

تحضير أفلام رقيقة من الجرمانيوم بسماكات مختلفة وتعيين بعض خصائصها البنيوية والضوئية

علي عبدالله*، رياض عبدالله**، أيمن كسيبي**

ملخص البحث

تم في هذا البحث تحضير أفلام رقيقة من الجرمانيوم بالاعتماد على تقانة التبخير الحراري في الخلاء (10^{-5} mbar)، تم التأكد من بنية الأفلام المحضرة باستخدام تقنية (XRD) أظهرت النتائج أن الأفلام المحضرة كانت من النمط غير البلوري وعند معالجتها حرارياً تتحول الى النمط البلوري المكعبي متمركز الوجوه (FCC) بثابت شبكة قدره (5.649 \AA).

تم معاينة سطح الأفلام المحضرة باستخدام مجهر القوة الذرية (AFM) والذي يعطي صور ثنائية (2D) وثلاثية الأبعاد (3D) لسطح الأفلام الرقيقة وتبين أن نمو البلورات في الأفلام المتبلورة يتجه نحو الأعلى. أما الأفلام غير البلورية ظهرت خالية من التضاريس ويلاحظ غياب كامل للقمم فيها وكان السطح متجانساً على كامل امتداد الأفلام.

تم تعيين بعض الخصائص الضوئية للأفلام المحضرة (النفوذية، الانعكاسية) وتم حساب معامل الامتصاص وطاقة عرض المجال المحظور للأفلام المحضرة بنمطها البلوري وغير البلوري وعند السماكات المختلفة.

كلمات مفتاحية: أفلام رقيقة، جرمانيوم، التبخير الحراري، فجوة الطاقة.

(* طالب ماجستير في فيزياء المادة الكثيفة - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة البعث - حمص - سوريا.

(** أستاذ في قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة البعث - حمص - سوريا.

Preparation of germanium thin films with different thicknesses and study of their structural and optical properties

Ali Abdullah*, Reiad Al-Abdallah **, Ayman Ksibe **

Abstract

In this research, thin films of germanium were prepared based on the vacuum thermal evaporation technique (10^{-5} mbar).

The structure of the prepared films was confirmed using (XRD) technique, which showed that the prepared films were of a non-crystalline type and when heat treated they turn into a face-centered cubic crystal (FCC), with a network constant of (5.649 Å).

The surface of the prepared films was previewed using atomic force microscope (AFM) which gives 2D and 3D images of the surface of the thin films and it was found that the crystal growth in the crystallized films is upwards. As for the non-crystalline films, they appeared free of topography and a complete absence of peaks was observed, and the surface was homogeneous over the entire length of the films.

The optical properties of the prepared films (transmittance, reflectance) were studied, through which the absorption coefficient was calculated and the energy gap of the prepared films with their crystalline and non-crystalline patterns at different thicknesses was found.

Keywords: thin films, germanium, thermal evaporation, energy gap.

*) Ms Student, Department of Physics-Faculty of science-Al-baath university Homs-Syria.

***) professor of Physics, Department of Physics -Faculty of science- Al-baath university Homs-Syria.

1- مقدمة:

تعتمد أغلب الأجهزة الإلكترونية الحديثة في عملها على مواد ذات خصائص فيزيائية مميزة ألا وهي المواد نصف الناقلية (Semiconductor) التي تملك خصائص المواد العازلة عند درجات الحرارة المنخفضة، كما لها القدرة على النقل الكهربائي عند ارتفاع درجة حرارتها إلى حد معين [1].

نتيجة لتلك الخصائص الهامة بدأت العديد من المؤسسات العلمية أبحاثاً موسعة للتعرف على الخصائص البنيوية والضوئية وكذلك الكهربائية لهذه المواد وإمكانية الاستفادة القصوى منها عملياً، حيث أثمرت هذه الأبحاث عن تصنيع المقاومات الكهربائية بأنواعها المختلفة (الضوئية والحرارية) بدءاً من عام 1886 ومن ثم صناعة الديودات والترانزستورات عام 1964 ومن ثم الخلايا الشمسية والدارات الإلكترونية المتكاملة [2].

لا شك أن صناعة الترانزستور (أساس الدارات المتكاملة) خلقت ثورة علمية وصناعية في مجال صناعة الدارات الإلكترونية فقد أمكن تصغير حجمها مئات المرات (بل تصل إلى ملايين المرات كما في المعالجات الرقمية والحاسوبية) وزيادة كفاءتها وخفض تكلفتها، والجدير بالذكر أن أول ترانزستور تمت صناعته بالاعتماد على الخصائص نصف الناقلية لعنصر الجرمانيوم (Ge) عام (1947) من قبل العلماء (J. Bardeen, W. H. Brattain, W. B. Shockley) [3,4]، ومع العلم أن كلاً من الجرمانيوم والسيليكون ينتميان إلى العمود الرابع من الجدول الدوري وخصائصهما متقاربة إلا أن مادة السيليكون قد هيمنت على إنتاج الترانزستورات والدارات المتكاملة وذلك بسبب رخص ثمنها وتوافرها بكميات كبيرة [5].

لم تتوقف الثورة التقنية مجال صناعة الدارات الإلكترونية على استخدام أنصاف النواقل بصورتها المعروفة، بل تعدتها بكثير (وذلك بالاعتماد على نتائج الأبحاث العلمية) حتى وصلت لصناعة طبقات رقيقة من هذه المواد (أطلق عليها اسم الأفلام الرقيقة)

ذات فعالية كبيرة وخصائص متميزة تفوق خصائص مادتها الأصلية بشكلها الأولي [6].

تعرف الأفلام الرقيقة على أنها عبارة عن مواد كيميائية تحضر على هيئة طبقة أو عدة طبقات من ذرات المادة (أو جزيئاتها) لا تتعدى سماكتها $(1\mu\text{m})$ [7,8] إذ ترسب هذه الأفلام على مواد صلبة تعرف بالركائز، وتعتبر تقنية الأفلام الرقيقة واحدة من أهم التقنيات التي ساهمت وبشكل كبير في تطوير دراسة أنصاف النواقل كما تعددت إستخداماتها وتطبيقاتها، حيث سيطرت على أغلب الميادين العلمية والصناعية نذكر منها: الإلكترونيات، الضوئيات، الطلاء... [9].

حضرت الأفلام الرقيقة من مواد كيميائية مختلفة بعضها أنصاف نواقل بغرض استخداماتها الصناعية، ويعد الجرمانيوم (Ge) أهم هذه المواد بل كان أساسها ودراسته بشكل مفصل فتحت الباب على مصراعيه لدراسة أنصاف نواقل أخرى.

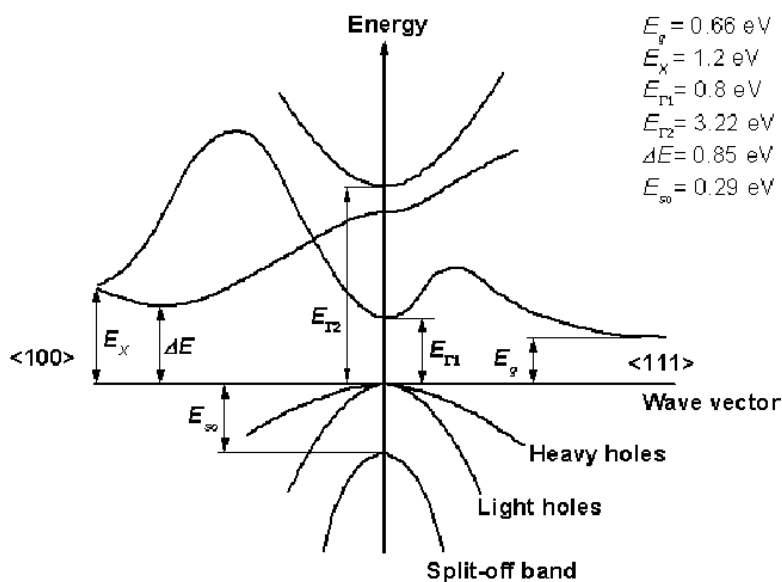
الجرمانيوم (Ge) عنصر كيميائي من المجموعة الرابعة في جدول مندلييف الدوري، ووزنه الذري $(72.61\text{ gr.mol}^{-1})$ وعدده الذري (32) وهو صلب في حالته الطبيعية وينصهر عند الدرجة $(958.5\text{ }^\circ\text{C})$.

يمتلك الجرمانيوم البلوري بنية بلورية مكعبية متمركزة الوجوه (FCC) ثابتها يأخذ القيمة $(a=5.657\text{ \AA})$ وتشغل ذرات الجرمانيوم رؤوس المكعب ومراكز الوجوه فيه.

ونظراً للخصائص الضوئية الهامة التي تبديها أفلام الجرمانيوم فقد تم استخدامها بكثرة في صناعة الكواشف الضوئية وخاصة الاشعاعية منها. حيث يمثل كاشف الجرمانيوم عالي النقاوة الأساس في تقنيات التحليل بأشعة غاما ولحد الآن لازال هذا الكاشف الأفضل من نوعه والأكثر حساسية [10].

ويبين الشكل التالي بنية نموذجية للعصابات الطاقية في الجرمانيوم حيث يلاحظ وجود نهاية صغرى لعصابة الناقلية لا تقع فوق قمة عصابة التكافؤ مباشرة، مما يعبر عن الجرمانيوم بأنه نصف ناقل غير مباشر.

يوافق هذا الوضع انتقالات الكترونية لا مباشرة تحدد الامتصاص أو الاصدار الأكثر احتمالاً، وفي هذه الحالة يكون عرض الفجوة الطاقية ($0.6 \text{ eV} \leq E_{gi} \leq 0.8 \text{ eV}$) في حين أننا نلاحظ وجود قاع آخر في عصابة الناقلية يقع مباشرة فوق قمة عصابة التكافؤ مما يشير الى وجود فجوة طاقية مباشرة $0.8 \text{ eV} \leq E_{gd}$ [11].



الشكل (1) المخطط الطاقى للجرمانيوم

2- هدف البحث:

يهدف البحث لتحضير أفلام الجرمانيوم البلورية وغير البلورية بسماكات مختلفة، بالاعتماد على تقنية التبخير الحراري تحت الضغط المنخفض.

تعيين بعض الخصائص البنيوية والضوئية لأفلام الجرمانيوم المحضرة وبيان تأثير سماكة الفلم المحضر والمعالجة الحرارية على خصائص هذه الأفلام ومقارنة النتائج مع الدراسات المرجعية السابقة.

3- الإجراء التجريبي والتوصيف:

1.3. تحضير الأفلام:

تم ترسيب أفلام رقيقة من الجرمانيوم عالي النقاوة (99.99%) على ركائز زجاجية نظيفة تماماً ذات أبعاد (2cmx4cm) باستخدام منظومة التبخير الحراري في الخلاء تحت ضغط مخفف قدره (10^{-5} mbar) المتواجدة لدى هيئة الطاقة الذرية في دمشق.

توضع كمية من الجرمانيوم النقي في بوتقة خاصة من التنغستن يمر من خلالها تيار كهربائي فتبدأ حرارتها بالارتفاع ويبدأ الجرمانيوم بالتبخر ويترسب على الركيزة الزجاجية التي تبعد عن البوتقة مسافة (12 cm).

تتغير كمية الجرمانيوم وزمن التسخين وشدة التيار تبعاً لسماكة الأفلام المطلوبة.

بعد انتهاء عملية الترسيب نحصل على أفلام الجرمانيوم الرقيقة غير البلورية، ولتحويلها الى بلورية فقد تم معالجتها حرارياً بدرجات حرارة مختلفة لمدة (30) دقيقة حيث لوحظ أنها تحتفظ بطورها اللامتبلور حتى الدرجة (500°C) وكانت درجة الحرارة التي يتحول عندها الفلم اللامتبلور الى فلم متبلور هي (525°C).

2.3. توصيف الأفلام المحضرة:

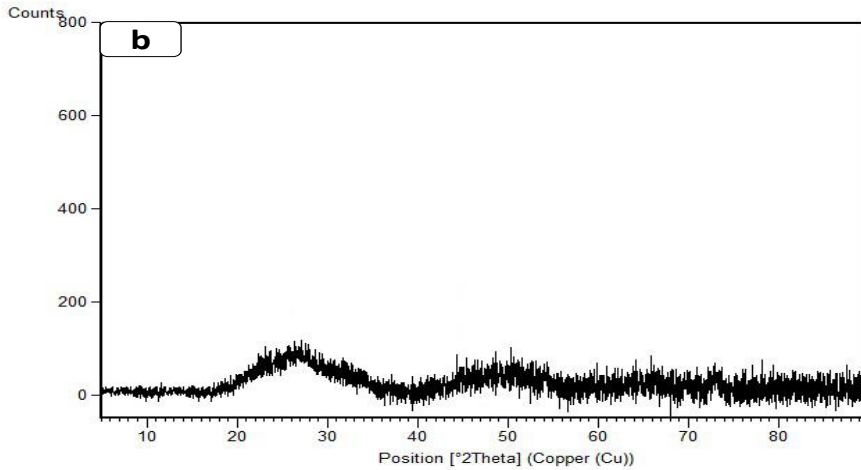
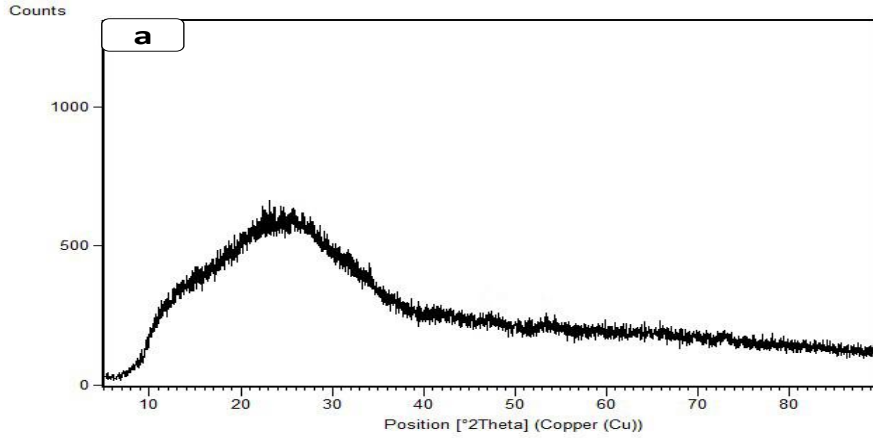
تم استخدام جهاز انعراج الأشعة السينية (XRD) من انتاج شركة (STOE) الألمانية المتواجد لدى هيئة الطاقة الذرية لدراسة الخصائص البنيوية للأفلام المحضرة ضمن مجال زوايا انعراج (2θ) (20° – 80°). أما بالنسبة لدراسة سطح الأفلام فقد استعنا بجهاز مجهر القوة الذرية (AFM) المتواجد لدى هيئة الطاقة الذرية والذي يعطي صور ثلاثية الأبعاد عالية الوضوح للطبقة السطحية من الأفلام.

استخدم جهاز المطيافية (Spectrophotometer) لقياس طيفي النفوذية والانعكاسية الضوئية من أجل تعيين بعض الخصائص الضوئية.

4- النتائج والمناقشة:

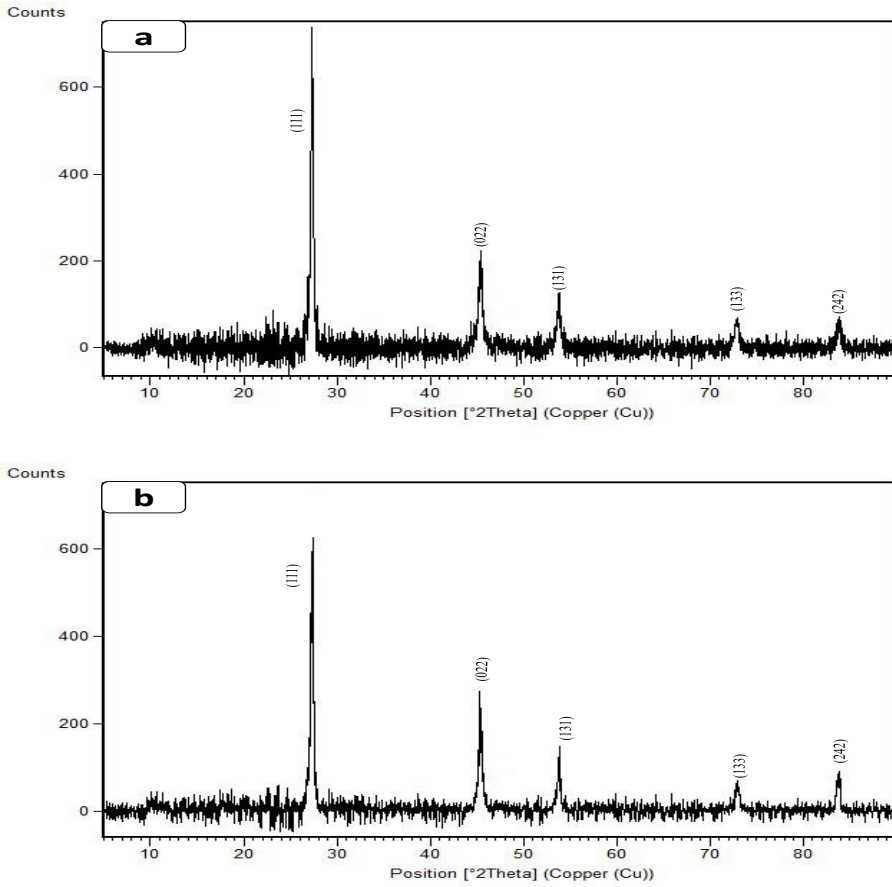
4-1- الدراسة البنوية للأفلام المحضرة باستخدام تقنية (XRD):

يبين الشكل التالي مخطط انعراج الأشعة السينية للأفلام الرقيقة قبل المعالجة الحرارية وتبدو هذه الأفلام غير متبلورة (amorphous) ويعود ظهور الهضبة في بداية الطيف للركيزة الزجاجية غير المتبلورة .



الشكل (2) أطياف (XRD) لأفلام الجرمانيوم قبل التلدين والمحضرة بسماكات مختلفة (a:400 nm, b:900 nm)

بينما يبين الشكل (3) أطياف (XRD) للأفلام المعالجة حرارياً عند الدرجة (525°C):



الشكل (3) أطياف (XRD) لأفلام الجرمانيوم بعد التلدين والمحضرة بسماكات مختلفة (a:400 nm, b:900 nm)

يلاحظ ظهور خمس قمم عائدة للجرمانيوم وفق نمط التبلور (المكعبي) وفق التوجهات البلورية [111], [022], [131], [133], [242] والتوجه البلوري السائد هو [111] وهو ما تم تأكيده بالمقارنة مع البطاقة المرجعية ذات الرقم (96-1051-901).

وبالاعتماد على نتائج مطيافية (XDR) قمنا بحساب ثوابت الشبكة البلورية بالاعتماد على قانون براغ في الانعراج وعلاقة ثوابت الشبكة البلورية بالمسافة بين المستويات البلورية [12]:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

$$a = d \sqrt{(h^2 + k^2 + l^2)}$$

$$\lambda = 1.540589 \text{ \AA}$$

رتبت النتائج وفق الجدول التالي:

الجدول (1) قيم (2θ, hkl, d, a) لأفلام الجرمانيوم المحضرة بسماكات مختلفة (400nm, 900nm)

t=400 nm				t=900 nm			
(2θ)°	(h,k,l)	d	a	(2θ)°	(h,k,l)	d	a
27.357	111	3.257	5.642	27.298	111	3.264	5.654
45.451	022	1.993	5.639	45.421	022	1.995	5.643
53.777	131	1.703	5.648	53.815	131	1.702	5.645
72.960	133	1.296	5.647	72.896	133	1.297	5.652
83.888	242	1.152	5.645	83.921	242	1.152	5.644
$\bar{a} = 5.645 \text{ \AA}$				$\bar{a} = 5.648 \text{ \AA}$			

يلاحظ من هذه النتائج التقارب الكبير بين متوسط قيم (a) بعد الشبكة البلورية للأفلام المحضرة مع القيمة الواردة في البطاقة المرجعية وهي (a=5.680 Å).

بعد ذلك قمنا بحساب حجم الحبيبات المتشكلة بالاعتماد على علاقة شيرر [13]:

$$D = \frac{K \lambda}{\beta_{FWHM} \cdot \cos(\theta)}$$

كذلك حسب كثافة الانخلاعات (δ) والتي تعرف بأنها المسافة بين خطوط الانخلاع لكل وحدة حجم من البلورة وتحسب وفق العلاقة :

$$\delta = \frac{1}{D^2}$$

أما الاجهاد الداخلي (ε) فيعرف بأنه عيب ينشأ أثناء تشكل البلورة ويكون وجوده مقترناً بوجود العيوب البلورية بأنواعها المختلفة (النقطية والسطحية والحجمية) [13] وقد تم حسابه للأفلام المحضرة بالاعتماد على العلاقة [14]:

$$\varepsilon = \beta_{FWHM} \frac{\cos(\theta)}{4}$$

حيث (K) ثابت وقيمه (0.94)، و β_{FWHM} عرض القمة عند نصف الشدة وتقاس بالراديان، و (D) أبعاد البلورات بوحدة (nm).

الجدول (2) قيم كل من أبعاد البلورات وكثافة الانخلاعات والاجهاد الداخلي لأفلام الجرمانيوم المحضرة عند سماكات مختلفة

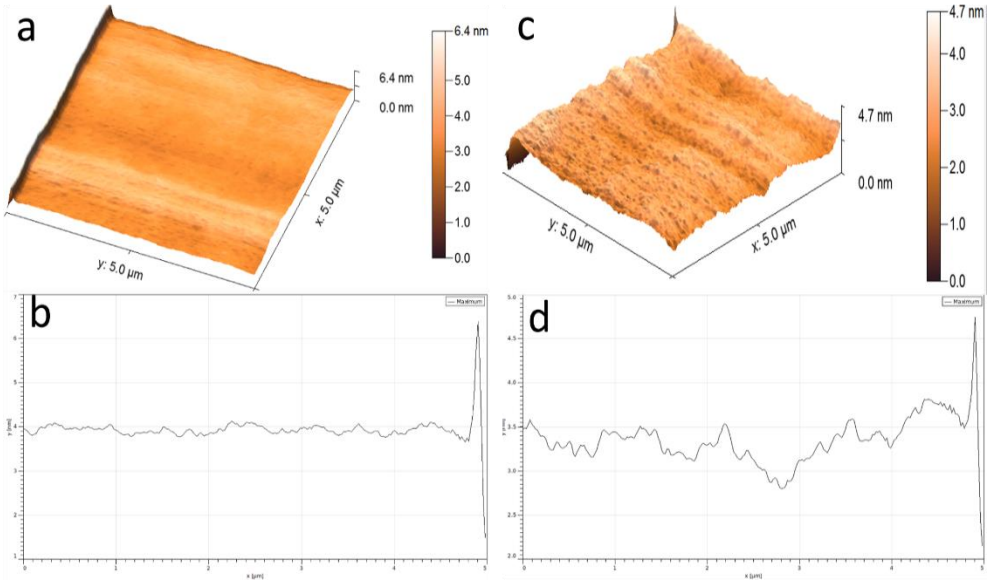
t=400nm					
83.888	72.960	53.777	45.451	27.357	2θ(°)
0.96	1.152	0.384	0.576	0.24	β_{FWHM} (°)
11.62	8.957	24.226	15.617	35.581	D (nm)
7.406	12.462	1.703	4.099	0.7898	$\delta(x10^{+15} \text{ line/m}^2)$
3.115	4.041	1.494	2.318	1.017	$\varepsilon(x10^{-3})$
t=900nm					
83.921	72.896	53.815	45.421	27.298	2θ(°)
0.958	1.148	0.379	0.569	0.237	β_{FWHM} (°)
11.647	8.985	24.55	15.807	36.027	D (nm)
7.371	12.386	1.659	4.001	0.7704	$\delta(x10^{+15} \text{ line/m}^2)$
3.108	4.029	1.474	2.29	1.005	$\varepsilon(x10^{-3})$

نلاحظ من النتائج السابقة أن أبعاد البلورات للفلم المحضر عند سماكة (900nm) أكبر من مثيلاتها للفلم المحضر عند السماكة (400nm) وهذا يدل على نمو البلورات بشكل أكبر وانخفاض العيوب المتشكلة فيها وهذا ما دل عليه انخفاض كثافة الانخلاعات والاجهاد الداخلي. الأمر الذي يتوافق مع كون (β_{400nm}) أكبر من (β_{900nm}) مما يعني أن (D_{400nm}) أصغر من (D_{900nm}) وهذا السلوك يتوافق مع علاقة شرر.

4-2- معاينة سطح أفلام الجرمانيوم المحضرة:

تم معاينة طبوغرافية سطح الأفلام المحضرة باستخدام مجهر القوة الذرية (AFM) ذو القدرة العالية على التكبير والمتواجد لدى هيئة الطاقة الذرية في دمشق، وتم اختيار مقطع سطحي من الأفلام الرقيقة بأبعاد ثابتة ($5 \times 5 \mu m$) وبسماكة سطحية تختلف تبعاً لتغير تضاريس الفلم المحضر.

الشكل التالي يبين صورة مجهر القوة الذرية لأفلام الجرمانيوم غير المتبلورة بسماكات مختلفة إضافة لمخطط المقطع الخطي الخاص بكل صورة:



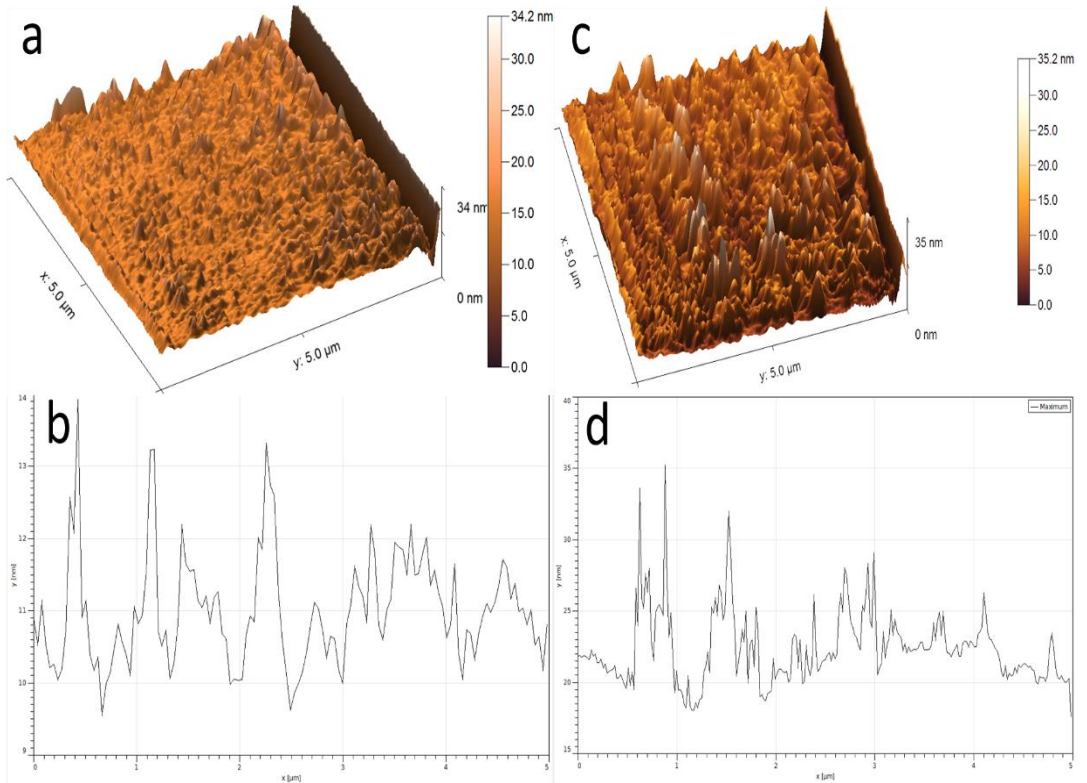
الشكل (4) صور مجهر القوة الذرية لأفلام الجرمانيوم غير البلورية المحضرة
a: سماكة 400 nm، b: البروفائل الخطي عند سماكة 400 nm، c: سماكة 900 nm،
d: البروفائل الخطي عند سماكة 900 nm

تحضير أفلام رقيقة من الجرمانيوم بسماكات مختلفة وتعيين بعض خصائصها البنيوية والضوئية

يلاحظ من الشكل السابق أن الأفلام غير المتبلورة مستوية تماماً وخالية من التضاريس ومتجانسة طبوغرافياً على كامل مساحة سطح الفلم. وهذا ما أكدته منحنيات المقطع الخطي لكلا الفلمين المحضرين حيث لم يتجاوز ارتفاع أعلى قمة فيهما (6 nm). وهذا يدل أيضاً على عدم وجود نمو بلوري وفق اتجاهات محددة، الأمر الموافق للدراسة البنيوية (XRD) للأفلام اللابلورية وهي تعتبر قريبة من الاستواء الضوئي (من رتبة $\frac{\lambda}{100}$) المثالي فمثلاً

$$\cdot \frac{\lambda}{100} = \frac{500}{100} = 5nm \text{ يكون } 500nm \text{ وسطي}$$

يبين الشكل (5) صورة مجهر القوة الذرية لأفلام الجرمانيوم المتبلورة بسماكات مختلفة إضافة لمخطط البروفایل الخطي الخاص بكل صورة:



الشكل (5) صور مجهر القوة الذرية لأفلام الجرمانيوم البلورية المحضرة
a: سماكة 400 nm، b: البروفایل الخطي عند سماكة 400 nm، c: سماكة 900 nm،
d: البروفایل الخطي عند سماكة 900 nm

نلاحظ من الشكل السابق (a,b) ظهور سطح الأفلام البلورية (400 nm) على شكل قمم وتضاريس غير متجانسة في معظمها وتمتد على كامل السطح. حيث يلاحظ أعلى ارتفاع للقمم وفق منحنى البروفائل الخطي (14 nm) إضافة أن هذه القمم تمتد بشكل غير متجانس على كامل السطح، أما بالنسبة للأفلام المحضرة عند سماكة (900 nm) الشكل (c,d) فيلاحظ ازدياد ارتفاع القمم لتصل حتى (35 nm) وهي تمتد أيضاً بشكل غير متجانس على كامل السطح.

ازدياد ارتفاع القمم في الأفلام البلورية عند سماكة (900 nm) يدل على نمو البلورات وفق اتجاهات محددة وازدياد الحجم البلوري نتيجة زيادة سماكة الأفلام. وهذه النتيجة تؤكد ما توصلنا إليه من خلال دراستنا البنيوية لأفلام الجرمانيوم.

يبين الجدول التالي قيم خشونة السطح للأفلام المحضرة إضافة لارتفاع وانخفاض القمم والقعر على السطح:

الجدول (3) قيم خشونة السطح للأفلام المحضرة إضافة لارتفاع وانخفاض القمم والقعر على السطح

Crys 400nm	Amo 400nm	Crys 900nm	Amo 900nm	
2.2644	0.3897	3.744	0.4783	الخشونة (nm)
1.4143	0.2713	2.8516	0.3563	متوسط الخشونة (nm)
14.7813	4.7406	35.2406	6.3875	أعلى ارتفاع قمة (nm)
12.5162	2.4791	14.3564	3.1110	أدنى انخفاض قعر (nm)

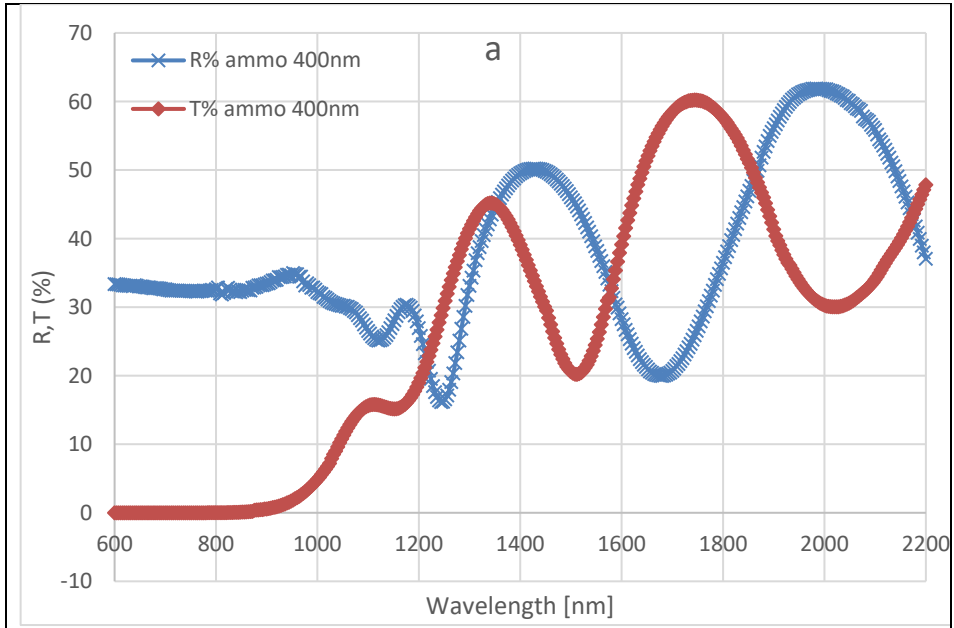
3-4- تعيين بعض الخصائص الضوئية لأفلام الجرمانيوم المحضرة بسماكات مختلفة:

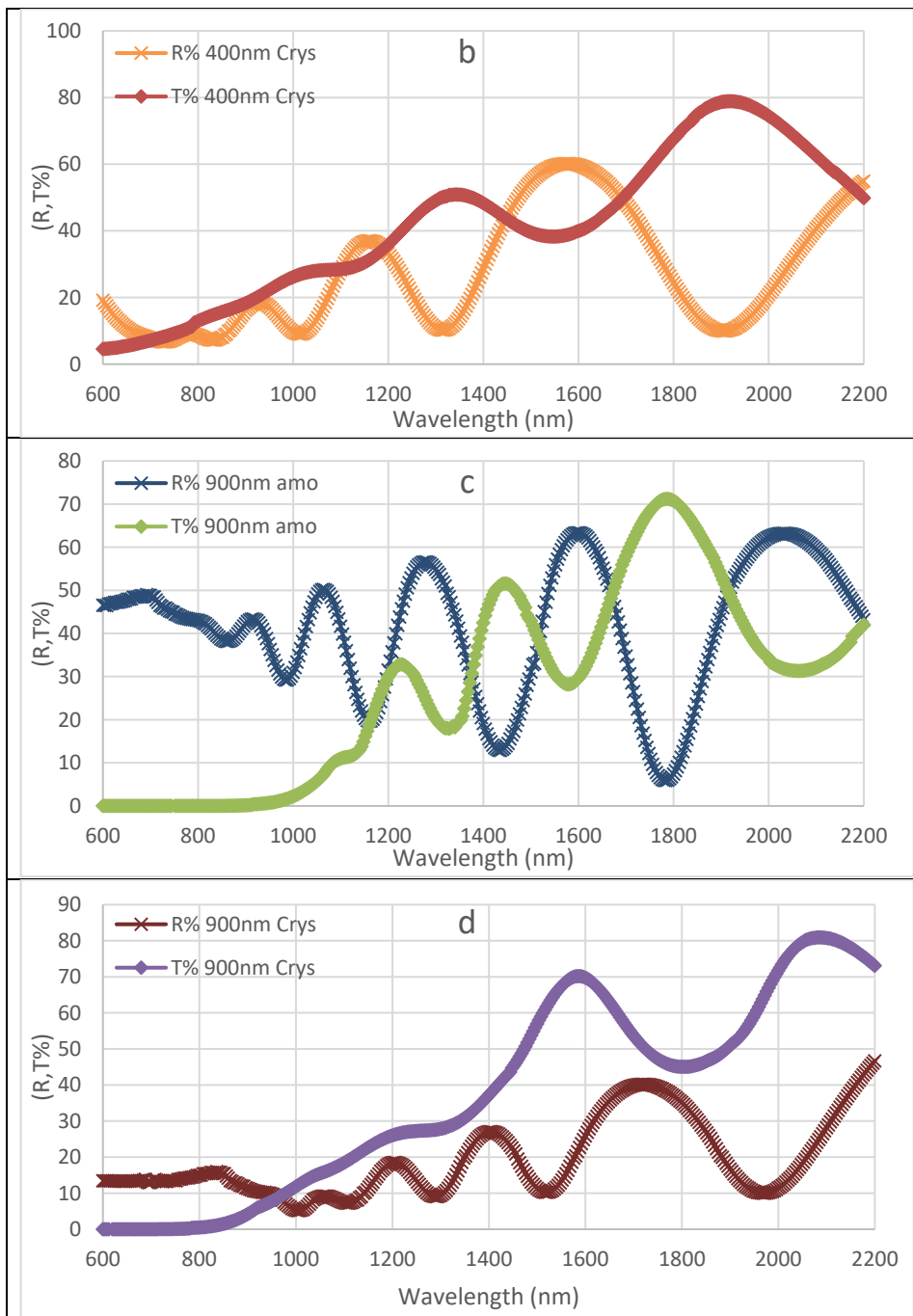
4-3-1- دراسة أطياف النفاذية والانعكاسية:

تقوم دراسة الخصائص الضوئية للأفلام المحضرة على دراسة أطياف النفاذية (T) والانعكاسية (R) الضوئية إضافة للامتصاصية (Abs) حيث أمكن حساب معامل الامتصاص (α) كما سنرى في الفقرة (4-3-2).

وهنا تجدر الإشارة الى أن عدد الأفلام المحضرة هو أربعة أفلام (اثتان عند كل سماكة، أحدهما متبلور والآخر غير متبلور).

يبين الشكل التالي منحنيات النفاذية والانعكاسية الضوئية للأفلام المحضرة.





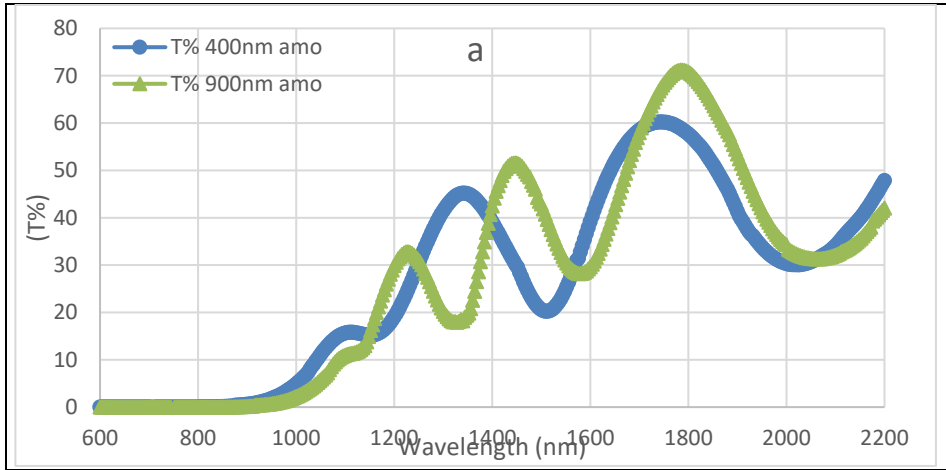
الشكل (6) أطيف النفاذية الضوئية (T) والانعكاسية (R) لأفلام الجرمانيوم المحضرة
a: فلم غير بلوري بسماكة (400nm)، b: فلم بلوري بسماكة (400nm)، c: فلم غير
بلوري بسماكة (900nm)، d: فلم بلوري بسماكة (900nm)

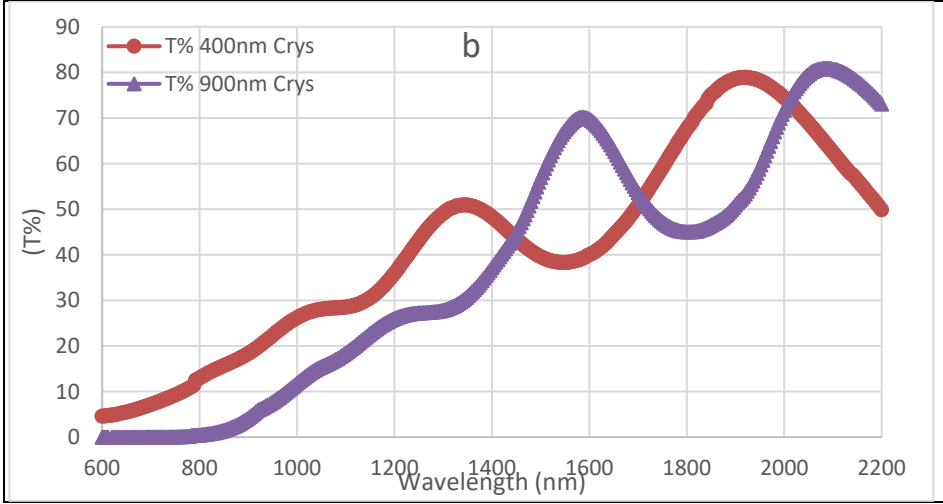
تحضير أفلام رقيقة من الجرمانيوم بسماكات مختلفة وتعيين بعض خصائصها البنيوية والضوئية

يلاحظ من جميع الأطياف السابقة وبشكل عام تعاكس بسلوك النفاذية والانعكاسية، ونلاحظ أيضاً أن هذه المنحنيات تبدأ انسيابية ثم تظهر فيها نهايات عظمى وصغرى متتالية ويزداد عددها وتزداد حدتها بزيادة السماكة، ويعود وجود هذه الأهداب إلى التداخل متعدد الانعكاسات ضمن الطبقة الرقيقة.

وبإجراء مقارنة بين الأفلام ذات السماكات المختلفة نحصل على الشكل (7)، وفيه نلاحظ أن النفاذية الضوئية في الأفلام ذات السماكة الأعلى (900nm) منزاحة نحو الأطوال الموجية الأكبر وذات شدة أقل من النفاذية للأفلام ذات السماكة المنخفضة (400nm) ويفسر ذلك بأن زيادة السماكة تؤدي لزيادة امتصاص الضوء من قبل الأفلام وبالتالي تنخفض شدة الضوء النافذ.

إن انزياح (T) للأفلام بزيادة السماكة نحو الأطوال الموجية الأطول يشير إلى انزياح حد الامتصاص نحو الطاقات الأقل الأمر الذي ينبئ بانخفاض عرض المجال المحظور بازدياد السماكة.





الشكل (7) مقارنة طيف النفاذية الضوئية لأفلام الجرمانيوم المحضرة بسماكات مختلفة
a: أفلام الجرمانيوم غير البلورية، b: أفلام الجرمانيوم البلورية

4-3-2- امتصاص الضوء :

يحدث امتصاص الضوء في الأفلام الرقيقة نتيجة الانتقالات الالكترونية من منطقة التكافؤ إلى منطقة الناقلية.

يعبر عن ارتباط ظاهري النفاذية (T) والانعكاسية (R) بالامتصاصية من خلال قانون انحفاظ الطاقة المعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$I_0 = I_R + I_T + I_A$$

حيث (I_0) شدة الضوء الساقط على العينة، (I_R) شدة الضوء المنعكس، (I_T) شدة الضوء النافذ من العينة بينما (I_A) شدة الضوء الممتص من قبل العينة. وبقسمة طرفي العلاقة السابقة على (I_0) نحصل:

$$1 = \frac{I_R}{I_0} + \frac{I_T}{I_0} + \frac{I_A}{I_0}$$

$$1 = R + T + A$$

حيث تمثل (R) الانعكاسية وتمثل (T) النفاذية بينما تمثل (A) الامتصاصية.

وترتبط شدة الضوء النافذ من العينة ذات السماكة (t) بمعامل امتصاص المادة من خلال

قانون بير-لامبرت [15]:

$$I_T = I_0 e^{-\alpha t}$$

وبالأخذ بعين الاعتبار تأثير الانعكاسات على السطح الخلفي للعينة (حيث ظاهرة التداخل متعدد الانعكاسات يفضل استخدام العلاقة الأدق بالنسبة لأفلامنا [16]:

$$I_T = (1 - R)I_0 e^{-\alpha t}$$

$$\frac{I_T}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha t}$$

$$\frac{T}{1 - R} = e^{-\alpha t}$$

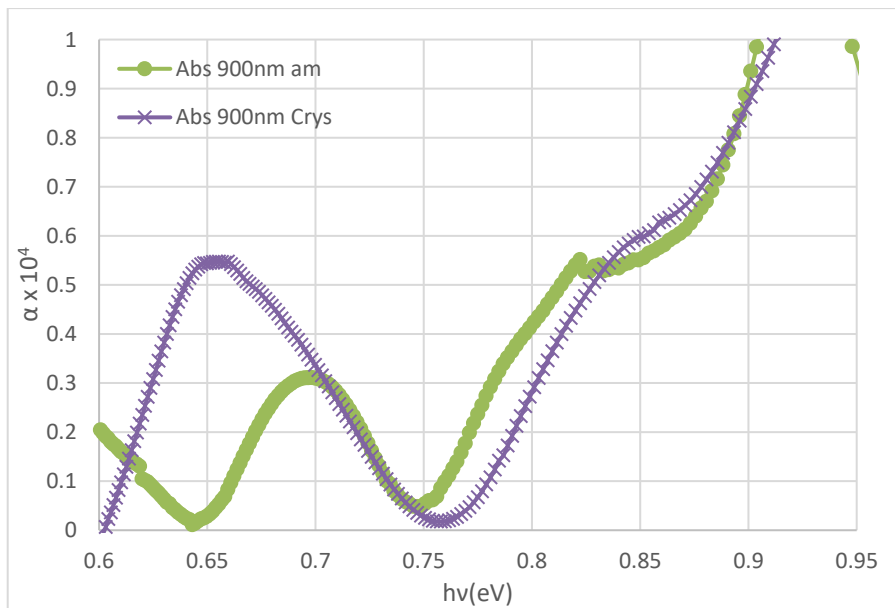
$$\ln\left(\frac{T}{1 - R}\right) = -\alpha t$$

$$\alpha = -\frac{1}{t} \ln\left(\frac{T}{1 - R}\right)$$

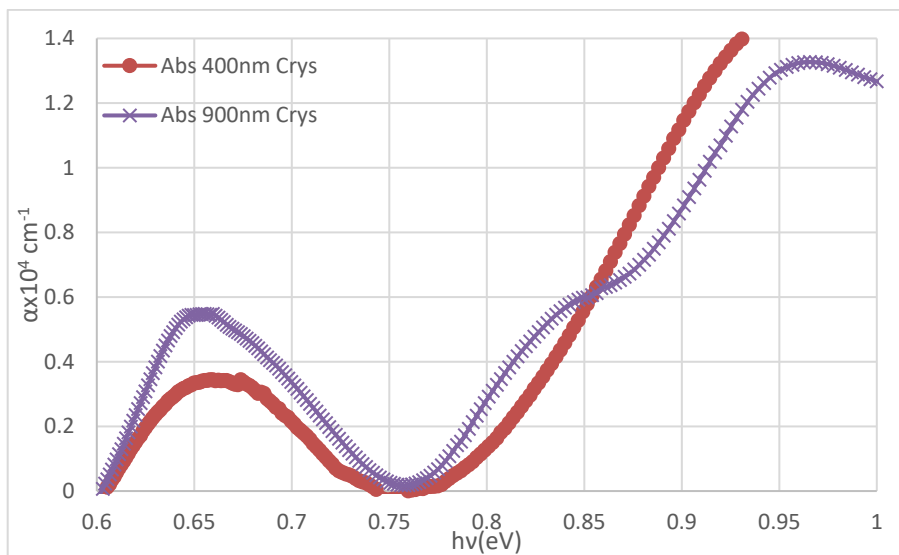
$$\alpha = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{1 - R}{T}\right)$$

وعليه قمنا بحساب معامل الامتصاص للأفلام المحضرة وبيان تغيراته بدلالة طاقة الفوتون

كما في الشكل التالي:



الشكل (8) معامل الامتصاص لأفلام الجرمانيوم البلورية وغير البلورية عند ذات السماكة ولملاحظة تأثير السماكة على الامتصاص نعرض معامل الامتصاص للسماكتين (400nm, 900nm) المتبلورتين في الشكل (9):



الشكل (9) معامل الامتصاص لأفلام الجرمانيوم البلورية عند سماكات مختلفة

يلاحظ من الشكل (9) أن معامل الامتصاص يكون أكبر عند السماكة الأعلى مما يدل على زيادة الامتصاصية بزيادة سماكة الفلم بسبب الانخفاض في العيوب البنيوية وعيوب التراص [17] وهذا ما استنتجناه سابقاً عند دراسة طيف النفوذ الضوئية.

4-3-3- تعيين فجوة الطاقة E_g :

تعرف فجوة الطاقة بأنها أقل طاقة لازمة لانتقال الإلكترون من منطقة التكافؤ الى منطقة الناقلية وبهذا نطلق مفهوم حد الامتصاص واقترحت العديد من النماذج النظرية لحسابها ومن أهمها نموذج (Mott and Davis, 1971) المعطى بالعلاقة [18]:

$$\alpha h\nu = B (h\nu - E_g)^m$$

حيث B ثابت يتبع لنوع المادة، وإلى حد ما تعبر هذه العلاقة تجريبية وتستخدم لحساب عرض الفجوة الطاقية الضوئية (E_{opt}) بتقريب جيد فهي تتأرجح حول القيمة الحقيقية وهذا يرتبط بشروط التحضير ودرجة الحرارة ويكون الأفلام متبلورة أو لا متبلورة وغيرها من العوامل الأخرى.

تأخذ m قيمة تعتمد على طبيعة الانتقالات الضوئية:

- $m=1/2$ من أجل الانتقالات المباشرة المسموحة.
- $m=3/2$ من أجل الانتقالات المباشرة غير المسموحة.
- $m=2$ من أجل الانتقالات غير المباشرة المسموحة.
- $m=3$ من أجل الانتقالات غير المباشرة وغير المسموحة.

ومن الجدير ذكره أن البنية الإلكترونية للجرمانيوم تشير الى وجود الانتقالات المباشرة وغير المباشرة، ولحساب عرض الفجوة الطاقية الموافقة قمنا بتقسيم طيف الامتصاص للجرمانيوم

الى منطقتين موافقتين لنوعي الانتقالات الإلكترونية السابقة وحسبنا (E_{gi}) للانتقالات غير المباشرة انطلاقاً من العلاقة:

$$\alpha h\nu = B (h\nu - E_g)^2$$

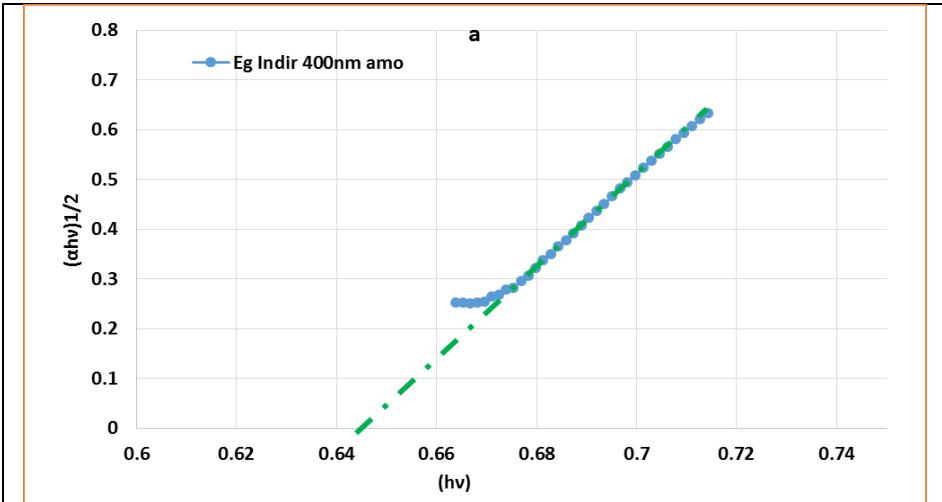
وذلك برسم تغيرات المقدار $(\alpha h\nu)^{1/2}$ بدلالة طاقة الفوتون ($h\nu$) وذلك من أجل الأفلام المتبلورة وغير المتبلورة وعند سماكتين مختلفتين (400nm, 900nm) وعينا (E_{gi}) من تقاطع ممدد الجزء المستقيم مع محور ($h\nu$) مقدرة بـ (eV).

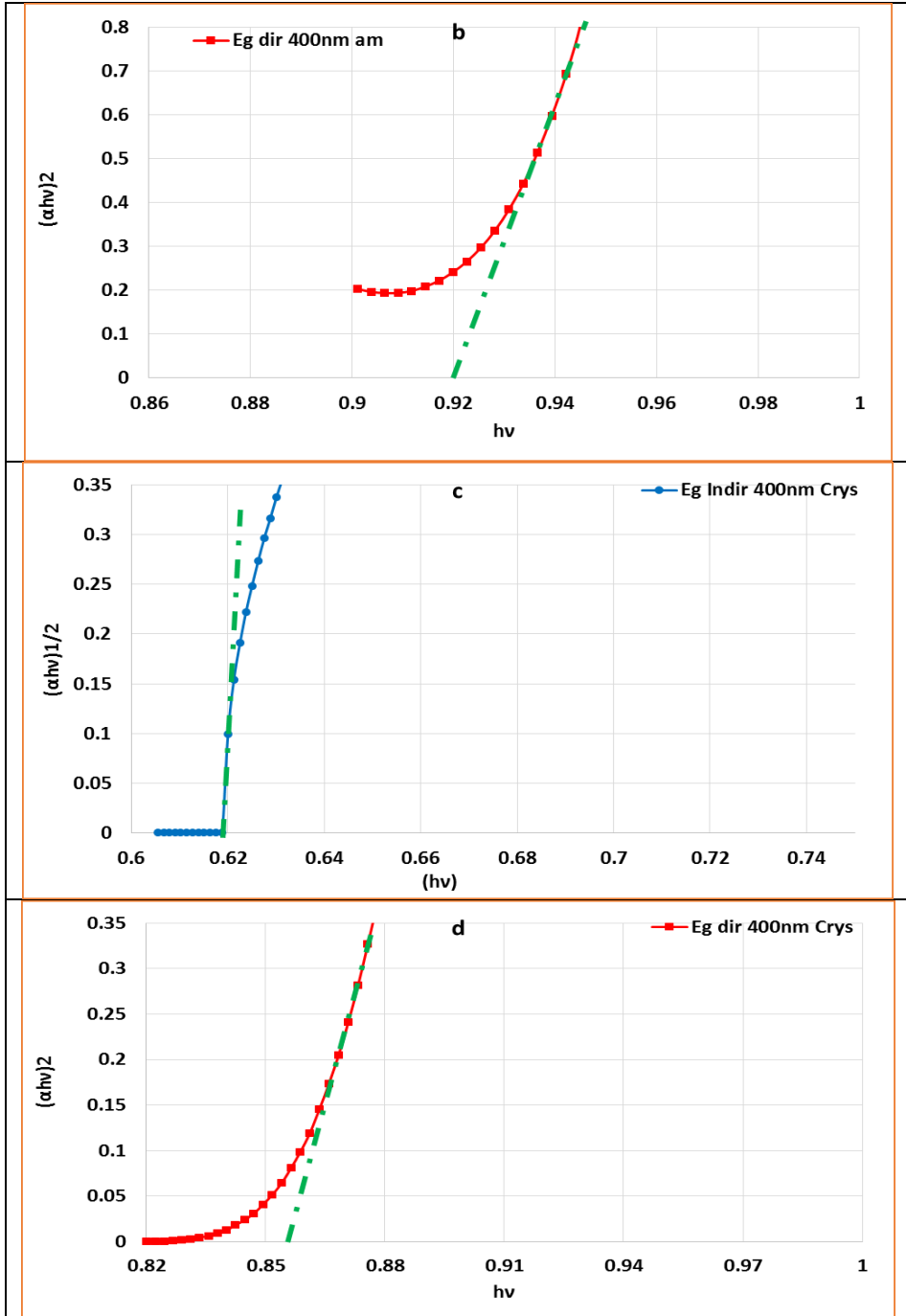
وبطريقة مشابهة قمنا بتحديد (E_{gd}) للانتقالات المباشرة انطلاقاً من العلاقة:

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

وذلك برسم تغيرات المقدار $(\alpha h\nu)^2$ بدلالة طاقة الفوتون ($h\nu$) وذلك من أجل الأفلام المتبلورة وغير المتبلورة وعند سماكتين مختلفتين (400nm, 900nm) وعينا (E_{gd}) أيضاً من تقاطع ممدد الجزء المستقيم مع محور ($h\nu$) مقدرة بـ (eV).

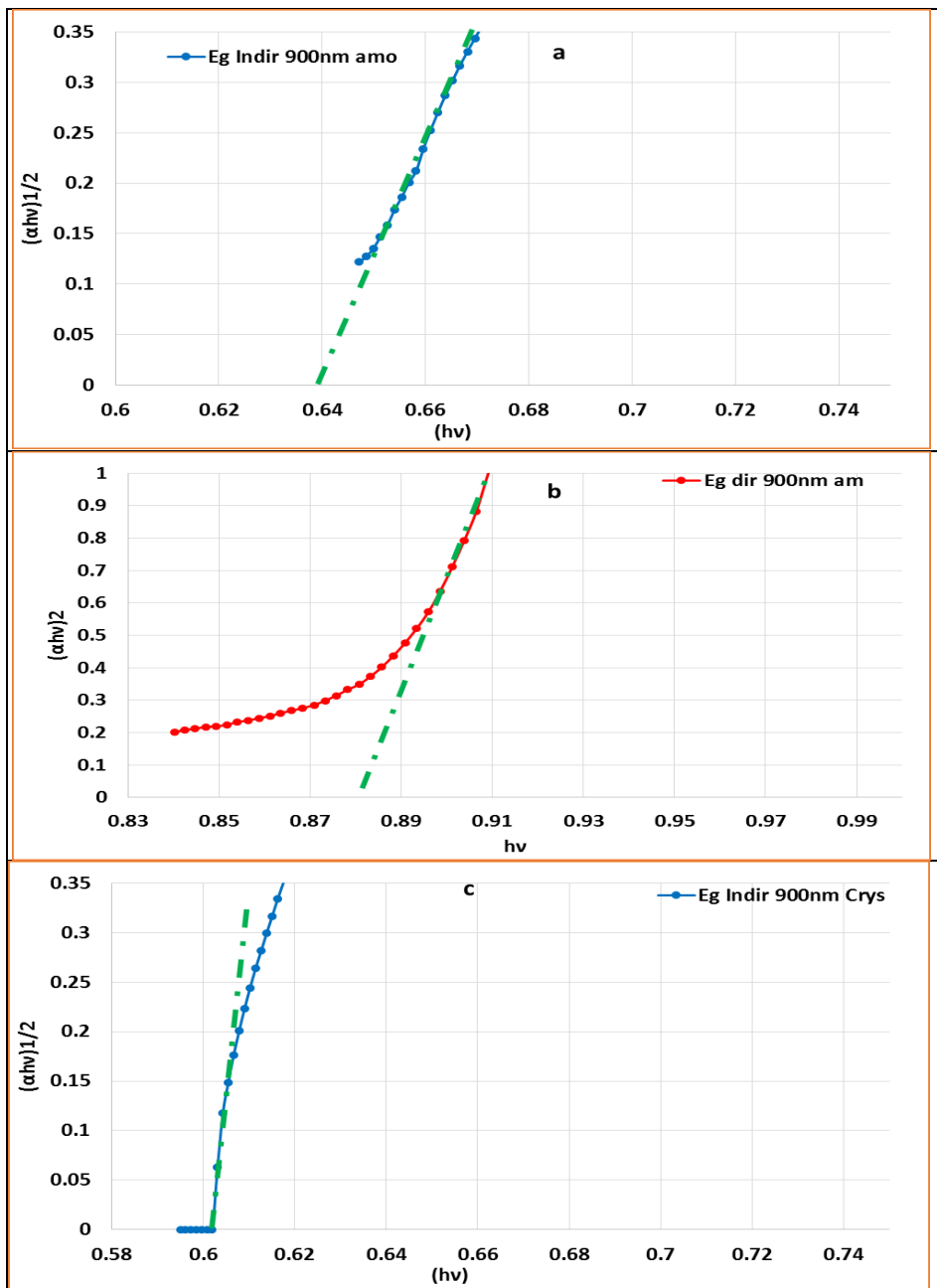
يظهر الشكل (10) قيمة الفجوة الطاقية المباشرة وغير المباشرة لأفلام الجرمانيوم البلورية وغير البلورية المحضرة عند سماكة (400 nm).

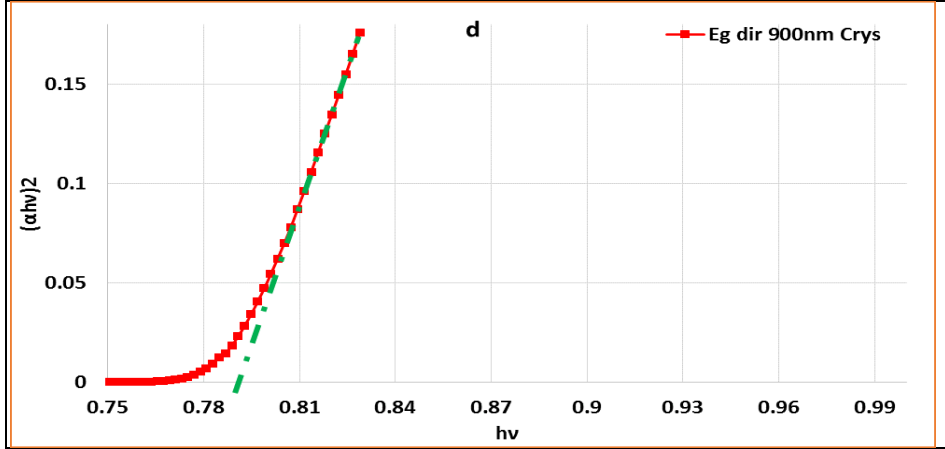




الشكل (10) قيم الفجوة الطاقية لأفلام الجرمانيوم عند سماكة (400 nm) a : غير مباشرة بلوري، b : مباشرة فلم غير بلوري، c : غير مباشرة فلم بلوري، d : مباشرة فلم بلوري

بينما يظهر الشكل (11) قيمة الفجوة الطاقية المباشرة وغير المباشرة لأفلام الجرمانيوم البلورية وغير البلورية المحضرة عند سماكة (900 nm).





الشكل (11) قيم الفجوة الطاقية لأفلام الجرمانيوم عند سماكة (900 nm) : a غير مباشرة فلم غير بلوري، b مباشرة فلم غير بلوري، c غير مباشرة فلم بلوري، d مباشرة فلم بلوري

رتبت قيم الفجوة الطاقية المباشرة وغير المباشرة المستخلصة من الأشكال السابقة في الجدول التالي لسهولة المقارنة بينها:

الجدول (4) قيم الفجوة الطاقية المباشرة وغير المباشرة لأفلام الجرمانيوم المتبلورة وغير المتبلورة بسماكات مختلفة

		الفجوة الطاقية المباشرة E_{gd}	الفجوة الطاقية غير المباشرة E_{gi}
سماكة $t= 400 \text{ nm}$	أفلام متبلورة	0.855 eV	0.620 eV
	أفلام غير متبلورة	0.920 eV	0.645 eV
سماكة $t= 900 \text{ nm}$	أفلام متبلورة	0.790 eV	0.600 eV
	أفلام غير متبلورة	0.880 eV	0.640 eV

نلاحظ أن قيمة الفجوة الطاقية للانتقالات غير المباشرة في الأفلام البلورية أقل من قيمتها في الأفلام غير البلورية وهذا يدل على أن عملية التبلور تخفض الفارق الطاقى بين قمة

عصابة التكافؤ وقرع عصابة الناقلية وهذا متوافق مع المراجع [19-21]، ونعيد السبب إلى انتظام توزع الذرات في بنية بلورية مما يخفف من عشوائية توزع الذرات. أما بالنسبة لقيمة الفجوة الطاقية للانتقالات المباشرة نلاحظ التغير في السلوك تبعاً للسماعة، فعند السماعة (400 nm) نلاحظ أن قيمة الفجوة الطاقية أكبر من مثيلاتها عند السماعة (900 nm) وذلك بسبب ميل الأفلام الرقيقة لسلوك المادة العازلة بانخفاض السماعة على اعتبار أن زيادة السماعة تؤدي إلى تراص أفضل وانخفاض العيوب البلورية وبالتالي نقصان (E_g) وزيادة الامتصاص.

5- الخلاصة والاستنتاجات:

1- تم تحضير أفلام رقيقة من الجرمانيوم (Ge) غير البلورية المرسبة على ركائز زجاجية بسماكات مختلفة وتم تحويلها بالتلدين الحراري الى أفلام بلورية من النمط البلوري المكعبي متمركز الوجوه (FCC) بثابت شبكة بلورية وسطي قدره $(a=5.646\text{Å})$.

2- يبين معامل الامتصاص بوضوح حدي الامتصاص المتعلقين بالانتقالات المباشرة وغير المباشرة في أفلام الجرمانيوم المحضرة بنمطها البلوري وغير البلوري.

3- أثبتت صور مجهر القوة الذرية (AFM) تشكل بنية بلورية في الأفلام المدنة الى الدرجة (525 °C)، حيث ظهرت البلورات المتشكلة على شكل قمم محددة الاتجاه (نحو الأعلى) تملأ سطح الفلم بشكل غير متجانس تقريباً. ولوحظ ازدياد ارتفاع هذه القمم نتيجة زيادة سماكة الفلم المحضر مما دل على نمو البلورات.

4- إن قيم (E_g) في مجال الامتصاص بالانتقالات الالكترونية غير المباشرة وكانت (0.6 eV) للأفلام المتبلورة و تقارب (0.64 eV) للأفلام غير المتبلورة.

5- حسبت قيم (E_g) في مجال الامتصاص بالانتقالات الالكترونية المباشرة وكانت القيمة تختلف تبعاً للسماكة حيث أنها أعلى عند السماكة (400 nm) مقارنة بالسماكة (900nm).

المراجع:

1. H. T. GRAHN, "Introduction to semiconductor physics", World scientific publishing, London, P.1-10, (2001).
2. Dautremont-Smith WC. Hydrogen in III-V Semiconductors. MRS Online Proceedings Library Archive. 1987;104.
3. I. BERGER, "Semiconductor Materials", CRC Press, New York, P. 15-35 (1997).
4. SINGH R, HARAME DL, OPRYSKO MM. SILICON GERMANIUM Technology, Modeling, and Design. United States of America: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION; 2004.
5. A. TRIBBLE, "Electrical engineering material and devices", University of Iowa, Iowa , (2002).
6. A. Z. MOSHFEGH, H. V. KANEL, S. C. KASHYAP and M. WUTTIG, "Physics and technology of thin films", World scientific publishing, London, P.1-10 (2003).
7. Heavens OS. The Film physics. Methuen Young Co. Ltd. 1970.
8. R. UEDA and J. B. MILLIN, "Crystal Growth and Characterization", Mc Graw- Hill, (1975).
9. Harsha KS. Principles of vapor deposition of thin films. Elsevier; 2005 Dec 16.
10. Stenzel O. The Physics of Thin Film Optical Spectra. New York: Springer; 2015.
11. Levinstein M, Rumyantsev S, Shur M. Handbook Series on Semiconductor Parameters. World Scientific; 1996.
12. Yücel E, Güler N, Yücel Y. Optimization of deposition conditions of CdS thin films using response surface methodology. J Alloys Compd [Internet]. 2014 Mar;589:207–12. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838813027977>
13. Reddy TS, Kumar MCS. Effect of substrate temperature on the

- physical properties of co-evaporated Sn₂S₃ thin films. *Ceram Int* [Internet]. 2016 Aug;42(10):12262–9. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884216305818>
14. Kariper I. Optical and structural properties of CdSe thin film produced by chemical bath deposition. *J Non-Oxide Glas.* 2016;1(8):1–9.
 15. Dhanam M, Prabhu RR, Manoj PK. Investigations on chemical bath deposited Cadmium Selenide thin films. *Mater Ch Phy.* 2008;107:289–96.
 16. العيسى ح, عبدالله ر, كسيبي أ. دراسة معامل الامتصاص a انطلاقاً من طيفي الانعكاسية Rm والنفاذية Tm لفلم رقيق من المركب AISb وتحديد مجاله المحظور. *Eg. مجلة جامعة البعث.* 2020;42(12):70–143.
 17. Makori N. Optical and electrical properties of SnSe thin films for solar cell applications. *Am J Condens Matter Phys.* 2014;5(4):87–90.
 18. Tobergte, D.R. and Curtis, S. (2013) *The Physics of Thin Film Optical Spectra: An Introduction.* .
 19. Liu P, Longo P, Zaslavsky A, Pacifici D. Optical bandgap of single- and multi-layered amorphous germanium ultra-thin films. *J Appl Phys* [Internet]. 2016;119(1). Available from: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4939296>
 20. Liu H, Li S, Sun P, Yang X, Liu D, Ji Y, et al. Study on characterization method of optical constants of germanium thin films from absorption to transparent region. *Mater Sci Semicond Process* [Internet]. 2018;83(April):58–62. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.04.019>
 21. Goh ESM, Chen TP, Sun CQ, Liu YC. Thickness effect on the band gap and optical properties of germanium thin films. *J Appl Phys.* 2010;107(2).