

دراسة تأثير تركيز الكاديوم على الخواص البنيوية والضوئية للزجاج الشالكوجيني ثلاثي المكونات Ge-Te-Cd

د. إياد مدور*

الملخص

يقدم هذا العمل دراسة شاملة للخواص البنيوية والضوئية لأغشية محضرة من المركب الشالكوجيني $GeTe_{2-x}Cd_x$ حيث $(x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1)$ باستخدام طريقة التبخير الحراري. جرى تحضير المركبات المدروسة بطريقة الصهر المباشر لها في الخلاء، ومن ثم الاسقاء في ماء ثلجي. أجري فحص أولي للعينات المدروسة باستخدام تقنية الأشعة السينية، حيث أظهرت النتائج أن هذه العينات تمتلك بنى متعددة التبلور. أظهرت نتائج دراسة طبوغرافية السطح للأغشية المحضرة تشكل حبيبات ذات أقطار متزايدة، ويزداد قطر هذه الحبيبات بازدياد تركيز الكاديوم.

دُرِس طيف النفاذية وحُدِد عرض المجال المحظور لجميع العينات في المجال $(400-1500) \text{ nm}$ ، وتبين أن عرض المجال المحظور يزداد بازدياد تركيز الكاديوم. كما وحسبت طاقة أيرباخ ولوحظ تناقصاً في قيمها، وفسر ذلك بازدياد البنية البلورية للعينات المدروسة. حُدِدت أيضاً قرينة الانكسار، ومعامل التخماد، والجزء الحقيقي والتخيلي لثابت العزل.

الكلمات المفتاحية: مركب شالكوجيني، فجوة طاقة، قطر الحبيبات، طاقة أيرباخ، قرينة الانكسار، معامل التخماد.

* قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة دمشق.

Investigation of the Cd concentration upon the structure and optical properties of the Ge-Te-Cd chalcogenide thin films

Dr. Iad Mdawar*

Abstract

This work presents a comprehensive study of the structural and optical properties of thin films prepared from chalcogenide composition $GeTe_{2-x}Cd_x$ where ($x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$) by using method of thermal evaporation. Compounds were prepared in a direct melting method and then removed in ice water. A preliminary examination of samples doing by XRD diffractions, These samples have a poly crystalline structure. The results of topography study of prepared films showed that grains with increasing diameter were increased and the diameter of these grains increased with increasing cadmium concentration.

The transmission spectra was studied and the width of band gap for all samples determined in the rang (400-1500nm). The width of band gab was increase by increasing the concentration of cadmium, and the Urbach Energy was calculated and a decrease in its values was observed, this was explained by the increase of crystalline structure of studied samples. The refractive index is also determined, and The coefficient of extension, and the real and imaginary part of the dielectric constant.

Key words: Chalcogenide Composition, Energy gap, Ureabach Energy, Refractive index, Extinction index.

* Department of physics, Faculty of Science, University of Damascus, Syria.

مقدمة:

تعد المواد الشالكوجينية الزجاجية (ChG,s)، ذات أهمية كبيرة من وجهتي نظر الفيزياء ولتقانة التطبيقية، حيث يمكن استخدامها في الأجهزة الكهروضوئية (التصوير الضوئي، الخلايا الشمسية، الألياف البصرية) والذاكر بنوعها الكهربائي والضوئي (DVD)، PRAM، وفي تصنيع بعض أنواع الترانزستورات (TFT)، ومداخل الأقلام الرقيقة، وتطبيقات كثيرة أخرى. لذلك تم مؤخراً توجيه الاهتمام بشكل كبير لدراسة الخواص الفيزيائية والكهربائية والضوئية والحرارية لهذه المواد. كما تجمع هذه المواد بين خواص المواد الزجاجية والمواد نصف الناقلة البلورية [1-2].

تستخدم (ChG,s) Ge-Te الغنية بعنصر التيلوريوم كمادة تسجيل بيانات على أقراص تغيرات الأطوار ضوئياً (recording materials in the phase change optical discs) [3]. كما وأنه من بين التنوع الهائل للمواد الشالكوجينية الزجاجية تأتي المواد التي أساسها Te في طليعة المواد التي تم الاهتمام بها في تطبيقات ذواكر التحولات الطورية (PCMs) المبنية على خاصية القدح الكهربائي أو الضوئي بين الحالتين الأمورفية والبلورية. إضافة لذلك تستخدم الجملة Ge-Te كنموذج للكثير من السبائك المستخدمة في الصناعة. بالرغم من أن الجمل الثنائية الغنية بالTe تبدي مقاومة عالية وقساوة أعلى وجودة في الخواص الكهربائية والضوئية [4,5]، ولكن تبقى الجمل الثنائية لها بعض المعوقات التي تحد من تطبيقاتها. لذلك فإن إضافة مكون ثالث لمصفوفة التيلوريوم يمكن أن يؤدي إلى تغيرات ملحوظة في معظم خواصها، وبالتالي إن إضافة عنصر Cd إلى الجملة Ge-Te يمكن أن يغير مجال التشكل الزجاجي له، وربما يشكل عشوائية مرغوبة في تركيبه وترتيبه تؤدي بدورها لإحداث تغير كبير في الخواص البنيوية والالكترونية والفيزيائية والضوئية والحرارية [6-7].

طيف الامتصاص الضوئي:

يحتوي طيف حافة الامتصاص الضوئي لنصف الناقل الامورفي ثلاث مناطق مختلفة [8]:
منطقة الامتصاص العالية: $\alpha \geq 10^4 \text{ cm}^{-1}$ والتي توافق الانتقال الضوئي بين حزمة التكافؤ وحزمة الناقلية والذي يكافئ عرض الفجوة الطاقية ويعطى معامل الامتصاص في هذه المنطقة بعلاقة Tauc:

$$\alpha(h\nu) = B(h\nu - E_g)^P \dots \dots \dots (1)$$

حيث E_g عرض الفجوة الطاقية، B ثابت يتعلق بذيل الحزمة، $P=1/2$ من أجل الانتقالات المباشرة المسموحة، $P=2/3$ من أجل الانتقالات المباشرة الممنوعة، $P=2$ من أجل الانتقالات المسموحة غير المباشرة، $P=3$ من أجل الانتقالات الممنوعة غير المباشرة.
المنطقة الأسية: ($10^2 \geq \alpha \geq 10^4 \text{ cm}^{-1}$) التي تسمى منطقة الذيل الأسى لأورباخ ويكون فيها معامل الامتصاص تابعاً أسياً لطاقة الفوتون [9]، ويعطى بالعلاقة:

$$\alpha(h\nu) = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_u}\right) \dots \dots \dots (2)$$

حيث α_0 ثابت، E_u عرض ذيل الحزمة للحالات المتموضعة، حيث أن الامتصاص في هذه المنطقة يحدث بسبب الانتقالات بين الحزم الممتدة في إحدى العصابات والحالات المتموضعة في الذيل الأسى للعصابة الأخرى [10]. بأخذ لوغارتم طرفي العلاقة ورسم تغيرات $\ln(\alpha \cdot h\nu)$ بدلالة $h\nu$ ، نجد أن مقلوب الميل أو عرض الحافة الأسية E_u يشير إلى عرض ذيل الحزمة الأكثر امتداداً، وغالباً ما يسمى طاقة أورباخ. مثل هذه الحافة

يشير عادة إلى الحالات المتموضعة عند حواف الحزمة، بمعنى آخر إن طاقة أورباخ تحدد بواسطة درجة العشوائية أو العيوب البنيوية في مادة نصف الناقل [11].

المنطقة الطيفية: $\alpha \leq 10^2 \text{ cm}^{-1}$ وهي منطقة امتصاص الطاقة المنخفضة وتنتج من العيوب والشوائب وتعزى هذه المنطقة إلى حدوث انتقالات في داخل الحزم في المستويات الذيلية.

2-1 مواد البحث وطرائقه:

تحضير العينات:

تم تحضير خلائط الجملية $\text{GeTe}_{2-x}\text{Cd}_x$ على شكل قطع (5gr)، بطريقة الصهر المباشر لها في الخلاء، حيث تم أخذ مواد خام ذات نقاوة عالية هي (Ge, Te, Cd,) (purity 99.99 %)، وزن كل منها بواسطة ميزان حساس بدقة 10^{-4} gr ، ثم وضعت في أنبوب من الكوارتز. وبعدها تم لحم الأنبوب تحت ضغط منخفض (10^{-3} pa) ومن ثم سخنت العينات حتى الدرجة 950°C ولمدة 12 ساعة مع التحريك المنتظم للحصول على أفضل تجانس ممكن ثم اسقائها في مزيج من الماء الثلجي melt quenching (technique) [12]. أخرجت بعد ذلك العينات وطحنت بواسطة مطحنة سيراميكية للحصول على العينات بشكل مسحوق. حيث تم تحضير العينات في مختبرات قسم الفيزياء بجامعة دمشق.

تحضير الأغشية الرقيقة:

أُستخدمت منظومة التغطية عالية الخلاء JSM200-JO3، تحت الضغط 10^{-5} mbar وبمعدل ترسيب ($7-10 \text{ A}^\circ \text{s}^{-1}$) لتحضير خمسة أغشية رقيقة للمركب $\text{GeTe}_{2-x}\text{Cd}_x$ حيث ($x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$)، وبسماكة (500nm)، وجرى قياس سماكة الأغشية المحضرة باستخدام بلورة من الكوارتز من النوع CT200 موجودة ضمن حجرة التبخير.

2-2 الأجهزة المستخدمة وطريقة القياس:

التوصيف البنيوي: جرت عملية التوصيف البنيوي بتقانة انعراج الأشعة السينية (XRD) باستخدام جهاز انعراج الأشعة السينية المبينة من نوع (Ital products ADP 200 diffractometer) وضمن الشروط المبينة بالجدول (1)، وبمجهر القوة الذرية (AFM) طراز (easy scan 2 Flex AFM) صنع سويسرا وفق طريقة النقر (Tapping-mode).

الجدول (1) شروط قياس طيف الـ XRD للعينات المدروسة

1.54060	$\dots (A^\circ) K_{\alpha 1}$
Cu	Tube anode
0.020	Scan step size
0.500 second	Scan step time
5-90	Scan range
Continuous	Scan type

2- التوصيف الضوئي: استخدم مقياس الطيف (UV-Vis spectrometer carry 5000)

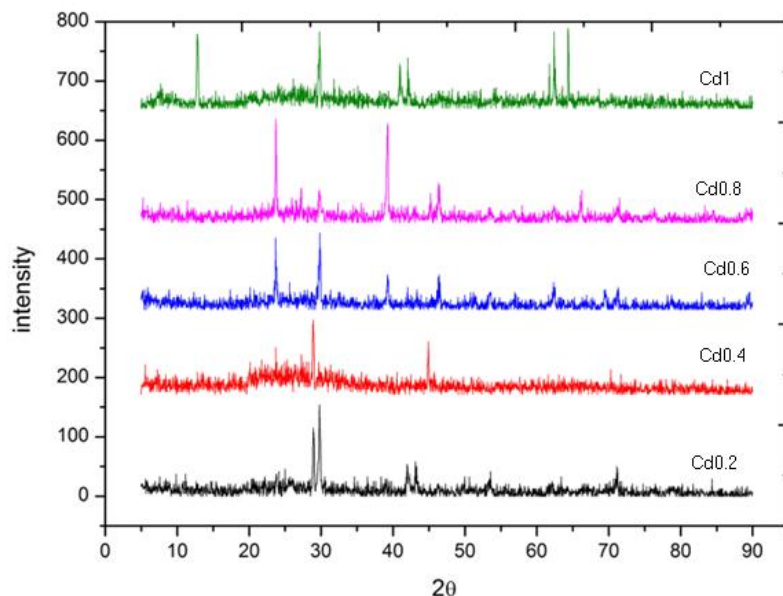
لتسجيل أطياف النفاذية كتابع للطول الموجي ضمن المجال (400-1500nm).

نتائج الدراسة البنيوية:

دراسة طيف الـ XRD:

إن الجمل الزجاجية التي أساسها التيليريوم هي صعبة التشكل بالطور الزجاجي (مقارنة مع الجمل الزجاجية التي أساسها السيلينيوم). لتحري تفاصيل ونتائج إضافة عنصر

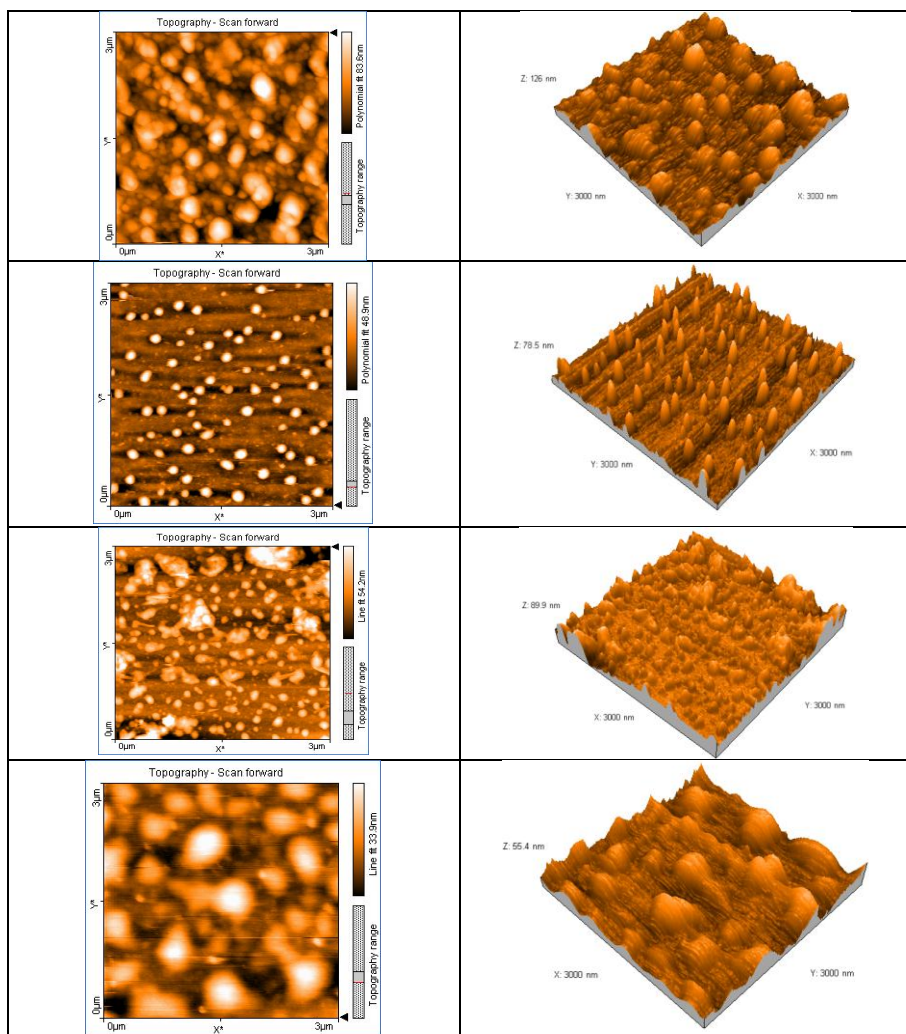
الكادميوم Cd للشبكة البنيوية للنظام الشالكوجيني $GeTe_{2-x}Cd_x$ جرى في البداية، وبواسطة تقنية XRD، فحص أولي للعينات المدروسة. يُظهر الشكل (1) طيف XRD للعينات المدروسة أنها متعددة التبلور (polycrystalline).



الشكل (1) طيف XRD للعينات المحضرة

نتائج التصوير الضوئي بمجهر القوة الذرية:

تم أخذ صور ثنائية وثلاثية الأبعاد للأغشية المحضرة للمركب $(GeTe_{2-x}Cd_x)$ كما هو موضح بالشكل (2)، حيث سماكة العينات $d=500nm$



الشكل (2) صور AFM للعينات المحضرة

وبين الجدول (2) تغير أقطار وارتفاع الحبيبات المقاسة بواسطة مجهر القوة الذرية بتغير التركيب وعرض المجال المحظور. نلاحظ من الجدول (2) والشكل (2) ظهور حبيبات تتغير أقطارها وارتفاعاتها بحسب تغير التركيب. من أجل العينة ذات التركيز $x=0.6$ لعنصر الكاديوم لم تظهر صورة واضحة للحبيبات في مجهر القوة الذرية بسبب عدم تغيير القوة الضوئية للمجهر.

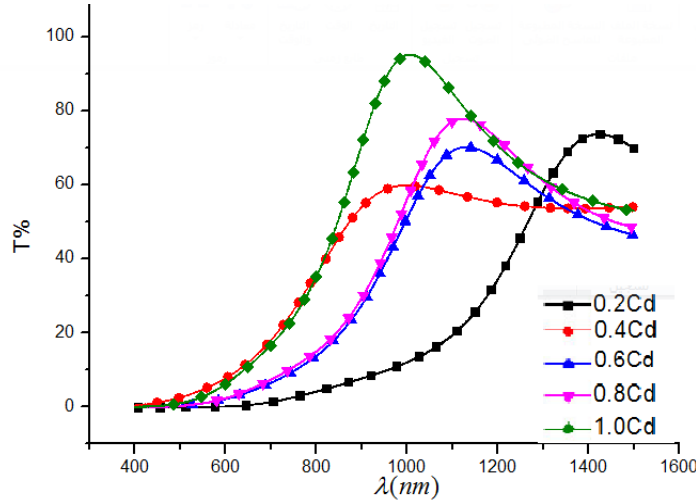
الجدول (2) قيم أقطار الحبيبات المقاسة

Composition التركيب	(2r)nm قطر الحبيبة	H _m (nm) الارتفاع الوسطي للحبيبة
GeTe _{1.8} Cd _{0.2}	163	23
GeTe _{1.6} Cd _{0.4}	-	-
GeTe _{1.4} Cd _{0.6}	250	40
GeTe _{1.2} Cd _{0.8}	500	20
GeTeCd	200	37

نتائج الدراسة الضوئية:

طيف النفوذية: سجلت عدة قياسات لنفوذية أغشية التركيب $\text{Ge Te}_{2-x}\text{Cd}_x$ ضمن شروط الورود الناظمي، يبين الشكل (3) طيف نفوذية العينات ضمن المجال (400-1600)nm

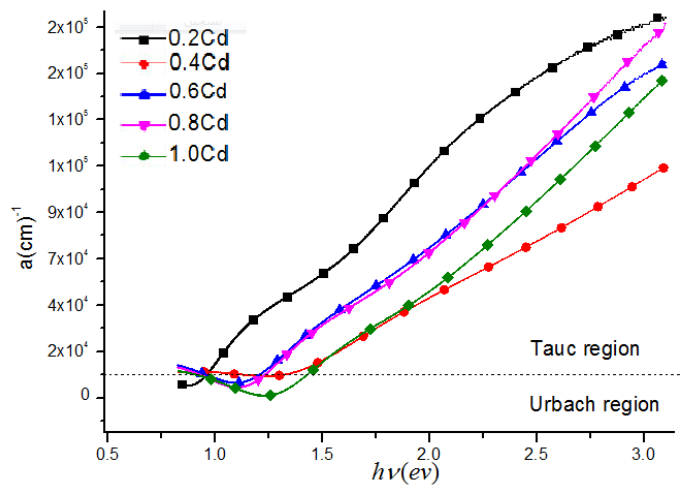
والذي يتضح منه أن هذه الأفلام لها نفوذية عالية في المجال الطيفي من 800 حتى 1400 nm تتراوح قيمتها الوسطية بين 60% حتى 97%.



الشكل (3) تابعة النفاذية بالنسبة للطول الموجي

تحديد الثوابت الضوئية:

حافة امتصاص الأطوال الموجية القصيرة: يظهر الشكل (4) تابعة معامل الامتصاص بالنسبة لطاقة الفوتون الوارد عند الأطوال الموجية القصيرة للأغشية المدروسة. يلاحظ أنه بالإضافة المتزايدة لـ Cd يحدث انزياح حافة النفوذية الضوئية باتجاه الأطوال الموجية الموجية الأقل شدة، والذي نتج عن تابعة فجوة الطاقة للتركيب المدروس، حيث أن إضافة الكاديوم تؤدي إلى ازدياد عرض المجال المحظور. هذه الزيادة يمكن تفسيرها بما يسمى ازاحة (Bureshtain-Moss Shift) وذلك لأن المستويات القريبة من حزمة الناقلية تكون ممثلة بالالكترونات، لذلك فإن الالكترونات تحتاج لطاقة أكبر للانتقال فيبدو وكأن فجوة الطاقة تزداد [13].



الشكل (4) تابعة معامل الامتصاص لطاقة الفوتون الوارد

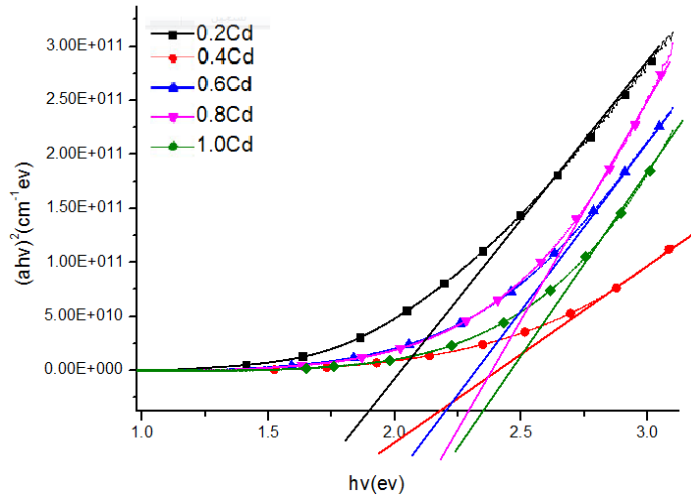
عرض المجال المحظور:

يرسم تابعة $\alpha = f(h\nu)$ لكل غشاء مدروس، وحسب الشكل (4)، يمكننا تقسيمه لمنطقتين:

- منطقة القيم المرتفعة لمعامل الامتصاص: حيث $\alpha(h\nu) \geq 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ، والعائدة للانتقالات بين الحالات الممتدة في كل من عصابتي التكافؤ والناقلية. يبين الشكل (5) تابعة مربع معامل الامتصاص $(\alpha h\nu)^2$ لطاقة الفوتون الوارد $(h\nu)$ على الأغشية المدروسة. إن القيم العالية لمعامل الامتصاص تقدم دليلاً على أن الانتقالات في الفجوة الطاقية هي من النوع المباشر [14]. من أجل كل تركيب مدروس تم حساب عرض الفجوة الطاقية بالموائمة الخطية في منطقة الطاقات العالية للجزء الأكثر استقامة من المنحني. إن قيم عرض المجال المحظور هي نقطة تقاطع امتداد الجزء المستقيم لهذا المنحني مع

المحور ($h\nu$). والنتائج مبينة في الجدول (3) والشكل (5). نلاحظ تزايداً في قيم عرض المجال المحظور مع زيادة نسبة الكاديوم.

- منطقة القيم المنخفضة لمعامل الامتصاص: حيث $\alpha(h\nu) < 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ، والعائدة للانتقالات بين الحالات الممتدة في إحدى العصابات الطاقية والحالات المتموضعة في الذيل الأسّي للحزمة الأخرى. إن عرض ذيل الحزمة E_u (طاقة أورباخ) يمكن حسابه بأخذ لوغارتم طرفي العلاقة (2)، ورسم $\ln(a)$ بدلالة $h\nu$ حيث قيم E_u مبينة بالجدول (3). نلاحظ تناقصاً في قيم E_u وهذا مرده لزيادة تبلور العينات المدروسة، فيما عدا قيمة E_u من أجل $x=0.2$ ويمكن تفسير ذلك بازدياد حالة الفوضى والعشوائية أي أن ذرات الكاديوم Cd يمكن أن تدخل لمراكز الشبكة المضيفة GeTe_2 منتجة روابط لا جسرية تؤدي إلى مزيد من اللاتوازن والعشوائية في بنيتها [15].



الشكل (5) تابعة مربع معامل الامتصاص بالنسبة لطاقة الفوتون الوارد

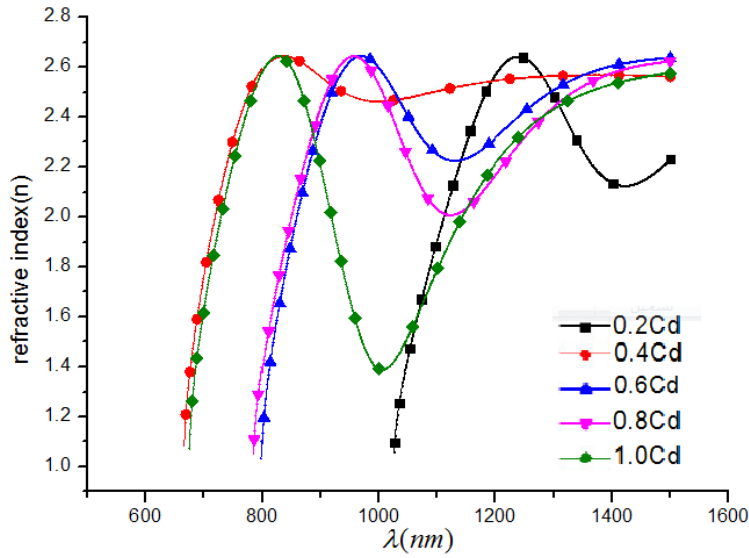
الجدول (3) قيم E_u ، E_g للعينات المحضرة

Composition	At % C d	E_g (ev)	E_u (ev)
GeTe _{1.8} Cd _{0.2}	6.67	1.89	0.11
GeTe _{1.6} Cd _{0.4}	13.33	2.17	0
GeTe _{1.4} Cd _{0.6}	20.00	2.19	0.21
GeTe _{1.2} Cd _{0.8}	26.67	2.29	0.13
GeTeCd	33.34	2.34	0.07

قرينة الانكسار: تمت دراسة تابعة قرينة الانكسار للأطوال الموجية ضمن المجال 500-1500nm، اعتماداً على العلاقة [16]:

$$n = [4R/(R-1)^2 - K^2]^{1/2} - (R+1)/(R-1).....(3)$$

يبين الشكل (6) تابعة $n=f(\lambda)$ لمختلف التراكيب المدروسة، حيث يتضح من هذا الشكل أن قرينة الانكسار تزداد بازدياد طول موجة الضوء الوارد.

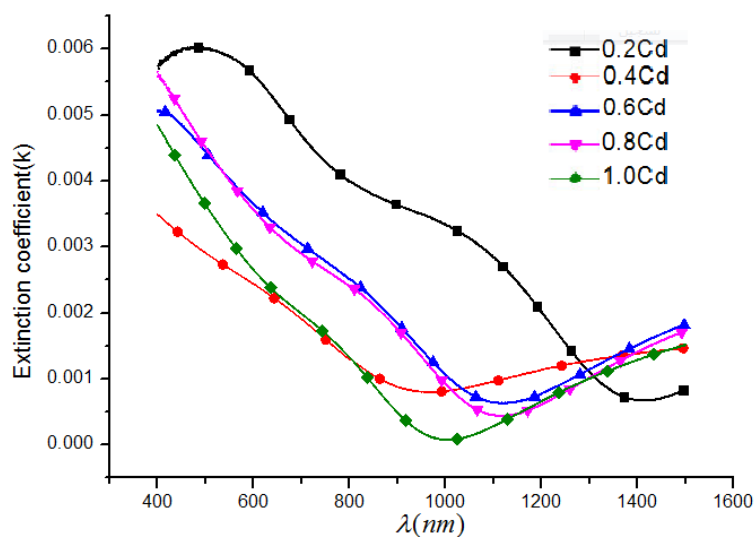


الشكل (6) تابعة قرينة الانكسار بالنسبة للطول الموجي

معامل التخماد: يبين الشكل (7) تغيرات معامل التخماد المحسوب من العلاقة [17]:

$$k = a \cdot \lambda / 4\pi \dots \dots (4)$$

بدلالة طول موجة الضوء الوارد على الأغشية المدروسة، يتضح من الشكل تناقص معامل التخماد بزيادة الطول الموجي حتى القيمة 1000nm، ويعود ذلك للقيمة الكبيرة لمعامل الامتصاص في هذا المجال من الأطوال الموجية. كما يوضح الشكل أيضاً تناقص معامل التخماد بزيادة تركيز الـ Cd في العينات، ويؤدي معامل التخماد سلوكاً مماثلاً لمعامل الامتصاص.



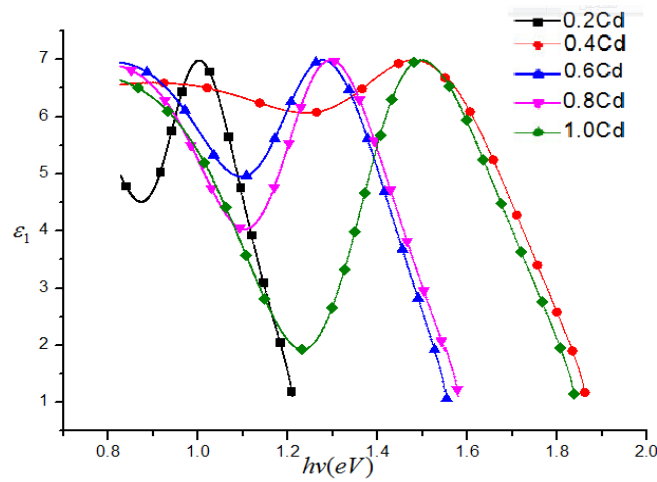
الشكل (7) تغيرات معامل التخماد مع الطول الموجي

ثابت العازلية: يظهر الشكل (8) والشكل (9) تغير كل من القسم الحقيقي (ϵ_1)، والتخيلي (ϵ_2) لثابت العازلية بتغير طول موجة الضوء الوارد [18]. فقد تم حسابهما من العلاقات:

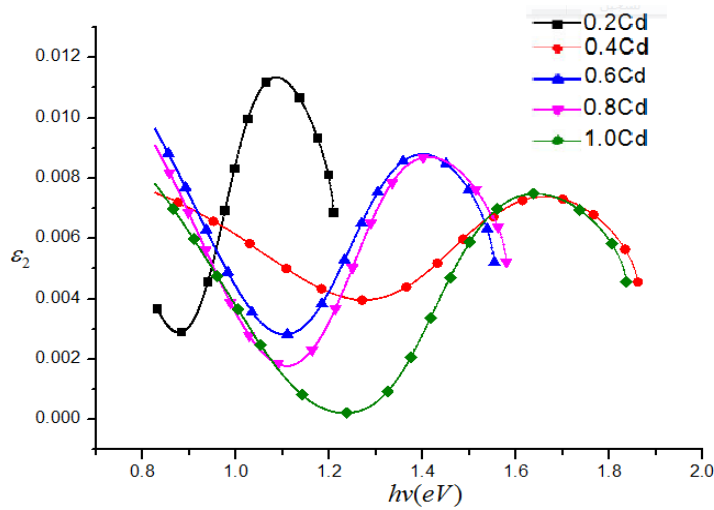
$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \dots\dots\dots(5)$$

$$\epsilon_2 = 2nk \dots\dots\dots(6)$$

نلاحظ من الشكل المذكور أن ϵ_1 و ϵ_2 لهما نفس سلوك n و k على التوالي.



الشكل (8) تغيرات القسم الحقيقي لثابت العزل مع طاقة الفوتون الوارد

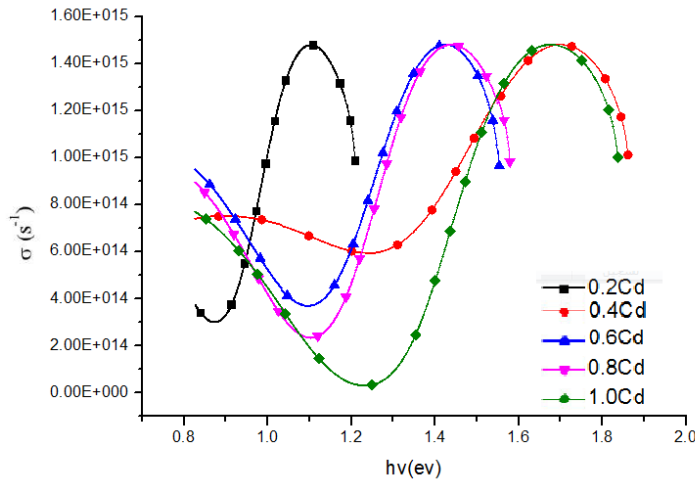


الشكل (9) تغيرات القسم التخيلي لثابت العزل مع طاقة الفوتون الوارد.

الناقلية الضوئية: حسب الناقلية الضوئية (والتي أبعادها أبعاد تردد) لمادة الأغشية المدروسة باستخدام العلاقة [19]:

$$\sigma = \frac{\alpha n c}{4\pi} \dots\dots\dots (7)$$

حيث α معامل الامتصاص، n قرينة الانكسار، c سرعة الضوء في الخلاء. تعتمد الناقلية الضوئية اعتماداً مباشراً على معامل الامتصاص وقرينة الانكسار. يظهر الشكل (10) أن الناقلية الضوئية ازدادت بحدّة عند القيم العالية للطاقة، وهذه الحدة تعود للقيم التي تمتلكها قرينة الانكسار ومعامل الإمتصاص في هذا المجال الطاقى. نلاحظ أيضاً تناقصاً في قيم الناقلية الضوئية بازدياد نسبة الكاديوم ويمكن تفسير ذلك بالاعتماد على (نموذج كثافة الحالات) حيث أنه بازدياد فجوة الطاقة تتناقص الناقلية الضوئية [20].



الشكل (10) تغيرات الناقلية الضوئية كنسبة لطاقة الفوتون الواردة

الاستنتاجات:

- 1- أظهرت طيوف الـ XRD أن زيادة تركيز عنصر الكاديوم في التركيب المدروس يؤدي إلى زيادة البلورة.
- 2- من أجل التركيز 0.4 وكما هو واضح من أطيف الـ XRD وجود طور أمورفي ولو بنسبة ضعيفة، أدى إلى عشوائية في بنية الغشاء الرقيق وبالتالي شذوذ في سلوك هذا التركيب عن باقي التراكيب المدروسة، حتى أننا لم نتمكن من أخذ صور واضحة لسطح العينة باستخدام مجهر القوة الذرية ويظهر هذا الشذوذ بشكل واضح من خلال قيم قرينة الإنكسار المحسوبة لجميع الأطياف.
- 3- يتناقص عرض المجال المحظور المحسوب في منطقة الامتصاص الضعيف لايرباخ بسبب ازدياد نسبة البلورة بزيادة تركيز الكاديوم.

References:

- [1] J. Rocca, M. Erazu, M. Fontana, B. Arcondo, (2009) J. Non-Cryst. Solids.V. 355 ,p.2068.
- [2] Abd Elnaeim, A.M., Aly, K.A., Afify,N, and A.M. Abousehilly. (2010) ,*J. Alloys Compd.* V.491,p.85.
- [3] V. Wiedenhopf, I. Friedrich, S. Ziegler, M. Wuttig, (2001). J. Applied Physics 89 (6), 3168.
- [4] J. Feinleib, J. de Neufville, S.C. Moss, S.R. Ovshinsky, Rapid Reversible Light- Induced Crystallization of Amorphous Semiconductors, *Appl. Phys. Lett.*, 18 (1971) 254.
- [5] M.M. Wakkad, E.K. Shokr, S. H. Mohamed, (2000). Optical and calorimetric studies of Ge-Sb-Se glasses, J. Non Crystalline Solids, 265.
- [6] K.S. Sangunni & E.S.R. Gopal, (2000). Determination of thermal diffusion length in bismuth doped chalcogenide glasses by Photoacoustic technique, *J Optoelect. & Advanced Materials*, 91-94.
- [7] Fadel ,M., Sedeek, K. and N.A. Hegab, . 1998. *Al Azhar Bull science* 9: 385.
- [8] Elliot. S.R. (1990). "Physics of Amorphous Materials", *Essex: Longman Group Limited*, New York .
- [9] Franz Urbach. (1953). "The Long-Wavelength Edge of Photographic Sensitivity and of the Electronic Absorption of Solids" *Physical Review*. 92: 1324–1324.
- [10] Cohen. M. H., Soukoulis. C. M., Economou. E. N., Taylor. P.C. and Bishop. S. Eds. (1984). "Optical Effects in Amorphous Semiconductors" *AIP ConJ Proc.* 120, 371.
- [11] Mott. N.F., Davis. E.A. (1979). "Electronic Processes in Non-Crystalline Materials" *Clarendon Press*, Oxford.
- [12] Wei Lu and Charles. M. L. (2006). "Semiconductor nanowires" *J.Phys. D: Appl.phys.* 39, 190.
- [13] Ferro, R., and Rodriguez, (2000) J.A."Study of Some Optical Properties of CdO:F ThinFilms",*Phys.State.Sol.(b)*,V.220, P.299.

- [14] Babkair, S.S., (2010). "Charge Transport Mechanisms and Device Parameters of CdS/CdTe Solar Cells Fabricated by Thermal Evaporation" Sci. ,Vol. 22 ,No. 1, pp 21-33.
- [15] Kotkata, M.F., El-Fouly, M.H., Fayek, S.A., El-Hakim, S.A. (1986). The effect of Tl addition on the electrical and thermal transport properties of amorphous As₂Se₃. *Semiconductor Science and Technology*. 1: 313.
- [16] Gauthier, B. (1998). Simultaneous determination of the thickness and optical constants of weakly absorbing thin films. *Measurement Science and Technology*. 9: 485–487.
- [17] Gushterova. P., Sharlandjiev. B., S. A ., Phama. M. (2005). On the determination of the optical constants Of Very Thin (L/50) Films. *Journal of Opto -electronics and Advanced Materials*. 7(1):305 – 308.
- [18] Reitter, A. M., Sreeram, A. N., Varshneya, A. K., Suiler, D. R. (1992). Modified preparation procedure for laboratory melting of multicomponent chalcogenide glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 139: 121.
- [19] Wemple, S. H., and DiDomenico, M. M. (1971). *Physical Review*. 3: 1338-1351.
- [20] Tintu, R., Sulakhna, K., Saurav, K. V. Nampoori, P. N., Radhakrishnan, P., and Sheenu Thomas. (2010). Ge₂₈Se₆₀Sb₁₂/PVA Composite Films For Photonic Application. *Journal of Non-Oxide Glasses*. 2: 167-174.