

توصيف ضوئي لأفلام رقيقة من سيلينيد الزنك (ZnSe) المحضرة بالتبخير الحراري

أ. د. أيمن كسيبي * أ.د. رياض العبد الله ** عبد المعين العلص ***

الملخص:

رُسِّبَت أفلام رقيقة من مركب سيلينيد الزنك (ZnSe) بسماكة ($t \approx 175\text{nm}$) على ركائز زجاجية عند درجة حرارة الغرفة باستخدام تقنية التبخير الحراري في الخلاء. عُولِجت الأفلام حرارياً وتم تحديد الدرجة المثلى للتبلور حيث كانت (175°C). انطلاقاً من قياسات النفاذية (T) والانعكاسية (R) الضوئية للأفلام في المجال الطيفي (320–2200) nm حُسب معامل الامتصاص (α) ومعامل التخماد (k) كما تم تحديد قيمة الفجوة الطاقية $E_g = 2.55\text{eV}$. أُستخدِمت علاقات كرامرز-كرونينغ (Kramers–Kronig) لحساب قرينة الانكسار (n) على كامل المجال الطيفي. تمت دراسة الاستجابة الضوئية للمادة من خلال تحليل تابع العزل الكهربائي العقدي والناقلية الضوئية، تشير النتائج التي حصلنا عليها أن أفلام ZnSe تمتلك خصائص ضوئية واعدة تجعلها مرشحاً مثالياً لاستخدامها في الخلايا الشمسية كطبقة منفذة في المجال تحت الأحمر أو كطبقة ماصة في المجال المرئي.

كلمات مفتاحية: سيلينيد الزنك، أفلام رقيقة، التبخير الحراري، الفجوة الطاقية، قرينة الانكسار.

* أستاذ في قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة حمص-فيزياء الخلايا الشمسية.

** أستاذ في قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة حمص- الضوء الفيزيائي.

*** طالب دكتوراه -كلية العلوم-جامعة حمص- فيزياء المادة الكثيفة.

Optical Characterization of Zinc Selenide (ZnSe) Thin Films Prepared by Thermal Evaporation

Prof.Dr.Ayman Ksibe Prof.Dr. Reiad Al-Abdallah Abdalmoaen Alales

Abstract:

Thin films of zinc selenide (ZnSe) with a thickness of approximately ($t \approx 175\text{nm}$) were deposited onto glass substrates at room temperature using the vacuum thermal evaporation technique. The films were subsequently thermally annealed, and the optimal crystallization temperature was determined to be (175°C). Based on optical transmittance (T) and reflectance (R) measurements performed over the spectral range of (320–2200) nm, the absorption coefficient (α) and extinction coefficient (k) were calculated, and the optical energy bandgap was determined as $E_g = 2.55\text{eV}$. The Kramers–Kronig relations were employed to derive the refractive index (n) across the entire investigated spectral range. The optical response of the material was further analyzed through the complex dielectric function and optical conductivity. The obtained results indicate that ZnSe thin films exhibit promising optical properties, rendering them an ideal candidate for solar cell applications as a transparent layer in the infrared region or as an absorber layer in the visible region.

Key words: Zinc Selenide, Thin films, Thermal evaporation, Energy bandgap, Refractive index.

1. مقدمة نظرية:

تشهد متطلبات الطاقة العالمية تحولاً جوهرياً نحو مصادر متجددة ومستدامة، خاصة في ظل نضوب الوقود الأحفوري وتأثيراته البيئية السلبية المتمثلة في ظاهرة الاحتباس الحراري، مما جعل هذا الواقع من الخلايا الشمسية وتقنيات التحويل الكهروضوئي محوراً أساسياً للبحث العلمي خلال العقود الماضية. وفي سعي لتحقيق كفاءات أعلى، برزت تكنولوجيا الأفلام الرقيقة التي تتميز بقلّة سماكتها واستهلاكها المنخفض للمواد الخام، مما يسهم في خفض التكاليف وإضافة لخفة الوزن والمرونة في التصميم، لتصبح بذلك بديلاً واعداً في سوق الطاقة الشمسية مقارنة بالخلايا التقليدية المعتمدة على السيليكون البلوري [1]. وفي هذا الإطار تكتسب تكنولوجيا الأفلام الرقيقة المصنوعة من المواد نصف الناقلة غير العضوية أهمية استثنائية نظراً لتطبيقاتها الواسعة في الإلكترونيات الدقيقة والخلايا الشمسية وأجهزة التحسس الضوئي حيث تُعد القياسات الضوئية لهذه الأفلام أداة فعالة لتقييم خصائص أنصاف النواقل وتحديد الثوابت الضوئية الأساسية مثل (قرينة الانكسار و معامل التخميد) والفجوة الطاقية E_g ، حيث يُعد التحديد الدقيق لهذه الثوابت خطوة حاسمة لتقييم إمكانيات المادة وتكييفها للتطبيقات الإلكترونية المختلفة [2]. من بين المواد الواعدة في هذا المجال تُعرف المركبات الثنائية المكونة من عناصر المجموعة الثانية (IIB) وعناصر المجموعة السادسة (VIA) باسم مركبات (II-VI) والتي تمتلك تطبيقات تقنية واسعة، ومن بين هذه المركبات يبرز كلٌّ من تيلورايد الكاديوم (CdTe) وسيلينيد الزنك (ZnSe) كمادة فريدة قابلة للتخصيص بنمطي الناقلة n و p مما يوسع آفاق استخدامها في الوصلات غير المتجانسة والأجهزة الإلكترونية الفعالة [3]. يُعد مركب سيلينيد الزنك (ZnSe) واحداً من أهم أنصاف النواقل ضمن مجموعة (II-VI) حيث يتميز ببنية بلورية مكعبية من نوع زنك بليند (Zincblende) وفجوة طاقية مباشرة واسعة تبلغ حوالي 2.5-2.7 eV عند درجة حرارة الغرفة وذلك اعتماداً على بنية الفيلم الرقيق وشروط التلدين. تجدر الإشارة إلى أن القيم التجريبية للفجوة الطاقية قد تختلف قليلاً اعتماداً على تقنية التحضير وشروطها، إلا أن موقعها يضع المادة ضمن منطقة الامتصاص الفعال في المنطقة المرئية من الطيف الكهرومغناطيسي [4]. على الصعيد التطبيقي يُعد سيلينيد الزنك ZnSe مادة واعدة للعديد من الأجهزة الإلكترونية مثل الثنائيات الباعثة للضوء (LEDs) بألوان متعددة، شاشات الليزر، والترانزستورات ذات الأفلام الرقيقة (TFTs). كما يُستخدم بكفاءة كطبقة منفذة للضوء

في الخلايا الشمسية حيث يمثل بديلاً مثالياً وغير سام لكبريتيد الكاديوم (CdS) بسبب سُميَّته العالية ومخاطره البيئية. بالإضافة إلى ذلك، يدخل ZnSe في تركيب الطلاءات الواقية والممانعة للانعكاس للأسطح الكهروحرارية العاملة في منطقة الأشعة تحت الحمراء [5]. لتحقيق هذه الإمكانيات التطبيقية يمكن تصنيع أفلام ZnSe الرقيقة عبر طرائق فيزيائية وكيميائية متعددة أبرزها التبخير الحراري في الخلاء (Thermal Evaporation) والترسيب في حمام كيميائي (CBD). نظراً لأن الخصائص الكهروضوئية والضوئية لمركبات (II-VI) حساسة جداً للبنية المجهرية وتعتمد بشكل كبير على طريقة الترسيب، فإن الدراسة المتعمقة لهذه الخصائص تُعد أمراً بالغ الأهمية لتحسين أداء الأجهزة وتطوير بدائل مواد صديقة للبيئة وعالية الكفاءة [6]. رغم هيمنة تقنيات الترسيب الكيميائي (CBD/CVD) في معظم المراجع الخاصة بسيلينيد الزنك ZnSe تظل بيانات الأفلام المحضرة بالتبخير الحراري محدودة وغير متسقة، وذلك نتيجة التباين في شروط المعالجة الحرارية وتأثيرها المباشر على البنية البلورية والخصائص الضوئية. لذا تهدف الدراسة لسد هذه الفجوة عبر تحضير أفلام ZnSe بالتبخير الحراري تحت شروط مضبوطة، وتحديد الدرجة المثلى للتبلور، واستخلاص دقيق للثوابت الضوئية والفجوة الطاقية اعتماداً على التحليل الطيفي الشامل وتطبيق علاقات كرامرز-كرونيغ وإجراء مقارنة مع الاعمال العلمية السابقة.

2. أهداف البحث:

يمتلك مركب سيلينيد الزنك خصائص ضوئية مميزة كالفجوة الطاقية المباشرة الواسعة، غير أن تحسين أدائه في التطبيقات الإلكترونية يستدعي تحديد ثوابته الضوئية وفجوته الطاقية بدقة بعد إجراء المعالجة الحرارية المناسبة، بناءً على ذلك يهدف البحث إلى:

1. تحضير أفلام رقيقة من سيلينيد الزنك والتحقق من بنيتها البلورية والمورفولوجية عبر تقنيات XRD, SEM, EDX, AFM.
2. استخدام المعالجة الحرارية للحصول على أفضل درجة يتبلور عندها المركب.
3. تعيين الثوابت الضوئية (k, n) وتحديد الفجوة الطاقية لتلك الأفلام.
4. تحليل الاستجابة الضوئية عبر حساب تابع العزل الكهربائي العقدي $\epsilon(\omega)$ والناقلية الضوئية (σ_{opt}) وتقييم ملائمة الأفلام المحضرة للتطبيقات الإلكترونية.

3. الاجهزة والأدوات المستخدمة في البحث:

1- منظومة الترسيب الحراري في الخلاء. 2- جهاز انعراج الأشعة السينية XRD. 3- مجهر إلكتروني ماسح SEM مزود بـ EDX. 4- مقياس الطيف الضوئي Spectrophotometer. 5- مجهر القوى الذرية AFM. 6- جهاز التنظيف بالموجات فوق الصوتية. 7- ركائز زجاجية. 8- مواد كيميائية للتنظيف. 9- مرمدة تلدين.

4. الترتيبات التجريبية:

4.1. تحضير العينات وشروط الترسيب:

لغرض ترسيب الأفلام الرقيقة وإجراء التوصيف الضوئي والبنوي اللازم، تم استخدام ركائز زجاجية شفافة. حيث مرّت الركائز بمراحل تنظيف دقيقة بدأت بالغسل بالماء المقطر، ثم وضعت في حمام بجهاز الأمواج فوق صوتية يحتوي على الأسيتون والكحول الإيثيلي على التوالي. بعد إتمام عملية التنظيف، شطفت الركائز بالماء المقطر مرة أخرى وجففت باستخدام تيار من غاز النيتروجين، بهدف الحصول على سطح خالٍ من الملوثات وتحسين قوى التماسك بين الفيلم والركيزة. تم ترسيب أفلام سيلينيد الزنك الرقيقة باستخدام جهاز التبخير الحراري المتوفر في مختبرات هيئة الطاقة الذرية. قبل البدء بعملية الترسيب، نُظِّفَت حجرة التخلية كيميائياً بشكل جيد باستخدام المحاليل الكيميائية المخصصة لهذا الغرض (حمض كلور الماء الممدد، كحول إيثيلي، أسيتون، ماء مقطر) وجُفِّفَت بغاز النيتروجين، لضمان بيئة خالية من الملوثات. باستخدام مكبس هيدروليكي، جُعِلَت بوردرة سيلينيد الزنك النقية (99.99%) على شكل أقراص مضغوطة، لمنع تطاير البوردرة أثناء عملية الترسيب بسبب حرارة البوتقة العالية. وُضِعَت الركائز على حامل قابل للدوران، حيث أُجْرِيَ الترسيب تحت فراغ عالٍ قدره (5×10^{-6} mbar) مع رفع تدريجي لدرجة حرارة البوتقة بمعدل تسخين مضبوط حتى الوصول لدرجة انصهار المركب ومن ثم تبخير المادة، يتزامن ذلك مع تدوير حامل الركائز لتوزيع المادة المتكاثفة بشكل منتظم على أسطح الركائز للحصول على فيلم متجانس.

ندرج في الجدول (1) بارامترات عملية الترسيب لأفلام سيلينيد الزنك ZnSe :

معدل الترسيب (nm/sec)	السماكة (nm)	زمن الترسيب (sec)
5	175	35

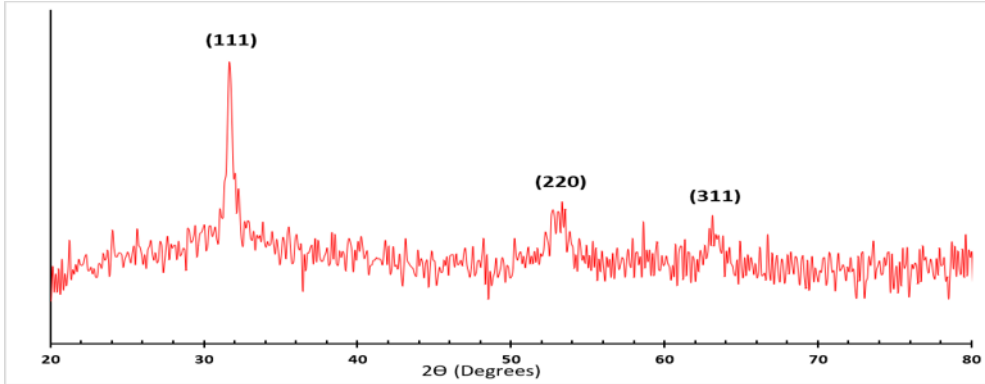
الجدول (1): يوضح بارامترات عملية الترسيب لأفلام سيلينيد الزنك ZnSe

4.2. التحقق من بنية الفيلم الرقيق:

تم التحقق من البنية البلورية للأفلام المحضرة باستخدام جهاز انعراج الأشعة السينية (XRD) وذلك قبل إجراء القياسات الضوئية.

4.2.1. طيف انعراج الأشعة السينية (XRD) للعينة المحضرة دون معالجة حرارية (As-deposited):

نعرض في الشكل (1) طيف انعراج الأشعة السينية XRD للعينة المحضرة قبل المعالجة الحرارية.

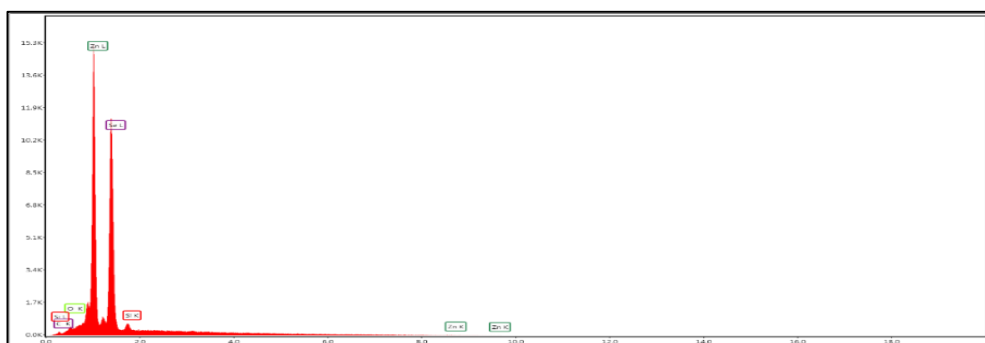


الشكل (1): طيف XRD لعينتنا المحضرة قبل التلدين الحراري

أظهر تحليل انعراج الأشعة السينية (XRD) للفيلم المحضر عند درجة حرارة الغرفة قمة انعراج حادة وواضحة عند المستوى البلوري (111)، تتوافق هذه القمة مع البنية المكعبية من نمط الزنك بليند (Zincblende) لمركب ZnSe والبطاقة المرجعية القياسية التي تحمل الرقم (JCPDS Card No. 01-080-0021) كما ظهرت قمتان أقل شدة عند المستويين البلوريين (220) و(311)، مما يؤكد أن العينة المحضرة متعددة التبلور (Polycrystalline) مع اتجاه نمو مفضل (Preferred Orientation) والذي يعود للمستوي (111) الأعلى كثافة ذرية والأقل طاقة سطحية في هذه البنية [7]. يُعزى التبلور المكعبي في الأفلام غير المُلدنة (As-deposited) إلى الشروط المثلى للترسيب: سماكة الفيلم تقع ضمن مجال السماكة (100–300) nm الكافية لتكوين بنية عالية الجودة [8] والترسيب تحت فراغ عالٍ بلغ قدره (5×10^{-6} mbar) الذي عزز حركة الذرات المترسبة وانتظامها البلوري، بالإضافة إلى نقاوة المادة الأولية (99.99%) التي قللت العيوب النقطية. هذا التضافر بين العوامل المذكورة سابقا يفسر بشكل كامل ظهور قمة (111) الحادة في طيف XRD والتي تتوافق مع الدراسات الحديثة لأفلام ZnSe عالية الجودة المحضرة بالتبخير الحراري [8].

4.2.2. المسح الضوئي باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح SEM:

أُستكمل التوصيف البنيوي للأفلام المحضرة قبل التلدين الحراري بالكشف على مورفولوجيا السطح وللتأكد من النقاوة العنصرية ونسب كل واحدة منها، نستخدم المجهر الإلكتروني الماسح المزود بتحليل طيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDX). يوضح الشكل (2) طيف تحليل EDX للعينة المحضرة.



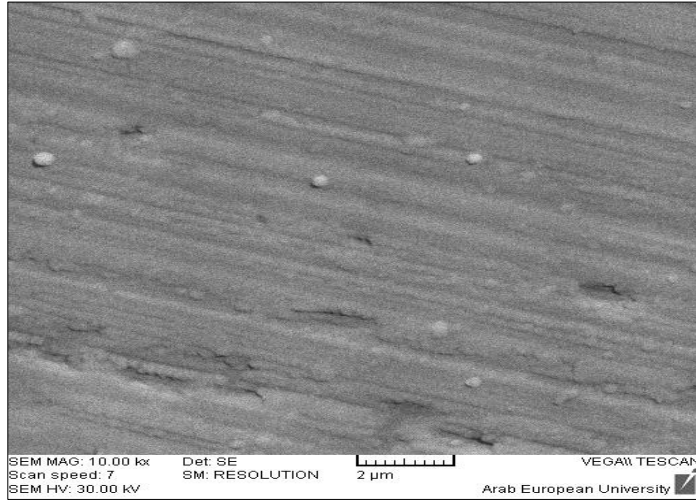
الشكل (2): طيف تحليل EDX لعينتنا المرسبة

من خلال الشكل (2) نلاحظ ظهور قمم حادة ومميزة لعنصري الزنك (Zn) والسيلينيوم (Se)، مما يؤكد ترسيب مركب ZnSe بنجاح أما القمم الضعيفة الظاهرة عند طاقات منخفضة والمشار إليها بـ O, C, Si، فتعزى إلى الركيزة الزجاجية، حيث أن طاقة الحزمة الإلكترونية المستخدمة في هذا التحليل (20KV) سمحت باختراق الفيلم الرقيق والوصول إلى الركيزة. تُظهر النتائج نسباً ذرية متكافئة بين الزنك والسيلينيوم قريبة من 1:1 (كما هو موضح في الجدول 2)، مما يؤكد أن الفيلم المحضر قد تشكل من مركب ZnSe نقي ومتوافق مع الصيغة الكيميائية المستهدفة. نعرض في الجدول (2) النسب الوزنية والذرية للعناصر المكونة للعينة المحضرة.

Element	Atomic%	Weight %	Error %
Zn L	48.19	43.65	1.8
Se L	47.77	52.14	2.1
Si K	1.23	0.83	8.5
C K	2.11	1	12.3
O K	0.72	0.42	10.2

الجدول (2): النسب الوزنية والذرية للعناصر المكونة للعينة المحضرة

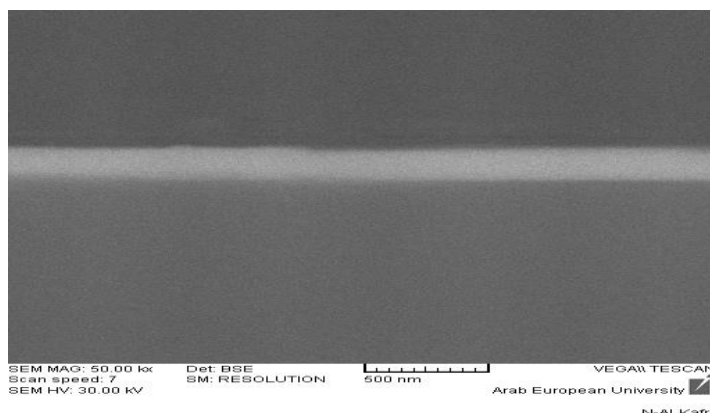
ولدراسة مورفولوجيا السطح، عُرضت صورة المجهر الإلكتروني الماسح SEM في الشكل (3)



الشكل (3): صورة لسطح العينة المرسبة (2D Surface)

تكشف صور المجهر الإلكتروني الماسح الموضحة في الشكل (3) أن سطح الفيلم عبارة عن طبقة متجانسة ومستمرة خالية من التشققات أو الفراغات الكبيرة، ويتميز بتكون حبيبات نانوية دقيقة مدمجة بشكل وثيق وموزعة بشكل منتظم وفق خطوط مستقيمة، مما يعكس جودة عالية في عملية الترسيب بالتبخير الحراري. ويرتبط هذا المظهر الحبيبي ارتباطاً وثيقاً بنتائج انعراج الأشعة السينية التي نوّشت سابقاً، فظهر قمة انعراج حادة وواضحة للمستوي البلوري (111) في طيف XRD الشكل (1) هو دليل مباشر على وجود بنية بلورية واضحة، وهو ما يتجسد ضوئياً في صورة الـ SEM على شكل هذه الحبيبات المتبلورة، فلو كان الفيلم لا بلوريا (Amorphous) كما في حالة بعض الأفلام الرقيقة غير المتبلورة لظهر السطح في صورة SEM أملساً تماماً بدون أي ملامح حبيبية مميزة وكان طيف XRD خالياً من القمم الحادة. وبالتالي فإن التوافق التام بين النتائج البنوية والنتائج المورفولوجية يؤكد بشكل قاطع أن أفلام ZnSe المحضرة في هذا العمل هي أفلاماً متعددة التبلور (Polycrystalline) ذات بنية مكعبية من نوع زنك بليند.

إن تحديد السماكة (t) بدقة يُعد شرطاً أساسياً لحساب الثوابت الضوئية (n, k) وقد أكد تصوير المقطع العرضي بالمجهر الإلكتروني الماسح SEM الشكل (4) تجانس الفيلم وانتظام سماكته مما يضمن دقة وموثوقية النتائج الضوئية المستخلصة.



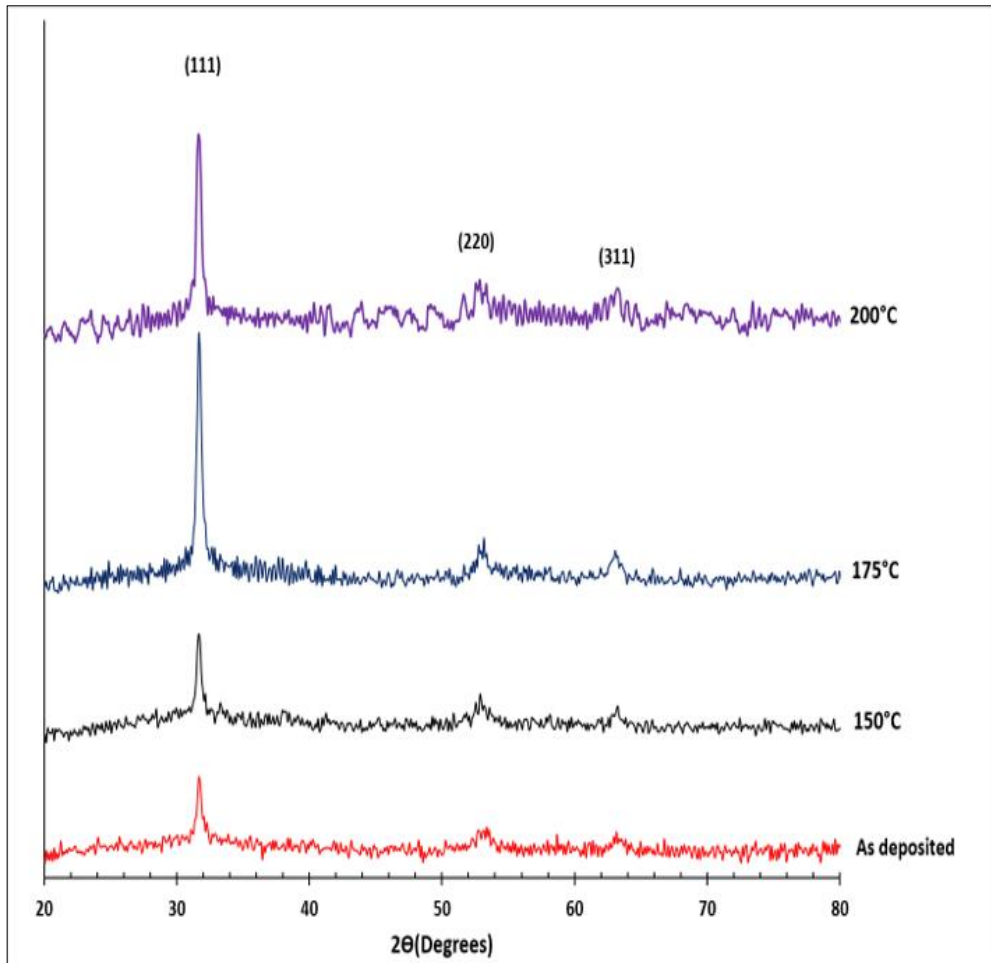
الشكل (4): صورة المقطع العرضي للعينة المحضرة

بلغت السماكة المتوسطة للفيلم المحضر 175 nm، وهي قيمة تقع ضمن المنطقة المثالية لسماكة الأفلام الرقيقة من سيلينيد الزنك (ZnSe) المخصصة للتطبيقات الإلكترونية، دون الحاجة للوصول إلى سماكات كبيرة بمرتبة الميكرومتر التي قد تزيد من الإجهادات الداخلية أو تكلفة المادة.

4.2.3. معالجة الأفلام بالتلدين الحراري:

أظهرت النتائج التجريبية في هذا العمل أن الأفلام المحضرة عند درجة حرارة الغرفة كانت متبلورة ذات بنية مكعبية (كما نوقش سابقاً)، ولكن عملية التلدين الحراري أدت إلى تحسين ملحوظ في خصائصها البنيوية. حيث بدأت مؤشرات التحسن بالظهور من درجة حرارة 150°C من خلال زيادة طفيفة في شدة قمم الانعراج، ثم ازداد هذا التحسن تدريجياً بارتفاع درجة حرارة التلدين، مما يعكس إعادة ترتيب ذري أكثر انتظاماً ونمواً للحبيبات البلورية على حساب الحدود الحبيبية. وقد أكدت أطيف انعراج الأشعة السينية (XRD) الموضحة في الشكل (5) تطابق النتائج مع البطاقة المرجعية القياسية ذات الرقم (JCPDS Card No 01-080-0021)، حيث حافظت الأفلام الملدنة على بنيتها المكعبية نوع زنك بليند (Cubic Zincblende) متعددة التبلور من أجل جميع درجات الحرارة المدروسة، وكان الاتجاه المفضل للنمو (Preferred Orientation) دائماً على طول المستوى البلوري (111)، وهو الاتجاه الأكثر كثافة ذرية واستقراراً في هذه البنية [4]. تم إجراء عملية التلدين في وسط هوائي باستخدام مرمدة خاصة، برفع درجة الحرارة بخطوات مقدارها 25°C لمدة نصف ساعة لكل خطوة، وبعد الوصول لدرجة الحرارة المطلوبة، تُركت العينة داخل المرمدة لتبرد ببطء حتى تصل لدرجة حرارة الغرفة قبل إجراء

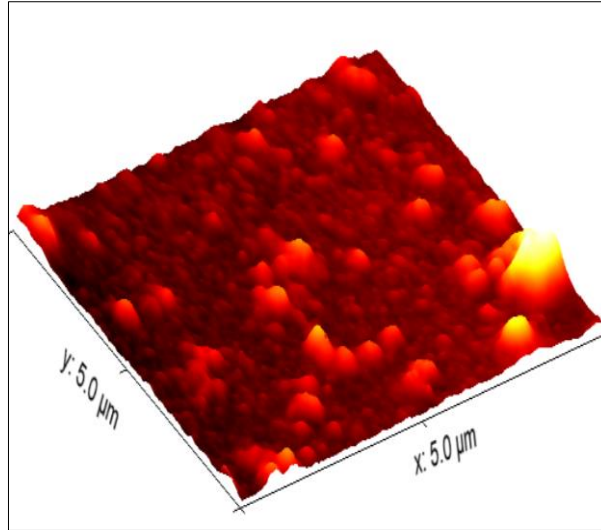
تحليل XRD. يتضح من خلال الأطياف في الشكل (5) أنه بزيادة درجة حرارة التلدين حتى الدرجة 175°C ، تزداد شدة القمة الرئيسية (111) بشكل واضح ويتناقص نصف عرض الخط الطيفي عند منتصف ارتفاعه (FWHM)، مما يؤكد بشكل قاطع زيادة التوجه البلوري (Crystallinity) وكبر حجم الحبيبات البلورية المتشكلة. وقد لوحظ أن درجة حرارة 175°C تمثل الدرجة المثلى للحصول على أعلى جودة بنيوية، بينما يؤدي تجاوز هذه الدرجة مثل (200°C) أو أعلى إلى بداية تدهور طفيف في الخصائص أو عدم وجود تحسن إضافي ذي دلالة، وقد يرتبط ذلك ببدء عمليات أكسدة سطحية محتملة تؤثر سلباً على النقاوة الضوئية المطلوبة للتطبيقات، وهذا يتوافق تماماً مع الأعمال العلمية الحديثة التي أشارت إلى أن التلدين المعتدل يحسن البنية البلورية دون تغيير الطور الأساسي للمركب.



الشكل (5): مراحل الحصول على الدرجة المثلى للتبلور.

4.2.4. التعرف على طبوغرافية السطح المتبلور:

لتقييم الخصائص المورفولوجية الدقيقة وتأثير المعالجة الحرارية على طبوغرافية السطح، تم إجراء مسح لسطح العينة المُلْدَنَة عند الدرجة المثلى باستخدام مجهر القوى الذرية (AFM) كما هو موضح في الشكل (6) .

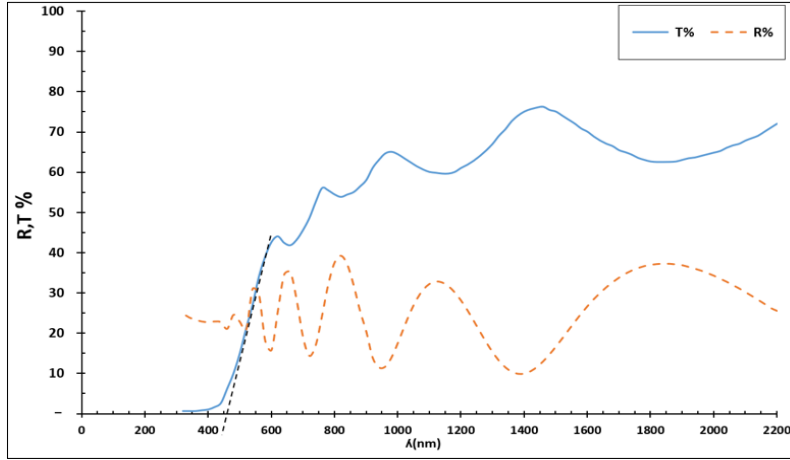


الشكل (6): صورة AFM للعينة بعد الحصول على أفضل تبلور

يُظهر الشكل (6) صورة طبوغرافية ثلاثية الأبعاد لسطح فيلم ZnSe المُلدن، حيث يتسم باستواء عام وحبيبات نانوية مدمجة أقرب للكروية وخالية من الفراغات أو التشققات، مما يعكس جودة الترسيب واستقراره الحراري، وتترتب الحبيبات في سلاسل مترابطة تتوافق مع ملاحظات المجهر الإلكتروني الماسح، مما يشير إلى نمو بلوري منتظم يقلل العيوب السطحية ويعزز التماسك البنيوي. ويرتبط هذا الانتظام المورفولوجي ارتباطاً بنيوياً مباشراً بنتائج انعراج الأشعة السينية، حيث يتوافق الانتظام الحبيبي والترابط السطحي مع ازدياد شدة قمة (111) وتناقص العرض عند منتصف الشدة العظمى (FWHM)، وهو ما تؤكد دراسات حديثة تربط بين حدة القمم البلورية وانتظام السطح وانخفاض الخشونة [8]. ويُعدّ هذا المزيج من الاستواء السطحي وترابط الحبيبات عاملاً محورياً في تحسين الأداء الوظيفي للفيلم؛ إذ يقلل تشتت الضوء (داعماً للنفاذية العالية) ويحسن نقل حاملات الشحنة عبر تقليل مقاومة الحدود الحبيبية، مما يعزز جدواه كطبقة فعالة في الخلايا الشمسية والأجهزة الإلكترونية.

4.3. قياسات النفاذية والانعكاسية الضوئية للفيلم الرقيق بعد المعالجة الحرارية.

تم قياس كل من النفاذية والانعكاسية الضوئية لفيلم رقيق من المركب سيلينيد الزنك ZnSe باستخدام مقياس الطيف الضوئي في المجال الطيفي الممتد (320–2200) nm بعد الحصول على درجة التبلور المثلى.



الشكل (7): طيف النفاذية والانعكاسية للفيلم الرقيق

من الشكل (7) نلاحظ أن هناك انخفاضاً حاداً في طيف النفاذية باتجاه الأطوال الموجية القصيرة (أقل من 500 nm تقريباً)، يشير هذا الانخفاض الحاد إلى بدء امتصاص الفوتونات ذات الطاقة الكافية لإثارة الإلكترونات من منطقة التكافؤ (v) إلى منطقة الناقلة (c)، وهو ما يعبر عن حافة الامتصاص الأساسية للمادة نصف الناقلة، وللتحديد الأولي لحافة الامتصاص من خلال طيف النفاذية نلاحظ أن امتصاصاً حاداً يبدأ عند طول موجة ($\lambda = 465\text{nm}$) تقريباً في الفيلم المدروس لدينا والموافقة لطاقة فوتون ($\hbar\omega = 2.66\text{eV}$) والذي نراه إشارة أولية على عرض الفجوة الطاقية، والذي نتوقع توافقه مع بدء الانتقالات الالكترونية وظهور الناقلة الضوئية والمؤكد في النتائج النظرية [9]. أما في المنطقة المرئية وتحت الحمراء (550-2200)nm تتراوح قيمة النفاذية بين 55% و 80% كمتوسط، مع وجود تذبذبات واضحة تعود إلى الانعكاسات المتعددة المرتبطة بأهداب تداخل الضوء (Interference Fringes) ضمن الفيلم الرقيق الامر الذي يدل على تجانس السماكة و نعومة السطح العلوي والسفلي للفيلم وجودة التبلور وتقليل التشننت الضوئي الناتج عن الخشونة السطحية. بالنسبة لطيف الانعكاسية فإنه

يظهر قيمياً تتراوح بين 10% و 40%، مع تذبذبات معاكسة في الطور لطيف النفاذية، وهو سلوك متوقع للأفلام الرقيقة الشفافة على ركائز شفافة أو شبه شفافة.

5. النتائج والمناقشة للدراسة الضوئية:

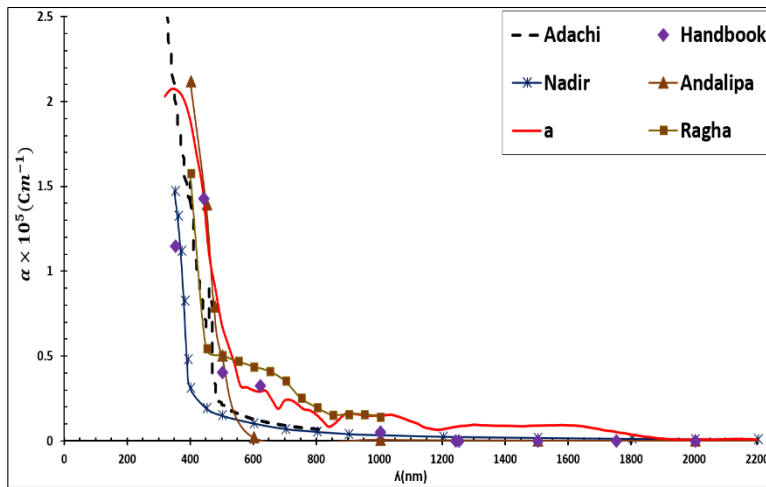
لدراسة الخصائص الضوئية لفيلم ZnSe بدقة، انطلقنا من مفهوم تابع العزل الكهربائي العقدي $\tilde{\epsilon}(\omega)$ الذي يصف استجابة المادة للإشعاع الكهرومغناطيسي. وبناءً عليه، قمنا بتعيين معامل التخماد $k(\omega)$ وقرينة الانكسار $n(\omega)$ من خلال قياسات النفاذية والانعكاسية الضوئية مما يمهّد لحساب باقي الثوابت الضوئية ذات الأهمية الفيزيائية.

5.1. حساب معامل الامتصاص $\alpha(\omega)$:

تم حساب معامل الامتصاص $\alpha(\omega)$ للفيلم الرقيق بالاعتماد على قيم النفاذية (T) والانعكاسية (R) المقاسة، وذلك باستخدام العلاقة (1) [10]:

$$\alpha_{abs}(\omega) = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{1-R}{T} \right) \quad (1)$$

حيث (t) تمثل سماكة الفيلم المدروس مقدرة بالسنتيمتر، ندرج في الشكل (8) معامل الامتصاص المحسوب للفيلم والمشار إليه بالخط الأحمر المستمر، مقارنةً بالقيم المأخوذة من الأدبيات العلمية السابقة [11] Handbook، Adachi [12]، Nadir [5]، Andalipa [4]، Raghu [13]، [13] للتحقق من دقة نتائجنا التجريبية ومطابقة السلوك العام للمادة.



الشكل (8): معامل الامتصاص للفيلم الرقيق مقارنة مع بعض المراجع العلمية

يتضح من الشكل (8) وجود توافق جيد بين السلوك العام والقيم المطلقة لمعامل الامتصاص في دراستنا والنتائج المنشورة سابقاً أما الفروق الطفيفة الملحوظة في القيم فيمكن عزوها إلى الاختلافات في شروط تحضير الأفلام (مثل طريقة الترسيب، درجة حرارة ونوع الركيزة المستخدمة، شروط التلدين، نقاوة المواد الأولية التي حُضرت منها الأفلام)، نلاحظ أن معامل الامتصاص يرتفع بشكل حاد في المنطقة الطيفية المرئية وفوق البنفسجية القريبة، ليصل إلى قيم عالية تتجاوز 10^5 cm^{-1} ، مما يعكس الكفاءة العالية للمادة في امتصاص الضوء عند طاقات أكبر من الفجوة الطاقية. كما يتوافق بدء الارتفاع الحاد في معامل الامتصاص إلى حد كبير مع موقع حافة الامتصاص الأساسية المستنتجة سابقاً من طيف النفاذية، الامر الذي يدل على انسجام طرائق الحساب المستخدمة.

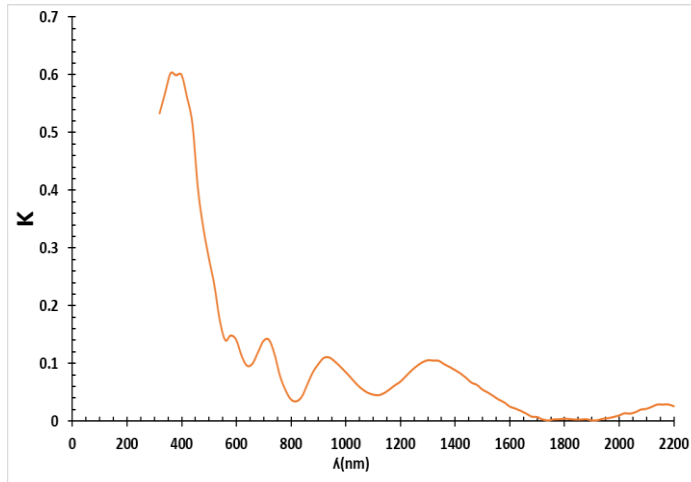
5.2. حساب معامل التخماد $k(\omega)$:

بعد حساب معامل الامتصاص $\alpha(\omega)$ ومقارنته مع الاعمال العلمية، يمكن استنتاج معامل التخماد (Extinction Coefficient) $k(\omega)$ والذي يمثل الجزء التخيلي لقريبة الانكسار العقدية للمادة من خلال العلاقة (2) [14]:

$$k(\omega) = \frac{c\alpha_{abs}(\omega)}{2\omega} \quad \text{أو} \quad k(\lambda) = \frac{\lambda\alpha_{abs}(\lambda)}{4\pi} \quad (2)$$

حيث أن c : سرعة الضوء في الخلاء، λ : الطول الموجي للضوء الساقط على العينة و α : معامل الامتصاص المحسوب سابقاً.

تُعد هذه العلاقة صلة وصل فيزيائية هامة، فهي تربط بين معامل امتصاص الضوء الكلي للفيلم المدروس (α) وبين الثابت الضوئي الهام (k)، الذي يصف قدرة تبديد الطاقة الضوئية في المادة.



الشكل (9): معامل التخماد للفيلم الرقيق

من خلال الشكل السابق (9) يمكن ملاحظة السمات الرئيسية التالية لسلوك معامل التخماد: في منطقة الشفافية (الأطوال الموجية الأكبر من 500 nm) تظهر قيم معامل التخماد منخفضة جداً، مما يعكس ضعف امتصاص المادة للفوتونات ذات الطاقة الأقل من الفجوة الطاقية. هذا السلوك ينسجم مع الطبيعة شبه الشفافة للفيلم في مجال الأمواج الحمراء والمجال تحت الأحمر القريب، ويدل على جودة الفيلم وقلة العيوب الممتصة للضوء في هذه المنطقة الطيفية. في منطقة الامتصاص الأساسي (الأطوال الموجية الأقل من 500 nm) يرتفع معامل التخماد بشكل حاد وسريع مع تناقص الطول الموجي، ليصل إلى قيم عالية تتجاوز 0.6، يشير هذا الارتفاع الحاد إلى أن فوتونات الضوء في هذا المجال تمتلك طاقة كافية للتغلب على حاجز فجوة الطاقة وإثارة الإلكترونات من منطقة التكافؤ إلى منطقة الناقلة بكفاءة عالية. كما نلاحظ أن طيف معامل التخماد يعكس تماماً نفس السلوك الطيفي لمعامل الامتصاص، حيث تتطابق مواقع حافة الارتفاع الحاد لكلا المعاملين، مما يؤكد مصداقية الحسابات ودقة البيانات التجريبية المستخلصة من طيفي النفاذية والانعكاسية.

5.3. حساب قرينة الانكسار $n(\lambda)$:

لحساب قرينة الانكسار في بحثنا الحالي استخدمنا ذات الطريقة التي اتبعناها في البحث [15] والتي تبنى على الأساس النظري لعلاقات كرامرز-كرونيغ التي تربط الجزئين الحقيقي والتخيلي

لتابع العزل الكهربائي العقدي ($\tilde{\epsilon} = \epsilon_1 + i\epsilon_2$). ومايلبي هدفنا من هذه العلاقات هو المعادلة التالية [9]:

$$\epsilon_1(\omega_0) - 1 = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\omega \epsilon_2(\omega)}{\omega^2 - \omega_0^2} d\omega \quad (3)$$

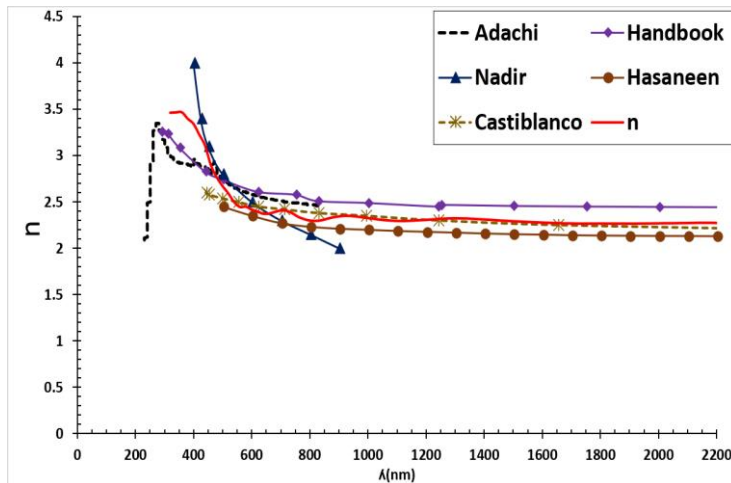
حيث أن ω_0 التردد الذاتي للمهتز الموافق لقمة الامتصاص. وباعتبار أن $\epsilon_1 = n^2 - k^2$ و $\epsilon_2 = 2nk$ يمكن التوصل إلى علاقة تربط بين n و k [9] كما في الشكل التالي:

$$n(\omega_0) - 1 = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\omega \cdot k(\omega)}{\omega^2 - \omega_0^2} d\omega \quad (4)$$

وباستخدام العلاقة (2) أمكن الانتقال إلى العلاقة (5) التالية [15]:

$$n(\lambda_0) - 1 = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{\alpha(\lambda)}{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_0^2}} d\lambda \quad (5)$$

وهي نتيجة متوافقة مع المرجع [16]، حيث أن λ_0 الموافقة لقمة الامتصاص. ندرج في الشكل (10) قيم قرينة الانكسار المحسوبة لدينا والمشار إليها بالخط الأحمر المستمر ومقارنتها مع نتائج أخرى في بعض الاعمال العلمية معه، [11] Handbook، [12] Adachi، [5] Nadir، [17] Hasaneen، [18] Castiblanco للتحقق من السلوك والقيم التجريبية.



الشكل (10): طيف قرينة الانكسار $n(\lambda)$ لفيلم ZnSe مقارنةً مع بيانات مرجعية

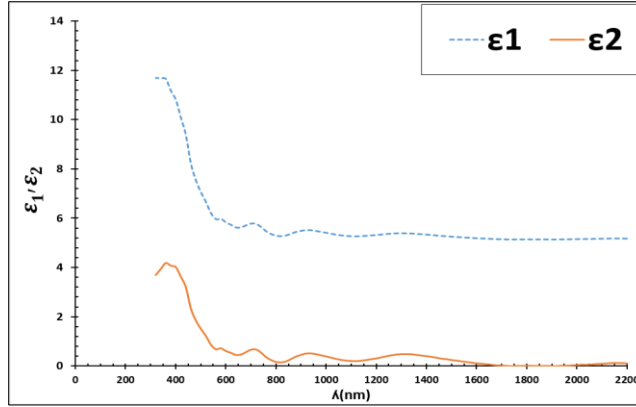
يُظهر الشكل (10) سلوكاً نموذجياً للتبدد الضوئي في فيلم ZnSe في المنطقة الشفافة (الأطوال الموجية الأكبر من قمة الامتصاص، حيث تتناقص قرينة الانكسار $n(\lambda)$ تدريجياً مع زيادة الطول الموجي، وهو ما يُعرف بالتبدد النظامي (Normal Dispersion)، وينجم عن استجابة الإلكترونات المرتبطة للحقل الكهربائي للموجة الضوئية بعيداً عن ترددات التجاوب. أما في منطقة الامتصاص الأساسية أي الأطوال الموجية الأقل من قمة الامتصاص فإن $n(\lambda)$ تبدأ بالارتفاع مع زيادة الطول الموجي، وهو سلوك يُصنف كتبدد شاذ (Anomalous Dispersion)، هذا السلوك يتوافق تماماً مع التوقعات النظرية لمواد أنصاف النواقل. فمن الناحية الكمية على سبيل المثال، تبلغ قيمة قرينة الانكسار لدينا عند الطول الموجي 632.8 nm حوالي 2.58، وهي قريبة جداً من القيم المرجعية المسجلة لأفلام ZnSe البلورية عالية الجودة (مثل 2.55–2.60) حسب أحد الأدبيات [19]. مما يؤكد جودة الفيلم وخلوه من العيوب المحسوسة المؤثرة على الخصائص الضوئية. كما يلاحظ تطابقاً جيداً بين نتائجنا والبيانات المرجعية في المجال الطيفي (2200–500 nm) أما في المنطقة فوق البنفسجية الأقل من 400 nm، فإن الاختلافات المرصودة قد تعزى إلى زيادة حساسية القياسات في منطقة الامتصاص العالي، أو إلى اختلافات في شروط تحضير العينات المرجعية (مثل سمك الفيلم وطريقة الترسيب وطرائق الحساب). وبشكل عام، فإن التطابق الجيد في المنطقة المرئية وتحت الحمراء يدعم استخدام أفلام ZnSe المُحضرة في التطبيقات الضوئية المتقدمة.

5.4. الجزءان الحقيقي والتخيلي لتابع العزل الكهربائي العقدي $\tilde{\epsilon}(\omega)$:

يُشتق تابع العزل الكهربائي العقدي $\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega)$ من قيم قرينة الانكسار $n(\lambda)$ ومعامل التخماد $k(\lambda)$ المحسوبة سابقاً، وذلك عبر العلاقات الأساسية:

$$\epsilon_1(\lambda) = n^2(\lambda) - k^2(\lambda) \quad \text{و} \quad \epsilon_2(\lambda) = 2n(\lambda)k(\lambda)$$

يُظهر الشكل (11) طيفي الجزأين الحقيقي والتخيلي لفيلم ZnSe عند درجة التبلور المثلى.



الشكل (11): طيف الجزأين الحقيقي ϵ_1 والتخيلي ϵ_2 لتابع العزل الكهربائي لفيلم ZnSe

من خلال تحليل الشكل (11) نلاحظ أنه يشير إلى سلوك ضوئي نموذجي لمادة نصف ناقلة ذات فجوة طاقة مباشرة واسعة (Wide Direct Band Gap)، كما هو موثق لأنصاف النواقل من المجموعة (II-VI) مثل ZnSe [14]، نلاحظ وجود قمة حادة لكل من ϵ_1 و ϵ_2 في المنطقة الطيفية بين (300-400nm) المنطقة القريبة من فوق البنفسجية والمرئية الزرقاء، بينما تتناقص القيم بشكل ملحوظ وتستقر في منطقة الأشعة تحت الحمراء الأطول من 700 nm.

5.4.1. تفسير سلوك كل من ϵ_1 و ϵ_2 الجزأين الحقيقي والتخيلي لتابع العزل الكهربائي العقدي:

قبل الشروع في تفسير سلوك كل من ϵ_1 و ϵ_2 في عيناتنا اعتماداً على الانتقالات ما بين المناطق في ميكانيك الكم؛ نلقي نظرة على ماهية كل من ϵ_1 و ϵ_2 .

أولاً: الجزء الحقيقي ϵ_1 : يمثل قدرة المادة على تخزين الطاقة الكهربائية نتيجة استقطاب الشحنات المرتبطة تحت تأثير الحقل الكهربائي للفوتون الساقط وهنا نميز:

- في المنطقة الشفافة : $\lambda > 700 \text{ nm}$ تكون قيمة ϵ_1 موجبة وثابتة نسبياً حوالي (5-5.5)، مما يعكس الاستقطابية الإلكترونية المستقرة للمادة بعيداً عن ترددات التجاوب، وهي قيمة تتوافق مع أدبيات ZnSe البلوري، [14].

- بالقرب من حافة الامتصاص ($\sim 486 \text{ nm}$) ، ترتفع قيمة ϵ_1 بسرعة لتصل إلى ذروتها (~ 11.8)، وهو سلوك ناتج عن التجاوب الإلكتروني عندما تقترب طاقة الفوتون من طاقة الفجوة الطاقية E_g .

- بعد تجاوز الذروة ($\lambda < 486 \text{ nm}$)، تبدأ ϵ_1 بالانخفاض، وهو ما يميز سلوك المواد نصف الناقلة عند ترددات أعلى من تردد التجاوب الأساسي، ويتوافق هذا السلوك مع نموذج المذبذب اللورنتزي (Lorentz Oscillator) [14].

ثانياً: الجزء التخليوي ϵ_2 : يصف فقدان الطاقة (المبددة) داخل الوسط الناتج عند امتصاصه للفوتونات وانتقال الإلكترونات من منطقة التكافؤ إلى منطقة الناقلة. تظهر قمة واضحة لـ ϵ_2 عند طول موجي يقع في المجال $(300-400) \text{ nm}$ وتشير إلى حدوث انتقالات إلكترونية قوية (Strong Optical Transitions).

5.4.2. تحليل سلوك ϵ_2 من خلال مبادئ ميكانيك الكم:

يمكن تفسير ما نلاحظه في سلوك ϵ_2 اعتماداً على الانتقالات ما بين المناطق في ميكانيك الكم فمن العلاقة التالية يتبين أن $\epsilon_2(\omega)$ تتناسب طردياً مع $\alpha_{abs}(\omega)$ [9]:

$$\epsilon_2(\omega) = \frac{nc}{\omega} \alpha(\omega) \quad (6)$$

حيث أن n : قرينة الانكسار و c : سرعة الضوء في الخلاء.

بالاعتماد على مبادئ ميكانيك الكم في حالة الانتقالات المباشرة ما بين المناطق يتبين أن معامل الامتصاص يتناسب مع كثافة احتمال انتقال الإلكترونات من منطقة التكافؤ (v) إلى منطقة الناقلة (c) كما يلي [9]:

$$\alpha_{abs}(\omega) \sim \rho_{cv}(\hbar\omega) \sim \frac{m_0 E_g}{2} \cdot \frac{m_0}{m^*} \quad (7)$$

ρ_{cv} : كثافة احتمال انتقال الإلكترونات بين المنطقتين (v) و (c)

E_g : عرض الفجوة الطاقية، m_0 : كتلة الإلكترون الحر، m^* : الكتلة الفعالة.

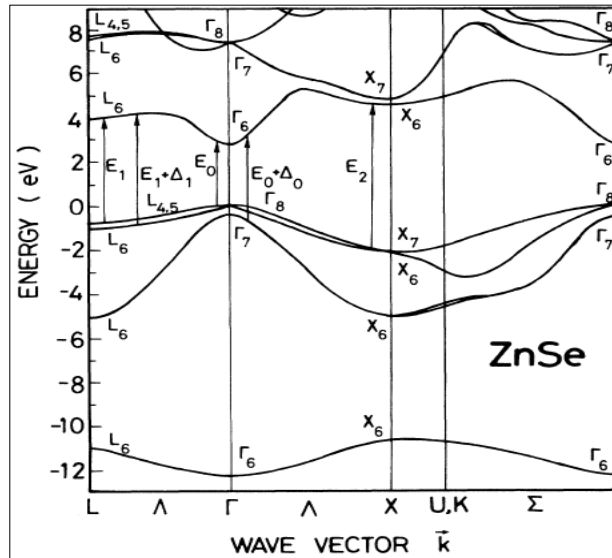
أي أن $\epsilon_2(\omega)$ تتناسب طردياً مع ρ_{cv} ويمكن أن تأخذ الشكل التالي كما في العلاقة التالية [9]:

$$\varepsilon_2(\omega) = \left(\frac{8\pi^2 e^2 \hbar}{m\omega} \right) f_{cv} \rho_{cv}(\hbar\omega) \quad (8)$$

f_{cv} : كمية دون أبعاد تسمى قوة الهزاز وتمثل عدد الالكترونات المشاركة بالاهتزاز. فإذن القيمة الأساسية المؤثرة في α و ε_2 هي كثافة اتصال الحالات:

$$\rho_{cv}(\hbar\omega) = \frac{2}{8\pi^3} \int_s \frac{ds}{\nabla_k(E_c - E_v)|_{E_c - E_v = \hbar\omega}} \quad (9)$$

يمثل المقام في التكامل السطحي تدرج (Gradient) الفرق $(E_c - E_v)$ عند طاقة الفونون $\hbar\omega$. أي أن تساوياً أكبر بين سويتي E_v و E_c يؤدي إلى تدرج لتغير الطاقة $(E_c - E_v)$ صغير جداً الامر الذي يؤدي إلى كثافة احتمال انتقال الالكترونات أعظمية ونحصل على قيمة أعظمية لـ $\varepsilon_2(\omega)$ عند طاقة محددة للفوتونات الواردة عند نقطة محددة من منطقة برنولي تسمى نقطة حرجة وهي كثيراً ما توافق طاقة مساوية لعرض الفجوة الطاقية (الممثلة بـ E_0 على المخطط الطاقى) تتوافق هذه المناقشة مع المخطط الطاقى للمركب ZnSe شكل (12) [12]، حيث أن النقطة الحرجة تُمثل في النقطة Γ .



الشكل (12): المخطط الطاقى لسيلينيد الزنك

يشير الشكل السابق بوضوح إلى أن تساوياً كبيراً لسويات الطاقة في المنطقتين E_v و E_c في نقطة قريبة من قمة E_v وقاع E_c عند النقطتين Γ_6 و Γ_7 وهذا التساير (أي تدرج صغير) أدى

إلى زيادة كبيرة في ρ_{cv} وبالتالي في معامل الامتصاص (a) و ε_2 ومن أجل قيمة محددة $\hbar\omega$ وهي توافق إلى حد كبير مع E_g [20] ، من الشكل السابق أيضا نلاحظ كلما ابتعدنا نحو اليمين تتباعد السطوح E_v عن سطوح E_c وبالتالي تدرج $(E_c - E_v)$ يكون كبيرا وتتناقص ρ_{cv} أي أن انتقالا اقل للإلكترونات وانخفاضا في كل من قيمة الامتصاص (a) وقيمة $\varepsilon_2(\omega)$ الموضحة من سلوك $a_{abs}(\omega)$ و $\varepsilon_2(\omega)$

5.5. الناقلية الضوئية في أفلام سيلينيد الزنك بعد المعالجة الحرارية:

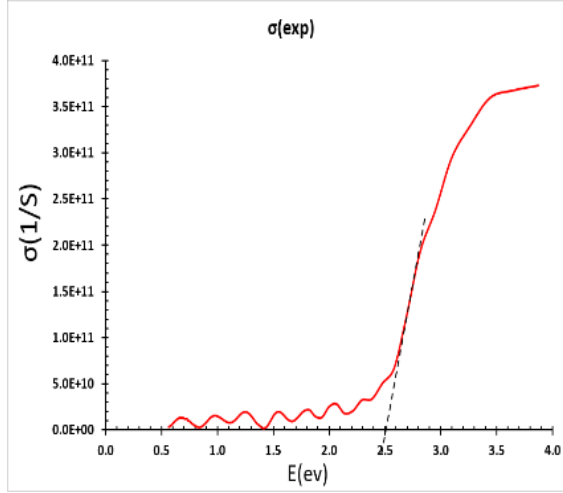
تُعد الناقلية الضوئية $\sigma(\omega)$ من الثوابت الضوئية الديناميكية الهامة، والتي تعبر عن قدرة المادة على استجابة الشحنات الحرة للحقل الكهربائي المتغير للضوء الساقط على العينة. ترتبط هذه الكمية $\sigma(\omega)$ ارتباطاً وثيقاً بالجزء التخيلي لتابع العزل الكهربائي $\varepsilon_2(\omega)$ ، حيث تمثل مقياساً لمعدل تبدد الطاقة الضوئية داخل الوسط عبر آليات الامتصاص الإلكتروني [14]:

$$\sigma(\omega) = \frac{\omega}{4\pi} \varepsilon_2(\omega) \quad (10)$$

وبما أن $\varepsilon_2 = \frac{nc}{\omega} \alpha$ نحصل على علاقة مباشرة تربط الناقلية الضوئية بمعامل الامتصاص كما في العلاقة:

$$\sigma(\omega) = \frac{nc}{4\pi} \alpha(\omega) \quad (11)$$

توضح هذه العلاقة وبالرجوع إلى الفقرة 5.4.2 أن $\sigma(\omega)$ متناسبة طردا مع ρ_{cv} كثافة احتمال انتقال الإلكترونات بين المنطقتين (c) و (v). تم استخدام العلاقة (11) لحساب طيف الناقلية الضوئية $\sigma(\omega)$ لفيلم ZnSe المُحضر عند درجة التبلور المثلى والنتائج موضحة في الشكل (13).



الشكل (13): الناقلية الضوئية $\sigma(\omega)$ لفيلم ZnSe

يُظهر الشكل (13) سلوكاً طيفياً مميزاً يتوافق تماماً مع الخصائص الإلكترونية العامة لأنصاف النواقل ذات الفجوة الطاقية الواسعة. نلاحظ أن قيمة $\sigma(\omega)$ تكون مهملة أو قريبة من الصفر في منطقة الأطوال الموجية الطويلة (الطاقات المنخفضة $E < 2.5$ eV)، مما يعكس شفافية المادة في مجال الأشعة تحت الحمراء والمرئي الأحمر بسبب عدم كفاية طاقة الفوتونات لإثارة الإلكترونات عبر الفجوة الطاقية. عندما تصل طاقة الفوتون الساقط $\hbar\omega$ إلى قيمة حرجية محددة، تبدأ قيمة $\sigma(\omega)$ بالارتفاع الحاد والمفاجئ. يشير هذا السلوك إلى بداية الانتقالات الإلكترونية الأساسية Fundamental Electronic Transitions من قمة منطقة التكافؤ Valence Band Maximum إلى قاع حزمة الناقلية Conduction Band Minimum كما في المخطط الطاقى عند النقطة Γ شكل (12) وفقاً لمبادئ ميكانيك الكم، لا تتحقق هذه الانتقالات إلا عندما تكون طاقة الفوتون مساوية أو أكبر من عرض الفجوة الطاقية E_g للمادة [2]. لتحديد قيمة E_g بدقة، تم تحديد نقطة الانعطاف الحادة إلى الأعلى في منحنى $\sigma(\omega)$ ومدّ الجزء الخطي لينقاطع مع محور الطاقة. يُستنتج من الشكل (13) أن الناقلية الضوئية تبدأ بالظهور بشكل فعال عند طاقة تقارب ($E_g = 2.52$ eV) وهذه القيمة للفيلم الرقيق تتقارب إلى حد كبير مع المعطيات المرجعية المسجلة لمركب ZnSe البلوري ذو الفجوة المباشرة عند درجة حرارة الغرفة (2.5 eV – 2.70 eV)، كما هو موثق في الأدبيات العلمية والشكل (12) الخاص بالبنية الطاقية لـ ZnSe [12]. إن هذا التطابق الدقيق بين قيمة الفجوة الطاقية المستخلصة من طيف الناقلية الضوئية وتلك المستنتجة من أطياف T و ϵ_2 و α يؤكد مصداقية النموذج الحسابي وجودة

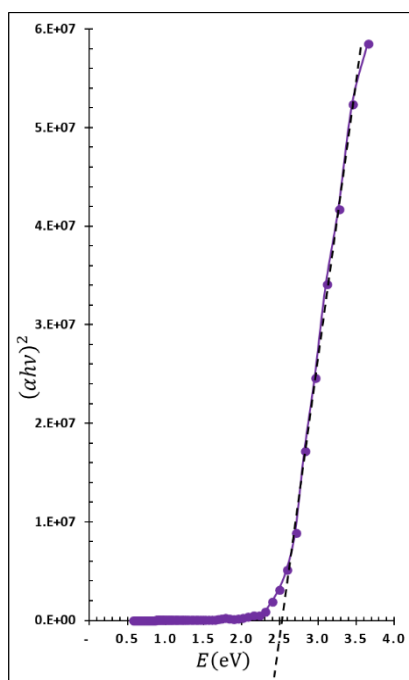
الفيلم المُحضّر ويدعم الاستنتاج بأن معالجة الفيلم حرارياً عند 175°C أدت إلى تحسين البنية البلورية، مما نتج عنه فجوة طاقة مباشرة واضحة ومناسبة للتطبيقات الضوئية والإلكترونية في منطقة الأزرق والأخضر من الطيف المرئي، مثل الثنائيات الباعثة للضوء (LEDs) وكواشف الأشعة فوق البنفسجية.

5.6. عرض الفجوة الطاقية (Band Gap):

بما أن مركب ZnSe يُصنف كنصف ناقل ذو فجوة طاقة مباشرة كما هو مؤكد في الأدبيات الخاصة بالبنية الطاقية لـ ZnSe [21]، فإن الانتقالات الإلكترونية المسموحة بين منطقة التكافؤ ومنطقة الناقلية تخضع لعلاقة Tauc التالية للانتقالات المباشرة المسموحة:

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (12)$$

حيث $h\nu$: طاقة الفوتون الساقط، h : ثابت بلانك، B : ثابت يعتمد على خصائص المادة. تم رسم العلاقة البيانية بين $(\alpha h\nu)^2$ وطاقة الفوتون $h\nu$ ، وهي موضحة في الشكل (14) يتم تحديد قيمة الفجوة الطاقية E_g بيانياً من خلال تقاطع الجزء الخطي المستقيم من المنحني مع محور الطاقة ($h\nu$).



الشكل (14): مخطط Tauc لتحديد الفجوة الطاقية المباشرة لفيلم ZnSe

من خلال الشكل (14)، نلاحظ وجود منطقة خطية واضحة وحادة في طيف الطاقة العالية بين (2.5 و 3.5 eV). بتطبيق طريقة الاستقراء الخطي (Linear Extrapolation) للجزء المستقيم من المنحنى، وجدنا أن تقاطعه مع محور الطاقة يعطي قيمة للفجوة الطاقية تساوي ($E_g=2.52\text{eV}$) هذه القيمة تتقارب من القيم المرجعية المسجلة لمركب ZnSe البلوري عند درجة حرارة الغرفة (300 K)، والتي تتراوح بين 2.5-2.7 eV حسب البيانات الواردة في الأدبيات العلمية [17]. إن الحصول على قيمة ($E_g \approx 2.52 \text{ eV}$) يؤكد نجاح عملية التلدين الحراري عند 175°C في إنتاج فيلم ZnSe ببنية بلورية جيدة ونقاوة عالية. فعلى عكس المواد التي قد تظهر انزياحاً كبيراً في الفجوة بسبب العيوب أو الإجهادات الشديدة، فإن فيلم ZnSe المدروس يحافظ على قيمة فجوة قريبة جداً من القيمة النظرية للبلورة الأحادية. يُعزى ذلك إلى أن المعالجة الحرارية ساهمت في تحسين ترتيب الذرات وتقليل العيوب البنيوية (مثل فراغات الزنك V_{Zn} وفراغات السيلينيوم V_{Se})، مما أدى إلى استعادة الخصائص الإلكترونية المميزة لـ ZnSe كمادة مثالية للتطبيقات الضوئية في المنطقة الأزرق والأخضر.

لمقارنة نتائجنا مع الأعمال العلمية السابقة، ندرج الجدول التالي الذي يوضح التقارب الكبير بين قيمتنا والبيانات المنشورة:

المرجع	طريقة التحضير	قيمة الفجوة الطاقية E_g
(This Work)	تبخير حراري	2.52eV
Khairnar. [17]	تبخير حراري	(2.2 – 2.6) eV
Khan [22]	تبخير حراري	(2.45 – 2.54) eV
Castiblanco [18]	تبخير حراري (TMM)	(~2.65) eV
Venkatachalam [21]	تبخير حراري	(2.60 – 2.72) eV

الجدول (3): مقارنة قيمة الفجوة الطاقية E_g لفيلم ZnSe مع أعمال علمية سابقة

يتبين من الجدول تقارباً ممتازاً بين نتيجتنا التجريبية (2.52 eV) والقيم المرجعية القياسية، مما يدعم مصداقية القياسات الضوئية ودقة تطبيق نموذج Tauc إلى حد معقول في توصيف خصائص أفلام سيلينيد الزنك المحضرة في هذا البحث.

6. الاستنتاجات:

1. أثبتت تقنية التبخير الحراري فعاليتها في تحضير أفلام ZnSe متجانسة ذات بنية مكعبية مستقرة حتى في الحالة غير المُلدنة (As-deposited)، حيث أدت المعالجة الحرارية عند درجة 175°C للوصول إلى الشروط المثلى لتعزيز جودة التبلور وزيادة حجم الحبيبات وتقليل العيوب الشبكية دون إحداث تدهور حراري في بنية الفيلم.
2. تميزت الأفلام بفجوة طاقة مباشرة (Direct Band Gap) قيمتها $2.52 \sim \text{eV}$ ، وتتوافق قيم ثوابت العزل الكهربائي (ϵ_1 و ϵ_2) مع السلوك النموذجي لمواد المجموعة (II-VI)، حيث تعكس القيم الواضحة في المجال $(300-400) \text{ nm}$ انتقالات إلكترونية قوية؛ ويعزى الانزياح الطفيف في الفجوة الطاقية نحو الأحمر مقارنة بالبلورة الأحادية لكون عينتنا فيلم رقيق متعدد التبلور.
3. أظهرت الأفلام نفاذية عالية في المناطق المرئية وتحت الحمراء، مع امتصاص قوي في المنطقة الزرقاء/الخضراء (الأشعة فوق البنفسجية القريبة)، مما يجعلها مرشحة مثالية لتطبيقات متقدمة مثل الطلاءات المانعة للانعكاس، المرشحات الضوئية الانتقائية، وكواشف الأشعة فوق البنفسجية.
4. إن تحليل النتائج بطريقة الدمج بين المفاهيم الضوئية الكلاسيكية ومبادئ ميكانيك الكم تقدم آلية ممكنة لتفسير واضح لسلوك الاستجابة الضوئية لأفلام المركب ZnSe

7. التوصيات

1. الانتقال إلى تقنيات ترسيب متقدمة مثل (MOCVD أو MBE) لتقليل كثافة العيوب البلورية والاقتراب بالفجوة الطاقية من قيمتها النظرية (2.7 eV)، مع إجراء قياسات كهربائية مباشرة (تأثير هول) لتحديد نوع وتركيز حاملات الشحنة، والتحقق تجريبياً من مستويات العيوب النقطية ($V_{\text{Zn}}, V_{\text{Se}}$) المستخلصة من التحليلات البصرية.
2. دراسة تأثير الاشابة بعناصر انتقالية (Cr, Fe) أو عناصر المجموعة الثالثة (Al) لضبط الفجوة الطاقية وتحسين الناقلية الكهربائية بما يخدم تطبيقات الليزر و LEDs عالية الكفاءة، بالإضافة إلى استكشاف تصميم هياكل متعددة الطبقات مع مواد مثل ZnS أو CdSe للاستفادة من شفافية ZnSe في الأشعة تحت الحمراء لتعزيز كفاءة الخلايا الشمسية والمرايا الانعكاسية.

3. تصنيع وصلة الكترونية نموذج Metal ZnSe Metal (Diode) ودراسة ميزاتها الالكترونية (I-V) في الظلمة وعند التعرض للضوء.

8.المراجع

- [1] BABATUNDE. R, ODUNAIKE. R, TALABI. A, and ADELEKE. A, 2020– Synthesis and characterization of ZnSe thin films deposited by thermal vacuum evaporation method for photovoltaic application. Applied Journal of Environmental Engineering Science, Vol. 6, 227–237
- [2] BHUIYAN. M, MIAH. M, and BEGUM. J, 2012– Substrate temperature effect on the structural and optical properties of ZnSe thin films. Journal of Bangladesh Academy of Sciences, Vol. 36, 233–240.
- [3] EZEMA. F, EKWEALOR. A, and OSUJI. R, 2006– Effect of thermal annealing on the band gap and optical properties of chemical bath deposited ZnSe thin films. Turkish Journal of Physics, Vol. 30, 157–163.
- [4] ISLAM. A, DAS. C, CHOUDHURY. S, SHARMIN. M, and BEGUM. T, 2014– Structural and optical characterization of vacuum evaporated zinc selenide thin films. European Scientific Journal, Vol. 10, 241–253.
- [5] HABUBI. N, JABBAR. A, and CHIAD. S, 2011– Structural and optical properties of ZnSe thin films. Atti della "Fondazione Giorgio Ronchi", Vol. 66, 333–340.
- [6] KALITA. P, SARMA. B, and DAS. H, 2000– Structural characterization of vacuum evaporated ZnSe thin films. Bulletin of Materials Science, Vol. 23, 313–317.

- [7] BACAKSIZ. E, AKSU. S, POLAT. I, YILMAZ. S, and ALTUNBAS. M, 2009– The influence of substrate temperature on the morphology, optical and electrical properties of thermal–evaporated ZnSe thin films. Journal of Alloys and Compounds, Vol. 487, 280–285.
- [8] OKEREKE. N, EZENWA. I, and EKPUNOBI. A, 2011– Effect of thickness on the optical properties of zinc selenide thin films. Journal of Non–Oxide Glasses, Vol. 3, 105–111.
- [9] DRESSEL. M, and GRÜNER. G, 2002– Electrodynamics of solids: Optical properties of electrons in matter. Cambridge UniVersity Press, Cambridge, 464.
- [10] AL–ABDULLAH. R, KSIBE. A, ALISSA. H, 2020– Study of absorption coefficient α depending on reflectance R_m and transmittance T_m spectrums of a thin film of AlSb compound and determine its bandgap E_g . Journal of Homs UniVersity, Vol. 42(12), 145–170.
- [11] PALIK. E. D, 1995– Handbook of optical constants of solids. Academic Press, Orlando, Florida, 1096.
- [12] ADACHI. S, 1991– Optical properties of ZnSe. Physical Review B, Vol. 43(12), 9569–9577.
- [13] RAGHU. P, NAVEEN. C. S, SANJEEV. G, and MAHESH. H. M, 2013– Thickness dependent optical properties of ZnSe thin films. International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 2(11), 3568–3572.
- [14] CHOWDHURY. M. T, ZUBAIR. M. A, TAKEDA. H, HUSSAIN. K. M. A, and ISLAM. M. F, 2017– Optical and structural characterization

of ZnSe thin film fabricated by thermal vapour deposition technique. AIMS Materials Science, Vol. 4(5), 1095–1121.

[15] KSIBE. A, AL-ABDULLAH. R, ALALES.A, 2026– Photoresponse study of selenium (Se) thin films prepared by the electron beam method. Journal of Homs University,Accept(25/5/2026) 1–30.

[16]VASKO. A, 1970– Optical constants of amorphous selenium from X-rays to the far infrared. Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 3, 225–233.

[17] HASANEEN. M, ALROWAILI. Z, and MOHAMED. W, 2020– Structure and optical properties of polycrystalline ZnSe thin films: validity of Swanepol's approach for calculating the optical parameters. Materials Research Express, Vol. 7(1), 016422.

[18] CASTIBLANCO. R, VARGAS. J, MORALES. J, TORRES. J, and PARDO. A, 2014– Determination of the optical properties of ZnSe thin films using the transfer matrix method. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 480, 012025.

[19] LALHRIATZUALA. P, and AGARWAL. P, 2012– Preparation and characterization of ZnSe thin film for photovoltaic applications. International Journal of Innovative Research & Development, Vol. 3(11), 104–110.

[20] HARTKE. J, and REGENSBURGER. P, 1965– Electronic states in vitreous selenium. Physical Review, Vol. 139(3A), A970–A980.

[21] VENKATACHALAM. S, NANJO. H, KAWASAKI. K, HAYASHI. H, EBINA. T, and MANGALARAJ. D, 2011– Optoelectronic properties of ZnSe, ITO, TiO₂ and ZnO thin films. In: Optoelectronics – Materials and Techniques, IntechOpen, 165–184.

[22] KHAN. N, SALEEM. A, SATTI. A, IMRAN. M, and KHURRAM. A, 2016– Post deposition annealing: a route to bandgap tailoring of ZnSe thin films. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. 27, 9755–9760.

