مجلة الدراسات التربوية والعلمية - كلية التربية - الجامعة العراقية
العدد السابع والعشرون - المجلد التاسع - علوم الفيزياء - نيسان 2026 م
doi.org/10.52866/esj.2026.09.27.04

التحقق في الخواص البصرية لاغشية أوكسيد القصدير النانوية (SnO_2) المحضرة بطريقة الترسيب بالليزر النبضي وتأثير إضافة CdTe على تلك الخواص

مصطفى باسل حياوي [1*] ، قاسم حمادي محمود [2]
1. قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة تكريت، تكريت، العراق.
2. قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة تكريت، تكريت، العراق.
*البحث مستل من رسالة ماجستير الباحث الاول
البريد الالكتروني[1]: mbhueps87@st.tu.edu.iq

مستخلص:
في هذه الورقة البحثية ، تم تحضير اغشية رقيقة من أوكسيد القصدير النانوي (SnO_2) بطريقة الترسيب بالليزر النبضي PLD . تم التحقق في الخواص البصرية الممتثلة بحساب قيم كل من الامتصاصية، النفاذية ، معامل الامتصاص و فجوة الطاقة البصرية عند مزج الكادميوم-تلريد مع أوكسيد القصدير بنسب وزنية (٪ 0،20،40،60) . أظهرت النتائج أن عملية التشويب بالكادميوم تلريد أثرت بوضوح في الخصائص البصرية لأغشية SnO_2، إذ لوحظ انخفاض في الامتصاصية ومعامل الامتصاص مع زيادة نسبة CdTe، مقابل ارتفاع تدريجي في النفاذية . كما بينت النتائج أن فجوة الطاقة البصرية انخفضت من 2.799 إلكترون فولت للعينة النقية إلى 2.067 إلكترون فولت عند نسبة التشويب ٪60، مما يشير إلى إمكانية التحكم في خصائص المادة من خلال ضبط نسب التشويب. هذا التغيير ناتج من تشكّل وصلة غير متجانسة (Heterostructure) بين المادتين مما أدى إلى تحسين امتصاص الفوتونات وتقليل فقدانها عبر عمليات إعادة الاتحاد. كما بينت النتائج أن التقنية المستخدمة فعّالة في تحضير أغشية نانوية متجانسة تمتاز بخواص بصرية محسّنة، ما يجعلها مرشحة واعدة للتطبيق في الخلايا الشمسية، والمستشعرات البصرية، والأجهزة الإلكترونية الضوئية .
الكلمات المفتاحية: الخصائص البصرية ، الترسيب بالليزر النبضي PLD ، SnO_2 ، CdTe .

Investigating the optical characteristics of tin oxide (SnO_2) nanofilms produced using pulsed laser deposition, and the influence of CdTe incorporation on these characteristics.

Mustafa Basil Hayawi[1*] , Qasim Hammadi Mahmoud[2]
1.Department of Physics ،Collage of Education for Pure Science ،University of Tikrit ،Tikrit ،Iraq.
2.Department of Physics ،Collage of Education for Pure Science ،University of Tikrit ،Tikrit ،Iraq.
E-mail: mbhueps87@st.tu.edu.iq

ABSTRACT :
In this paper, thin films of tin oxide nanoparticles (SnO_2) were prepared using pulsed laser deposition (PLD). The optical properties were investigated by calculating the absorbance, transmittance, absorption coefficient, and optical band gap when cadmium-telluride was mixed with tin oxide at weight percentages of 0%, 20%, 40%, and 60%. The results showed that cadmium-telluride doping significantly affected the optical properties of the SnO_2 films. A decrease in absorbance and absorption coefficient was observed with increasing CdTe content, while the transmittance gradually increased. Furthermore, the optical band gap decreased from 2.799 eV for the pure sample to 2.067 eV at a 60% doping concentration, indicating the possibility of controlling the material's properties by adjusting the doping ratio. This change results from the formation of a heterostructure between the two materials, leading to improved photon absorption and reduced photon loss through recombination processes. The results also demonstrated that the technique is effective in preparing homogeneous nanofilms with enhanced optical properties, making them promising candidates for application in solar cells, optical sensors, and optoelectronic devices.
Key words: Optical properties, pulsed laser deposition (PLD), SnO_2, CdTe

1. المقدمة

خلال العقود القليلة الماضية، ظهر مصطلح علم النانو، ويتناول هذا العلم بشكل أساسي تطوير وتوصيف واستكشاف وتطبيق المواد النانوية. يجب أن يكون لهذه المواد بُعد واحد على الأقل من ثلاثة أبعاد في نطاق النانومتر. النانومتر (nm) هو جزء من مليار من المتر، أو 10^{-9} متر في مقياس النانومتر. هناك العديد من التقنيات والوسائل لتطوير وتشخيص بنية وخصائص المواد التي يتراوح حجم حبيباتها بين جزء من واحد وبضعة أجزاء من مئة من النانومتر في مجالات البحث العلمي، والتي حظيت باهتمام كبير على مدى السنوات الماضية. تتميز أكاسيد أشباه الموصلات، التي تُشكل أساس المواد الوظيفية، بخصائص مميزة يمكن التحكم فيها أو تعديلها، ويمكن استخدامها في تطبيقات تكنولوجية مهمة [1].كان هناك اهتمام كبير بخصائص الأغشية الرقيقة منخفضة التكلفة من SnO_2 [2]. ويرجع ذلك إلى الغشاء الرقيق ذي فجوة النطاق الكبيرة (مثلًا 3 إلكترون فولت) [3،2]. تُعد أغشية أوكسيد القصدير (Tin Oxide) جذابة من الناحية العلمية والتكنولوجية، نظرًا لكونه أكسيدًا شفافًا وموصلًا للكهرباء في المنطقة المرئية من الطيف الكهرومغناطيسي، نتيجةً لفجوة النطاق الكبيرة [4،2]. يتمتع أكسيد القصدير (SnO2) بالعديد من المزايا، بما في ذلك الشفافية الممتازة والاستقرار الكيميائي المتميز، مما يجعله مرشحًا ممتازًا من الناحية النظرية للأجهزة الإلكترونية عالية الأداء. [9-5] وكذلك الأقطاب الكهربائية الشفافة لشاشات الكريستال السائل [10] . تعددت طرق صناعة أغشية SnO_2 باستخدام تقنيات متنوعة بما في ذلك الترسيب البخار الكيميائي CVD [11]، والتحلل الحراري بالرش [12]، وترسيب الطبقة الذرية (ALD) [13]، وترسيب الليزر النبضي (PLD) [14]، وترسيب البخار الفيزيائي (PVD) [15]. ومن ناحية أخرى، يُعدّ تيلوريد الكادميوم مادة شبه موصل من النوع p، بمعامل امتصاص بصري عالٍ [16]، مما يجعله مادة امتصاص ممتازة. في الواقع، يكفي سمك 2 ميكرومتر لامتصاص ما يقارب مجمل الفوتونات الساقطة [17].

في هذه الدراسة، حُضِّرت أغشية رقيقة من أكسيد القصدير بتقنية بتقنية الترسيب بالليزر النبضي PLD ، وتتميز هذه التقنية ببساطتها، وسرعتها. كما تم في هذا العمل دراسة تأثير التطعيم بالكادميوم تلرايد CdTe بنسب وزنية (0,20,40,60٪wt) على الخصائص البصرية لأغشية SnO2 المترسبة على ركائز الكوارتز. أُجريت قياسات كل من النفاذية والامتصاصية ومعامل الامتصاص وفجوة الطاقة البصرية لهذه الاغشية باستخدام جهاز مطياف الأشعة فوق البنفسجية المرئية Shimadzu UV-1650 في النطاق الطيفي 1100-190 نانومتر.

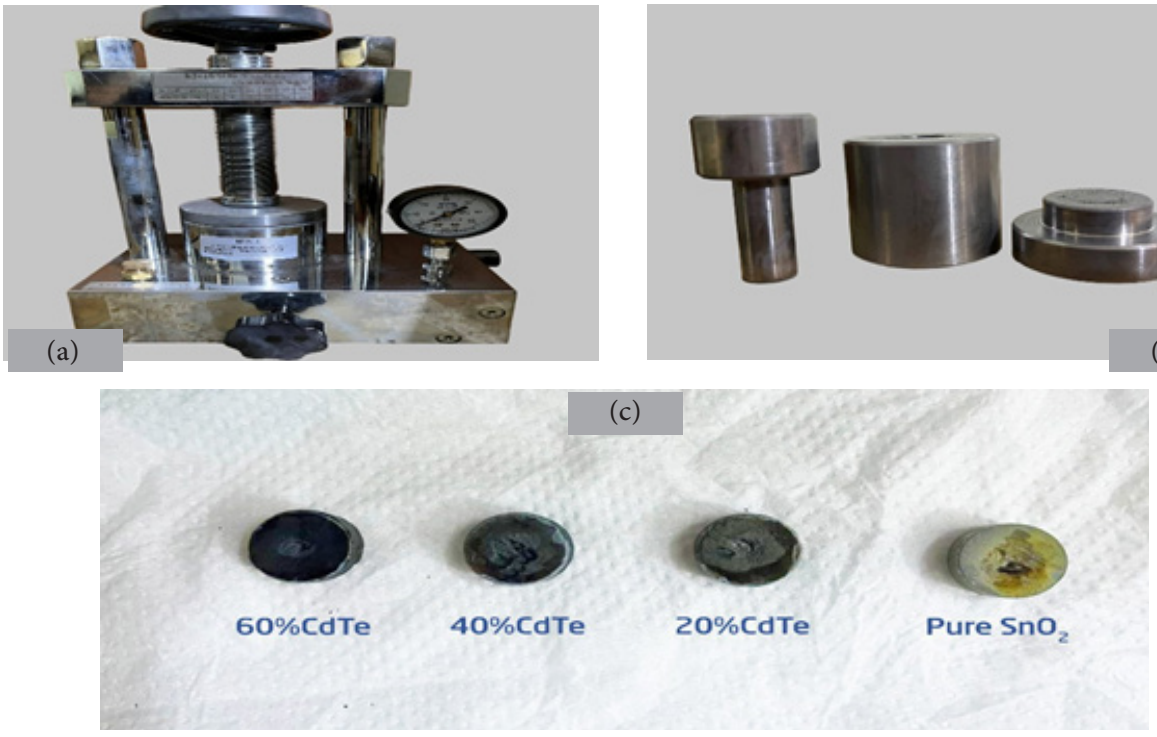
2. طريقة العمل

يبين هذا الجانب كيفية الحصول اغشية رقيقة من أوكسيد القصدير النقية والمشوبة بالكادميوم تلرايد بنسب وزنية (0,20,40,60٪ wt) باستعمال تقنية الترسيب بالليزر النبضي في المواد الصلبة ، حيث تم استخدام مسحوق SnO2 المجهز من شركة Sig-ma-Aldrich صلب عالي النقاوة (≤ 99.9٪)، تم وزن 2.1g من مسحوق أوكسيد القصدير وكبسه في قالب قطره الدائري 8mm تحت ضغط 8Ton

للحصول على هدف لمادة أوكسيد القصدير SnO2. اما بالنسبة لمادة التطعيم CdTe (Cadmium Tel-luride Powder) ذات المنشا الصيني المجهزة من شركة Heeger Materials ، بدرجة نقاء 99.92٪، وبمتوسط حجم جسيمات 10-20 مايكرومتر، كانت نسب التطعيم من الكادميوم تلرايد هي (20،40،60 wt.٪) مع أوكسيد القصدير النقي .

تتكون المنظومة من مصدر ليزر (Q-switched Nd: YAG) ذي منشأ صيني من شركة (HUAFEI) بالطول الموجي (1064 nm) مع اقصى طاقة (250 mJ) لكل نبضة وزمن النبضة (9 ns) ومعدل التكرار (6 Hz) وقطر الحزمة الفعالة هو (2 mm) التي تستخدم بالاستئصال الليزري . تم وضع قرص الهدف لكل من أوكسيد القصدير النقي والمشوب في داخل حجرة زجاجية مفرغة من الهواء تحت ضغط $2.1*10^{-3}$ تم توجيه مسدد الليزر على الهدف المستخدم بزاوية ميلان 45° على بعد 6cm من قرص الهدف ، علاوةً على ذلك كانت المسافة بين قرص الهدف وقاعدة الكوارتز المستخدمة لترسيب الاغشية تقدر بحوالي 2.5mm .

بعد وضع العينة داخل حجرة الترسيب وتشغيل منظومة التفريغ ووصول الضغط الى حدود $2.1*10-3$ mmbar ~ تم تسليط نبضات الليزر الى 500 نبضة لحين الحصول على غشاء رقيق ومتجانس وخالي من التكتلات .والشكل (1) يوضح صور المكبس الهيدروليكي المستخدم والقالب و العينات قيد الدراسة بعد الكبس كذلك الجدول (1) ادناه يوضح اهم معلمات جهاز الليزر المستخدم في تحضير اغشية SnO_2:CdTe.



الشكل(1): يوضح صور
(a)- المكبس الهيدروليكي المستخدم (b)- القالب و(c)- العينات قيد الدراسة.

الجدول (1): معلمات الليزر المستخدم.

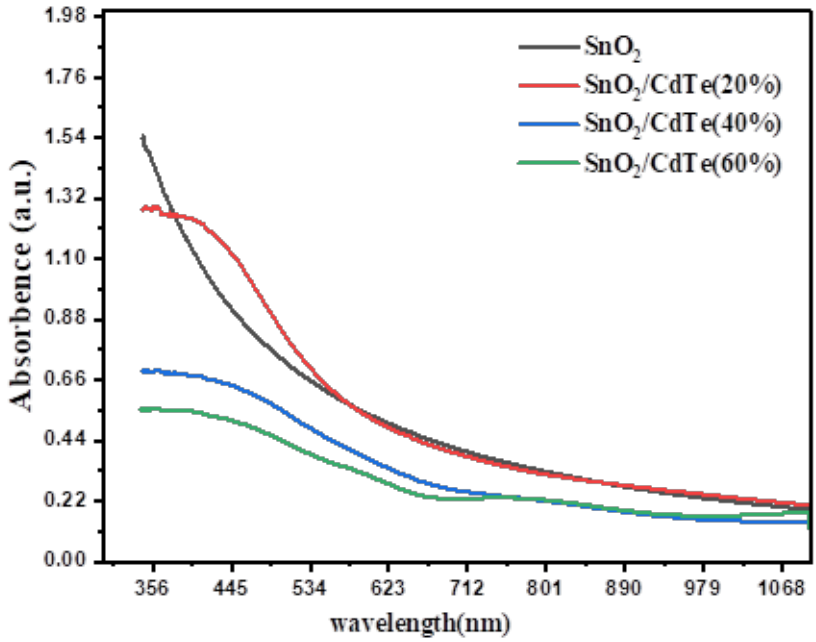
الخاصية	القيمة
مدة النبض	9 ns
معدل التكرار	6 Hz
طاقة الليزر	250mJ
الوضع العرضي	TEM00
نوع الليزر	Q-switched Nd:YAG
الطول الموجي	1064nm
عدد النبضات	بين 250 الى 500 نبضة

تم قياس اطياف الامتصاص لاغشية SnO_2:Cd-Te النانوية بواسطة مقياس الطيف الضوئي للأشعة فوق البنفسجية المرئية UV-Visible ضمن مدى الاطوال الموجية 1100–190 نانومتر باستخدام جهاز Shimadzu UV–1650

3 - النتائج والمناقشة

3–1 الامتصاصية البصرية

الشكل (2) يوضح طيف الامتصاصية كدالة للطول الموجي لأغشية أوكسيد القصدير النانوي النقية والمشوبة بالكادميوم تلرايد بنسب وزنية (wt ,40,60٪0,20) باستعمال تقنية الترسيب بالليزر النبضي في المواد الصلبة . أظهرت اغشية SnO2 النقية زيادة تدريجية عند الاطوال الموجية القريبة من المرئية والمرئية وتشير ايضا النتائج التجريبية إلى أن الامتصاصية البصرية لاغشية (SnO_2:CdTe) تتناقص بوضوح مع زيادة نسبة الخلط أثناء عملية التحضيرللعينات الثلاث SnO_2:20٪CdTe و العينة SnO_2:40٪CdTe والعينة SnO_2:60٪CdTe ، وهذا السلوك يعكس التأثيرات العميقة التي تُحدثها عملية الخلط وقد يعزى سبب ذلك الى ان لتغير في البنية الإلكترونية ونطاق الطاقة حيث ان أوكسيد القصدير (SnO_2) هو شبه موصل من نوع n ذو فجوة طاقة واسعة (eV3.6 ≈)، بينما الكادميوم تلرايد (CdTe) هو شبه موصل من نوع p بفجوة طاقة أضيق (eV 1.45 ≈). عند خلط المادتين بنسب وزنية مختلفة، يحدث تشكيل وصلة غير متجانسة (heterojunction) بين المادتين تؤدي إلى انتقال الإلكترونات من CdTe إلى SnO_2 نتيجة فرق مستويات فيرمي (Fermi level mismatch) وتكوّن منطقة االاستنزاف (depletion region) عند الحد البيني، ما يقلل من عدد الحاملات الحرة القادرة على امتصاص الفوتونات.بالتالي، ينخفض معامل الامتصاص الكلي لأن بعض الفوتونات تُفقد في عمليات إعادة الاتحاد (recombination) أو الانعكاس السطحي بدلاً من الامتصاص الفعّال [18].



الشكل (2): طيف الامتصاصية لأغشية أوكسيد القصدير النانوي النقية والمشوبة بالكادميوم تلرايد بنسب وزنية (0,20,40٪ wt) بتقنية الترسيب بالليزر النبضي

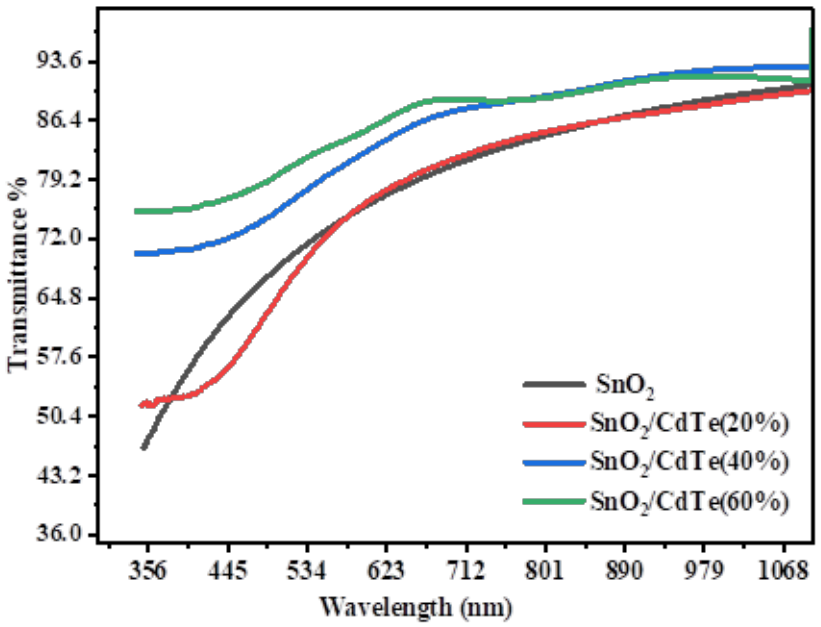
3-2 طيف النفاذية

الشكل (3) يوضح طيف النفاذية لأغشية أوكسيد القصدير النانوي النقية والمشوبة بالكادميوم تلرايد بنسب وزنية (0,20,40,60٪ wt) باستعمال تقنية الترسيب بالليزر النبضي في PLD، حيث تُظهر النتائج التجريبية أن النفاذية البصرية لأغشية أوكسيد القصدير النانوي النقية والمشوبة بالكادميوم تلرايد، تزداد بشكل تدريجي مع زيادة نسبة التشويب المستخدمة أثناء التحضير.

ان طيف النفاذية البصرية كدالة للطول الموجي لأغشية أكسيد القصدير النانوي النقية والمشوبة مع الكادميوم تلرايد CdTe بنسب وزنية مختلفة (0,20,40,60٪wt) تُعتبر مؤشراً حيوياً على الجودة البصرية للمادة وإمكانية استخدامها في التطبيقات الإلكترونية الضوئية، وخاصة كأغشية الاكاسيد الشفافة (TCO). يُلاحظ أن النفاذية لجميع الأغشية تزداد بشكل حاد مع الانتقال من منطقة الأشعة فوق البنفسجية (UV) نحو المنطقة المرئية والقريبة من الأشعة تحت الحمراء (NIR). تُظهر الأغشية نفاذية عالية في المنطقة المرئية والـ NIR بأطوال موجية تزيد عن 500 نانومتر ، حيث تتجاوز النفاذية نسبة 70٪ وتصل إلى ما يقارب 95٪ لجميع الاغشية النقية والمشوبة بنسب SnO_2:20٪CdTe و العينة SnO_2:40٪CdTe والعينة SnO_2:60٪CdTe على التوالي. ان زيادة النفاذية في النسب (20٪ و 40٪) يعزى السبب الى أن إضافة CdTe قد حسّنت من تجانس الغشاء أو قللت من تشتت الضوء أو عدد العيوب في نطاق الطاقة.

اما النسبة 60٪ فقد لوحظ انخفاض طفيف عند زيادة تركيز CdTe إلى 60٪ wt ، يمكن تفسير هذا

الانخفاض بالزيادة في امتصاص الناقل الحر (Car-rier Absorption) نتيجة لإدخال شوائب إضافية، أو زيادة في تشتت الضوء بسبب تكتل (Aggregation) جسيمات CdTe النانوية في بنية SnO_2 عند التركيزات العالية، ويعزى سبب هذه الزيادة في طيف النفاذية الى الاختلاف في نصف القطر الايوني لكل من: (الايون الموجب للقصدير Sn^{+4} =0.69Å، الايون السالب للاوكسجين O^{-2}=Å 1.4 ، الايون الموجب للكادميوم Cd^{+2} =095Å والايون السالب للتلرايد Te^{-2} =Å 2.21) [19] ، حيث ان الاختلاف الكبير في انصاف الاقطارالايونية للوصلة الغير متجانسة $SnO_{2\ (1-x)}\ CdTe_x$ يخلق اجهادات داخل الشبيكة البلورية فتسبب في خلق مناطق عيوب وظهور مناطق للانتقالات الالكترونية [20،21]



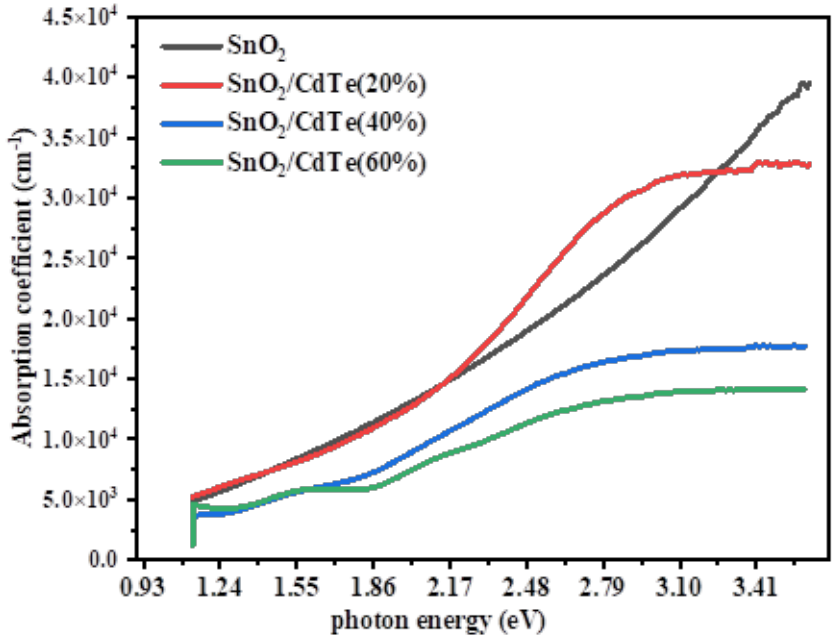
الشكل (3): طيف النفاذية لأغشية أوكسيد القصدير النانوي النقية والمشوبة بالكادميوم تلرايد بنسب وزنية (0,20,40,60٪ wt) باستعمال تقنية الترسيب بالليزر النبضي PLD.

3-3 معامل الامتصاص

يُعد معامل الامتصاص (α أحد المعلمات الأساسية التي تبين عن قدرة المادة على امتصاص الضوء الداخل إليها، ويعتمد بشكل مباشر على الامتصاصية وطاقة الفوتونات.

الشكل (4) يوضح معامل الامتصاص للأغشية أوكسيد القصدير النانوي النقية والمشوبة بالكادميوم تلرايد بنسب وزنية (0,20,40,60٪ wt) باستعمال تقنية الترسيب بالليزر النبضي في PLD . تُظهر النتائج أن معامل الامتصاص يتناقص بشكل ملحوظ مع ارتفاع نسبة الخلط مقارنة بالمادة النقية SnO2 ، وكما موضح بالشكل (3)، ويمكن تفسير

هذا السلوك من خلال مجموعة من التغيرات البنيوية والبصرية التي تُحدثها عملية الخلط العالية. من ناحية أخرى، فإن معامل الامتصاص مرتبط رياضيًا بكمية الطاقة الممتصة وطول المسار البصري داخل المادة، فكلما زادت قدرة المادة على امتصاص الضوء عبر زيادة نسبة الخلط من 20٪-60٪، انخفض معامل الامتصاص. ومن ناحية اخرى أن سلوك معامل الامتصاص(α) مشابه جداً لسلوك طيف الامتصاصية (A) و ذلك بسبب التناسب الطردي بينهما، أن قيم معامل الامتصاص للأغشية ($SnO_{2\,(1-x)}CdTe_x$) النقية والمطعمة اكبر من 10^4، ($\alpha>10^4$) وهذا يدل على الانتقالات الالكترونية التي حدثت هي من نوع الانتقالات الغير مباشرة وهذه النتيجة متوافقة مع الباحث [22] .



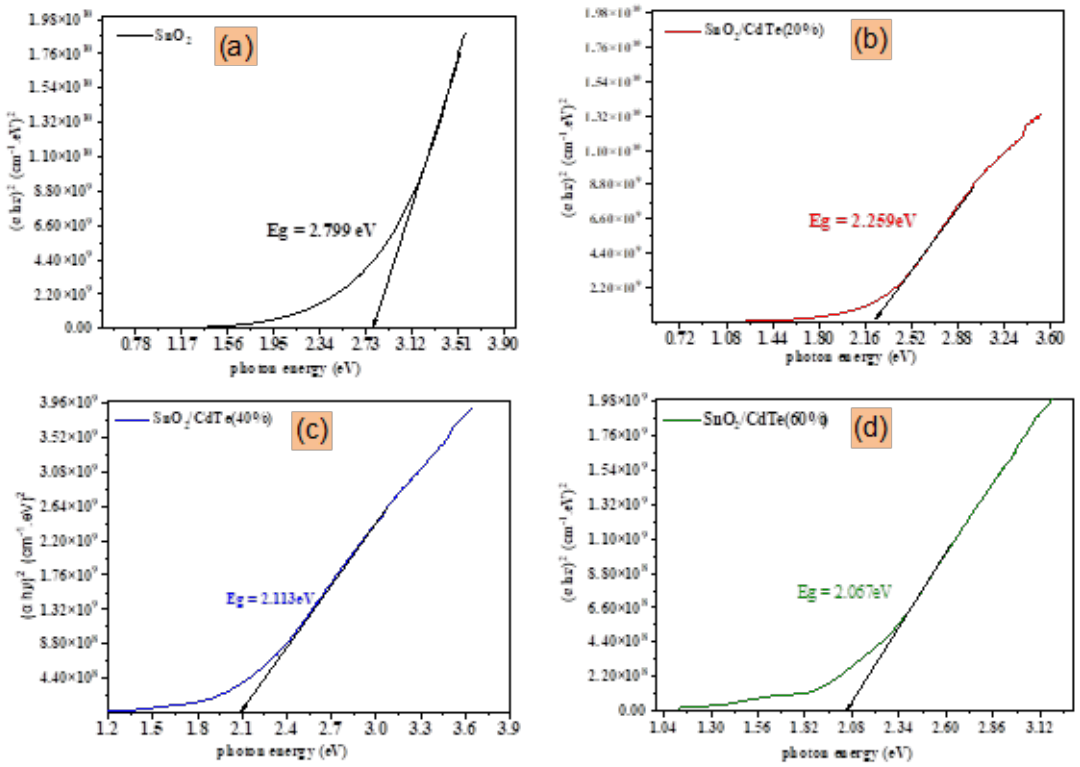
الشكل (4): معامل الامتصاص لأغشية أوكسيد القصدير النانوي النقية والمشوبة بالكادميوم تلرايد بنسب وزنية (wt 0,20,40,60٪) باستعمال تقنية الترسيب بالليزر النبضي PLD.

3-5 فجوة الطاقة البصرية

تم تقييم فجوة الطاقة البصرية (Eg) لأغشية أوكسيد القصدير النانوي النقية والمشوبة بالكادميوم تلرايد بنسب وزنية (wt 0,20,40,60٪) باستعمال تقنية الترسيب بالليزر النبضي في PLD وذلك باستخدام علاقة Tauc حسب المعادلة التالية : $(\alpha h\upsilon)^n = A\,(h\upsilon - Eg)$ ، حيث تمثل hν ، α ، n ، Eg ، وA : معامل الامتصاص، و طاقة الفوتون الساقط ، و فجوة الطاقة ، الأس n (الذي يختلف بناءً على نوع انتقال الطاقة، على سبيل المثال، n = 2 لفجوة نطاق غير مباشرة)، و Aثابت التناسب، على التوالي [23]. يوضح الشكل (5من a-d) فجوة الطاقة البصرية لأغشية أوكسيد القصدير النانوي النقية والمشوبة بالكادميوم تلرايد بنسب وزنية

(wt 0,20,40,60٪) المحضرة بتقنية الترسيب بالليزر النبضي (PLD) .

أظهرت نتائج هذا البحث أن فجوة الطاقة البصرية (Eg) في أوكسيد القصدير النانوي (SnO_2) تتناقص تدريجيًا مع زيادة الخلط بمادة الكادميوم تلرايدCdTe المستخدم أثناء عملية التحضيرللعينات Pure SnO2 والمشوبة بنسب SnO_2:20٪CdTe، SnO_2:40٪CdTe والعينة SnO_2:60٪CdTe على التوالي ، بلغت فجوة الطاقة البصرية Eg للعينة النقية 2.799eV و2.259eVعند النسبة 20٪ و 2.113eV عند النسبة 40٪ و2.067eV لنسبة 60٪ ، يمكن تفسير هذا الانخفاض في فجوة الطاقة بناءً على مجموعة من التأثيرات الفيزيائية على بنية المادة فإن تقليص فجوة الطاقة يعكس قدرة المادة على امتصاص فوتونات ذات طاقات أقل، وهذا ما تم تأكيده أيضًا من خلال الزيادة في الامتصاصية عند الأطوال الموجية الأطول بالتالي، فإن الانخفاض في فجوة الطاقة من 2.799eV إلى 2.067eV يُعد معلماً دقيقًا على التغير في التركيب الإلكتروني للمادة ويُعتبر هذا التأثير ذا أهمية كبيرة في التطبيقات التي تتطلب مواد ذات فجوة طاقة مضبوطة مثل الخلايا الشمسية، وأجهزة الاستشعار البصرية.



الشكل (5): فجوة الطاقة البصرية لأغشية أوكسيد القصدير النانوي النقية والمشوبة بالكادميوم تلرايد بنسب وزنية (wt 0,20,40,60٪) باستعمال تقنية الترسيب بالليزر النبضي PLD.

4 - الاستنتاجات

استنادًا إلى دراسة الخواص البصرية لأغشية أوكسيد القصدير النانوية ($SnO_{2\ (1-x)}\ CdTe_{\ x}$) المحضرة بطريقة الترسيب بالليزر النبضي وتأثير إضافة الكادميوم تلريد (CdTe) بنسب وزنية (0,20,40,60٪wt) فأن اهم الاستنتاجات في هذه الدراسة تتلخص بالآتي :

- فعالية الليزر النبضي (PLD) أثبتت أن تقنية الترسيب بالليزر النبضي فعّالة في تحضير أغشية نانوية رقيقة ومتجانسة من أوكسيد القصدير (SnO_2) والممزوج بالكادميوم تلريد (CdTe).
- تحسين الخصائص البصرية لأغشية ($SnO_{2\ (1-x)}\ CdTe_{\ x}$) : عند زيادة نسبة CdTe في الأغشية انخفضت الامتصاصية البصرية ، وبالمقابل زيادة في طيف النفاذية النفاذيةبشكل تدريجي حتى ٪90 > ، مما يشير إلى تحسّن قدرة الأغشية على امتصاص الضوء.
- انخفاض فجوة الطاقة البصرية (Eg): أظهرت النتائج أنخفاضا في قيم فجوة الطاقة البصرية من 2.799eV للغشاء النقي إلى 2.067eV لنسبة التشويب ٪60 من CdTe ، مما يدل على إمكانية ضبط فجوة الطاقة تبعًا لنسبة الإضافة.
- تحسين معامل الامتصاص لاغشية ($SnO_{2\ (1-x)}\ CdTe_{\ x}$) : تناقص معامل الامتصاص مع ارتفاع نسبة الخلط من ٪20 الى ٪60 من CdTe، مما يعزز استخدام هذه الأغشية في التطبيقات البصرية والإلكترونية.
- إمكانية الاستخدام التطبيقي لاغشية ($SnO_{2\ (1-x)}\ CdTe_{\ x}$) : النتائج تشير إلى أن الأغشية المحضّرة مناسبة للتطبيق في الخلايا الشمسية، والمستشعرات البصرية، والأجهزة الإلكترونية الضوئية، نظرًا لقابليتها لضبط الخواص البصرية.

المصادر

[1]Mohammd, Walla M., et al. "Enhanced Broadband Photo-detection via Carbon Nanotube Integration in ZnO Nanostructured Films." Physica B: Condensed Matter (2025): 417655.

[2] Patil , G. E. D. D. Kajale, D. N. Chavan, N. K. Pawar, P. T. Ahire, S. D. Shinde, V. B. Gaikwad and G. H. Jain, "Synthesis, charactarization and gas sensing performance of SnO2 thin film prepared by spry pyrolysis"Bull. Mater. Sci. Vol. 34, pp.1-9, Feb. 2011.

[3] Savua, R. M. A. Ponceb, E. Joannia, P. R. Buenoa, M. Castrob, M. Cilensea, J. A. Varelaa, E. Longoa, " Grain Size Effect on the Electrical Response of SnO2 Thin and Thick Film Gas Sensors", Materials Research, Vol. 12, No. 1, 83-87, 2009.

[4] Igwe, H. U. and E. I. Ugwu," Optical chracteristics of nanocrystaline thermal annealed tin oxide (SnO2) thin film samples prepared by chemical bath deposition technique" Advance in applied science research , 240-246. 2010.

[5] Q. Jiang, L. Zhang, H. Wang, X. Yang, J. Meng, H. Liu, Z. Yin, J. Wu, X. Zhang, and J. You, Nat. Energy 2, 16177 (2017).

[6]H. J. Snaith and C. Ducati, Nano Lett.

95-99 .

[13] W.S. Choi," Effects of Seed Layer and Thermal Treatment on Atomic Layer Deposition-Grown Tin Transactions On Oxide", Electrical and Electronic Materials, 11(5) (2010) 222 225.

[14] D. H. Kim, W.S. Kim, S. B. Lee and S. H. Hong," Gas sensing properties in Epitaxial SnO2 films grown on TiO2 single crystals with various orientations", Sensors and Actuators B ,147 (2010) 653–659.

[15] T. Gui, L. Hao, J. Wang, L. Yuan, W. Jia and Xiaoli Dong," Structure and Features of SnO2 Thin Films Prepared by RF Reactive Sputtering", Chinese Optics Letters, 8 (2010) 134-136.

[16] Amin, N., Sopian, K., Konagai, M., 2007. Numerical modeling of CdS/CdTe and CdS/ CdTe/ZnTe solar cells as a function of CdTe thickness. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 91, 1202–1208.

[17]Anthony, T.C., Fahrenbruch, A.L., Peters, M.G., Bube, R.H., 1985. Electrical properties of CdTe films and junctions. J. Appl. Phys. 57, 400–410. https://doi.org/10.1063/ 1.334764.

[18]Vasa, P., et al. "Photoluminescence properties of CdS-ZnO nanocomposite thin films." Conference on Lasers and Electro-Optics. Optica Publishing Group, 2003.

[19]Shannon, Robert D. "Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides." Foundations of Crystallography 32.5 (1976): 751-767.

10, 1259 (2010).

[7] H. Huang, O.K. Tan, Y.C. Lee, M.S. Tse," Preparation and characterization of nanocrystalline SnO2 thin films by PECVD", Journal of Crystal Growth, 288 (2006) 70–74 .

[8] K. Von Rottkay, M. Rubin," Optical Indices Of Pyrolytic Tin-Oxide Glass", Mater. Res. Soc. Symp. Proc. , 426 (1996) 449-456.

[9] C. Euvananont, T. Chansawang , Y Boontongkong and C. Thanachayanont," Microstructural and Electrical Investigation of SnO2 Twinned Crystalline Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis", Journal of Microscopy Society of Thailand, 23 (1) (2009) 79-82 .

[10] L.S. Roman, R. Valaski , C.D. Canestraro , E.C.S. Magalhaes , C. Persson , R. Ahuja , E.F. da Silva Jr., I. Pepe and A. Ferreira da Silva ," Optical band-edge absorption of oxide compound SnO2" , Applied Surface Science , 252 (2006) 5361–5364 .

[11] P. K. Biswas, L. Dua, A. DE, T. Chaudhuri," Aquo- organic sol-based F doped SnO2 (Sn:F = 90:10) coatings on glass ", Materials Science-Poland, 24 (2/1) (2006) 367-374.

[12] M. Pisco, M. Consales1, R. Viter, V. Smyntyna, S. Campopiano, M. Giordano, A. Cusano and A. Cutolo," Novel SnO2 based optical sensor for detection of concentrations low in ammonia water at room temperatures", Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 8(1)(2005)

[20] Outemzabet, R., M. Doulache, and M. Trari. "Physical and photoelectrochemical properties of Sb-doped SnO2 thin films deposited by chemical vapor deposition: application to chromate reduction under solar light." Applied Physics A 119.2 (2015): 589-596.

[21] de Moure-Flores, F., et al. "Structural, optical and electrical properties of Cd-doped SnO2 thin films grown by RF reactive magnetron co-sputtering." Applied surface science 258.7 (2012): 2459-2463.

[22] Hussain, A. A., and Q. N. Abdullah. "Characterization of ZnO-SnO2 Nanostructures Prepared by Thermal Evaporation Technique as Gas Sensor." Iraqi J. Appl. Phys 19 (2023): 243-250.

[23] Rzooqi, Mohammed A., et al. "AP0976 Characterization of Nanocomposites SnO_2:Cu for Gas Sensing Applications." Iraqi Journal of Applied Physics 21.3 (2025): 310-316.