

Study of Some Optical, Electrical Properties of ZnO Thin Films Deposited by Chemical Spray Pyrolysis Method

Ban Kalid Mohamed

Applied Science Department, University of Technology /Baghdad

Email:bbb777@yahoo.com

Received on: 16/11/2011 & Accepted on: 1/3/2012

ABSTRACT

In this research we prepared ZnO thin films by Spray pyrolysis method with thickness (300nm) on a glass substrates and study its optical and electric properties. The results of (X-Ray) diffraction showed that the films have a polycrystalline structure , The Absorption and The transmission as a function of photon energy for ZnO films had been studied , The investigated of energy gap of the direct allowed transitions of ZnO film showed a value of (3.14 eV). The optical Absorption coefficients have been study as a function of Photon Energy. See beck measurements revealed that ZnO thin films are n-type.

دراسة بعض الخواص البصرية والكهربائية لاغشية اوكسيد الزنك المحضرة بطريقة التحلل الكيميائي الحراري

الخلاصة

تم في هذا البحث تحضير غشاء اوكسيد الزنك ZnO بطريقة التحلل الكيميائي الحراري وبسمك (300nm) على قاعدة من الزجاج حيث تم دراسة الخصائص البصرية والكهربائية . تبين من خلال نتائج حيود الاشعة السينية (X-Ray) ان الاغشية ذات تركيب متعدد البلورة وجرى دراسة علاقة كل من الامتصاصية و النفاذية كدالة لطاقة الفوتون لاغشية ZnO كما جرى حساب فجوة الطاقة المسموحة للانتقال المباشر المسموح للاغشية وكانت (3.14eV) وتم دراسة معامل الامتصاص كدالة لطاقة الفوتون . اظهرت نتائج سبيك بان اغشية اوكسيد الزنك ZnO ذات توصيلية مانحة (n-type) .

المقدمة

احدى اهم اشباه الموصلات تلك هي ما يسمى بأكاسيد التوصيل الشفافة (Transparent Conductive Oxides) ويطلق عليها اختصارا (TCO) ، وهي عبارة عن اشباه موصلات مركبة مكونة من معدن متحد مع الاوكسجين اي انها اشباه موصلات اوكسيدية مثلها ZnO, In₂O₃, SnO₂ ، حيث تجمع هذه المواد بين خصلتين من اهم خصال الاجهزة الالكترونية ، ارتفاع توصيليتها ونفاذيتها البصرية (شفافة) فيمتد طيف النفاذية فيها ما بين (400-1500) nm وبالرغم من كبر فجوة طاقتها تكون حزمة التوصيل مليئة بالالكترونات الحرة بسبب الشواغر الاوكسجينية (Oxygen

(Vacancies) الناتجة عن عدم التكافؤ الكيميائي (Non-Stoichiometry) [1,2,3] ومن التطبيقات التي يستخدم بها هي التوصيل الشفافة (Transparent Conductive Electrodes) [4,5] والشاشات السائلة (Liquid Crystal Display) والطلاءات النافذة (Window Coatings) والمراريا الحرارية (Heat Mirrors) ومتحسسات غاز (Gas Sensors) والصمامات الباعثة للضوء (Light Emitting Diodes) [6,7]. وكمحولات طاقة اجهادية (Piezoelectric Transducers) والمقومات المتغيرة (Varistors) واجهزة الموجات السمعية السطحية (Surface-Acoustic Wave Devices) وسماعات الترددات فوق السمعية (Ultrasonic Transducers) [8,9] وغيرها [10,11].

ان التوسعات الكبيرة في استخدامات TCO كاغشية رقيقة على اختلاف انواع المواد ومواصفاتها اوجدت الحاجة الماسة الى ظهور تقنيات تحضير تلائم خصائص تلك الاغشية ومجالات تطبيقاتها ، لذا شهدت تقنيات التحضير تطورات كبيرة هي الاخرى فاستحدثت العديد من الطرائق التي لم تكن معهودة منذ زمن قريب [12,13].

جرت العادة في تحضير اغشية TCO بمعظم الطرائق المستخدمة لترسيب الاغشية الرقيقة اذ تعتمد بعض التقنيات على ترسيب الاغشية من الاوساط السائلة كما في تنقية التحلل الكيميائي الحراري (وهي الطريقة المعتمدة في هذا البحث) او من الاوساط الغازية (البخار) كما في طرائق التريذو او التبخير.

اجريت دراسات متعددة حول المادة ZnO بشكل اغشية رقيقة ودرست امكانية الاستفادة منها في كثير من التطبيقات المهمة ومنها في عام 1982 قام الباحث Coporaletti [2] بتحضير غشاء ZnO بطريقة التريذو المنحاز ومن نتائج القياسات البصرية تبين بأن الغشاء المحضر ذو نفاذية عالية ويمتلك فجوة طاقة بصرية مقدارها 3.3 eV (3.3) وله حافة امتصاص ضمن المدى (340-380)nm لاغشية ذات سمك يتراوح بين (0.3 – 0.56)mm ومن دراسة تأثير ظروف التريذو على الخواص الكهربائية للأغشية المحضرة توصل الباحث الى أن الفولتية المسلطة لها تأثير مباشر وكبير في كل من تركيز حاملات الشحن (n) والمقاومية فعند زيادة الفولتية المسلطة تزداد n حتى تصل الى أعلى قيمة لها وتبلغ $(10^{19} \text{ cm}^{-3})$. اما في عام 1986 تمكن الباحث Chartier وزملائه [14] من تحضير غشاء ZnO ذي التصاقية جيدة على قواعد زجاجية بطريقة التحلل باستخدام محلول مائي بمولارية مقدارها 0.1 مكون من اذابة نترات الزنك المائية في ماء لاأيوني مع قليل من حامض النتريك حيث أظهرت أن نتائج الفحص بالاشعة السينية بأن الغشاء عبارة عن أكسيد الزنك النقي ذي التركيب السداسي المتراس . ومن دراسة طيف الامتصاص الضوئي تبين أن الاغشية تمتلك شفافية عالية تتراوح من (90-95) % في المنطقة المرئية وبحافة امتصاص عند الطول الموجي (380 nm) والذي يوازي أو يطابق امتلاكه فجوة طاقة مباشرة تبلغ (3.2eV) أما خواصه الكهربائية فقد أظهرت امكانية زيادة التوصيلية بما يقارب خمسة أضعاف قيمتها عند تلدينه في الهيدروجين عند 400 درجة سيليزية حتى تصل الى قيمة مقدارها $(10\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$ تقريبا لاغشية ذات سمك (10mm). وفي عام (2004) قام عدد من الباحثين منهم [15]Norton بتحضير غشاء ZnO النقي بتقنية الترسيب بالليزر النبضي على قواعد من Al_2O_3 عند درجة حرارة (600°C). لينتج تركيز حاملات شحن (الكترونات) ضمن المدى cm^{-3} $(1.5 \cdot 10^{20} - 7.5 \cdot 10^{15})$. وقد اشار الباحثون الى امكانية زيادة هذا المدى الى قيمة تتراوح cm^{-3} $(2 \cdot 10^{20} - 5 \cdot 10^{20})$ من تركيز الاكترونات عن طريق اشابتها بالتذرية بالحزمة الايونية لعنصر المنغيز (Mn) ومن ثم التلدين عند درجة (600°C).

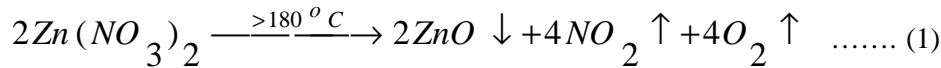
اما في عام 2005 قام الباحثون [16]Asadov بدراسة العلاقة المتبادلة بين الخواص التركيبية والخواص الكهربائية لاغشية ZnO المحضرة باسلوبين الاول التريذ بالموجات الراديوية والثاني التريذ بالتيار المستمر على قواعد زجاجية . حيث ان الخصائص الكهربائية لغشاء ZnO يتحدد بعاملين الاول التكافؤ الكيميائي للغشاء (Stoichiometry) والثاني هو التركيب البلوري . وتهدف هذه الدراسة الى امكانية تصنيع غشاء رقيق من مادة ZnO واجراء الفحوصات البصرية والكهربائية بدرجة حرارة الغرفة .

المواد وطرائق العمل

يعتمد اختبار تقنية التحضير المناسبة على عوامل عدة منها انواع المواد الاولية ، المواصفات النهائية للغشاء ، نوع القاعدة ومجالات التطبيق علاوة على معدل الترسيب وكلفة الانتاج لذلك يتم تحضيرها بطريقة الرش الكيميائي الحراري.

إن الآلية التي تستند عليها هذه الطريقة لتكوين الاغشية هي حدوث التفاعل الكيميائي على سطح القاعدة اعتماداً على درجة حرارة تلك القاعدة، اي ان الاغشية تتكون نتيجة التحلل الكيميائي – الحراري على سطح القاعدة تتطلب عملية التحلل الحراري عند سطح القاعدة بان تحفظ المادة الاولية تحت درجة حرارة التفكك. يتم هذا باذابة المادة الاولية في المذيب وتريذها بشكل قطرات محمولة بالغاز الى سطح القاعدة الساخن. هذه العملية تتم من خلال السيطرة على التركيب الكيميائي وكفاءة تريذ قطرات المحلول [17,18,19] .

عند تحضير المحلول المستخدم لترسيب أغشية ZnO استخدمت المادة الكيميائية نترات الخارصين المائية $[Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O]$ وهي مسحوق ابيض اللون سريعة الذوبان في الماء. تم حساب وزن المادة باستخدام ميزان حساس من نوع (Mettler. A. E-116) حساسيته (10 mg) وسعته (160 g) ثم تذاب المادة (50 ml) من الماء المقطر والقليل من حامض النتريك (HNO_3). وبعد ذوبانها كليا نحصل على محلول نترات الخارصين المائية وهو محلول رائق عديم اللون يتم حفظه في قنينة حجمية ويترك مدة 24 ساعة للتأكد من عدم وجود رواسب مختلفة فيه عند رش المحلول على القواعد الزجاجية وبفعل الحرارة تترسب مادة أكسيد الزنك ZnO على سطح القاعدة وفق التفاعل الآتي:



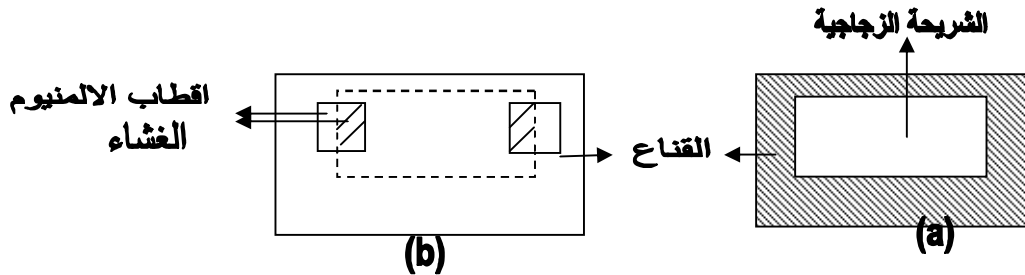
توجد عوامل عدة يجب مراعاتها أثناء تحضير الاغشية وهي ثبوت درجة حرارة القاعدة Stability of Substrate Temperature وإرتفاع جهاز الرش The Height of Spray Nozzle ومعدل الرش The Spray Rate وزمن الرش The Spray Time و ضغط غاز التنرية The Pressure of Carrier Gas .

أن قياس سمك الاغشية الرقيقة تم باستخدام الطريقة الوزنية التقريبية وبنسبة خطأ ($\pm 50nm$) حيث يتم قياس وزن القاعدة المراد الترسيب عليها قبل وبعد الترسيب باستخدام الميزان الحساس ومن معرفة كثافة المادة (الغشاء الرقيق) وكذلك مساحة الغشاء يمكن حساب سمك الغشاء باستخدام العلاقة الآتية [20] وقد كان سمك الغشاء 300nm .

$$t = \frac{\Delta m}{p_t \times A_0} \quad \dots\dots (2)$$

حيث Δm : فرق وزن القاعدة (قبل وبعد الترسيب). P_t : كثافة الغشاء الرقيق. A_0 : مساحة الغشاء الرقيق.

ومن أجل دراسة القياسات الكهربائية لأغشية ZnO الرقيقة يتم ترسيب أقطاب ألومنيوم النقي كأقطاب توصيل على الجانب الأمامي للقاعدة الزجاجية بعد ترسيب الغشاء عليه باستخدام أقمعه خاصة مصنوعة من رقائق الألومنيوم بما يتلائم ومتطلبات كل قياس كما موضح بالشكل (1).



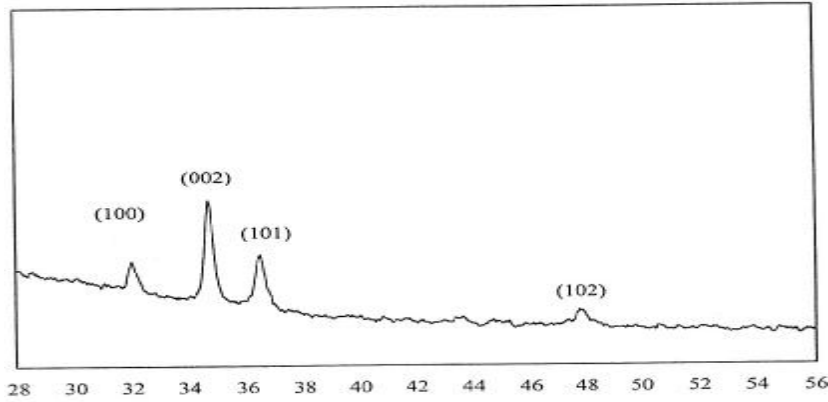
الشكل (1) (A): قناع ترسيب الاغشية
(b): قناع ترسيب اقطاب التوصيل لقياس التوصيلية الكهربائية وتأثير سيبك

لأجل التعرف على الطبيعة البلورية وطبيعة التركيب للأغشية الرقيقة لأغشية ZnO استخدمت تقنية حيود الأشعة السينية (XRD) باستخدام مصدر (Cu. Ka) وبطول موجي (0.15405nm). ولقد أجريت قياسات الخواص البصرية التي تشمل الامتصاصية (Absorptance) والنافذية (Transmittance) لأغشية ZnO المرسبة على قواعد زجاجية باستخدام جهاز المطياف نوع (UV/VIS-PU-8800 Spectrophotometer) المجهز من شركة (Pye Unicom) لمدى طيفي يمتد من (0.35-0.9μm).

النتائج والمناقشة

حيود الأشعة السينية

يظهر من طيف الأشعة السينية الموضح بالشكل (2) ان أغشية ZnO متعددة التبلور (Polycrystalline) وهذا يتفق مع البحوث المنشورة [2-14-15-16-21]. يتضح من طيف الأشعة السينية وجود اربع قمم متميزة جميعها تخص أغشية ZnO سداسي التركيب (Wurtzite) اذ أجريت مطابقتها مع بطاقة ASTM المرقمة 5-0664.



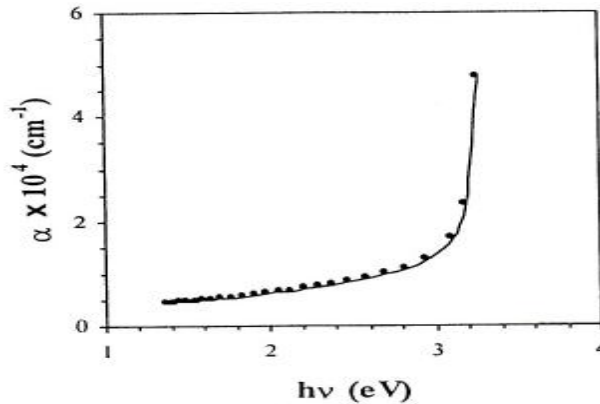
الشكل (2)
طيف حيود الاشعة السينية لغشاء ZnO

القياسات البصرية

وتشمل حساب فجوة الطاقة للانتقال المباشر المسموح للنماذج للاغشية , وايجاد علاقة كل من الامتصاصية والنفاذية بطاقة الفوتونات ومن خلال الامتصاصية والنفاذية تم ايجاد بمعامل الامتصاص . حيث حسب معامل الامتصاص من طيف الامتصاصية للاغشية ZnO والمحضرة في درجة حرارة الغرفة (R.T) باستخدام المعادلة التالية .

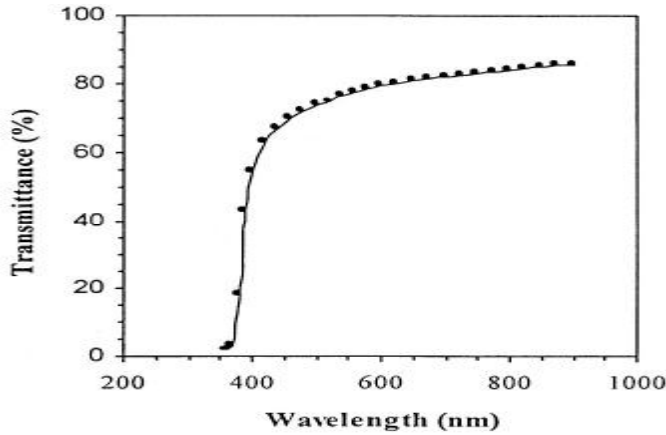
$$a = 2.303(A' / t) \dots\dots (3)$$

حيث A' : الامتصاصية ، t : سمك الغشاء الرقيق
ويبين الشكل (3) تغير طاقة الفوتون مع الامتصاصية لغشاء ZnO حيث يزداد معامل الامتصاصية بزيادة طاقة الفوتون الساقط .



الشكل (3)تغير معامل الامتصاص مع تغير طاقة الفوتون لاغشية ZnO

والشكل (4) يبين النفاذية كدالة للطول الموجي لغشاء ZnO حيث يتبين يظهر منحنى النفاذية زيادة مفاجئة وقوية (Jump) عند الطول الموجي (370nm) ثم يميل الى التشعب بعد الطول الموجي (450nm) مما يدل على ان هذه الاغشية تصلح كنافذة بصرية (Window Gap) للخلايا الشمسية لان المنطقة الطيفية الفعالة في الخلايا الشمسية تقع في المنطقة المرئية من الطيف وهذا ما يبرر الاهتمام المتزايد من قبل الباحثين في استخدام اغشية ZnO كنافذ بصرية في الخلايا الشمسية السليكونية.



الشكل (4) تغير النفاذية كدالة للطول الموجي لغشاء ZnO

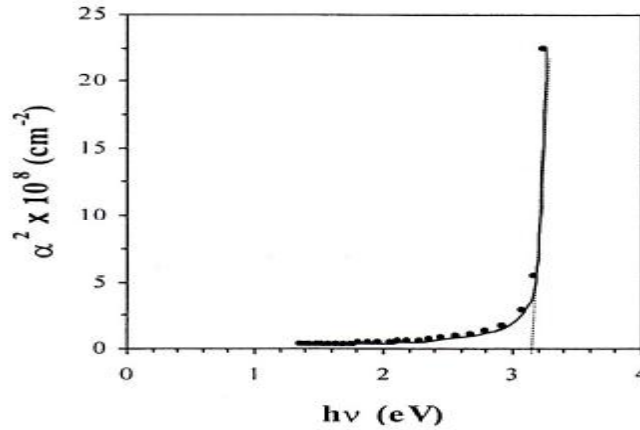
والشكل (5) يوضح تمثيل فجوة الطاقة لغشاء ZnO , حيث ان فجوة الطاقة حسبت من خلال العلاقة الاتية [22]:

$$a(h\nu) = A(h\nu - E_g)^g \quad \dots\dots (4)$$

حيث g : تساوي قيمته $\frac{1}{2}$ في الانتقالات المباشرة المسموحة , $h\nu$: طاقة الفوتون الساقط (eV)

E_g : فجوة الطاقة للغشاء الرقيق (eV), A , ثابت ويساوي 2×10^4

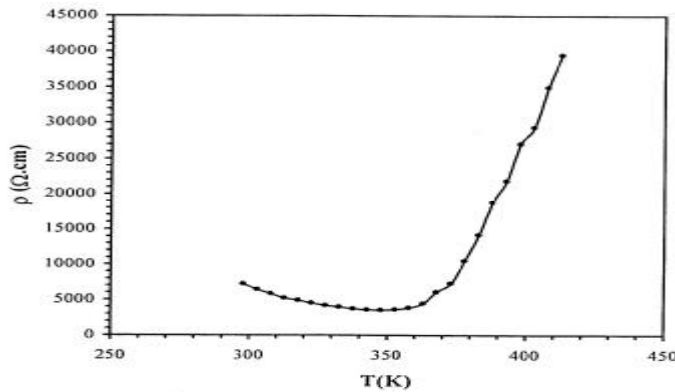
برسم العلاقة بين $(\alpha h\nu)^2$ وطاقة الفوتون ($h\nu$) وبمد الجزء المستقيم او المماس للمنحنى ليقطع محور طاقة الفوتون عند النقطة $((\alpha h\nu)^2=0)$, نحصل على قيمة فجوة الطاقة وهذا يحقق المعادلة $(h\nu=E_g)$, وهذه تمثل فجوة الطاقة البصرية الممنوعة للانتقال المباشر المسموح , اي ان نقطة القطع سوف تمثل فجوة الطاقة البصرية الممنوعة للانتقال المباشر المسموح [23,24], حيث ان قيمة فجوة الطاقة لمادة ZnO (3.14eV) في درجة حرارة الغرفة وهذا يتفق مع البحوث المنشورة [2,14,25].



الشكل (5) حساب فجوة الطاقة البصرية الممنوعة للانتقال المباشر المسموح لغشاء ZnO

القياسات الكهربائية

ان الشكل (6) يبين تغير المقاومة النوعية مع درجة حرارة المحيط لأغشية ZnO حيث تظهر المقاومة النوعية تناقصا تدريجيا مع زيادة درجة حرارة المحيط ثم زيادة حادة عند درجات الحرارة العالية . يعزى تناقص المقاومة الى انتقال الالكترونات من مستويات العيوب القريبة من حزمة التوصيل الى حزمة التوصيل بسبب الطاقة الحرارية $(K_B T/q)$, حيث ان K_B ثابت بولتزمان و T : درجة الحرارة المطلقة و q : شحنة الالكترون . اما الزيادة في المقاومة تعود الى زيادة المقاومة الكهربائية بسبب التسخين الذي يؤدي بدوره الى زيادة الاهتزازات الحرارية في الشبكة وبالتالي زيادة عمليات تصادم الحاملات مع الشبكة.

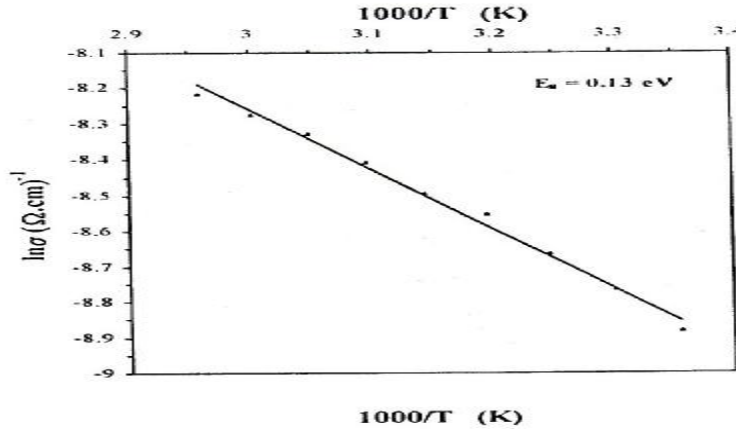


الشكل (6) تغير المقاومة النوعية كدالة لدرجة الحرارة لغشاء ZnO

ان الشكل (7) يبين العلاقة الخطية بين $(\ln \sigma)$ و (T^{-1}) لأغشية ZnO . نلاحظ أن طاقة التنشيط للأغشية بمقدار (0.13eV) وهذه القيمة اكبر من القيم المنشورة سابقا [9] . أن طاقة التنشيط هنا تمثل

مستويات العيوب الناشئة عن الشواغر الاوكسجينية وذرات Zn البينية ، وتقع هذه المستويات اسفل حزمة التوصيل وفوق مستوى فيرمي كون المادة سالبة التوصيلية.
اما معامل سيبك (S) يعرف بانه النسبة بين فرق جهد سيبك (ΔV) والفرق بدرجة الحرارة (ΔT) اي :

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \dots\dots\dots (5)$$



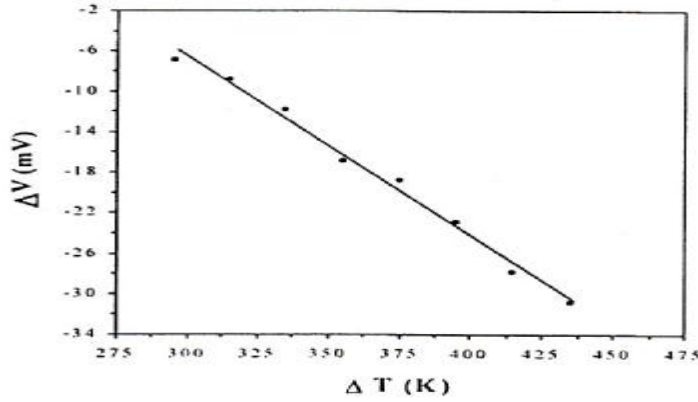
الشكل

(7)العلاقة بين لوغارتم المقاومة النوعية مع مقلوب درجة الحرارة لغشاء ZnO

حيث يبين الشكل (8) تغير فرق الجهد كدالة للفرق بدرجات الحرارة لاغشية ZnO ونلاحظ ان الاغشية مانحة التوصيلية وتتفق هذه النتيجة مع كل من البحوث المنشورة [2,14,25] . ويرتبط معامل سيبك بمستوى فيرمي وفق العلاقة الاتية :

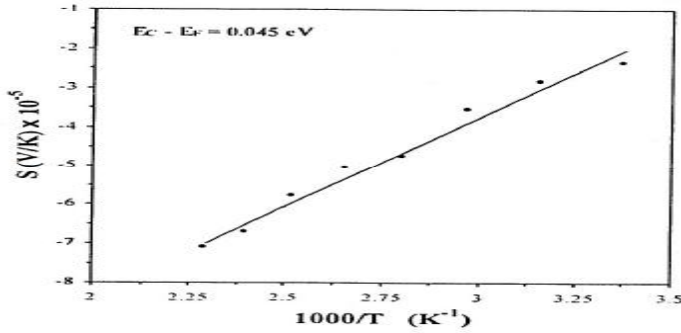
$$S = - \frac{E_C - E_F}{qT} + A \dots\dots\dots (6)$$

حيث ان A : ثابت ، E_C : مستوى الطاقة عند قمة حزمة التوصيل ، E_F : مستوى فيرمي ، T : درجة الحرارة المطلقة ، q : شحنة الالكترون .



الشكل (8) تغير فرق الجهد كدالة للفرق بدرجات الحرارة لآغشاء ZnO

وان الشكل (9) يبين تغير معامل سيبك مع مقلوب درجة الحرارة اما مستوى فيرمي فقيمه موضحة داخل الرسم، حيث كان بمقدار (45meV) وهذه القيمة تتفق مع البحوث المنشورة [2,14,25].



الشكل (9) تغير معامل سيبك مع مقلوب درجة الحرارة لآغشاء ZnO

الاستنتاجات

- 1- ان آغشية ZnO متعددة التبلور (Polycrystalline) سداسي التركيب (Wurtzite).
- 2- ان آغشية ZnO ذات فجوة طاقة مقدارها (0.14eV).
- 3- ان آغشية ZnO ذات طاقة تنشيط مقدارها (0.13eV).
- 4- ان معامل الامتصاص لآغشية ZnO يزداد بزيادة طاقة الفوتون الساقط.
- 5- ان مستوى فيرمي لآغشية ZnO قيمته (45meV).

المصادر

- [1] Roth, A. D. Williams , " properties of ZnO films prepared by oxidation of diethylzinc " J. Appl. Phys., Vol. 52, No. 11, P. 6685, 1981.
- [2] Caporaletti,O. "Electrical and Optical properties of sputtering ZnO thin films " , Solar Energy Material, Vol. 7, P. 65, 1982.
- [3] Schropp ,R. A. Madan , " properties f conductive ZnO films for transparent electrods applications prepared br rf magnetron sputtering ' , J. Appl. Phys., Vol. 66, No. 5, P. 2027, 1989.
- [4] Roy Gordon, Hu Jianhua, " Electrical and Optical of doped tin and zinc oxide thin films by atmospheric pressurechemical vapor deposition", AIP Conference proceedings , Vol. 268 No. 1, P.381, 1992.
- [5] Takada,S. "Relation between optical property and crystallinity of ZnO thin films prepared by rf magnetron sputtering " , J. Appl. Phys., Vol. 73, No. 10, P. 4739, 1993.
- [6] عباس محمد سلمان , " دراسة الخواص الكهربائية والبصرية لاعشوية او أكسيد الزنك الرقيقة وتأثيرها كطلاء للانعكاس على الخلايا الشمسية السلكونية " ، رسالة ماجستير ، كلية العلوم الجامعة المستنصرية ، 2003.
- [7] Eboth , J. A. Hichou and M. Addam, " Flow rate and interface riughness of zinc oxide thin films deposited by spray Pyrolysis technique " , J. Appl. Phys., Vol. 93, No. 1, P. 632, 2003.
- [8] Studeuikin ,S. N. Golego, M. Cocivera , " carrier mobility and density contributions to photoconductivity transients in polycrystalline ZnO films", J. Appl. Phys., Vol. 87, No. 5, P. 2413, 2000.
- [9] Poarton, S. P. Norton, Y. Park and M. Overberg. "Wide band gap ferromagnetic semiconductors and oxide films", J. Appl. Phys., Vol. 93, No. 1, 2003.
- [10] Sonmez, E. S. Aydin, M. Yilmaz , " Study of Structural and Optical Properties of Zinc Oxide Rods Grown on Glasses by Chemical Spray Pyrolysis" , Journal of Nanomaterials , Vol. 2012 ID 950793, P. 5 , 2011 .
- [11] Tamaekong,N. C. Liewhiran, A. Wisitsoraat, and S. Phanichphant, "Flame-spray-made undoped zinc oxide films for gas sensing applications," Sensors, Vol. 10, No. 8, P. 7863–7873, 2010.
- [12] Kanagai , M. M. Yohino , " Electrical and Optical properties for solar cells grown by metalorganic chemical vapor deposition" , J. Appl. Phys., Vol. 70, No. 11, P. 7119, 1991.
- [13] Juarez, D. R. Perez and G. Delgado , " Properties of ZnO:Al thin films obtained by the Sol-Gel method", Modern Physics Letters B, Vol. 15, Nos. 17, 18, 19, P. 730, 2001.
- [14] Koenig,J. F. P. Chartier, " Studies on semiconducting prepared by the spray Pyrolysis technique for photoelectrochemical solar cell applications: preparation and properties ZnO " , j. of Solar Ener. Material, Vol. 14, P. 107, 1986.
- [15] Heo,Y. M. Livill, D. Norton, J. Kelly and F. Hebard, " Effect of high-dose Mn implantation in to ZnO grown on sphhire", J. Appl. Phys. Lett., Vol. 84, No. 13, P. 2292, 2004.

- [16] Asadov, A. W. Gao and Hodgson, "Correlation between Structural and electrical properties of ZnO thin films", Thin Solid Film, Vol. 476, No. 1, P. 201, 2005.
- [17] Shirland, F.A. "Solar Cells", edited by Bachus C, E. IEFF press New York, p: 36, 1976.
- [18] Berry, R.W. P.M.Hall and T.Harris, "Thin Film Technology", Litton Education Publishing, New York, 1969.
- [19] Gledhill, S. A. Grimm, D. Greiner, "Doping induced structural and compositional changes in ZnO spray pyrolysed films and the effects on optical and electrical properties", Thin Solid Films, Vol. 519, P. 4293-4298, 2011.
- [20] Sze, S.M. "Physics of Semiconductor Device", John Wiley and Sons, Inc., New York, 1985.
- [21] Phillips, J. W. Bowen, E. Cagin, W. Wang, "Electronic and Optoelectronic Devices Based on Semiconducting Zinc Oxide", Comprehensive Semiconductor Science and Technology, Vol. 6, P. 101-127, 2011.
- [22] Pankov J., "Optical Processes in Semiconductors", Prentice-Hall, (1973).
- [23] منتهى جاسم الحسيني, "دراسة الخواص الكهربائيه والبصريه لأغشية كبريتيد الخارصين وكبريتيد الرصاص الرقيقه طرقة الرش", رسالة ماجستير مقدمه الى كلية العلوم, الجامعه المستنصريه, (1998).
- [24] Tapio Kannianen, "Studies of Zinc and Lead Chalcogenide Thin Films Grown by Sintering (Successive Layer Adsorption and Reaction) Technique", Thesis University of Helsinki, 2001.
- [25] Julio Aranovich, Armando Ortiz, "Optical and electrical properties for ZnO films prepared by spray Pyrolysis for solar cell application", Vac. Sci. Tech., Vol. 16, No. 4, P.944, 1979.