات، والترانزستورات والمضخمات والكواشف، كذلك تستخدم في صناعة الخلايا الشمسية [3].

تطورت طرق تحضير الاغشية الرقيقة وأصبحت على درجة عالية من الدقة في تحديد سمك الغشاء وتجانسه ، وتعددت طرق تحضير الاغشية الرقيقة واصبح لكل طريقة خصوصياتها لتؤدي الغرض الذي نشات من اجله ، ويتم تحضير الاغشية الرقيقة بالطرق الكيميائية والفيزيائية مثل التبخير الحراري في الفراغ، والترذيذ والترسيب الكهربائي، وترسيب البخار الكيميائي(CVD)، والتحلل الكيميائي الحراري (Spray Pyrolysis)، وترسيب المحاليل الغروية (Sol - Gel Deposition))[4،5].

وقد استخدمنا في هذا البحث طريقة التحلل الكيميائي الحراري (Chemical Pyrolysis) التي تعد من طرق تحضير الأغشية الرقيقة للمعادن والأكاسيد، حيث يتم رش محلول يحتوي على المركب المعدني على الركيزة ثم تعريضه لدرجة حرارة مرتفعة، مما يؤدي إلى تحلل المركب إلى أكسيده وتشكيل طبقة رقيقة متجانسة وكما موضح في الشكل (1). من أهم مميزات هذه التقنية سهولة التحكم في سمك الأغشية، القدرة على تغطية مساحات كبيرة، وانخفاض التكلفة مقارنة ببعض طرق الترسيب الأخرى، بالإضافة إلى إمكانية إنتاج أغشية ذات بنية بلورية جيدة وخصائص بصرية مستقرة[6].



الشكل (1) منظومة التحلل الكيميائي الحراري

تعتبر اكاسيد التوصيل الشفافة (TCOs) وهي عبارة عن أشباه موصلات مركبة مكونة من أكاسيد المعادن، من اهم أنواع الاغشية الرقيقة التي حظيت بدراسة واسعة، لما تتمتع به من صفات ميزتها عن غيرها من المواد، وذلك بارتفاع توصيليتها ونفاذيتها البصرية (شفافة) فيمتد طيف النفاذية فيها ما بين (400-1500) nm.

وانعكاسية عالية في المنطقة تحت الحمراء[7]. ومن هذه الأكاسيد أوكسيد الخارصين (ZnO)، الذي يظهر بشكل مسحوق أبيض ، يذوب في حامض الخليك والحوامض المعدنية والهيدروكسيدات القلوية لذلك يعد من الاكاسيد الامفوتيرية ويمتلك خصائص فيزيائية مميزة حيث يمتاز بامتلاكه بفجوة طاقة كبيرة تصل إلى حوالي (3.4) ev ونفاذية عالية في منطقة الضوء المرئي، واغلب الأحيان ذو توصيلية من النوع السالب (n- type)[8]. أما تركيبه البلوري فهو يتبلور في عدة اشكال فبالنسبة لمادة (ZnO) المستعملة في هذا البحث هي من نوع سداسي متراص (wurtzite) الذي يعد الأكثر استقراراً حرارياً وله ثوابت شبيكة لها قيم [c=5.206 A°, a=3.25 A°][9].

وقد استخدمنا في هذا البحث لتحضير اغشية أوكسيد الخارصين الرقيقة أسيتات الخارصين (Zinc Acetate) التي تعد من أكثر المركّبات استخدامًا كمصدر لأيونات الزنك في طرق التحضير الرطبة مثل السول-جيل والتحلل الكيميائي الحراري، وذلك بسبب ذوبانيته الممتازة في المذيبات العضوية ووجوده في صورة مستقرة كيميائيًا تسمح بتكوين محلول متجانس وسهل التحضير [10]. وعند المعالجة الحرارية، تتحلل أسيتات الخارصين تدريجيًا لينتج أوكسيد الزنك ZnO عالي النقاوة، مما يجعله مادة أولية مثالية لإنتاج أغشية رقيقة ذات تجانس بنيوي جيد وخصائص بصرية مستقرة، في إطار بحث تحضير ZnO المطعّم بالكوبالت، يؤدي استخدام أسيتات الخارصين إلى تحسين تجانس المزج بين Zn^{2+} وCo^{2+} داخل المحلول التحضيري، مما يساعد على دمج أيونات الكوبالت داخل الشبكة البلورية بشكل منتظم ويمنع تكوّن أطوار ثانوية [11،12].

اما مادة التطعيم فقد استخدمنا أسيتات الكوبالت (Cobalt(II) Acetate) التي تعد من أكثر المركّبات استخدامًا كمصدر لأيونات الكوبالت في عمليات تشويب أغشية ZnO، وذلك بفضل ذوبانيته العالية في المذيبات العضوية والمائية وسهولة تفككه الحراري عند درجات معتدلة، مما يسمح بإدخال أيونات Co^{+2} داخل الشبكة البلورية بشكل متجانس. وقد أكدت عدة دراسات اعتماده كمصدر رئيسي للتشويب في طرق التحضير الرطبة بسبب نقاوته وسهولة دمجه في المحلول التحضيري [13]. وتعود ملاءمة أسيتات الكوبالت للتحضير الكيميائي للأغشية إلى خصائصه الفيزيائية-الكيميائية، فهو يمتلك درجة ذوبانية مرتفعة وسلوكًا ثابتًا في التحلل الحراري، مما يجعله مناسبًا لتكوين أكاسيد الكوبالت عند درجات حرارة متوسطة. ان التشويب بالكوبالت يسبب زيادة في الاضطراب البلوري وتغيرًا في فجوة الطاقة وفي مستوى الشفافية، مما يعزز إمكانية استخدام المادة في تطبيقات أكاسيد التوصيل الشفافة [14،15].

ان تاثير دخول أيونات Co^{+2} في شبكة ZnO يؤدي الى استبدال أيونات Zn^{+2} بأيونات Co^{+2} وبالتالي حدوث تغيرات طفيفة في ثوابت الشبكة وتقلص الحجم البلوري نتيجة الفرق الطفيف في

نصف القطر الأيوني، الأمر الذي ينعكس على الخواص الإلكترونية والبصرية للغشاء[16].

2- الجانب النظري

للخصائص التركيبية أهمية كبيرة وذلك لمعرفة الطبيعة البلورية والتركيب البلوري الداخلي للأغشية المحضرة النقية والمطعمة وهذا يتم من خلال استخدام اجهزة حيود الأشعة السينية (XRD) لمعرفة التركيب البلوري للأغشية المحضرة وذلك من خلال معرفة مواقع القمم والاتجاه السائد والمفضل[17]. كما يمكننا إيجاد الحجم الحبيبي (Grain Size) للبلورات المتكونة في الغشاء الرقيق وذلك من خلال معرفة عرض منحني منتصف القمة (FWHM) المتشكلة باستخدام معادلة ديباي-شرر (Debye – Scherer Formula)[18].

$$D(nm) = \frac{K\lambda}{\beta\cos\theta} \qquad (1)$$

ان دراسة الخصائص البصرية من الأمور المهمة بسبب استخدام المواد في الكثير من التطبيقات البصرية مثل مرشحات التداخل، والالياف البصرية التي تتطلب معرفة دقيقة للثوابت البصرية وعلى مدى واسع من الأطوال الموجية والتي تكون لها صلة ببنيتها الذرية ، والخواص الكهربائية ، وهيكل النطاق الالكتروني [19].

ومن هذه الخصائص الامتصاصية (A) (Ab-sorption) التي تعرف بأنها النسبة بين شدة الإشعاع الممتص من قبل الغشاء(I_A) إلى شدة الاشعاع الساقط علية (I_0) وتكون خالية من وحدات القياس والتي تعطى بالعلاقة الاتية [20].

$$A = \frac{I_A}{I_o} \qquad (2)$$

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

اما النفاذية (T) (Transmittance) فتعرف بانها النسبة بين شدة الأشعة النافذة خلال المادة (الغشاء) إلى شدة الأشعة الساقطة على المادة وتعطى بالعلاقة الآتية [21].

$$T = I / I_o \qquad (3)$$

حيث ان (T) النفاذية عند طول موجي معين ، (I) شدة الاشعاع النافذ، (I_0) شدة الاشعاع الساقط

أما معامل الامتصاص (α) فيمكن حسابه من خلال طيف النفاذية ووحدة قياسه (cm^{-1}) ويعطى بالمعادلة الاتية [22].

$$\alpha = (2.303)\frac{A}{t} \qquad (4)$$

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

اما فجوة الطاقة البصرية (Energy gap) للانتقالات الالكترونية المباشرة المسموحة للاغشية المحضرة يمكن حسابها بتطبيق المعادلة (5) والتي عندها تكون قيمة الثابت (r = 1/2) ويمكن كتابتها بالشكل التالي [23].

$$\alpha h\nu = Bx\,(h\nu - E_g)^r \qquad (5)$$

حيث ان: α: معامل الامتصاص ، B: ثابت، Eg: فجوة الطاقة البصرية ، r: ثابت يأخذ القيمتين 1/2 او 2 ويعتمد على نوع الانتقالات الالكترونية، h: ثابت بلانك .

3 - الجانب العملي

3-1 تهيئة قواعد الترسيب

أستخدمت قواعد من الزجاج الاعتيادي بأبعاد

cm^2(2.5x2.5) وبسمك cm(0.1)، حيث تم تنظيف القواعد الزجاجية بعدة مراحل حيث تم غسلها بالماء المقطر لمدة خمس دقائق . وبعد ذلك ترفع القواعد من الماء المقطر بواسطة ملقط خاص وتوضع في دورق يحوي مادة كحول الايثانول ولمدة خمس دقائق ومن ثم بالماء المقطر. تم تجفيف العينات بورق مجفف خاص وقطع نسيج خاصة بتنظيف العدسات للتخلص من العوالق والشوائب، ووضعت القواعد بحافظات مناسبة ونظيفة .

3-2 تحضير المحاليل

تم وزن عينات من (ZnO_{1-x} : Co_x) بنسب وزنية wt٪ (x= 0, 2) حيث استخدمت مادة خلات الخارصين المائية (Zinc acetate) في تحضير محلول (ZnO) والتي رمزها الكيميائي [$Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$] وهي مادة ذات لون أبيض لها قابلية الذوبان في الماء ذات نقاوة (98٪) ووزنها الجزيئي (219.49) g/mol، حُضّر محلول أسيتات الخارصين المائية من خلال اذابة (2.19) g في (100) mol من الماء المقطر بتركيز (0.1) M مع التحريك المستمر للمحلول لمدة (30) min باستخدام الخلاط المغناطيسي للحصول على محلول رائق ومتجانس.

وتم استخدام مادة خلات الكوبالت المائية [Cobalt(II)-acetat reinst] في تحضير محلول (Co) والتي رمزها الكيميائي [$Co(CH_3COO)_2.4H_2O$] وهي مادة ذات لون بنفسجي لها قابلية الذوبان في الماء وذات نقاوة (99٪) ووزنها الجزيئي (249.08) g /mol حيث تم اذابة (2.49) g في (100) mol من الماء المقطر بتركيز (0.1) M وقد استعمل ميزان الكتروني حساس لغرض حساب وزن المادة المستخدمة . وقد تم حساب الوزن المطلوب من خلال المعادلة الاتية [24].

$$M_o = \frac{W_t}{M_{Wt}} \times \frac{1000}{V} \qquad (6)$$

حيث ان (M_o) التركيز المولاري للمادة وهو يساوي (0.1)، (M_{wt}) الوزن الجزيئي للمادة، (W_t) وزن المادة، (V) حجم الماء المقطر .

وبعد اكتمال عملية الاذابة تم الحصول على محلول رائق متجانس خالي من العوالق ، وبعدها تم وضع المحلول في جهاز الرش وتم رش المحلول على قواعد زجاجية ساخنة عند درجة حرارة (400) C^o وزمن رش (10) sec وتوقف (30) sec وعدد رشات (20) رشة . والجدول (1) يوضح النسب الوزنية لكل مادة .

الجدول (1) النسب الوزنية للمواد الداخلة في تحضير غشاء (ZnO_{1-x}: Co_x)

ZnO (wt)%	Co (wt)%
100	0
96	4

4 - نتائج القياسات التركيبية

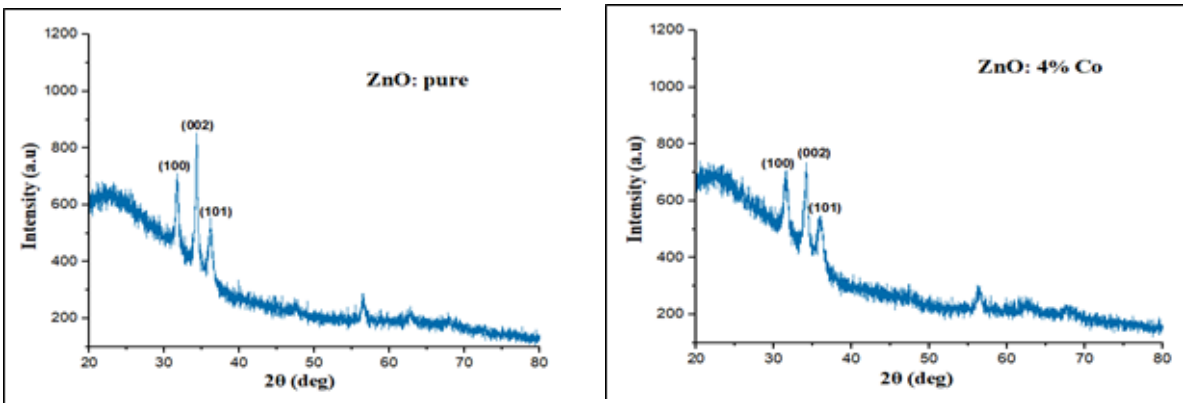
Results of Structural Measurements

حيود الاشعة السينية (XRD)

X- Ray Diffraction (XRD)

بينت نتائج التشخيص بتقنية حيود الاشعة السينية (XRD) وبعد المقارنة مع البطاقة الدولية (ICDD36-1451) لمادة (ZnO)، إن كافة أغشية اوكسيد الخارصين المحضرة النقية والمشوبة بالكوبالت (Co) تمتلك تركيبا متعدد التبلور (Poly-crystalline) ومن النوع السداسي المتراص (Hexag-onal Wurtzite)، وكان الاتجاه السائد للتبلور هو

(002) لكافة الأغشية وهذا يتفق مع[25،26]، كما نلاحظ ظهور قمم (002) ، (100) و(101) وعدم وجود قمم تشير الى الكوبالت او احد اكاسيده وكما مبين بالشكل (2)، واظهرت النتائج إن التركيب البلوري لأغشية اوكسيد الخارصين يتاثر بعملية التشويب بسبب تغير في المسافة البينية (d-spacing) من خلال تشوه في الشبكة البلورية دون تغير في الطور البلوري ناتج عن تمدد جزئي داخل الشبكة البلورية بسبب التقارب في نصف القطر الآيوني لآيون الخارصين (Zn^{+2} ≈ 0.74 Å) مع آيون الكوبالت (Co^{+2}≈ 0.745 Å) مع محافظة كافة الأغشية على تركيبها السداسي متعدد التبلور وعدم تكون اطوار ثانوية وهذا يعني ان آيونات Co^{+2} اندمجت بشكل استبدالي داخل شبكة (ZnO) البلورية ولم تشكل طورا «منفصلا»[27]. وبينت النتائج أن حجم البلوريات يقل بعد التشويب نتيجة الزيادة في عرض المنحني عند منتصف القمة (FWHM)، كما مبين في الجدول(2) .



شكل (2) اطياف حيود الاشعة السينية لأغشية ZnO النقية والمشوبة بCo

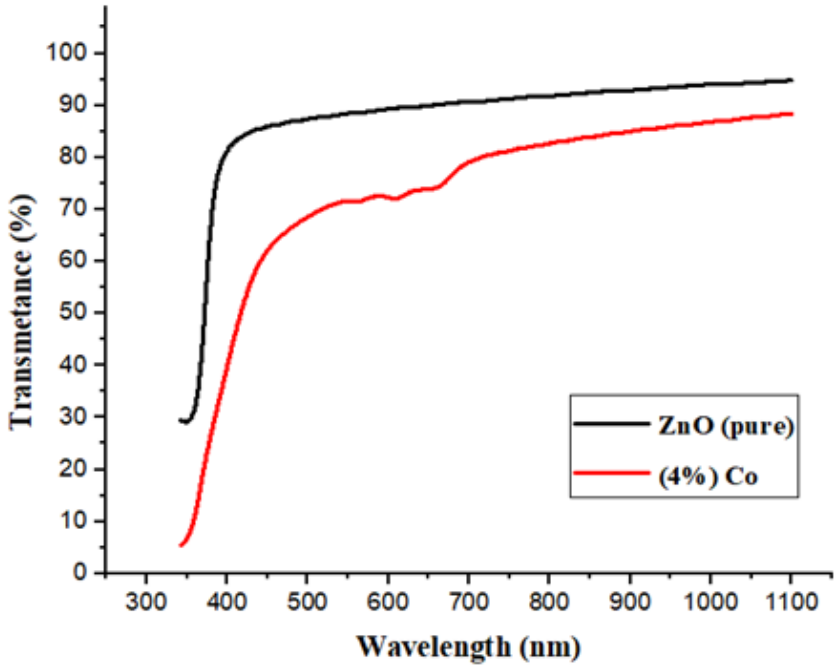
الجدول (2) نتائج حيود الاشعة السينية XRD لاغشية (ZnO) النقية والمشوبة

Sample		JCPDS	Pure	4%Co
2θ (deg)	(100)	31.769	31.592	31.466
2θ (deg)	(002)	34.421	34.271	34.106
2θ (deg)	(101)	36.252	36.113	35.943
d (Å)	(100)	2.8143	2.8297	2.8407
d (Å)	(002)	2.6033	2.6143	2.6266
d (Å)	(101)	2.4759	2.4851	2.4965
FWHM	(002)	-	0.2802	0.533
Lattice Constants	a˚(Å)	3.2497	3.2516	3.2510
	c˚(Å)	5.2066	5.2052	5.1998
(G) nm	(002)	-	30.90	16.29

5 - نتائج القياسات البصرية
Results of Optical Measurements

5-1 النفاذية Transmittance

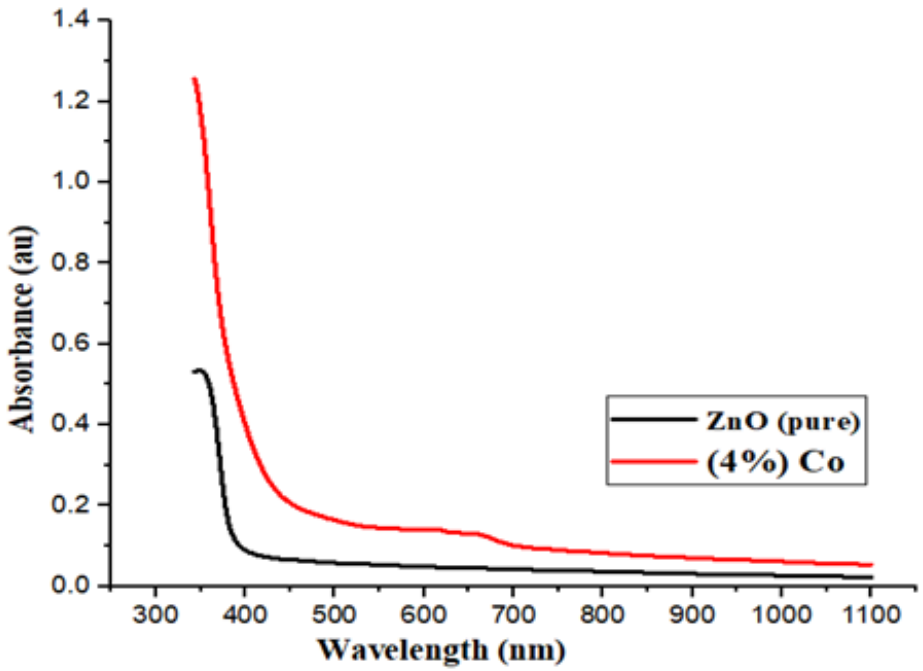
تم قياس النفاذية للاغشية النقية(ZnO) والمشوبة بالكوبالت (4٪Co) ضمن مدى الأطوال الموجية (340-1100)nm والشكل (3) يوضح طيف النفاذية كدالة للطول الموجي، حيث ان النفاذية لغشاء أوكسيد الخارصين النقي والمشوب تكون اقل ما يمكن عند حافة الامتصاص الأساسية (الاطوال الموجية القصيرة) وان النفاذية تزداد مع زيادة الطول الموجي وكانت اعظم قيمة للنفاذية لاغشية (ZnO) النقية هي (94٪) تقريبا وتقل بعد التشويب[28] ويعود سبب الانخفاض الى إدخال أيونات(Co^{+2}) داخل شبكة (ZnO) .



الشكل (3) طيف النفاذية كدالة للطول الموجي لاغشية (ZnO) النقية والمشوبة

5-2 **الأمتصاصية** Absorbance

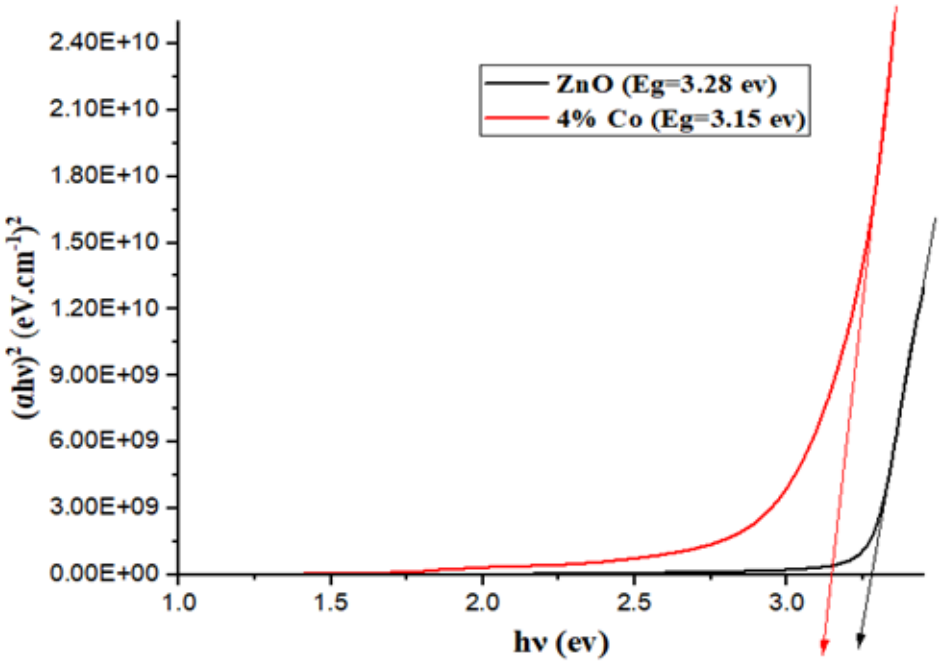
تم قياس النفاذية للاغشية النقية(ZnO) والمشوبة بالكوبالت (4٪Co) ضمن مدى الأطوال الموجية (340-1100)nm والشكل (4) يوضح طيف الامتصاصية كدالة للطول الموجي حيث ان الامتصاصية للأغشية كافة تكون اعظم ما يمكن عند حافة الامتصاص الأساسية (الأطوال الموجية القصيرة)، ثم تقل مع زيادة الطول الموجي، أي أن الأغشية المحضرة تمتاز بالامتصاصية العالية عند الأطوال الموجبة القصيرة ونلاحظ أنها تقع ضمن المنطقة المرئية وبذلك يمكن استخدامها في تطبيقات الخلايا الشمسية، كما نلاحظ أن الامتصاصية تزداد بعد التشويب مقارنة بالاغشية غير المشوبة[28].



الشكل (4) طيف الامتصاصية كدالة للطول الموجي لاغشية (ZnO) النقية والمشوبة

3-5 فجوة الطاقة البصرية Optical Band Gap

تم حساب فجوة الطاقة البصرية للأنتقالات الالكترونية المباشرة المسموحة للاغشية النقية(Z-nO) والمشوبة بالكوبالت (4٪Co) ضمن مدى الأطوال الموجية nm(1100-340) من خلال رسم العلاقة بين وطاقة الفوتون الساقط وكما مبين بالشكل (5) حيث يرسم مماس للجزء المستقيم من المنحني ليقطع محور طاقة الفوتون عند النقطة اذ تمثل نقطة التقاطع هذه قيمة فجوة الطاقة البصرية للانتقالات المباشرة المسموحة، وكانت قيمة فجوة الطاقة البصرية للانتقال المباشر المسموح لغشاء أوكسيد الخارصين غير المشوب بحدود (3.283) eV وتقل بعد التشويب الى(3.15) eV ويعزى النقصان في قيم فجوة الطاقة البصرية للأغشية المشوبة إلى ان الشوائب أدت إلى تكوين مستويات موضعية جديدة (مستويات مانحة) تقع اسفل حزمة التوصيل وهذه المستويات مهيأة لاستقبال الإلكترونات وتوليد ذيول طاقة موضعية داخل فجوة الطاقة البصرية تعمل على امتصاص الفوتونات ذات الطاقة الواطئة (إزاحة حافة الامتصاص نحو الأطوال الموجية الطويلة)؛ مما يؤدي إلى نقصان في قيمة فجوة الطاقة البصرية وهذا السلوك يتفق مع [29] .



الشكل (5) فجوة الطاقة البصرية لاغشية (ZnO) النقية والمشوبة

6 - الاستنتاجات

1- أظهرت نتائج جيود الأشعة السينية إن غشاء أوكسيد الخارصين (ZnO) غير المشوب والمشوب بالكوبالت (Co) هي ذات تركيب متعدد التبلور ومن النوع السداسي المتراص (Hexagonal Wurtzite).

2- ان حجم البلوريات للأغشية المحضرة يقل بعد التشويب بالكوبالت.

3- بينت نتائج فحص الخصائص البصرية تناقصاً في طيف النفاذية عند التشويب بالكوبالت وتكون ثابتة تقريبا في المنطقة المرئية لجميع الاغشية لذلك فان الأغشية المحضرة تصلح لاستخدامها كنافذة في الخلايا الشمسية، وكانت اعظم قيمة للنفاذية لاغشية (ZnO) النقية هي (94٪) تقريبا .

4- وجد ان هناك زيادة في قيم الامتصاصية بعد التشويب، لذلك يمكن استخدامها في تطبيقات الكواشف الضوئية والحساسات.

5- وجد إن فجوة الطاقة البصرية لغشاء(ZnO) النقي (3.28) ev، بينما انخفضت الى (3.15) ev بعد التشويب بالكوبالت (Co) مما يدل على ازدياد عدد الانتقالات الالكترونية وبالتالي توسيع نطاق الامتصاص الطيفي وتحسين الاستجابة الضوئية.

المصادر:

1. Singh, V. P. (2025). Advancements in thin film coatings for high-efficiency electronics and communication devices. Journal of Thin Films, Coating Science Technology & Application, 12(2), 19–24.

ties of ZnO films deposited by magnetron sputtering. Applied Surface Science, 255, 255–259.

10. Guo, C., Chu, Y., & Zeng, Y. (2004). Preparation of ZnO thin films from zinc acetate precursor via sol–gel method. Materials Letters, 58(14), 1671–1675.

11. Tang, Z., et al. (2006). Thermal decomposition of zinc acetate and formation mechanism of ZnO nanostructures. Journal of Alloys and Compounds, 415(1–2), 220–224.

12. Boukhachem, A., et al. (2015). Cobalt-doped ZnO thin films prepared by sol–gel method. Applied Surface Science, 348, 240–250.

13. Suresh, K., et al. (2018). Structural and optical properties of Co-doped ZnO thin films prepared by sol–gel method using cobalt acetate precursor. Journal of Materials Science: Materials in Electronics.

14. Lagerqvist, U., Ottosson, M., & Pohl, A. (2014). Synthesis and Characterization of Cobalt Oxide and Composite Thin Films. Advances in Materials, 3(5), 52–57.

15. Ali, M., et al. (2017). Role of cobalt ions on structural disorder and optical properties of ZnO. Journal of Alloys and Compounds.

16. Singh, R., et al. (2016). Influence of Co-doping on microstructure and opti-

2. Toma, F. T. Z., Rahman, M. S., & Maria, K. H. (2025). A review of recent advances in ZnO nanostructured thin films by various deposition techniques. Discover Materials, 5, Article 60.

3. Grolik, B., & Koppjochim. (2003). Optical properties of thin semiconductor films. Internet report.

4. Yunus, Y. (2020). Review of the common deposition methods of thin-film pentacene, its derivatives, and their performance. Polymers, 14, 1112.

5. Krunks, M. (2004). Thin films for photovoltaics by chemical methods. Tallinn University of Technology, Estonia.

6. Subramanian, V., & Gupta, A. (2008). Chemical spray pyrolysis of oxide thin films for electronic and optoelectronic applications. Materials Chemistry and Physics, 110(2–3), 359–365.

7. Dixon, S. C., Scanlon, D. O., Carmalt, C. J., & Parkin, I. P. (2016). n-Type doped transparent conducting binary oxides: An overview. Journal of Materials Chemistry C, 4, 6946–6964.

8. Wang, Z. L. (2014). ZnO nanostructures: growth, properties and applications. Journal of Physics: Condensed Matter, 16(25), R829–R858.

9. You, J. B., Zhang, X. W., Fan, Y. M., Yin, Z. G., Cai, P. F., & Chen, N. F. (2009). Effects of crystalline quality on the UV emission and electrical proper-

24. Johnson, R. L. (2005). Characterization of piezoelectric (ZnO) thin films and fabrication of piezoelectric micro-cantilevers (Master's thesis). Iowa State University, USA.

25. Habubi, N. F., Al-Dhahir, S. S., & Abed, J. M. (2019). Structural and optical properties of cobalt-doped ZnO thin films prepared by spray pyrolysis method. Surface Review and Letters, 26(5), 1950050.

26. Latif, A., Mohsin, M., Bhatti, I. A., Tahir, A. A., Hussain, M. T., & Iqbal, J.(2023).

Experimental and ab initio studies of Co-doped ZnO nanophotocatalyst thin films for dye mineralization. RSC Advances, 13, 23645–23658.

27. Shannon, R. D. (1976). Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. Acta Crystallographica Section A, 32(5), 751–767.

28. Gungor, E., Gungor, T., Caliskan, D., & Ceylan, A. (2014). Co-doping induced structural and optical properties of sol–gel prepared ZnO thin films. Applied Surface Science, 318, 309–313.

29. Ali Shakir, A. (2017). Structural and optical characterization of cobalt-doped zinc oxide thin films deposited by chemical spray pyrolysis. Journal of Kufa-Physics, 9(2), 32–40.

cal band gap of ZnO thin films. Materials Chemistry and Physics.

17. Upadhyay, S. M. D. (2021). Structural analysis of thin films using X-ray diffraction techniques. International Journal of Engineering & Extended Technologies Research (IJEETR), 3(1).

18. Mustapha, S., et al. (2019). Comparative study of crystallite size using Williamson-Hall and Debye-Scherrer plots for ZnO nanoparticles. Adv. Nat. Sci.: Nanoscience Nanotechnology, 10, 045013.

19.Streetman, B. G. (1997). Solid state electronic devices. Prentice Hall of India.

20. Nilens, A. G. (2013). Deep impurities in semiconductors. Wiley-Interscience.

21. Callister, W. D. (1997). Materials science and engineering (4th ed.). John Wiley & Sons.

22. Al-Juboori, R. A., & Al-Sammarraie, K. F. (2019). Optical properties of ZnO thin films deposited by spray pyrolysis technique. Journal of University of Babylon for Pure and Applied Sciences, 27(4).

23. Al-Karkhi, N. M. A. (2012). Study of structural and optical properties of (ZnO:Sn) thin films prepared by chemical spray pyrolysis (Master's thesis). University of Diyala, Iraq.