

## الفصل الرابع

### الخصائص الكهربائية للأغشية الرقيقة من سيلينيد البزموت

### Electrical Properties of Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> Thin Films

#### (4-1) الخصائص الكهربائية الانتقالية للأغشية الرقيقة من سيلينيد البزموت :

#### Transport Electrical Properties of Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> Thin Films:

تعطي دراسة الخصائص الانتقالية لأي شبه موصل المعلومات اللازمة لاستخدامه في

التطبيقات الإلكترونية وصناعة النماذج الإلكترونية Electronic Divices.

وقد أوضحت الدراسات أن الخصائص الكهربائية للأغشية الرقيقة مثل المقاومة النوعية

الكهربائية (  $\rho$  ) Resistivity ، والتي تعتمد في سلوكها على شروط التحضير لهذه الأغشية

الرقيقة، مثل: سمك الأغشية ودرجة الحرارة وكذلك المعالجة الحرارية "التلدين".

وتشمل هذه الخصائص دراسة المقاومة النوعية الكهربائية (  $\rho$  ) Resistivity

وعلاقتها بكل من سمك العينات  $t$  ، ودرجة الحرارة  $T$  وكذلك علاقة طاقة التنشيط الحراري

الأولى  $\Delta E_1$  ، و طاقة التنشيط الحراري الثانية  $\Delta E_2$  بالسمك  $t$ .

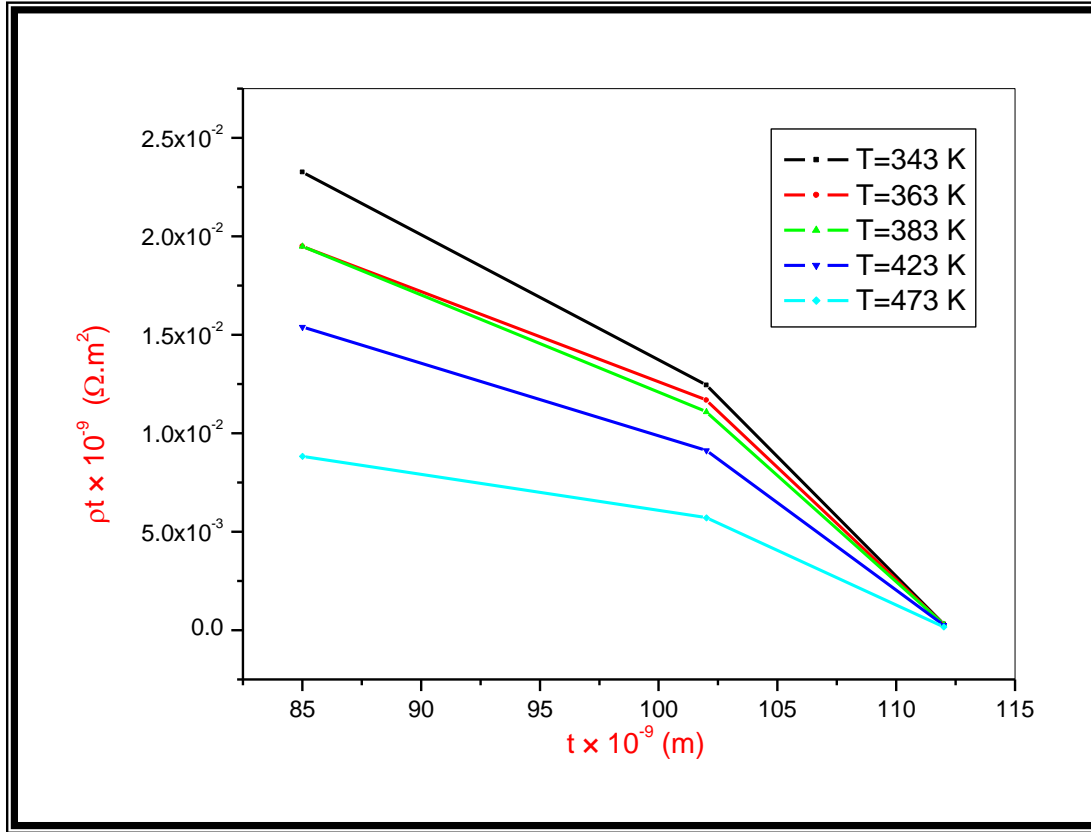
والجدير بالذكر أنه يسبق تلك القياسات اختبار التوصيل الأومي للمركب، وذلك باستخدام العديد من الوصلات الأومية Ohmic Contact، مثل الألمنيوم Al، الفضة Ag، الذهب Au، والتي تم ترسيبها بتقنية التبخير الحراري في جو مفرغ على طرفي العينة باستخدام قناع مناسب.

المقاومة النوعية الكهربائية  $\rho$  للأغشية الرقيقة من سيلينيد البزموت:

### Electrical Resistivity of Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> Thin Films:

تم تحضير عدد أربعة عينات من سيلينيد البزموت Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> على هيئة أغشية رقيقة بالتبخير الحراري المعتاد في جو مفرغ وعلى حوامل زجاجية نظيفة، حيث معدل الترسيب ثابت 2.5 نانومتر/ ثانية، وبسمك مختلف وباستخدام قناع مناسب تم ترسيب إلكترودين (قطبين) من الألمنيوم Al بالتبخير الحراري في جو مفرغ أيضاً، لتكوين وصلات أومية جيدة على طرفي كل عينة. ثم قيست المقاومة الأومية (R) للعينات باستخدام تقنية المجسبين (السابق شرحها في الفصل الثاني من هذه الرسالة)، ومنها تم حساب المقاومة النوعية ( $\rho$ ) باستخدام العلاقة (2-23) لجميع العينات عند درجة حرارة الغرفة، وعند درجات الحرارة الأعلى 323 – 343 – 363 – 383 – 423 – 473 كلفن.

شكل (1-4) يوضح العلاقة بين المقاومة الكهربائية مع سمك الأغشية الرقيقة (pt) للعينات والتي سمكها على الترتيب 85، 102، 112، 227 نانومتر والمقاسة عند درجات حرارة مختلفة، ويتضح من الشكل أن سلوك المنحنيات متشابه عند درجات الحرارة المختلفة ونلاحظ أن المقاومة النوعية تتناقص بزيادة السمك، حيث أنه في البداية تتناقص ببطء ثم تتناقص تناقصاً حاداً بزيادة السمك حتى تثبت عند قيم السمك العالي حوالي 227 نانومتر.



شكل (1 - 4): العلاقة بين المقاومة النوعية الكهربائية في سمك العينات ( ρt ) مع سمك الأغشية الرقيقة t عند درجات حرارة مختلفة.

وهذا السلوك لنتاقص المقاومة النوعية الكهربائية مع تزايد سمك الأغشية واستقرار المقاومة النوعية عند السمك الكبير بقيمة تقارب المقاومة النوعية الكهربائية للحالة الحجمية، والذي يمكن إرجاعه إلى العمليات الأولية للإنماء في الأغشية الرقيقة، حيث أنه في مراحل الإنماء للسمك الصغير يكون التركيب منفصل على هيئة جزر وله مقاومة عالية جداً، ومع تزايد السمك يتصل التركيب Continuous Film ، وتقل العيوب في التركيب البلوري وتزيد درجة التبلور ويتحسن توجيه البلورات ويتزايد الحجم الحبيبي للتبلورات Grain Size ، وهذا العامل الأخير يلعب دوراً كبيراً في نقص المقاومة الكهربائية مع زيادة السمك، وهذا ما أكدته الدراسات للبنية التركيبية البلورية في الفصل الأول. وهذا التفسير أكدته بترتز<sup>(73)</sup> ، Petritz ، بأن المقاومة النوعية الكهربائية للأغشية الرقيقة من أشباه الموصلات عديدة التبلور Polycrystalline ، وأنها تمثل مجموع مقاومتين نوعيتين، الأولى بتأثير الحجم للمادة وهي  $\rho_{bulk}$  "bulk resistivity" ، والثانية بتأثير حدود الحبيبات البلورية  $\rho_{grain}$  أي أن:

$$\rho = \rho_{bulk} + \rho_{grain} \quad (4-1)$$

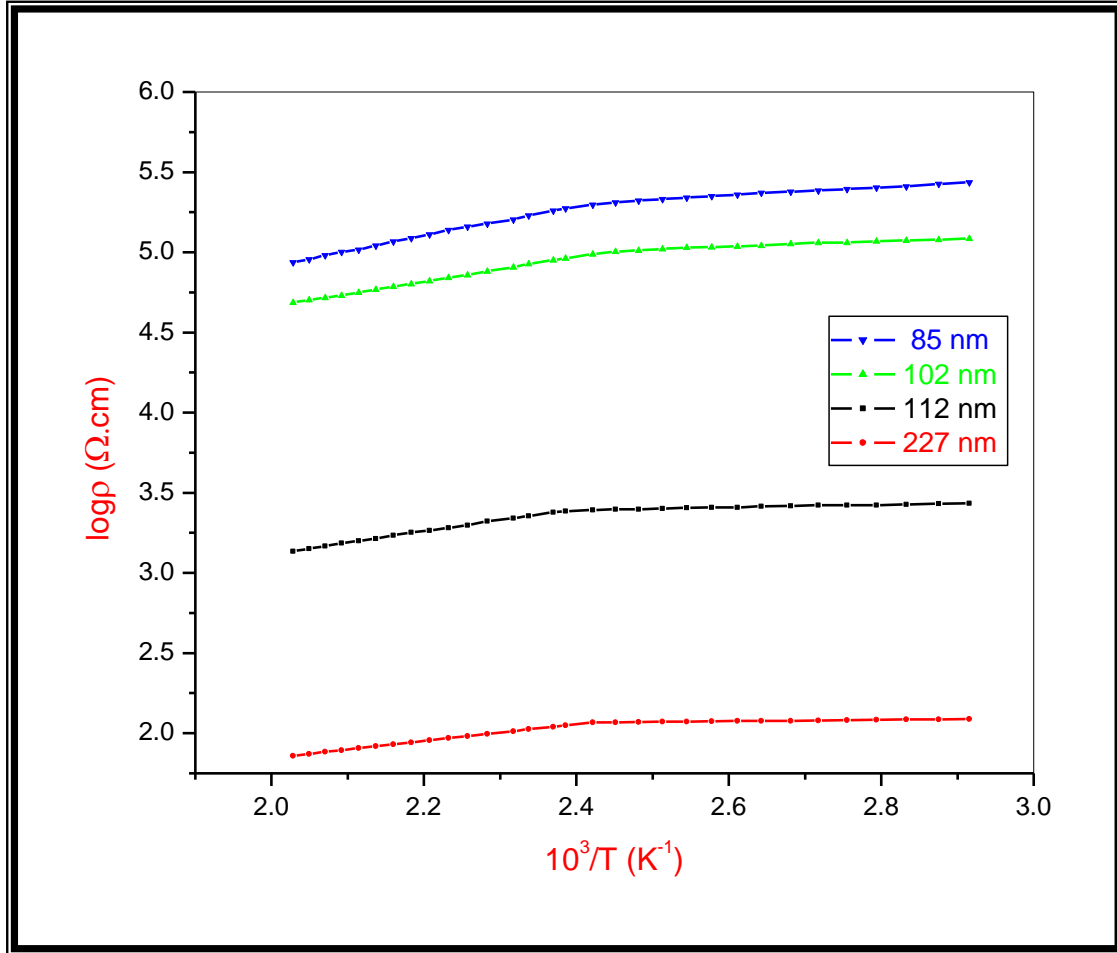
وفي هذا النوع من أشباه الموصلات فإن  $\rho_{grain} \gg \rho_{bulk}$  ، وقد أكد هذه الافتراضات كل من برجر<sup>(74)</sup> Berger ، ومانكارايوس وآخرين<sup>(75)</sup> ManKarious et al. ، حيث افترض أن طاقة التنشيط المستنتجة من الموصلية الكهربائية  $\Delta E_p$  ، هي مجموع طاقة التنشيط لحاملات الشحنة  $\Delta E_n$  ، وطاقة تنشيط ناشئة عن حاجز الجهد الناشئ عن حدود الحبيبات  $\Phi_b$  ، بحيث:

$$\Delta E_p = \Delta E_n + e \Phi_b \quad (4-2)$$

ونلاحظ أنه بارتفاع درجات الحرارة تكون قيم المقاومة النوعية أقل منها في حالة درجات الحرارة الأقل، وهذا هو السلوك العادي لأشباه الموصلات والتي تتناسب فيها المقاومة

النوعية الكهربائية عكسياً مع درجة الحرارة المطلقة. (أي أن الموصلية الكهربائية لها تتناسب طردياً مع درجة الحرارة المطلقة).

أما بالنسبة لعلاقة المقاومة النوعية الكهربائية ( $\rho$ ) بدرجة حرارة العينات T، فيوضح شكل ( 4 - 2 ) علاقة ( $\log \rho$ ) مع  $1000/T$  للعينات الأربعة السابقة من الأغشية الرقيقة، ويتضح من الشكل أن العلاقة تمثل خطين مستقيمين مما يعني أن سلوك المادة هو سلوك شبه موصل Semiconductor.



شكل ( 2 - 4 ): يوضح العلاقة بين (  $\log \rho$  ) كدالة في  $1000/T$  للأغشية الرقيقة مختلفة السمك من سيلينيد البزموت  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .

كما يتضح من الأشكال ( a - 2 - 4 ) و ( b - 2 - 4 ) و ( c - 2 - 4 ) و ( d - 2 - 4 ) أيضاً ولجميع العينات وجود خطين مستقيمين مختلفين في الميل ، وهذا يعني وجود قيمتين لطاقة التنشيط الحراري Thermal Activation Energy ، في مدى درجات الحرارة من 300 إلى 473 كلفن، ويتضح ذلك من المعادلة المحققة لتلك العلاقة والتي تعطى على الصورة:

$$\rho_T = \rho_0 \exp[(\Delta E_1 + \Delta E_2) / KT] \quad (4-3)$$

حيث:  $\rho_T$  المقاومة النوعية الكهربائية للغشاء الرقيق عند درجة حرارة T.

$\rho_0$  المعامل الذي يسبق الدالة الأسية ويعتمد على استطارة الفونونات.

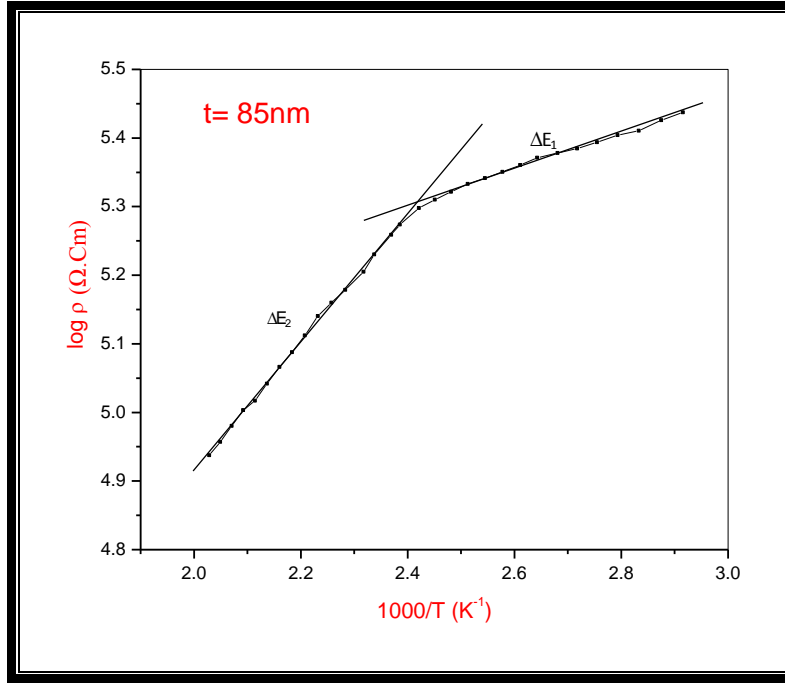
K ثابت بولتزمان.

$\Delta E_1$  و  $\Delta E_2$  طاقتي التنشيط الحراريين الأولى في مدى درجات الحرارة المنخفضة والتي تشير إلى آلية التوصيل بالشوائب (توصيل غير ذاتي) والثانية في مدى درجات الحرارة المرتفعة والتي تشير إلى التوصيل بحاملات الشحنة (توصيل ذاتي) . وهذا يساهم في معرفة نوع الانتقالات والمسموحة سواءً كانت مباشرة Direct ، أم غير مباشرة Indirect . وكذلك يمكن تعيين قيمة فجوة الطاقة (Energy Gap ( $E_g$ )). حيث تعطى من علاقة المقاومة النوعية الكهربائية للأغشية الرقيقة كدالة في درجة الحرارة لآلية التوصيل الذاتي على الصورة

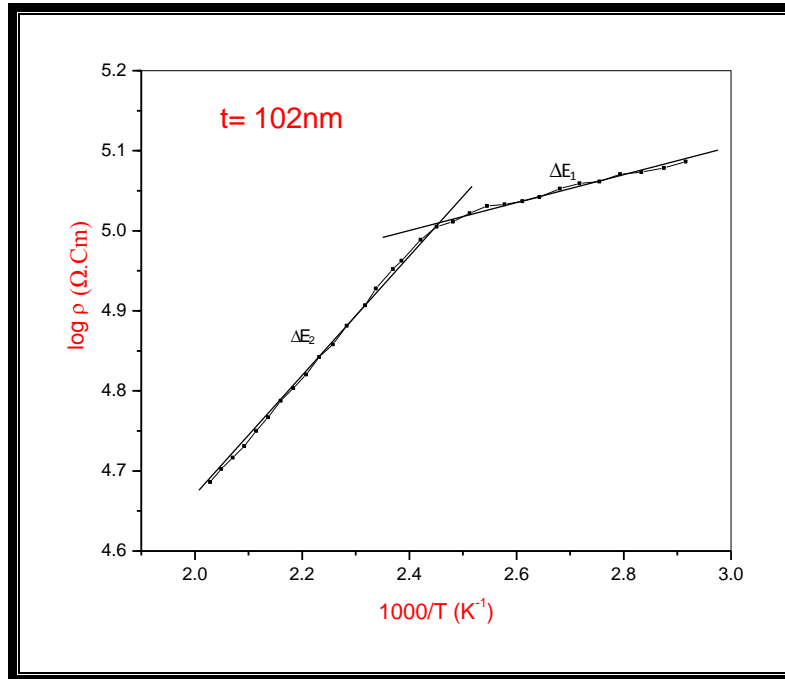
$$\rho = \rho_0 e^{E_g/2KT} \quad (4 - 4)$$

حيث:

$$E_g = 2 \Delta E_2 \quad (4 - 5)$$

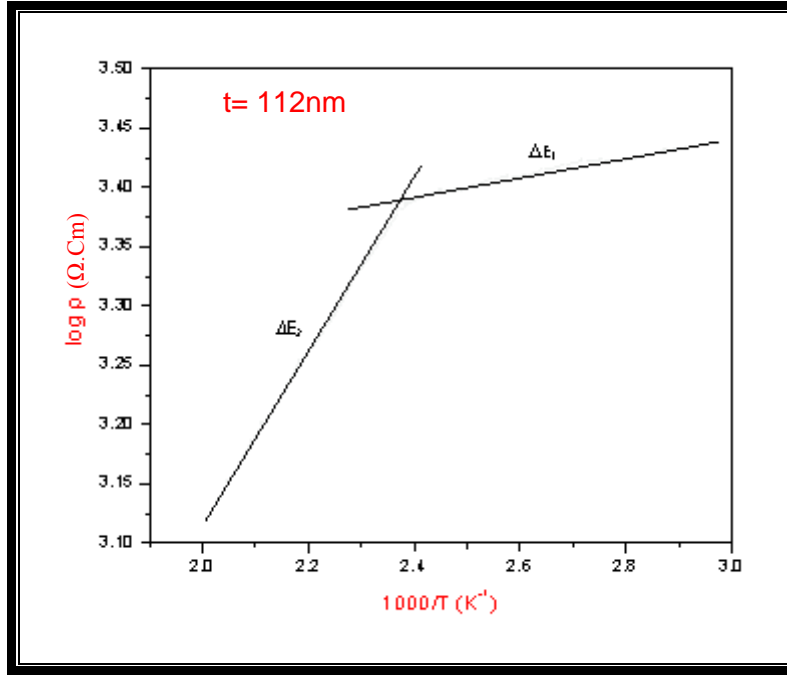


شكل (4-2-a): يوضح العلاقة بين ( $\log \rho$ ) كدالة في  $1000/T$  للغشاء الرقيق ذي السمك 85 nm من سيلينيد البزموت  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .

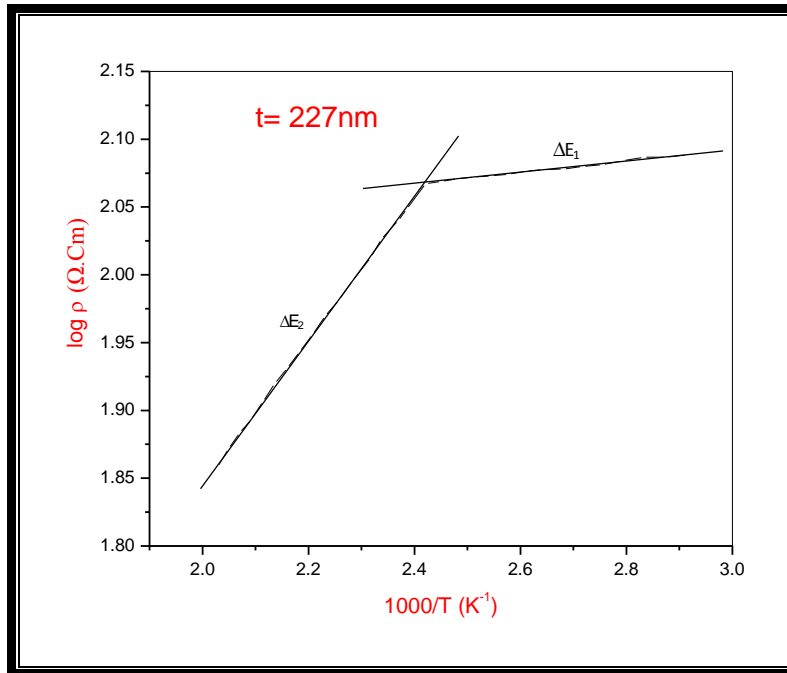


شكل (4-2-b): يوضح العلاقة بين ( $\log \rho$ ) كدالة في  $1000/T$  للغشاء الرقيق ذي السمك 102 nm من سيلينيد البزموت  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .





شكل (c-2-4): يوضح العلاقة بين ( $\log \rho$ ) كدالة في  $1000/T$  للغشاء الرقيق ذي السمك  $112 \text{ nm}$  من سيلينيد البزموت  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .



شكل (d-2-4): يوضح العلاقة بين ( $\log \rho$ ) كدالة في  $1000/T$  للغشاء الرقيق ذي السمك  $227 \text{ nm}$  من سيلينيد البزموت  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .

جدول [4-1] : يوضح علاقة طاقتي التنشيط وفجوتي الطاقة بالسلك للأغشية الرقيقة من سيلينيد البزموت  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$

السمك t (nm)	طاقة التنشيط الحراري لدرجات الحرارة المنخفضة $\Delta E_1$ (eV)	فجوة الطاقة لدرجات الحرارة المنخفضة $E_{g1}$ (eV)	طاقة التنشيط الحراري لدرجات الحرارة المرتفعة $\Delta E_2$ (eV)	فجوة الطاقة لدرجات الحرارة المرتفعة $E_{g2}$ (eV)
85	0.2668	0.5336	0.9286	1.8572
102	0.1651	0.3302	0.783	1.566
112	0.0814	0.1628	0.6844	1.3688
227	0.0428	0.0856	0.5283	1.0566

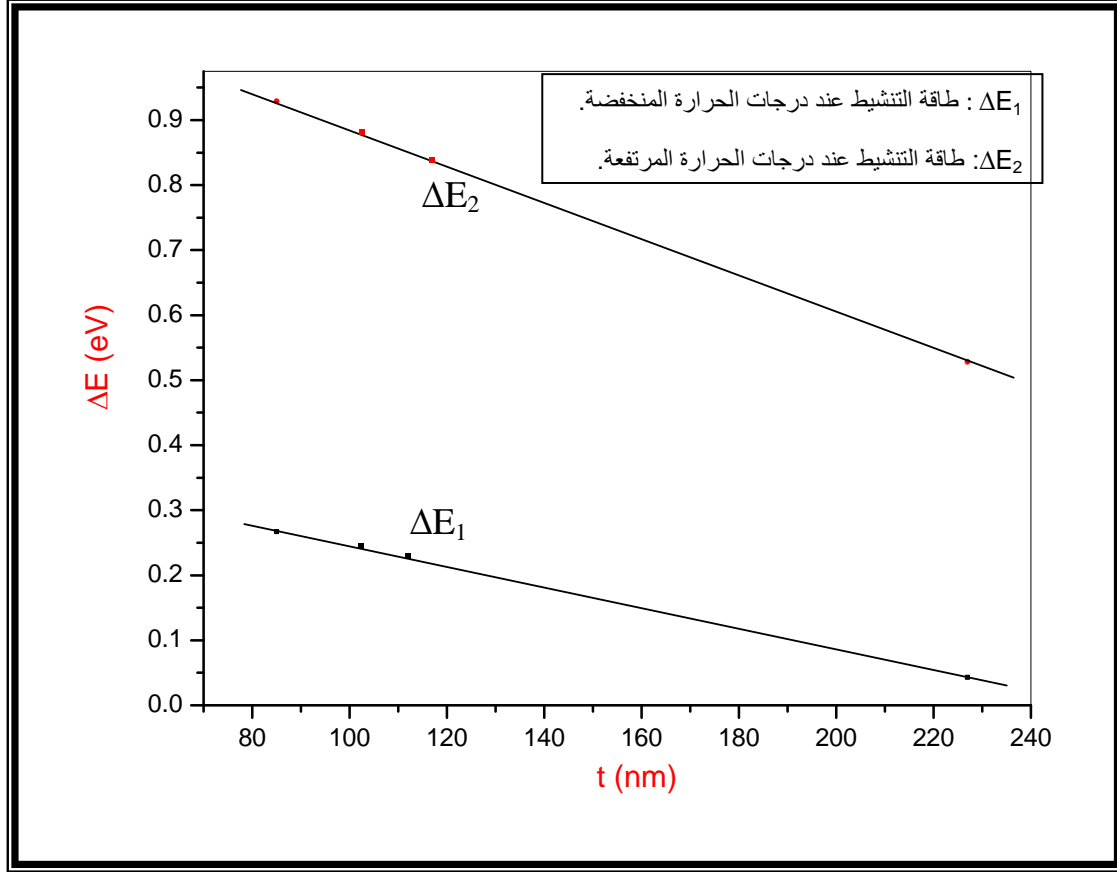
جدول [4-2]: يوضح مقارنة بين قيم طاقتي التنشيط الحراري في البحث الجاري مع الأبحاث السابقة لسلك مختلف من للأغشية الرقيقة من سيلينيد البزموت  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .

طاقة التنشيط الحراري في البحث الجاري			طاقة التنشيط الحراري في أبحاث أخرى				
السلك (nm)	$\Delta E_1$ (eV)	$\Delta E_2$ (eV)	السلك (nm)	$\Delta E_a$	طريقة التحضير	العام	المرجع
85	<b>0.2668</b>	<b>0.9286</b>	50	0.279	تبخير المركبات	1968	(76)
			50	0.279	تبخير المركبات	1994	(77)
			-	0.31	الترسيب الكيميائي	1998	(78)
			-	0.275	ترسيب الإلكترود	2001	(79)
			200	0.2-1.1	الترسيب الكيميائي	2002	(80)
102	<b>0.1651</b>	<b>0.7830</b>	160	0.116	تبخير المركبات	1968	(76)
			90	0.85	الترسيب الكيميائي	1997	(81)
			-	0.13	الترسيب الكيميائي	2004	(82)
112	<b>0.0814</b>	<b>0.6844</b>	160	0.116	تبخير المركبات	1994	(77)
			150 - 200	0.08	تبخير المركبات	1993	(83)
227	<b>0.0428</b>	<b>0.5283</b>	150	0.53	الترسيب الكيميائي	1997	(81)
			650	0.575	الترسيب الكيميائي	1980	(84)
			-	0.053	تبخير المركبات	2005	(35)

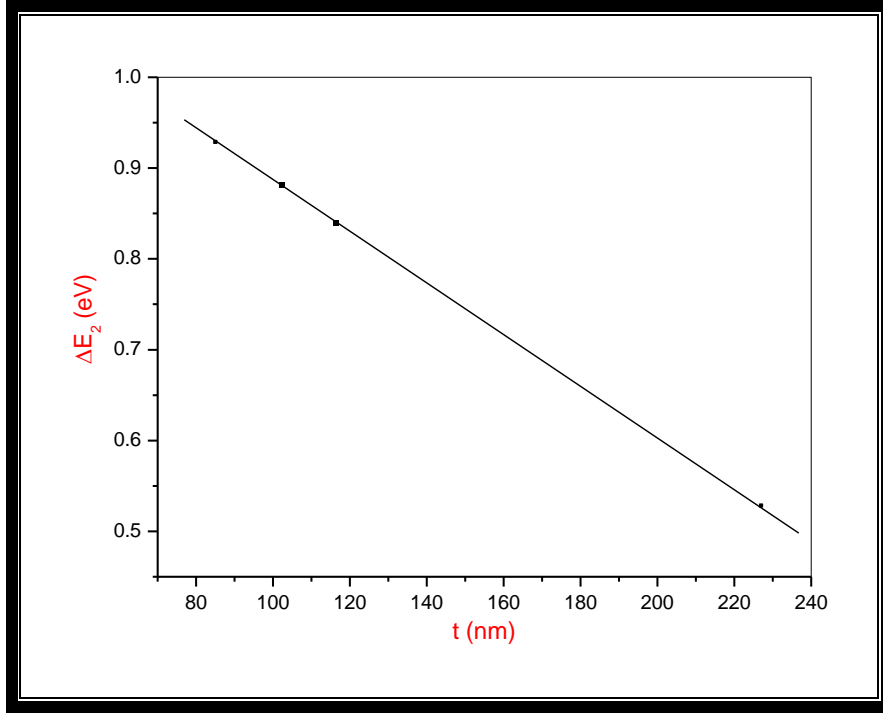
الجدول [4-1] مدون به قيم طاقات التنشيط ، ويلاحظ منه زيادة طاقة التنشيط الثانية في درجات الحرارة المرتفعة عن الأولى في درجات الحرارة المنخفضة.

والجدول [4-2] يوضح مقارنة بين قيم طاقتي التنشيط الحراري في البحث الجاري مع الأبحاث السابقة لسلك مختلف من للأغشية الرقيقة من سيلينيد البزموت  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .

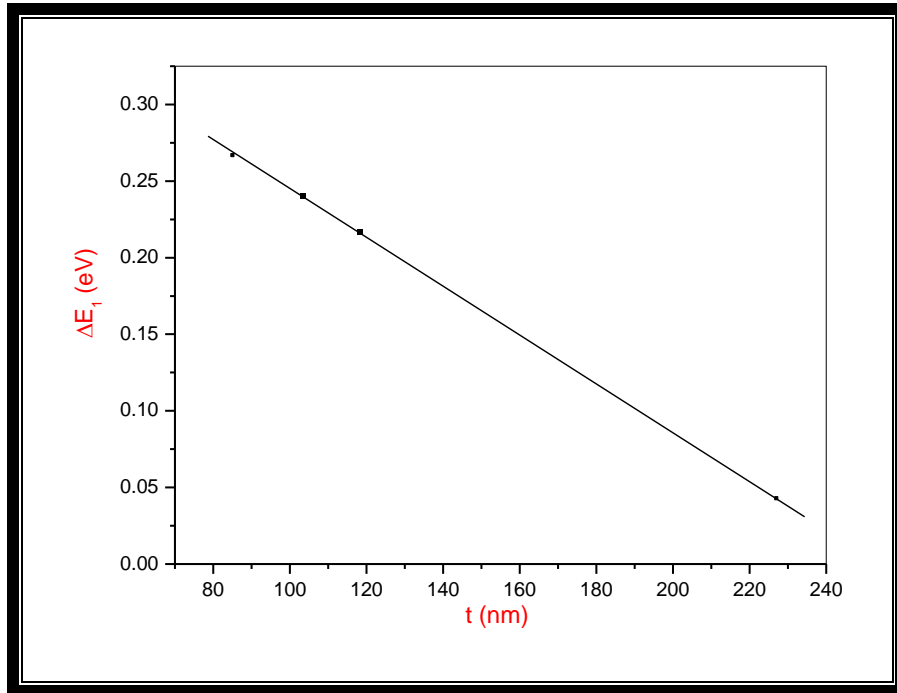
والشكلان (4-3- a) و (4-3- b) يوضحان علاقة طاقتي التنشيط الحراري مع التغير في السمك (t) ، ويلاحظ منها تناقص طاقات التنشيط الحراري مع زيادة السمك للأغشية الرقيقة وهذا هو السلوك الطبيعي للأغشية الرقيقة من أشباه الموصلات، والسبب أن زيادة السمك يؤدي إلى اتصال أجزاء الأغشية الرقيقة في مراحل الإنماء المتأخرة، مما يؤدي إلى تناقص الطاقة اللازمة لتنشيط الإلكترونات المتحركة عبر الأغشية الرقيقة.



شكل (3-4): يوضح علاقة طاقتي  $\Delta E_2$  و  $\Delta E_1$  مع السمك للأغشية الرقيقة من سيلينيد البزموت  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .



شكل (a-3-4): يوضح علاقة طاقة التنشيط عند درجات الحرارة المرتفعة  $\Delta E_2$  مع السمك  $t$  للأغشية الرقيقة من سيلينيد البزموت  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .



شكل (d-3-4): يوضح علاقة  $\Delta E_1$  طاقة التنشيط عند درجات الحرارة المنخفضة مع السمك  $t$  للأغشية الرقيقة من سيلينيد البزموت  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .