مجلة الدراسات التربوية والعلمية - كلية التربية - الجامعة العراقية
العدد السابع والعشرون - المجلد الحادي عشر - علوم الفيزياء - آيار 2026 م
doi.org/10.52866/esj.2026.11.27.07

دراسة تأثير عدد النبضات على الخصائص التركيبية وفجوة الطاقة لأغشية سيلينيد الزنك (ZnSe) النقي والمشوب بالألمنيوم (Al)

عبدالرحمن محمد خشان [1*] ، كوكب داود سالم [2*]
قسم الفيزياء ؛ كلية التربية للعلوم الصرفة ؛ جامعة تكريت ؛ العراق
قسم الفيزياء ؛ كلية التربية للعلوم الصرفة ؛ جامعة تكريت ؛ العراق
E-mail[1] :am230070pep@st.tu.edu.iq E-mail[2]:kawkab-badri@tu.edu.iq

مستخلص:

في هذا البحث تم ترسيب أغشية رقيقة من سيلينيد الزنك (ZnSe) النقي والمشوب بالالمنيوم (Al) بنسب تشويب (3٪،5٪،7٪) على قواعد زجاجية بأستخدام تقنية الترسيب بالليزر النبضي (PLD)، وكانت طاقة الليزر الموجه تبلغ mj(840) وبعدد نبضات (100) نبضة و(500) نبضة تحت تردد Hz(7) . تمت دراسة الخصائص التركيبية وفجوة الطاقة لأغشية سيلينيد الزنك النقية والمشوبة . بينت نتائج حيود الأشعة السينية (XRD) أن جميع الأغشية المحضرة حافظت على الطور البلوري المكعبي، حيث تم التعرف على القمم البلورية الرئسية عند الزوايا (27.7^0 ، 45.3^0 ، 53.6^0) 2θ والمرتبة للمستويات (311)، (220)، (111)على التوالي، مع زيادة في شدة الذروات عند (500) نبضة، مما يدل على تحسن في التبلور، كما تم ملاحظة زيادة في عرض منتصف القمم (FWHM) عند (500) نبضة مما يدل على نقصان في الحجم البلوري . كما أظهرت صور المجهر القوة الذرية (AFM) انخفاضاً ملحوظاً في كل من الخشونة السطحية والحجم الحبيبي مع زيادة عدد النبضات. ومن الجانب البصري، بينت نتائج قياس فجوة الطاقة البصرية حصول انخفاض طفيف مع ارتفاع عدد النبضات، مما يشير إلى أن التغير في عدد النبضات يؤثر بشكل أكبر على البنية التركيبية مقارنةً بتأثيره على الخصائص البصرية .

الكلمات المفتاحية : أغشية رقيقة ، عدد النبضات ، سيلينيد الزنك (ZnSe) ، الخواص التركيبية ، فجوة الطاقة، التشويب، الالمنيوم (Al)، الترسيب بالليزر النبضي (PLD) .

Study of the Effect of Pulse Number on the Structural Properties and Energy Band Gap of Pure and Aluminum(Al)-Doped Zinc Selenide (ZnSe) Thin Films.

Abdalrahman M.Khashan[*1] - Kawkab D.Salim[*2]
Department of Physics ؛College of Education for pure Sciences University of Tikrit ؛ Iraq
Department of Physics ؛ College of Education for pure Sciences University of Tikrit ؛ Iraq

ABSTRACT:

In this study, thin films of pure and aluminum-doped zinc selenide (ZnSe) were deposited on glass substrates using pulsed laser deposition (PLD). The doping concentrations of aluminum were (3%, 5%, and 7%). The deposition was carried out using a laser energy of (840) mJ at a frequency of 7 Hz, with two different pulse counts: (100) and (500) pulses. The structural and optical band gap properties of the pure and doped ZnSe films were investigated.

X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed that all prepared films retained a cubic crystal structure. The main diffraction peaks were observed at 2θ angles of (27.7°, 45.3°, and 53.6°) , corresponding to the (111), (220), and (311) planes, respectively. An increase in peak intensity was noted for the films deposited with (500) pulses, indicating improved crystallinity. However, a broadening of the peaks (FWHM) was also observed with the higher number of pulses, suggesting a decrease in crystallite size.

Atomic Force Microscopy (AFM) images showed a clear reduction in both surface roughness and grain size as the number of pulses increased. Optically, the measurements revealed a slight decrease in the optical band gap with the increase in pulse number, suggesting that variations in pulse count have a more pronounced effect on the structural properties than on the optical characteristics.

Keywords : Thin films , Number of pulses, Zinc selenide (ZnSe), Structural properties, Band gap, Doping , Aluminum (Al) , Pulsed laser deposition (PLD)

1- المقدمة Introduction

تُعد الأغشية الرقيقة لأشباه الموصلات عنصرًا جوهريًا في تطوير العديد من التطبيقات المتقدمة، مثل الأجهزة البصرية، والمستشعرات الدقيقة، والخلايا الشمسية، والأنظمة الإلكترونية الحديثة. ومن بين المواد التي نالت اهتمامًا واسعًا في هذا المجال، يبرز سيلينيد الزنك (ZnSe) كخيار واعد، نظرًا لما يتمتع به من خصائص كهروبصرية متميزة، كامتلاكه فجوة طاقة مباشرة في النطاق المرئي تُقدّر بحوالي ev(2.67) ، إضافةً إلى شفافيته العالية واستقراره الكيميائي[1].

ولتحقيق الأداء المثالي لأغشية (ZnSe) يتطلب ضبطًا دقيقًا لظروف التحضير، خصوصًا عند استخدام تقنيات متقدمة مثل الترسيب النبضي، سواء باستخدام الليزر أو القوس النبضي. من أبرز العوامل المؤثرة في هذه التقنيات هو عدد النبضات، الذي يؤثر بشكل مباشر على كمية المادة المترسبة، وسمك الغشاء، وطبيعته البلورية [2] .

تؤدي زيادة عدد النبضات إلى ترسيب كمية أكبر من المادة، مما قد يساهم في تحسين التبلور ضمن حدود معينة. إلا أن تجاوز تلك الحدود قد يؤدي إلى ظهور عيوب بلورية أو فقدان انتظام التوجه البلوري. كما أن التغير في عدد النبضات ينعكس على الخصائص السطحية مثل الخشونة والتوزيع الحبيبي، مما يؤثر بشكل مباشر على الأداء البصري للغشاء [3].

إضافة إلى ذلك، تلعب الخصائص البصرية دورًا حيويًا في تقييم جودة هذه الأغشية، حيث يُستخدم التحليل الطيفي في نطاق الأشعة فوق البنفسجية – المرئية (UV-Vis) لتحديد سلوك الامتصاص وفجوة الطاقة البصرية. وقد أشارت دراسات سابقة إلى أن عدد النبضات يمكن أن يُحدث تغيرات ملحوظة في سلوك الامتصاص والطبيعة البلورية، مما يؤدي إلى تغير في قيمة فجوة الطاقة، صعودًا أو هبوطًا، تبعًا لظروف النمو والبنية الدقيقة المتشكّلة [4].

حيث تناولة دراسة تبين تأثير عدد نبضات الليزر على الخصائص التركيبية والبصرية لأغشية (ZnSe) المحضرة بتقنية الترسيب بالليزر النبضي (PLD). فقد أوضح [5] أن زيادة عدد النبضات من 3000 إلى 6000 نبضة أدى إلى تحسين في التبلور وزيادة حجم البلورات في أغشية (ZnSe)، وهو ما انعكس على ارتفاع شدة قمم (XRD) وتحسن الخواص البصرية للأغشية. في المقابل، أظهرت دراسات أخرى أن الزيادة الكبيرة في عدد النبضات قد تؤدي إلى زيادة في العيوب البلورية أو إعادة توزيع الطاقة على سطح الركيزة، مما يُسهم في تقليل الحجم البلوري، كما أشارت اليه نتائج [6] في دراسة على أغشية CdTe المحضرة بنفس التقنية. وهذا التباين في النتائج يعكس أهمية الظروف التجريبية المحددة مثل طاقة النبضة، المسافة من الهدف، ودرجة حرارة الركيزة في تحديد البنية النهائية للأغشية.

أما في حالة تشويب (ZnSe) بالألمنيوم، فقد أظهرت دراسة لـ [7] أن التشويب يؤثر على البنية البلورية، حيث يسبب تقلصًا طفيفًا في الحجم البلوري وتغيرات واضحة في فجوة الطاقة، مما يُعدّ مؤشرًا على دخول الألمنيوم في الشبكة البلورية لعنصر (ZnSe). وتشير هذه الدراسات مجتمعة إلى أن التحكم بعدد النبضات والتشويب يعدّان من العوامل الحاسمة في ضبط الخصائص الفيزيائية والبصرية لأغشية (ZnSe) لتناسب التطبيقات

المطلوبة.

في ضوء ما سبق، يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير عدد نبضات الليزر على الخصائص التركيبية وفجوة الطاقة لأغشية (ZnSe) النقية والمشوبة بالألمنيوم، من خلال تحليل البنية البلورية بواسطة حيود الأشعة السينية (XRD)، والطبوغرافيا السطحية باستخدام المجهر الذري (AFM)، والسلوك البصري باستخدام (UV-Vis) .

2- الجزء العملي

Experimenal Work

في هذه الدراسة تم تحضير مجموعتين من الأغشية الرقيقة لسيلينيد الزنك (ZnSe) النقي والمشوب بالألمنيوم بنسب تشويب (٪7 ، ٪5 ، ٪3) لكل مجموعة باستخدام تقنية الترسيب باالليزر النبضي (PLD) وبعدد نبضات (100) نبضة و (500) نبضة على قواعد من الزجاج . وبدرجة حرارة الغرفة . قبل البدء بعملية الترسيب، تم تحضير مسحوق سيلينيد الزنك (ZnSe) والمجهز من شركة (Aladdin) بنسبة نقاوة (٪99.99) وتم أستخدام (gm2) منه ليكون وزن العينة النقية بأستخدام ميزان حساس من نوع (Metller.A.K–160) ذو حساسية (0.0001) والألمنيوم (Al) والمجهز من شركة (HIMEDIA) بنسبة نقاوة (٪99.99) . وتم حساب نسبة الخلط بمعرفة الوزن الجزيئي للألمنيوم وسيلينيد الزنك . وتم طحن وخلط المكونات بأستخدام هاون من العقيق لمدة (30) دقيقة، ثم وضعها في قالب من الصلب بقطر(12mm)، ثم تم كبس العينات بضغط (10^5 N/m^2) ولمدة (10 *min*) بعد ذلك تم تهيئة القواعد حيث خضعت لعملية تنظيف دقيقة لضمان إزالة أي شوائب قد تؤثر على جودة الغشاء المحضر . شملت عملية التنظيف غمر القواعد في الإيثانول لمدة عشر دقائق. ثم شُطفت القواعد بالماء المقطر وجُففت وتُركت لتجف في بيئة نظيفة.

ثم تم تحضير الأغشية الرقيقة بأستخدام نظام الترسيب باالليزر النبضي المجهز بليزر (Nd:YAG) يعمل عند الطول الموجي (1064*nm*) حيث تم ضبط معلمات الليزر عند ضغط مقداره (mbar 10^{-3}) وطاقة النبضة عند (840*mj*) وقد تم أستخدام (100) نبضة للمجموعة الأولى و (500) نبضة للمجموعة الثانية، وبتردد (7*Hz*) تم ضبط المسافة بين العينة والهدف داخل حجرة التفريغ عند 1.5 (cm)، مع توجيه شعاع الليزر نحو الهدف بزاوية (45) درجة، وعند تشغيل الليزر أدى تفاعل النبضات مع المادة المستهدفة إلى تبخرها وترسيبها على سطح القاعدة الزجاجية. استمرت عملية الترسيب حتى تم الحصول على طبقة ذات سماكة (130*nm* و 200*nm*) عند (100)و (500) نبضة على التوالي والتي تم تحديدها بناءً على عدد النبضات المستخدمة. بعد اكتمال الترسيب، تُركت العينة لتبرد داخل الحجرة قبل إخراجها، ثم تم تخزينها في بيئة جافة ونظيفة لحين إجراء الفحوصات التركيبية والبصرية .

الشكل (1) : يبين صورة لحجرة الترسيب وجهاز الليزر المستخدم في ترسيب الأغشية .

3 - النتائج والمناقشة
Results and Disussion

(3-1) الخصائص التركيبية
Structural properties

من الشكلين (2) ، (3) بينت نتائج فحوصات (XRD) تأثيرًا واضحًا لعدد النبضات على الخصائص التركيبية للعينات. فقد احتفظت جميع الأغشية (100) نبضة و(500) نبضة بالطور البلوري المكعبي مع بنية متعددة التبلور، وكان الاتجاه البلوري (111) هو الاتجاه المفضل للنمو في جميع العينات [8] حيث أضهرت عدة قمم عند الزوايا θ =27.7°2 ، 45.3° ، 53.6° تقابل المستويات (311)(220)، (111) على التوالي ، وذلك أعتمادا على البطاقة الدولية لخاصة بمركب سيلينيد الزنك ICDD PDF Card NO : 00-002-0479 [9] لوحظ أن زيادة عدد النبضات إلى (500) نبضة أدّت إلى ارتفاع ملحوظ في شدة القمم البلورية، مما يشير إلى تحسن في درجة التبلور نتيجة الطاقة العالية المتولدة في أثناء الترسيب، والتي تساعد على إعادة ترتيب الذرات وتشكيل بلورات أكثر انتظامًا [10] .

مع زيادة عدد النبضات ، ورغم هذا التحسن الظاهري في التبلور، أظهرت البيانات زيادة في عرض القمم البلورية (FWHM) ، وهو ما يُترجم إلى انخفاض في الحجم البلوري عند (500) نبضة وفقًا لمعادلة ديباي شيرر [11] .

$$G \cdot S = \frac{K\lambda}{\beta_{FWHM}\, COS\theta} \dots\dots\dots\dots (1)$$

حيث أن :

K : ثابت وقيمته تساوي 0.94 . λ: الطول الموجي للأشعة السينية (1.5406 A°) .

λ: الطول الموجي للأشعة السينية (1.5406 A°) .

β_{FWHM}: عرض المنحني عند منتصف القمة وتقاس بالوحدة النصف قطرية. θ: زاوية براك .

ما يدل على نمو حبيبات بلورية أصغر وأكثر كثافة، نتيجة تسارع معدلات الترسيب وتكون نوى بلورية جديدة على حساب نمو البلورات الأكبر أكما أظهرت الأنماط حيود الأشعة السينية (XRD) عند (500) نبضة تغيّرًا طفيفًا في مواضع القمم البلورية نحو زوايا حيود أعلى، خصوصًا عند التشويب وارتفاع عدد النبضات يشير هذا الأنزياح وفقا لمعادلة براك[12]

$$n\lambda=2d\sin\theta \quad \ldots\ldots\ldots (2)$$

حيث أن :

n : رتبة الأنعكاس وتمثل عدد الأطوال الموجية التي تتطابق مع فرق المسار بين الأشعة المنعكسة . غالبا ما تأخذ قيمته n=1 في التحليلات الأعتيادية .

λ : طول موجة الأشعة السينية .

d : المسافة البينية بين المستويات البلورية .

θ : زاوية الحيود .

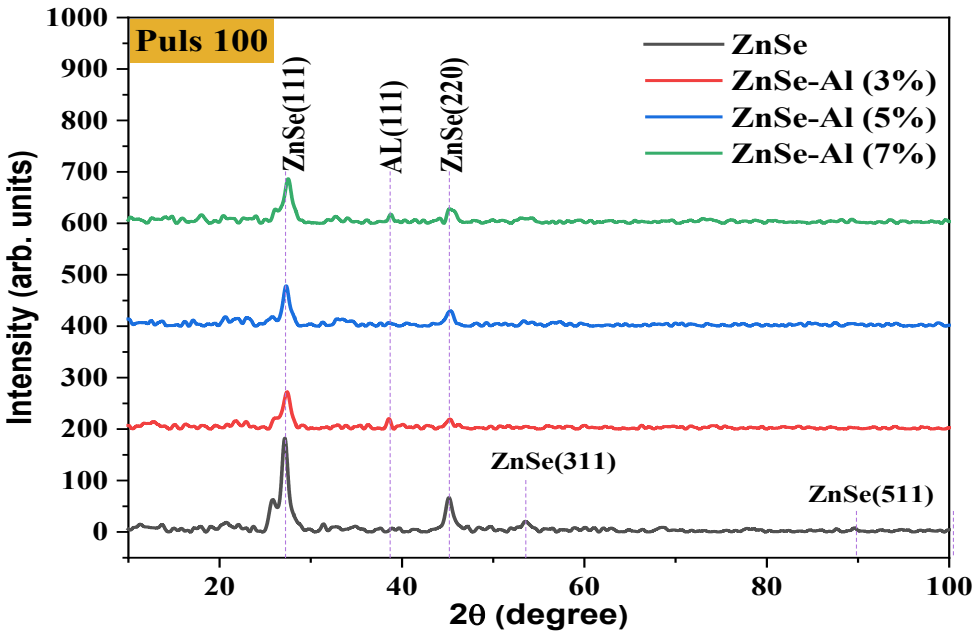
إلى تقلص في المسافات البينية بين المستويات البلورية، مما قد يعكس تأثيرات الإجهادات الداخلية أو تغيرات في أبعاد الخلية البلورية الناتجة عن التشويب ويعزى هذا التغير المحتمل الى أدخال أيونات الألمنيوم (Al^{+3}) ذات النصف القطر الأيوني الأصغر($0.53\,A^\circ$) بدلا من أيونات الزنك (Zn^{+2}) الأكبر حجما ($0.74\,A^\circ$) مما يؤدي الى توليد إجهادات ضغطية داخل الشبكة البلورية .

تشير الأدبيات الحديثة والدراسات البنيوية إلى أن أيونات الألمنيوم تميل غالبًا إلى استبدال أيونات الزنك في مواقعها الشبكية، مما يرجّح كون التشويب من النوع الأستبدالي. ويُستدل على ذلك من غياب أطوار بلورية ثانوية في أنماط (XRD)، وكذلك من انزياح القمم دون ظهور قمم جديدة، وهي مؤشرات نمطية للتشويب الأستبدالي كما ورد في دراسات متعددة [13][14][15] .

وتتفق هذه النتيجة مع ما تم رصده تجريبيًا في هذه الدراسة، حيث لم تُلاحظ أطوار ثانوية في الأنماط الحيودية مما يرجح أستقرار الألمنيوم في مواقع الزنك الشبكية . بالتالي، تُبيّن النتائج أن التحكم بعدد نبضات الليزر يُعدّ أحد العوامل الحاسمة في ضبط الخصائص التركيبية لأغشية (ZnSe) اي أن الزيادة في عدد النبضات تعزز التبلور الكلي، لكنها تؤدي في الوقت ذاته إلى تكون بلورات أصغر حجمًا نتيجة النمو المحدود، كما تعزز من ظهور الإجهادات البنيوية عند التشويب، مما يفرض ضرورة تحقيق توازن بين كثافة الطاقة ومعلمات التشويب للحصول على أغشية ذات خصائص بنيوية مثالية .

جدول (1) : نتائج حيود نتائج حيود الأشعة السينية (XRD) لأغشية (ZnSe) النقي والمشوب عند (100).

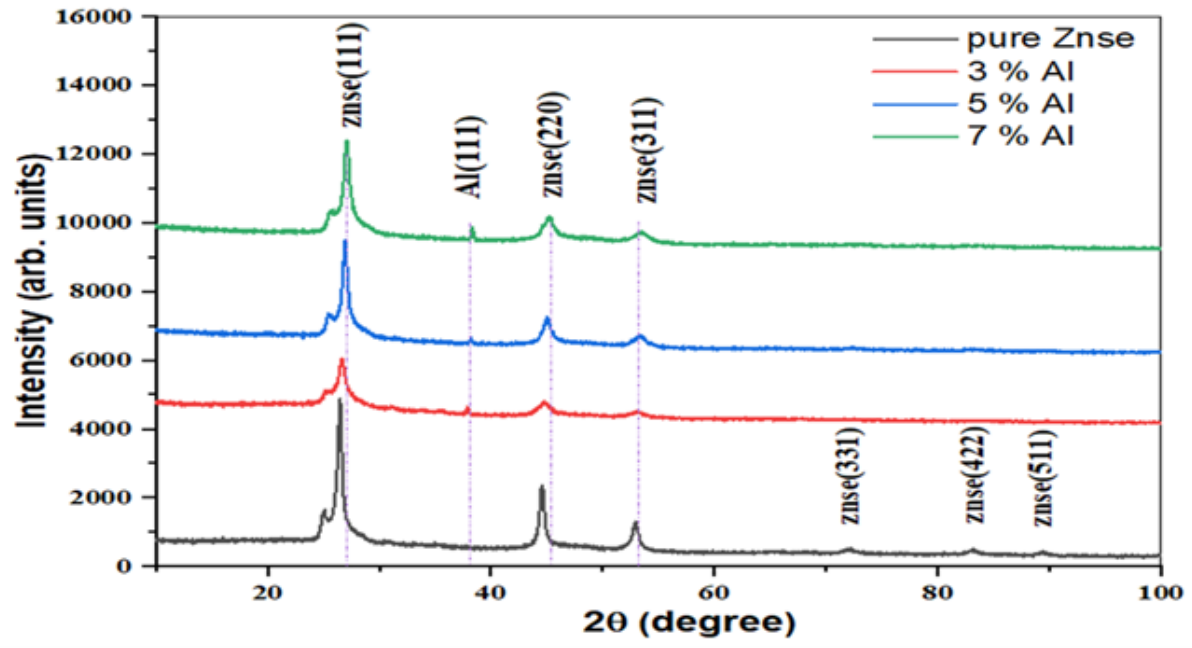
Sample	*Pos.[2θ°]*	*(θ°)2*	d- spacing عملي (A°)	FWHM Left [2θ°]	Crystallite Size (nm)	hkl	d hkl نظري (A°)
Pure	26.4361	27.165	3.36879	0.5319	10.6	111	3.2800
	44.5387	45.306	2.03266	0.4829	13.5	220	2.000
	52.8832	53.212	1.7299	0.5971	11.1	311	1.72000
	72.0008	72.675	1.3105	2.0631	2.9	331	1.30000
	83.0163	84.107	1.16232	1.5495	4.0	422	1.15000
	89.3434	89.934	1.09566	0.5228	12.6	511	1.09000
Al % 3	26.6158	27.165	3.346445	0.9342	5.2	111	3.2800
	44.7753	45.306	2.02247	1.3841	5.8	220	2.000
	53.021	53.212	1.72573	1.5183	6.3	311	1.72000
Al % 5	26.9203	27.165	3.30928	0.632	8.4	111	3.2800
	45.0044	45.306	2.0127	0.8415	7.4	220	2.000
	53.2696	53.212	1.71826	1.2807	6.2	311	1.72000
Al % 7	27.0682	27.165	3.29154	0.6015	9.2	111	3.2800
	45.1803	45.306	2.00527	1.2271	5.0	220	2.000
	53.3397	53.212	1.71617	1.5028	4.5	311	1.3000



الشكل (2): طيف حيود الأشعة السينية (XRD) لأغشية (ZnSe) النقي والمشوب عند (100) نبضة .

جدول (2) : نتائج حيود الأشعة السينية (XRD)لأغشية (ZnSe) النقي والمشوب عند (500) نبضة .

Sample	*Pos.[2θ°]*	*(θ°)2*	d- spacing عملي (A°)	FWHM Left [2θ°]	Crystallite Size (nm)	hkl	d hkl نظري (A°)
Pure	26.4361	27.165	3.36879	0.5319	10.6	111	3.2800
	44.5387	45.306	2.03266	0.4829	13.5	220	2.000
	52.8832	53.212	1.7299	0.5971	11.1	311	1.72000
	72.0008	72.675	1.3105	2.0631	2.9	331	1.30000
	83.0163	84.107	1.16232	1.5495	4.0	422	1.15000
	89.3434	89.934	1.09566	0.5228	12.6	511	1.09000
Al 3%	26.6158	27.165	3.346445	0.9342	5.2	111	3.2800
	44.7753	45.306	2.02247	1.3841	5.8	220	2.000
	53.021	53.212	1.72573	1.5183	6.3	311	1.72000
Al % 5	26.9203	27.165	3.30928	0.632	8.4	111	3.2800
	45.0044	45.306	2.0127	0.8415	7.4	220	2.000
	53.2696	53.212	1.71826	1.2807	6.2	311	1.72000
Al % 7	27.0682	27.165	3.29154	0.6015	9.2	111	3.2800
	45.1803	45.306	2.00527	1.2271	5.0	220	2.000
	53.3397	53.212	1.71617	1.5028	4.5	311	1.3000



الشكل (3) : طيف حيود الأشعة السينية (XRD) لأغشية (ZnSe) النقي والمشوب عند (500) نبضة .

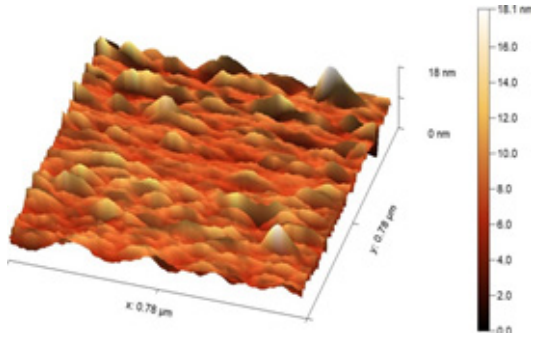
(2-3) الخصائص الطبوغرافية

(2-3-1) نتائج مجهر القوة الذرية

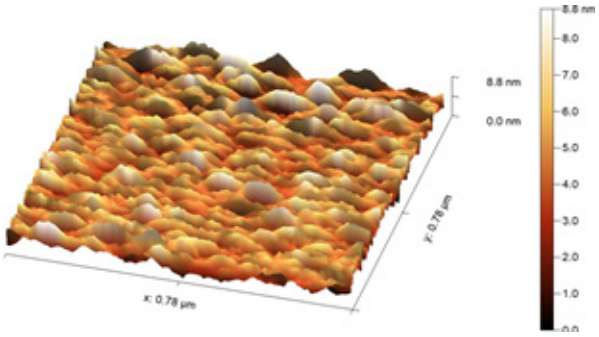
Atomic Force Microscope (AFM)

أجري تحليل دقيق لطبوغرافية سطوح أغشية (ZnSe) النقية والمشوبة من الألمنيوم بنسب ٪(7, 5, 3) بهدف دراسة تأثير عدد نبضات الليزر (100) و (500) نبضة على الخصائص السطحية باستخدام مجهر القوة الذرية (AFM) أمريكي المنشأ الموجود في جامعة بغداد- كلية العلوم - قسم الكمياء وهو من نوع (Scanning probe microscope type AA3000) من شركة (Angstrom Advanced Company)، يمتاز هذا الجهاز بقدرة تحليل كبيرة تبلغ قيمته (0.1-1)nm، إضافة الى أنه يمتلك قوة تكبير عالية ويمكن تشغيلة ضمن ضغط الجو الطبيعي، دون القيام بالتفريغ العالي كما في المجاهر الألكترونية . تُعد تقنية (AFM) من الأدوات المتقدمة في توصيف الأغشية الرقيقة، حيث تتيح قياسًا عالي الدقة لكل من الخشونة الجذرية (RMS)، والخشونة المتوسطة (Sa)، ومتوسط الحجم الحبيبي (D_{ave})، مما يساهم في فهم آلية النمو السطحي وانتظام البنية البلورية [16] . أظهرت نتائج الفحص عند(100) نبضة أن العينة النقية تمتلك سطحاً ناعماً نسبياً مع حجم حبيبي صغير بلغ (4.62 nm). مما يعكس ترسيباً منتظماً في المراحل الابتدائية في المقابل. لوحظ أن زيادة تركيز الألمنيوم أدت إلى زيادة تدريجية في كل من الخشونة والحجم الحبيبي، حيث بلغ الأخير (42.52*nm*) عند التشويب بنسبة 7٪ وهي دلالة على نموغير متجانس وظهور تكتلات نانوية على سطح الغشاء، يعكس هذا السلوك تأثير التشويب في إحداث اضطرابات بلورية تؤدي إلى نمو موضعي للجسيمات واختلال في الانتظام البنيوي.

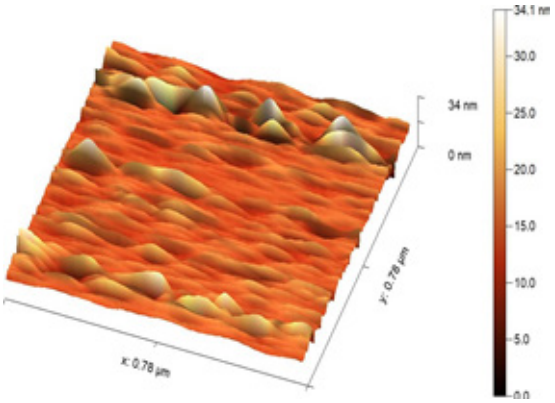
عند زيادة عدد النبضات إلى (500) نبضة طرأ تحسن واضح في طبيعة السطح، إذ انخفضت قيم الخشونة بشكل ملحوظ وتراوحت قيمة الحجم الحبيبي بين nm (6.4-7.8) في جميع العينات، بما فيها المشوبة. يشير هذا التحسن إلى أن زيادة عدد النبضات تؤدي إلى توزيع أكثر اتساقاً للمواد على سطح الركيزة، وتحفيز إعادة ترتيب الذرات بصورة تقلل من التكتلات والتفاوت السطحي . هذه النتائج تتماشى معما ورد في الدراسات السابقة التي تؤكد أن زيادة طاقة الليزر أو عدد نبضاته تساهم في تحسين نوعية الغشاء وتقليل العيوب البنيوية، بينما يؤدي التشويب لا سيما عند تركيزات عالية إلى اضطراب في البنية نتيجة الإجهادات البلورية [17][18] . من الناحية التطبيقية فإن الانخفاض الملحوظ في الخشونة السطحية واستقرار الحجم الحبيبي عند (500) نبضة يعزز من كفاءة استخدام هذه الأغشية في التطبيقات البصرية مثل الخلايا الشمسية، كواشف الأشعة تحت الحمراء، حيث تُعد السطوح الملساء والمتجانسة شرطًا أساسيًا للحصول على خصائص بصرية وانتقالية عالية الدقة .



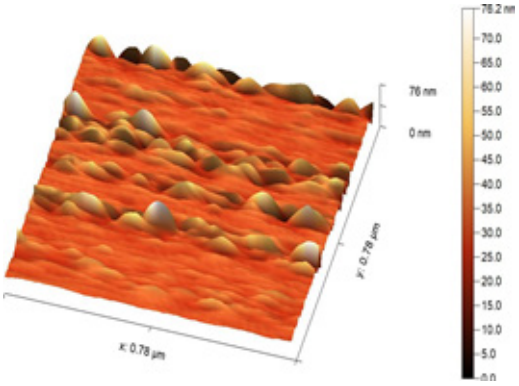
ZnSe Pure



ZnSe 3% Al



ZnSe 5% AL

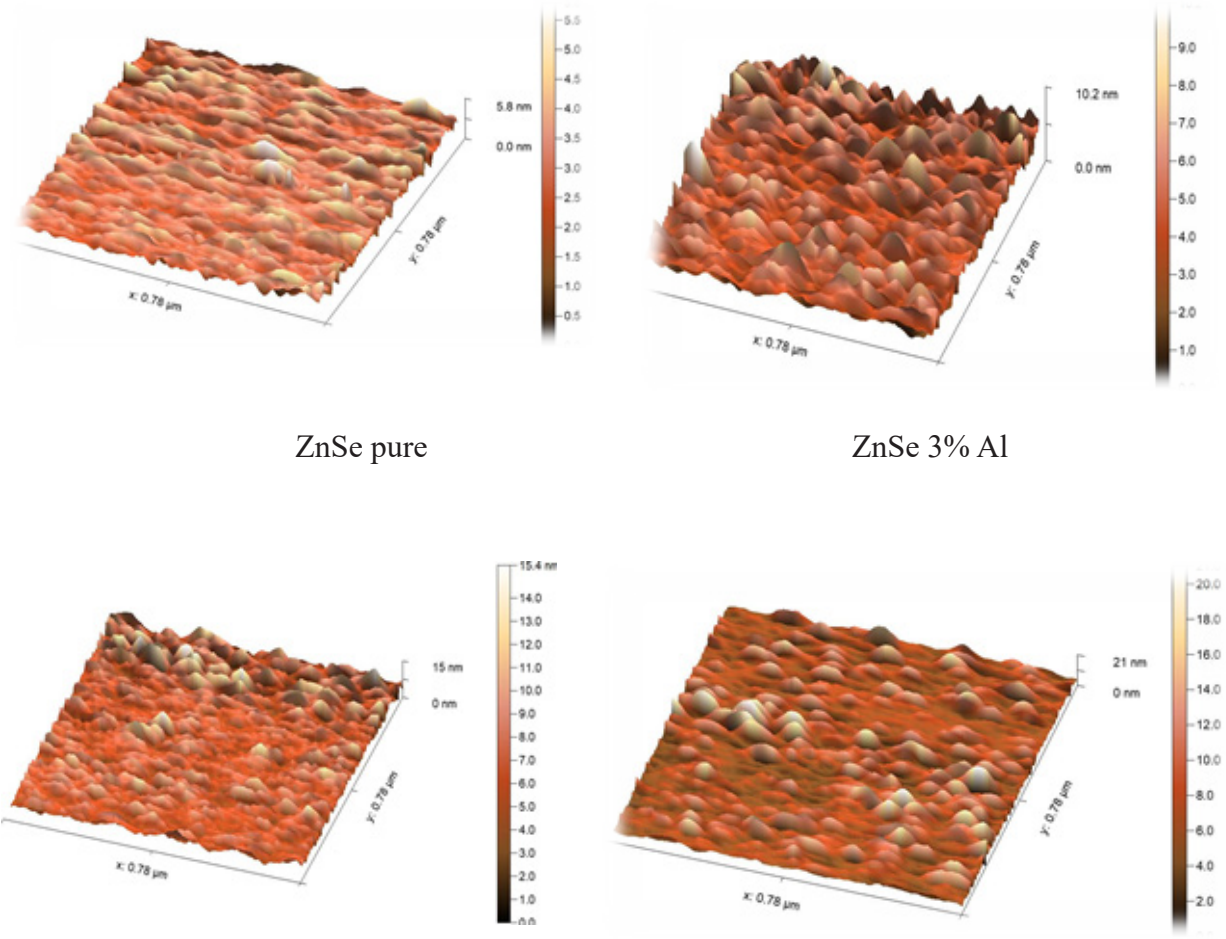


ZnSe 7% Al

الشكل (4) : صور (AFM) للأغشية (ZnSe) النقية والمشوبة المحضرة عند (100) نبضة .

جدول (3) : نتائج مجهر القوة الذرية (AFM)لأغشية (ZnSe) النقية والمشوبة عند (100) نبضة.

Sample	D_{av} (nm)	RMS Roughness (sq)(nm)	Mean Roughness (Sa) (nm)
ZnSe (Pure)	4.6272	1.42660	1.14915
ZnSe (3%)	26.9524	2.94758	2.01662
ZnSe(5%)	28.8836	3.23246	2.04689
ZnSe(7%)	42.5199	5.39343	3.39424



الشكل (5): صور (AFM) لأغشية (ZnSe) النقية والمشوبة عند (500) نبضة .

جدول (4) : نتائج مجهر القوة الذرية (AFM)لأغشية (ZnSe) النقية والمشوبة عند (500) نبضة.

Sample	D_{av} (nm)	RMS Roughness (sq)(nm)	Mean Roughness (Sa) (nm)
ZnSe (Pure)	7.80774	0.710515	0.564306
ZnSe (3%)	7.6127	1.22256	0.95432
ZnSe(5%)	7.7854	2.03749	1.55875
ZnSe(7%)	6.4612	2.46384	1.81615

(3-3) الخصائص البصرية .

(3-3-1) فجوة الطاقة البصرية .

من المعروف أن العلاقة بين معامل الأمتصاص (α) وطاقة الفوتون الساقط (hU) التي تقدمها علاقة Tauce تسمح لنا بتقدير قيم فجوة الطاقة (Eg) لأغشية الرقيقة [19] .

$$\alpha hU = \beta(hU - Eg)^r \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

حيث أن :

(β) : ثابت يعتمد على طبيعة المادة .

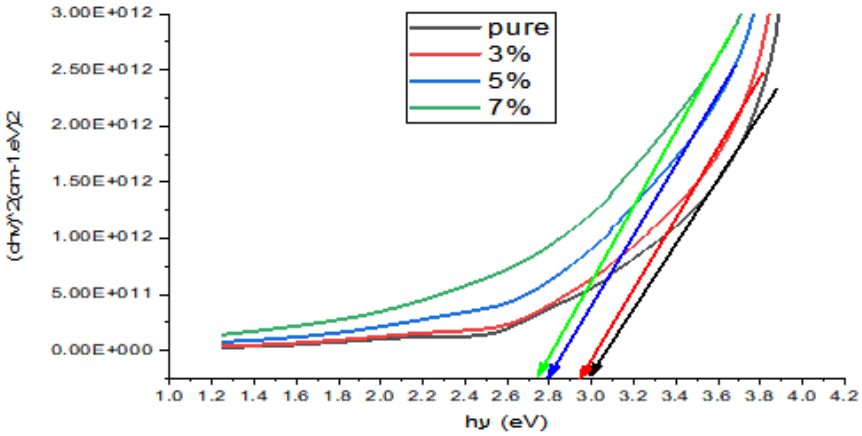
(E_g) : فجوة الطاقة البصرية .

(hU) : طاقة الفوتون الساقط .

(r) مرتبة الأنتقال البصري وتعتمد على نوع الأنتقال الألكتروني .

بينت نتائج الدراسة الحالية تأثيرًا واضحًا ومترابطًا لكل من عدد نبضات الليزر ونسبة التشويب بالألمنيوم (Al) على فجوة الطاقة البصرية لأغشية (ZnSe) المحضرة بطريقة ترسيب الليزر النبضي (PLD). فعند استخدام (100) نبضة، بلغت فجوة الطاقة لعينة (ZnSe) النقي (3 ev)، ما يدل على أن البنية البلورية لم تتعرض لتأثيرات جوهرية عند هذه الظروف من النبضات. وعند إضافة (3٪) من الألمنيوم، انخفضت فجوة الطاقة إلى (2.9 ev)، ويُعزى هذا الانخفاض إلى دخول ذرات (Al) ضمن شبكة (ZnSe)، حيث تحل محل بعض ذرات (Zn)، مما يؤدي إلى تشويه في التركيب البلوري وظهور مستويات طاقة داخلية (Impurity Levels) بالقرب من حافة نطاق التوصيل، مما يسبب تقليلًا في الفجوة البصرية. وتواصل الانخفاض مع زيادة تركيز (Al) إلى (5٪) و (7٪)، حيث وصلت فجوة الطاقة إلى (2.8 ev) و (2.75 ve) على التوالي، الأمر الذي يعكس زيادة كثافة هذه المستويات الداخلية، وتفاقم العيوب البنيوية الناتجة عن التشويب المرتفع [20][21]. وعند زيادة عدد النبضات إلى (500) نبضة، لوحظ انخفاض إضافي في فجوة الطاقة لجميع العينات. فقد انخفضت فجوة الطاقة في (ZnSe) النقي، نتيجة لتحسن في التبلور وتقليل التشتت البنيوي الناتج عن ارتفاع كثافة الطاقة المنقولة إلى سطح الهدف، مما يُعزز نمو بلوري أكثر انتظامًا، وهو ما تم تأكيده من خلال نتائج طيف حيود الأشعة السينية (XRD) التي أظهرت زيادة في شدة القمم البلورية. أما في العينات المشوبة، فقد استمر انخفاض فجوة الطاقة بشكل أكثر وضوحًا، ما يُشير إلى أن تأثير التشويب يصبح أكثر فعالية عندما يقترن بعدد نبضات أعلى، حيث تتوفر طاقة كافية لتسهيل اندماج ذرات (Al) في مواقع بلورية محددة ضمن الشبكة، مما يؤدي إلى إعادة توزيع الحالات الإلكترونية وتشكل مستويات شبه موصلة جديدة داخل فجوة الطاقة [22][23].

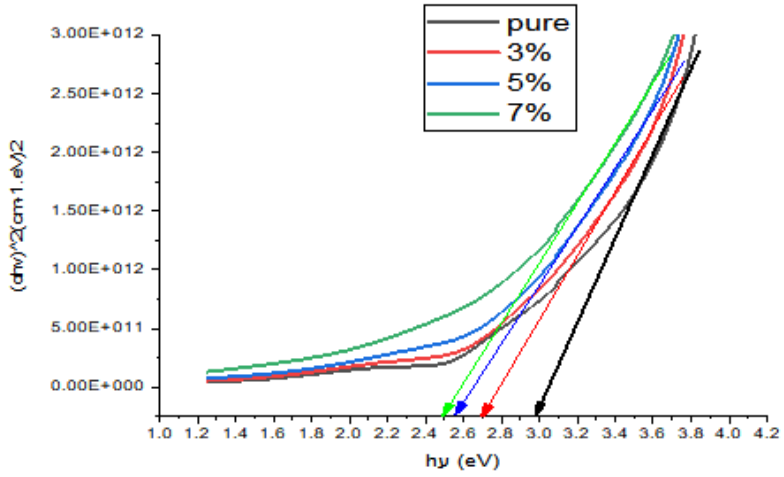
يمكن تفسير هذا السلوك بناءً على العلاقة المعروفة بين فجوة الطاقة والخصائص البنيوية للمادة، إذ إن وجود العيوب والتشوهات الناتجة عن التشويب يؤدي إلى تقليل الحصر الكمومي وزيادة انتقالات الإلكترونات بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل. كما أن تحسين ترتيب الشبكة البلورية نتيجة ارتفاع عدد النبضات يُسهم في تعديل البنية الإلكترونية، مما يدعم الانخفاض في فجوة الطاقة . تؤكد هذه النتائج أن فجوة الطاقة في (ZnSe) قابلة للتحكم عبر ضبط ظروف التحضير، مما يمنح هذه الأغشية خواصًا بصرية قابلة للتعديل لتناسب تطبيقات متنوعة، مثل الخلايا الشمسية، وأجهزة التحسس الضوئي، والبواعث الليزرية العاملة في نطاقات طيفية مختلفة [24][25] .



الشكل (6) : منحي فجوة الطاقة لأغشية (ZnSe) النقية والمشوبة عند (100) نبضة .

جدول (5) : يبين نتائج منحني فجوة الطاقة عند (100) نبضة لأغشية (ZnSe) النقية والمشوب .

Sample	*ZnSe Pure*	*%3 Al*	*%5 Al*	*%7 Al*
Eg(ev)	*3*	*2.95*	*2.8*	*2.75*



الشكل (7) : منحني فجوة الطاقة لأغشية (ZnSe) النقية والمشوبة عند (500) نبضة .

جدول (6) : يبين نتائج منحني فجوة الطاقة عند (500) نبضة لأغشية (ZnSe) النقي والمشوب .

Sample	*ZnSe Pure*	*%3 Al*	*%5 Al*	*%7 Al*
Eg(ev)	*2.9*	*2.7*	*2.55*	*2.5*

4 - الأستنتاجات Conclusions

1. بينت نتائج حيود الأشعة السينية (XRD) لأغشية سيلينيد الزنك (ZnSe) النقية والمشوبة بالألمنيوم (Al) عند (100) نبضة أن الغشاء ظهرت عليه قمتان وعند (500) نبضة ظهرت عليه ثلاث قمم بشدة أعلى مع الحفاظ على الطور البلوري المكعبي (Cubic) والبنية متعددة التبلور، كذلك أظهرت النتائج زيادة في عرض (FWHM) عند (500) نبضة .

2. وضحت نتائج مجهر القوة الذرية (AFM) أن تأثير عدد النبضات أدى الى زيادة وأنتظام في ترتيب الذرات، كما أدى الى نقصان في الحجم الحبيبي وكذلك نقصان في قيمة متوسط الجذر التربيعي للغشاء والذي بدوره يؤدي الى نقصان في خشونة سطح الغشاء .

3. على صعيد الخصائص البصرية أضهرت فجوة الطاقة أنخفاضا عند (500) نبضة بصورة طفيفة ولكن بدا واضحا عند نسبة التشويب (7٪ ، 5٪).

5 – المصادر References

1. Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). Physics of semiconductor devices (3rd ed.). Wiley.

2. Chrisey, D. B., & Hubler, G. K. (Eds.). (1994). Pulsed laser deposition of thin films. Wiley.

3. Singh, R. K., & Narayan, J. (1990). Pulsed-laser evaporation technique for deposition of thin films: Physics and theoretical model. Physical Review B, 41(13), 8843–8859.

4. Tauc, J. (1974). Amorphous and liquid semiconductors. Springer.

5. Hassan, M. A., Ali, A. H., & Ghoneim, M. T. (2018). Effect of laser pulse number on structural and optical properties of ZnSe thin films deposited by PLD. Materials Research Express, 5(6), 064004.

6. Kumari, R., Sharma, A., & Singh, S. (2022). Influence of laser pulse energy and number on crystallite size and morphology of CdTe thin films synthesized via PLD. Materials Today: Proceedings, 56, 233–238.

7. Sardar, M., Bhuiyan, A. H., & Khan, M. M. (2019). Effect of Al doping on structural and optical properties of ZnSe thin films prepared by thermal evaporation technique. Journal of Electronic Materials, 48(10), 6212–6219.

8. Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). Elements of X-ray diffraction (3rd ed.). Prentice Hall.

9. International Centre for Diffraction Data. (2002). PDF Card No. 00-002-0479: Zinc Selenide (ZnSe), cubic phase. ICDD.

10. Klug, H. P., & Alexander, L. E. (1974). X-ray diffraction procedures (2nd ed.). Wiley-Interscience.

11. Suryanarayana, C., & Norton, M. G. (1998). X-ray diffraction: A practical approach. Springer.

12. Als-Nielsen, J., & McMorrow, D. (2011). Elements of Modern X-ray Physics (2nd ed.). Wiley.

13. Al-Amin, M., Rehman, S., & Alzahrani, E. (2024). Al-doped ZnO thin films: Experimental and DFT investigations. Materials Futures, 3(1), 015002.

14. Chen, H., Wang, Z., & Li, F. (2024). Structure–property correlations in Al-doped ZnO studied by Rietveld refinement and TEM. Journal of Materials Science, 59, 10940–10953.

15. Li, Q., Zhang, Y., & Ahmed, M. (2025). Tailoring Al-Doped ZnO Nanoparticles via High-Energy Ball Milling. Crystals, 15(5), 397.

16. Binnig, G., Quate, C. F., & Gerber, C. (1986). Atomic force microscope. Physical Review Letters, 56(9), 930–933.

17. Kolasinski, K. W. (2006). Surface science: Foundations of catalysis and nanoscience (2nd ed.). Wiley.

18. Vossen, J. L., & Kern, W. (Eds.). (2003). Thin film processes II. Academic Press.

19. Tauc, J., Grigorovici, R., & Vancu, A. (1966). Optical properties and electronic structure of amorphous germanium. Physica Status Solidi (b), 15(2), 627–637.

20. Hussain, S. T., Khan, M. B., Mehmood, M., & Ali, M. (2020). Effect of Al doping on the structural and optical properties of ZnSe thin films. Materials Research Express, 7(1), 015009.

21. Sharma, D., Mehra, R. M., & Saini, L. (2018). Influence of Al doping concentration on structural, optical and electrical properties of ZnSe thin films. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 29(3), 2226–2232.

22. Rai, D. K., Kumar, R., & Srivastava, A. K. (2019). Pulse laser deposition and Al-doping effect on the properties of ZnSe thin films. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 129, 168–174.

23. Arefi-Khonsari, F., Richard, D., & Belloni, F. (2017). The influence of dopants and laser parameters on ZnSe thin film properties prepared by pulsed laser deposition. Thin Solid Films, 638, 42–48.

24. Tauc, J. (1974). Optical properties and electronic structure of amorphous Ge and Si. Materials Research Bulletin, 9(6), 707–720.

25. Al-Hadeethi, Y., Al-Ghamdi, A. A., Al-Ghamdi, A. A., & Khan, M. A. (2021). Tailoring optical properties of ZnSe thin films for optoelectronic applications. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 32(24), 32184–32192.