

## **Effect of Deposition Temperature on the Physical Performance of n-ZnO/p-Si Heterojunction**

**Yasir Hussein Mohammed**

Department of Physics, College of Education for Pure Science, University of Mosul, Mosul, Iraq

Email: [yasir.h.m@uomosul.edu.iq](mailto:yasir.h.m@uomosul.edu.iq)

(Received August 25, 2019; Accepted November 15, 2019; Available online June 01, 2020)

DOI: [10.33899/edusj.2019.126043.1017](https://doi.org/10.33899/edusj.2019.126043.1017), © 2020, College of Education for Pure Science, University of Mosul.

This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### **Abstract**

Comparative study of the physical characteristics of n-ZnO/p-Si heterojunction diode has been done as a function of deposition temperature in the range of 300-600 °C. Transparent conducting (TC) Zinc Oxide (ZnO) thin films were deposited by atmospheric pressure chemical vapor deposition (APCVD) technique on the p-Si(100) and glass substrates. Also, the influences of different deposition temperature on the morphology and optical properties of ZnO films were studied. Both the average surface roughness (from 62.8 to 18.8 nm) and the root mean square (from 78.2 to 24 nm) of ZnO films were decreased with the increase in the deposition temperature. Optical transmittance measurement results exhibited good transparency within the visible wavelength range for the films prepared at a temperature above 400 °C. The current-voltage (I-V) characteristics of the heterojunction diodes exhibited rectification behavior and depend on the deposition temperature. The electrical parameters of the n-ZnO/p-Si heterojunctions were also affected by the deposition temperature. The diodes prepared at a temperature above 400 °C were possessed lower reverse saturation current and high rectification ratio compared to those fabricated at a relatively lower temperature such as 300 °C or 400 °C. Such low a temperature grown n-ZnO/p-Si heterojunction diodes with lower reverse saturation current could be suitable for photo-detection applications.

**Keywords:** Heterojunction diodes; electrical characteristics; deposition temperature; chemical vapor deposition.

**تأثير درجة حرارة الترسيب على الأداء الفيزيائي للمفروق المتباين (n-ZnO/p-Si)**

**ياسر حسين محمد**

قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة الموصل، الموصل، العراق

### **المخلص**

تم إجراء دراسة مقارنة للخصائص الفيزيائية لثنائي المفروق المتباين n-ZnO/p-Si، كدالة لدرجة حرارة الترسيب في المدى (300-600 °C). أغشية أكسيد الزنك (ZnO) الرقيقة الموصلة الشفافة تم ترسيبها بتقنية الترسيب البخاري الكيميائي

عند الضغط الجوي الاعتيادي (APCVD) على أرضيات من السليكون ((p-Si(100)) و الزجاج. كذلك تمت دراسة تأثير تغيير درجة حرارة الترسيب على الخصائص المورفولوجية والضوئية لأغشية (ZnO). ان قيم كلاً من معدل خشونة السطح (من 62.8 الى 18.8 نانومتر) والجذر التربيعي لمربع متوسط الخشونة (من 78.2 الى 24 نانومتر) لأغشية (ZnO) تقل مع زيادة درجة حرارة الترسيب. أظهرت نتائج قياس النفاذية البصرية شفافية جيدة ضمن نطاق الأطوال الموجية المرئية للأغشية المحضرة عند درجة حرارة أعلى من 400 °C. كشفت خصائص تيار- فولتية للثنائيات المتباينة سلوكاً تقويمياً والذي يعتمد على درجة حرارة الترسيب. كما تأثرت المعلمات الكهربائية للثنائيات n-ZnO/p-Si بدرجة حرارة الترسيب. تمتلك الثنائيات المحضرة عند درجة حرارة أعلى من 400 °C تيار تشبع عكسي منخفض، ونسبة تقويم عالية مقارنة بتلك المصنعة عند درجة حرارة منخفضة نسبياً مثل 300 °C أو 400 °C. يمكن أن تكون مثل هذه الثنائيات المتباينة n-ZnO/p-Si المحضرة عند درجة حرارة منخفضة والتي تمتلك تيار تشبع عكسي منخفض مناسبة لتطبيقات الكشف الضوئي.

**الكلمات المفتاحية:** الثنائيات المتباينة، الخصائص الكهربائية، درجة حرارة الترسيب، الترسيب البخاري الكيميائي.

## المقدمة

يعتبر أكسيد الزنك مادة الكترول بصرية شفافة واعدة بسبب خصائصه الألكترونية والضوئية الفريدة من نوعها [1]. إذ يمتاز بثابت عزل كهربائي كبير، استقرار حراري وكيميائي عالي، امتلاكه فجوة طاقة عريضة مباشرة (3.37 eV)، طاقة ربط اكسيون كبيرة (60 meV) عند درجة حرارة الغرفة، غير سام، توصيلية من النوع السالب (n-type)، مادة ذات تكلفة منخفضة مقارنة مع أكسيد القصدير المطعم بالانديوم ((Indium Tin Oxide (ITO)) أو أكسيد القصدير (SnO<sub>2</sub>) [2]. يصنف أيضاً ضمن مجموعة الأكاسيد الموصلية الشفافة ((Transparent Conductive Oxide (TCO))، والتي تمتلك انعكاسية جيدة في المنطقة تحت الحمراء القريبة ونفاذية عالية في المنطقة المرئية. إن هذه الخصائص مكنت من استخدامه بشكل مؤثر في التطبيقات المتنوعة مثل الثنائيات الباعثة للضوء ((Light Emitting Diode (LED)) [3]، الخلايا الشمسية [4]، متحسسات الغاز [1]، الأقطاب الأمامية في الخلايا الشمسية الضوئية [5]، شاشات العرض السائلة ((Liquid Crystal Display (LCD)) [6]، كواشف الأشعة فوق البنفسجية [7]، بالإضافة الى التطبيقات الألكترونية كترانزستورات [8, 9]. لذا فهو يعد اليوم مفتاحاً أساسياً في عمليات تصنيع مختلف النماذج الألكترو بصرية [10]. عموماً، يتم ترسيب أغشية (n-ZnO) الرقيقة على أرضيات متنوعة من النوع الموجب (p-type) (مثلاً: السليكون (Si)، سليكون كربيد (SiC)، كاليوم ارسنيد (GaAs)، نيكل وأكسيد (NiO) [11]، كاليوم نتريد (GaN)، كاليوم نتريد المطعم بالالمنيوم (GaN:Al)، وكاليوم نتريد المطعم بالمغنسيوم (GaN:Mg) [12]، وذلك لتشكيل انواع مختلفة من ثنائيات المفرد المتباين. من بين كل هذه المساعي يتم اعتماد المفرد المتباين ذي التركيب (n-ZnO/p-Si)، بشكل كبير في تصنيع الكواشف الضوئية والخلايا الشمسية وذلك بسبب التكلفة المنخفضة، مقارنة مع التراكيب الأخرى.

استخدمت عدة طرق لتحضير أغشية (ZnO) الرقيقة، منها تقنية الاستئصال بالليزر النبضي (Pulsed Laser Ablation) [13]، النمو الفوقي بالحزمة الجزيئية (Molecular Beam Epitaxy) [14]، التحلل الكيميائي الحراري بالرش (Spray Pyrolysis) [9]، التريذ (Sputtering) [15]، وتقنية الترسيب البخاري الكيميائي عند الضغط المنخفض (LPCVD) [4]. إن تقنية الترسيب البخاري الكيميائي (CVD) يمكن ان تعمل اما في الضغط المنخفض أو الجوي [16] وتمتاز بكونها ذات تكلفة منخفضة لا تحتاج الى عمليات تفريغ عالية ( $10^{-3}$  Torr)، إمكانية تطعيم الغشاء بأية مادة اثناء عملية الترسيب، أكثر اقتصادية مقارنة مع تقنيات الترسيب الأخرى، وإمكانية فائقة في تصنيع (توليف) المواد النانوية ذات الأبعاد المنخفضة (احادية

الابعاد (1D) وثنائية الابعاد (2D) [17]. عموماً فإن تقنية (CVD) هي عملية ترسيب كيميائي تشكل تفاعلاً في الطور الغازي قرب قاعدة الترسيب الساخنة لتكون غشاء صلب [18].

أجريت دراسات متنوعة على مادة (ZnO) بشكل غشاء رقيق ودرست إمكانية الاستفادة منه في كثير من التطبيقات المهمة. على سبيل المثال، درس (Sahu, 2016) تأثير تغيير درجة حرارة الترسيب ( $100, 150, 200$  and  $250$  °C) على معلمات الثنائي المتباين (n-ZnO/p-Si)، والمحفز بتقنية ترسيب الطبقة الذرية ((Atomic Layer Deposition (ALD)). كشفت نتائج القياسات الكهربائية (تيار- فولتية) لجميع الثنائيات المصنعة سلوك تقويمي [19]. حضر (Zhang, 2011) أغشية (ZnO) النقية والمشوبة بالألمنيوم (ZnO:Al) على قواعد من الزجاج باستعمال تقنية التريذ المغنيتروني (Magnetron Sputtering)، تحت درجات حرارة ترسيب مختلفة ( $RT-350$  °C). إذ درست الخواص التركيبية، الكهربائية والبصرية بوصفها دالة لدرجة حرارة الترسيب. أظهرت نتائج القياسات البصرية بان جميع الاغشية تمتلك نفاذية بصرية عالية بحدود ( $\sim 85\%$ ) [20]. إن الاهتمام بتطوير أغشية رقيقة ذات خصائص فيزيائية متميزة قد ازداد بصورة هائلة نتيجة النمو السريع للتطبيقات الألكترونية المختلفة [1]. لذا فإن من المهم القيام بدراسة منهجية للخصائص الفيزيائية لأغشية (ZnO) والمفرق المتباين (n-ZnO/p-Si) في محاولة لتحسين أداء عمل الأجهزة الألكترونية باستخدام أشباه الموصلات المركبة. ان دراسة تأثير تغيير درجة حرارة الترسيب على العديد من الأجهزة البصرية والألكترونية باستخدام أشباه الموصلات المركبة. ان دراسة تأثير تغيير درجة حرارة الترسيب على الخصائص الفيزيائية لثنائي المفرق المتباين (n-ZnO/p-Si) والمحفز بتقنية (APCVD) لم يتم اجرائها بشكل مكثف لحد الان.

تم في هذا البحث دراسة تأثير تغيير درجة حرارة الترسيب ( $300, 400, 500$  and  $600$  °C) على اغشية (ZnO) النقية المحضرة بتقنية (APCVD)، ومن ثم تحديد تأثيرها على أداء المفرق المتباين (n-ZnO/p-Si). المورفولوجية السطحية للأغشية المحضرة (ZnO/p-Si) تمت دراستها باستخدام مجهر القوة الذرية (Atomic Force Microscope-AA3000). القياسات البصرية للأغشية الرقيقة (ZnO/Glass) اشتملت على قياس النفاذية والأمتصاصية ضمن مدى الأطوال الموجية ( $360-1000$  nm)، باستخدام المطياف الضوئي ((UV-Vis Spectrophotometer (Shimadzu, UV1800)) ذي الحزمتين. كذلك تم تقييم ومقارنة الأداء الكهربائي للثنائي المتباين (n-ZnO/p-Si) باستخدام دائرة تيار- فولتية المتواليّة.

#### التقنية العملية

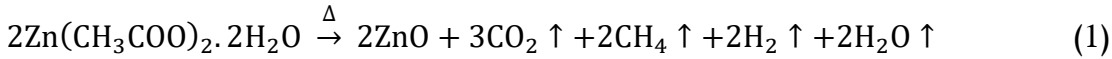
تم في هذا البحث تحضير أغشية (ZnO) الرقيقة عند درجات حرارة ترسيب مختلفة ( $300, 400, 500$  and  $600$  °C) بتقنية (APCVD)، على ارضيات من الزجاج ( $\sim 2.5$  cm<sup>2</sup>) والسليكون ( $\sim 1$  cm<sup>2</sup>) من النوع الموجب (p-type) ذي الاتجاهية (100). إذ نظفت هذه الأرضيات بشكل جيد للتخلص من اية مواد عالقة فيها وذلك بغسلها بمحلول الأسيتون، الايزوبروبانول (IPA)، واخيراً بالماء اللابوني لمدة (5 min) لكل محلول باستخدام جهاز التنظيف بالموجات فوق الصوتية (Ultrasonic Cleaner). لضمان عملية الإزالة التامة لأي أكسيد على سطح السليكون تم وضع أرضيات السليكون في حامض الهيدروفلوريك (HF) المخفف بالماء اللابوني بنسبة (10:1) لمدة ( $\sim 60$  s). أخيراً تم غسلها مرة أخرى بالماء اللابوني ومن ثم تجفف بالهواء الحار وتخزن في حاوية مفرغة من الهواء.

تم تصنيع جميع الثنائيات المتباينة (n-ZnO/p-Si)، من خلال ترسيب طبقة رقيقة من الألمنيوم النقي ( $\sim 99.9\%$ ) بسمك ( $\sim 100$  nm)، على كامل السطح الخلفي لأرضيات السليكون النظيفة عن طريق استخدام جهاز التبخير الحراري تحت ضغط ( $\sim 10^{-5}$  Torr). بعد ذلك تم تليدين النماذج المحضرة (p-Si/Al) في الفراغ، باستخدام فرن كهربائي عند درجة حرارة

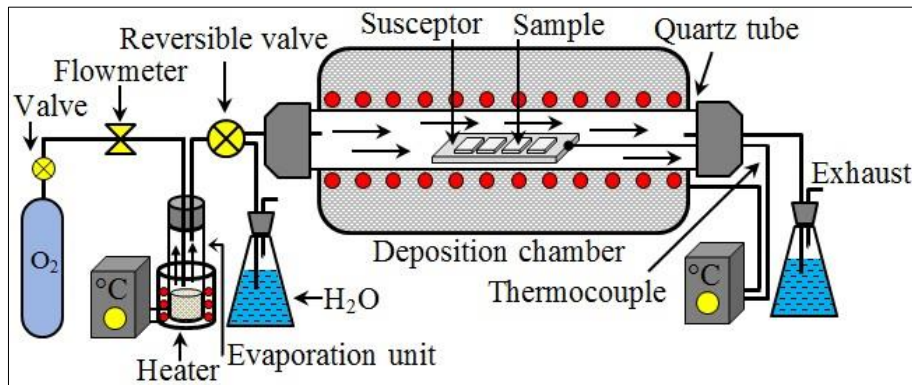
(580 °C) لمدة (5 min)، وتم ذلك عبر استخدام انبوبة زجاجية من البايكرس يتم وضعها داخل الفرن ومفتوحة من أحد الطرفين ومربوطة الى مضخة ميكانيكية. إن عملية التلدين الحراري مهمة جداً لضمان الحصول على اتصال اومي جيد بمقاومة واطئة في نبائط اشباه الموصلات. بعدها تم تثبيت العينات (الزجاج و (p-Si/Al)) على حامل، ومن ثم يتم ادخال الحامل داخل انبوبة الكوارتز. حامل العينات تم تثبيته على بعد (10 cm)، من فتحة دخول الغاز خلال عملية نمو الأغشية الرقيقة. بعدها يتم تسخين انبوبة الكوارتز إلى درجة حرارة النمو المطلوبة. المزودج الحراري ((K-type: (Chromel +, Alumel -)) والمتصل بمسيطر حراري (SG-642) تم استخدامهما للقياس والسيطرة على درجة حرارة الأرضيات بشكل دقيق. اغشية (ZnO) الرقيقة تم ترسيبها لمدة (15 min)، على السطح الأمامي للعينات (الزجاج و (p-Si/Al)) بتقنية (APCVD)، عند درجات حرارة ترسيب مختلفة.

إن أغشية (ZnO) الرقيقة تم تحضيرها من خلال استخدام مادة خلات الزنك المائية  $[Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O]$  كمصدر لعنصر الزنك. حيث تم وضع كمية مقاسة (2.195 gm) من خلات الزنك المائية في بودقة التبخير لتبدأ عملية التسخين إلى درجة حرارة الذوبان ومن ثم التبخر عند درجة حرارة تتراوح (340–380 °C)، وبعد ذلك تم إمرار غاز الأوكسجين من خلال مقياس تدفق الهواء (Flow meter) بمعدل تدفق (500 ml/min) كغاز حامل لنقل البخار إلى حجرة الترسيب وكمتفاعل في عملية الأكسدة داخلها. إن عملية طرد الأبخرة قبل دخولها حجرة الترسيب باتجاه وحدة معالجة الغازات بواسطة صمام التوجيه (Reversible Valve) لمدة (2 min)، أمر مهم جداً وذلك للتخلص من الضبابية التي تتكون على الغشاء الرقيق.

الشكل (1) يعرض مخطط توضيحي لتقنية (APCVD)، والتي تتكون بشكل أساسي من وحدة التبخير (أنتاج الغاز) ووحدة الترسيب. المعادلة الآتية تبين التفاعل الكيميائي الذي يحدث اثناء عملية تكوين اغشية (ZnO).

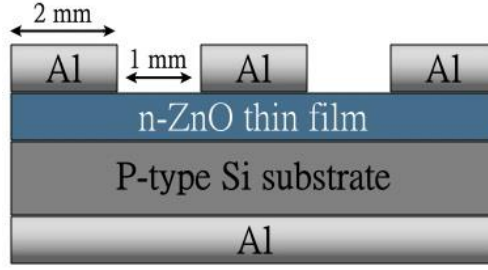


أخيراً تم ترسيب اقطاب دائرية الشكل، ذات اقطار (2 mm) بسبك (100 nm) من مادة الألمنيوم على السطح العلوي لأغشية (ZnO) المنماء من خلال استخدام قناع معدني بتقنية التبخير الحراري.



الشكل (1): مخطط توضيحي لمنظومة الترسيب البخاري الكيميائي عند الضغط الجوي الاعتيادي (APCVD).

الشكل (2) يصور مخطط توضيحي للمقطع العرضي للتثاينات المتباينة المصنعة. لتوصيل التثاينات المتباينة المصنعة بمنظومة قياس تيار - فولتية، تم لصق أسلاك نحاسية رفيعة على نقطة الاتصال (الأقطاب) باستخدام معدن الأندنيوم.



الشكل (2): مخطط توضيحي للمقطع العرضي للثنائي المتباين المصنع.

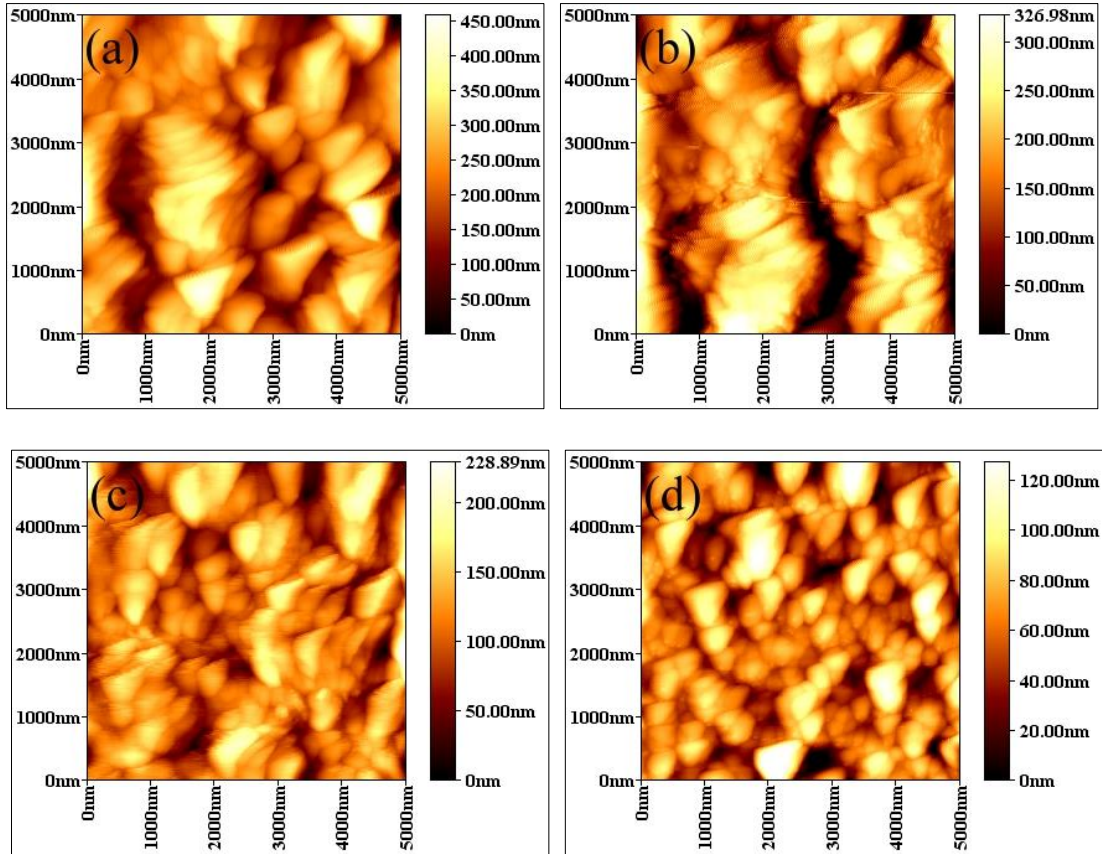
تم قياس سمك الأغشية الرقيقة باستخدام الطريقة الوزنية، وذلك باستعمال ميزان الكتروني عالي الحساسية ( $10^{-4}$  gm)، حيث تم وزن الأرضية قبل وبعد عملية الترسيب، وعن طريق إيجاد فرق الكتلة وبمعرفة كثافة مادة الغشاء ومساحته يمكن إيجاد السمك وفق المعادلة الآتية [21]:

$$t \text{ (cm)} = \frac{\Delta m \text{ (gm)}}{A \text{ (cm}^2\text{)} \rho \text{ (gm/cm}^3\text{)}} \quad (2)$$

حيث ان (t) سمك الغشاء المحضر، (m) كتلة مادة الغشاء، (A) مساحة الغشاء و ( $\rho$ ) كثافة مادة غشاء (ZnO). يتراوح سمك الأغشية المحضرة ضمن المدى (390–680 nm).

#### النتائج والمناقشة

لأجل دراسة تضاريس سطوح الأغشية المحضرة ومدى تأثير تغيير درجة حرارة الترسيب عليها، تم توظيف مجهر القوة الذرية (AFM)، ذي القدرة على تصوير وتحليل هذه السطوح وإعطاء معلومات مهمة في غاية الدقة عن قيم الجذر التربيعي لمربع متوسط الخشونة (Root Mean Square–RMS) ومعدل خشونة السطح (Roughness Average – Ra). الشكل (3) يظهر صور مجهر القوى الذرية ثنائية الأبعاد لأغشية (ZnO) المحضرة على أرضيات من السليكون عند درجات حرارة ترسيب مختلفة. ان تأثير تغيير درجة حرارة الترسيب على الأبعاد والشكل الهندسي للأغشية المحضرة يتجلى بكل وضوح في صور مجهر القوى الذرية (الشكل 3). كذلك تظهر الصور تناقص قيم (RMS) و (Ra) للأغشية المحضرة بزيادة درجة حرارة الترسيب. قيم (RMS) و (Ra) للأغشية المحضرة تم ادراجها بالجدول (1). كما نلاحظ أيضاً أن الغشاء المحضر عند درجة حرارة ترسيب ( $600^\circ\text{C}$ ) يتكون من حبيبات كثيفة ومنظمة (سطح ناعم) مقارنة بالأغشية المحضرة الأخرى. إضافة إلى ذلك أظهر هذا الغشاء نمو حبيبات تقع ضمن المقياس النانوي مع انخفاض في عدد الفراغات (الفجوات) على سطح الغشاء. ان قيمة (Ra) للغشاء المحضر عند ( $300^\circ\text{C}$ ) تساوي (62.8 nm)، والتي انخفضت الى (18.8 nm)، بزيادة درجة حرارة الترسيب الى ( $600^\circ\text{C}$ ). أن زيادة نعومة السطح مع زيادة درجة حرارة الترسيب يمكن أن يعزى الى ان الذرات تمتلك طاقة كافية لإعادة الترتيب لتشكيل سطح ناعم عند درجة حرارة ترسيب عالية [22].

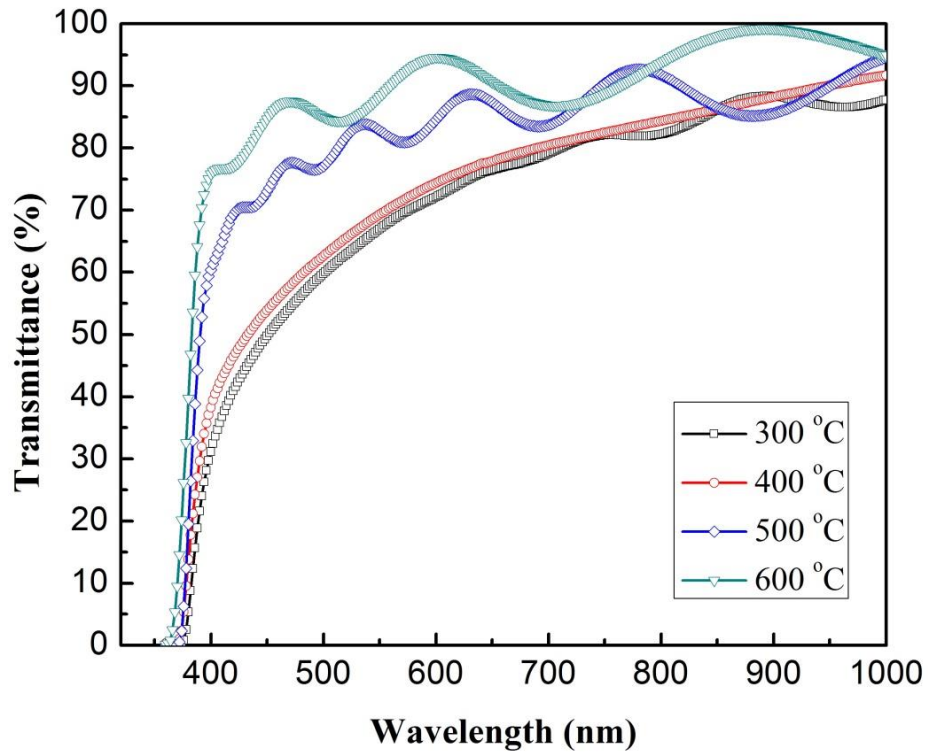


الشكل (3): يعرض صور مجهر القوة الذرية لأغشية (ZnO) المحضرة عند درجات حرارة ترسيب مختلفة  
(a) 300 °C ، (b) 400 °C ، (c) 500 °C و (d) 600 °C.

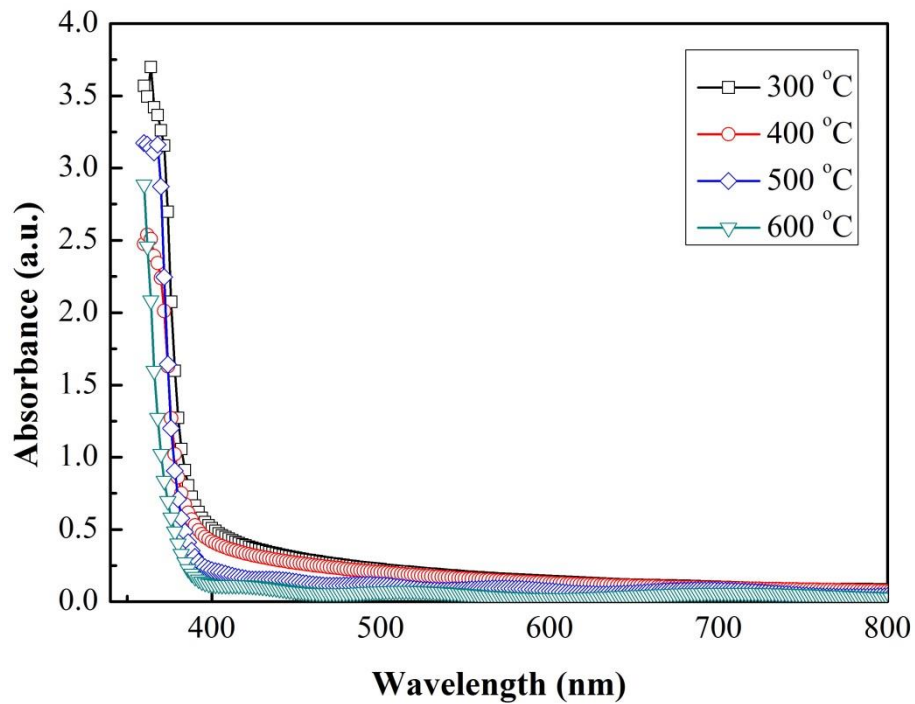
الجدول (1): المعلمات المورفولوجية، الضوئية والكهربائية للنماذج المحضرة.

| Deposition temperature (°C) | Ra (nm) | RMS (nm) | E <sub>opt</sub> (eV) | RR at ± 2V | R <sub>s</sub> (kΩ) | I <sub>o</sub> (nA) | η    | φ <sub>b</sub> (eV) |
|-----------------------------|---------|----------|-----------------------|------------|---------------------|---------------------|------|---------------------|
| 300                         | 62.8    | 78.2     | 3.26                  | 160        | 2.38                | 1.23                | 3.41 | 0.825               |
| 400                         | 57.5    | 71.6     | 3.28                  | 264        | 2.07                | 9.68                | 3.14 | 0.772               |
| 500                         | 28.2    | 35.4     | 3.3                   | 445        | 1.73                | 21.02               | 2.43 | 0.752               |
| 600                         | 18.8    | 24       | 3.35                  | 1085       | 0.86                | 30.51               | 2.19 | 0.742               |

تضمنت الخواص البصرية دراسة تأثير تغيير درجة حرارة الترسيب (300, 400, 500 and 600 °C)، على الخواص البصرية لأغشية (ZnO). إذ تضمنت الخواص البصرية قياس ودراسة كل من أطراف النفاذية، الامتصاصية والانعكاسية. الشكل (4) يوضح أطراف النفاذية الضوئية لأغشية (ZnO) الرقيقة المحضرة على أرضيات من الزجاج عند درجات حرارة ترسيب مختلفة. بينت هذه النتائج أن هناك زيادة واضحة في قيم النفاذية الضوئية بوصفها دالة للطول الموجي مع زيادة درجة حرارة الترسيب والتي يقابلها نقصان في قيم الامتصاصية الضوئية (الشكل (5)) ولجميع درجات الحرارة أيضاً. يمكن ملاحظة أن أغشية (ZnO)، تمتلك معدل نفاذية يقدر بحوالي (70%~) عند درجة حرارة (300 °C)، وتزداد هذه القيمة لتصل إلى معدل (95%~) عند درجة حرارة (600 °C)، ضمن منطقة الطيف المرئي والمنطقة تحت الحمراء القريبة، مع وجود نفاذية واطئة جداً في منطقة الأشعة فوق البنفسجية والتي تزداد بشكل حاد عند القيمة (380-400 nm)، وتسمى هذه المنطقة بحافة الامتصاص الأساسية. إن طيف النفاذية لجميع الأغشية أظهر حافة امتصاص حادة في منطقة الأشعة فوق البنفسجية وهذا يدل على الامتصاص العالي للفوتونات الساقطة على الغشاء في هذه المنطقة من الطيف الكهرومغناطيسي. كذلك نلاحظ من الشكل (4) وجود ازاحة في حافة الامتصاص الأساسية باتجاه الأطوال الموجية القصيرة (الطاقات العالية) مع زيادة درجة حرارة الترسيب. أن هذه الأزاحة في حافة الامتصاص البصرية، والتي أدت بدورها إلى زيادة في فجوة الطاقة البصرية لأغشية (ZnO)، يمكن أن تكون بسبب تأثير بورشتن-موس (Burstein-Moss effect) [23]. كذلك كشفت الأغشية المحضرة عند درجات حرارة أكبر من 400 °C عن وجود تذبذب في طيف النفاذية الضوئية (الشكل (4)). إن هذه الظاهرة يمكن أن تعزى إلى التحسن في التجانس الهيكلي والبلوري للأغشية الرقيقة مع زيادة درجة حرارة الترسيب [24].



الشكل (4): يوضح تغير طيف النفاذية الضوئية لأغشية (ZnO) عند درجات حرارة ترسيب مختلفة.



الشكل (5): يظهر تغير طيف الامتصاصية الضوئية لأغشية (ZnO) عند درجات حرارة ترسيب مختلفة.



قيم معامل الامتصاص ( $\alpha$ ) لجميع الأغشية المحضرة تم الحصول عليه باستخدام قانون بير-لامبرت (Beer-Lambert Law)، وكما مبين بالمعادلة الآتية [25]:

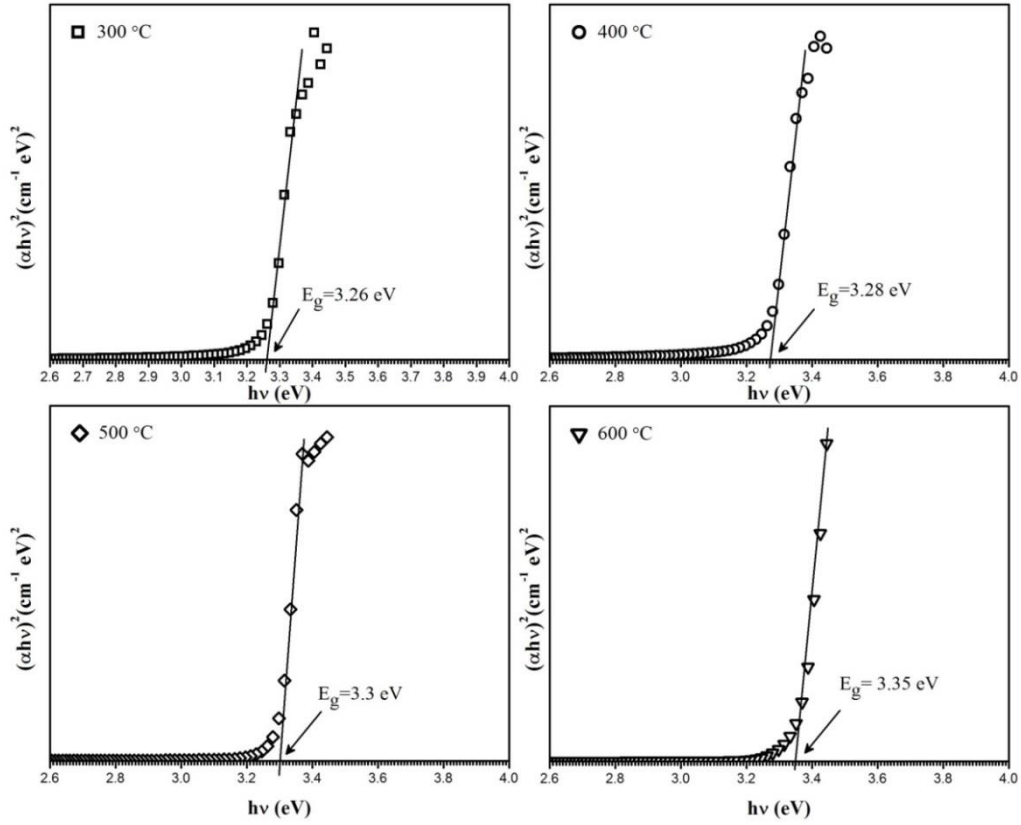
$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \left( \frac{1}{T} \right), \quad (3)$$

حيث ان ( $t$ ) سمك الغشاء و ( $T$ ) نفاذية الغشاء الرقيق. فجوة الطاقة البصرية ( $E_{opt}$ ) للأغشية الرقيقة تم حسابها باستخدام علاقة توك (Tauc's relation) [26, 27].

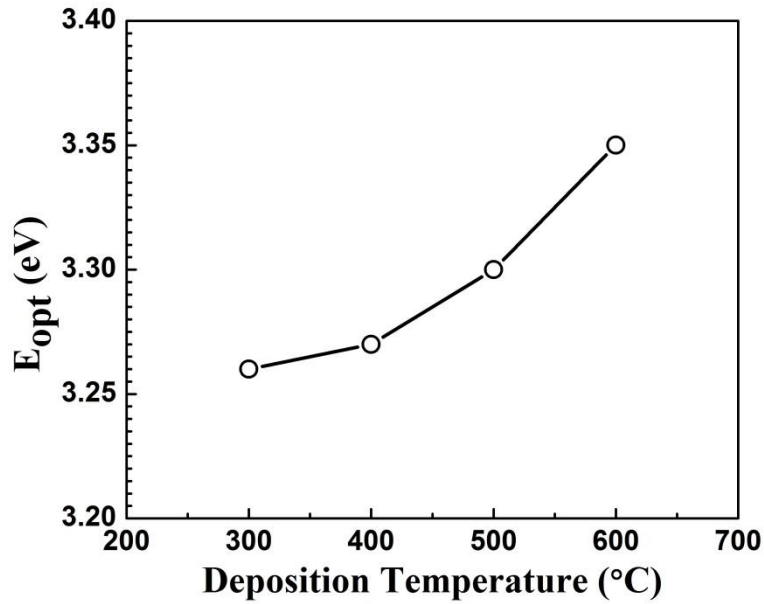
$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n, \quad (4)$$

حيث ان ( $h$ ) ثابت بلانك، ( $\nu$ ) تردد فوتون الضوء الساقط، ( $A$ ) ثابت يعتمد على قيمتي الكتلة الفعالة لحاملات الشحنة. الأس ( $n$ ) يعتمد على طبيعة الانتقالات البصرية السائدة. للانتقالات الألكترونية المباشرة المسموحة، غير المباشرة المسموحة والمباشرة الممنوعة، قيمة  $n$  تساوي (1/2)، (2) و (3/2) على التوالي. اظهرت نتائج العمل الحالي أن أغشية (ZnO) تمتلك انتقالات الكترونية مباشرة ( $\alpha > 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ). ان تحديد قيمة ( $\alpha$ ) تساعد على معرفة طبيعة الانتقالات الألكترونية فإذا كانت قيمته كبيرة بمقدار ( $\alpha > 10^4 \text{ cm}^{-1}$ )، فذلك يشير الى احتمالية حدوث انتقال الكتروني مباشر. أما إذا كانت قيمته بمقدار ( $\alpha < 10^4 \text{ cm}^{-1}$ )، فذلك يدل على حدوث انتقال الكتروني غير مباشر [28].

الشكل (6) يوضح العلاقة بين ( $\alpha h\nu$ ) و ( $h\nu$ ) لأغشية (ZnO) الرقيقة المحضرة عند درجات حرارة ترسيب مختلفة. ان قيمة فجوة الطاقة البصرية للأغشية المحضرة ازدادت من (3.26 eV) الى (3.35 eV) مع زيادة درجة حرارة الترسيب من (300 °C) الى (600 °C)، على التوالي. كذلك نلاحظ من الشكل أيضاً أن حافة الامتصاص البصرية أظهرت إزاحة زرقاء (Blue-Shift). إن زيادة فجوة الطاقة البصرية للأغشية المحضرة مع زيادة درجة حرارة الترسيب يمكن ملاحظته بوضوح في الجدول (1) و الشكل (7)، ويمكن أن تعزى هذه الزيادة الى تأثير بورشتن-موس (Burstein-Moss effect) [23].



الشكل (6): العلاقة بين  $(\alpha hv)^2$  و  $h\nu$  لأغشية (ZnO) الرقيقة المحضرة عند درجات حرارة ترسيب مختلفة.

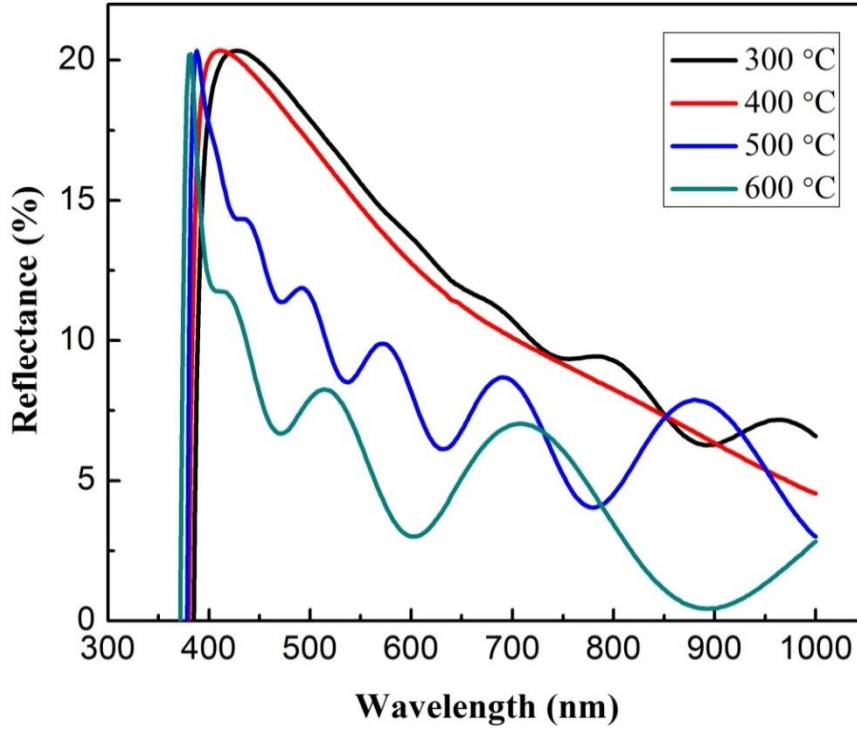


الشكل (7): العلاقة بين فجوة الطاقة البصرية ودرجة حرارة الترسيب لأغشية (ZnO).

الشكل (8) يظهر أطراف الانعكاسية الضوئية لأغشية (ZnO) الرقيقة المحضرة عند درجات حرارة ترسيب مختلفة. نلاحظ من الشكل أن الانعكاسية الضوئية للأغشية الرقيقة في المنطقة المرئية ومنطقة الأشعة تحت الحمراء تتغير أيضاً مع تغير درجة حرارة الترسيب. كذلك نلاحظ أيضاً حدوث هبوط حاد في قيم الانعكاسية الضوئية ما بعد الطول الموجي (400 nm)، مما يشير الى وجود انتقالات ضوئية داخل فجوة الطاقة [16]. إن قيم الانعكاسية الضوئية للأغشية تم حسابها باستخدام العلاقة الآتية [29]:

$$R = 1 - T - A$$

(5)



الشكل (8): يعرض تغير طيف الانعكاسية الضوئية لأغشية (ZnO) عند درجات حرارة ترسيب مختلفة.

الشكل (9) يظهر خصائص تيار- فولتية للثنائيات المتباينة المقاسة في حالة الظلام. اظهرت الثنائيات المتباينة سلوكاً غير مثالي، والذي قد يكون بسبب وجود حالات سطحية، طبقة الأوكسيد والطبيعة البلورية لأغشية اوكسيد الزنك [30]. خصائص تيار- فولتية للثنائيات المتباينة تحت ظروف الانحياز الامامي اظهرت ان قيمة التيار تزداد بشكل اسبي عند الفولتيات الواطنة بسبب زيادة عرض منطقة الاستنزاف عند السطح البيني. بينما نلاحظ عند فولتيات الانحياز العالية، تكون خصائص تيار- فولتية خطية تقريباً وذلك لأن طبقة الاستنزاف تقل عند السطح البيني [30]. من الواضح أن نسبة التقويم (Rectification Ratio (RR)) تعتمد على درجة حرارة الترسيب. نلاحظ من الجدول (1)، زيادة RR، مع زيادة درجة حرارة الترسيب. يمكن أن يرتبط هذا بالحجم الحبيبي لأغشية ZnO [30]. ان ارتفاع قيمة RR، يشير الى تحسن أداء الثنائي المتباين. للحصول على معلمات مهمة أخرى، تم تحليل خصائص I-V، باستخدام العلاقة [31].

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV_d}{\eta kT}\right), \quad (6)$$

حيث إن (I) يمثل التيار، ( $I_0$ ) تيار التشبع العكسي، (q) شحنة الالكترن، ( $V_d$ ) الفولتية عبر الثنائي، ( $\eta$ ) عامل المثالية، (k) ثابت بولتزمان و (T) درجة الحرارة بالكلفن (300 K). باستخدام العلاقة ( $V_d = V - IR_s$ )، وحيث ان فولتية الانحياز المسلطة و ( $R_s$ ) المقاومة المتوالي للثنائي المتباين. تم الحصول على قيمة ( $R_s$ )، من خلال حساب ميل الجزء الخطي في منحنى (I-V) عند جهد أعلى من جهد الركبة (Knee Voltage)، حيث كان سلوك الثنائي المتباين خطياً. لقد وجد أن قيمة ( $R_s$ )، تتناقص مع زيادة درجة حرارة الترسيب، والذي يمكن ان يعزى بشكل اساسي الى زيادة كثافة حاملات الشحنة في اغشية (ZnO) مع زيادة درجة حرارة الترسيب [19]. تم حساب قيمة ( $I_0$ ) و ( $\eta$ ) كما هو مبين في الجدول (1) للثنائيات المتباينة من خلال اخذ لوغاريتم

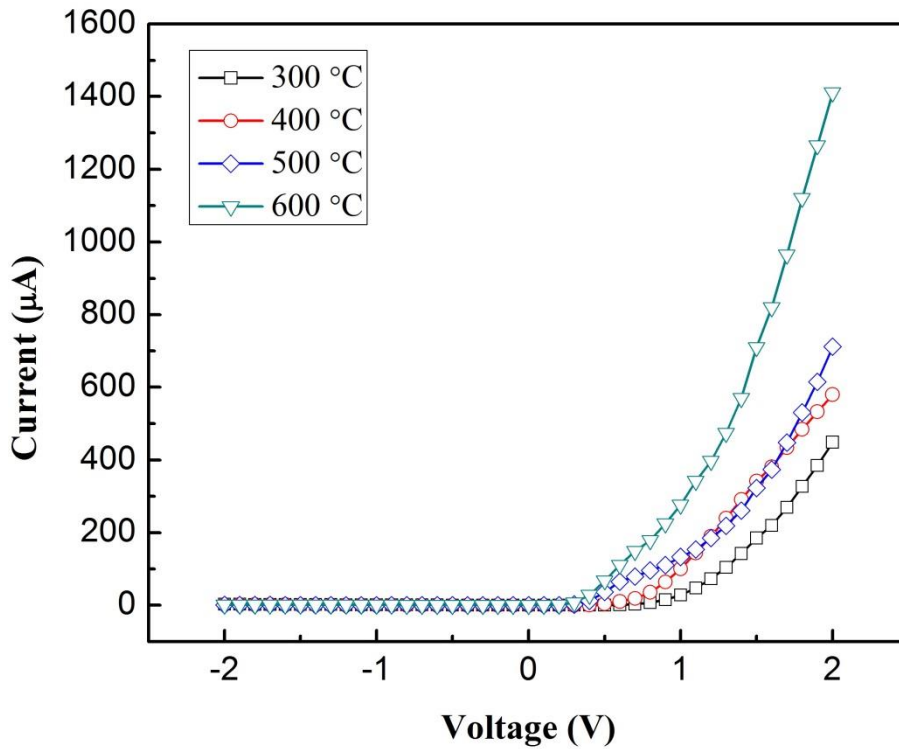
المعادلة (6)، والتي تسفر عن العلاقة:  $\ln I = \ln I_0 + (qV/\eta kT)$ . إن قيمة ( $I_0$ ) تم الحصول عليها من خلال تقاطع المحور ( $y$ ) لرسم ( $\ln I-V$ ) عند قيمة فولتية انحياز تساوي صفر. أما الميل لنفس الرسم يعطي قيمة ( $\eta$ ). من المعادلة (6)، قيمة ( $\eta$ ) تعطى بالشكل:

$$\eta = \left(\frac{q}{kT}\right) \left(\frac{\partial V}{\partial \ln I}\right), \quad (7)$$

من الجدول (1)، وجد أن عند زيادة درجة حرارة الترسيب، ازدادت قيمة تيار التشبع العكسي. تم ملاحظة سلوك مماثل من قبل باحثين اخرون [19]. وجد ايضاً ان قيمة ( $\eta$ ) تتغير ضمن المدى (2.19 الى 3.41) مع تغيير درجة حرارة الترسيب. كانت القيم المحسوبة لـ ( $\eta$ ) أعلى من الواحد وكما مبين بالجدول (1)، والتي يمكن أن تعزى الى تأثير المقاومة المتواليّة و طبقة الاوكسيد (native oxide) الرقيقة البينية عند السطح البيني بين (Al) و (ZnO) [28]. هذا يدل على ان الشوائب المتباينة المصنعة اظهرت سلوك غير مثالي. من الجدول (1) يلاحظ أن قيم ( $\eta > 2$ )، مما يشير الى هيمنة الية إعادة الاتحاد [19]. تم ايجاد قيمة ( $I_0$ ) باستخدام العلاقة الاتية [31]:

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right), \quad (8)$$

حيث ان ( $A$ ) مساحة الاتصال، ( $A^*$ ) ثابت ريتشاردسون الفعال ( $32 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$  for ZnO) و ( $\phi_b$ ) ارتفاع حاجز الجهد. تم حساب قيم ( $\phi_b$ ) عن طريق تعويض قيم ( $I_0$ ) في المعادلة (8). وجد ان قيم ( $\phi_b$ )، تقل مع زيادة درجة حرارة الترسيب. جميع المعلمات الكهربائية للشوائب المتباينة تم إدراجها في الجدول (1).



الشكل (9): يعرض خصائص تيار - فولتية للشوائب المتباينة المحضرة عند درجات حرارة ترسيب مختلفة.

## الاستنتاجات

باختصار، تم ترسيب جميع أغشية (ZnO) الرقيقة على أرضيات من الزجاج والسليكون (p-Si) باستخدام تقنية (APCVD) ضمن مدى درجات الحرارة (300-600 °C). تم دراسة تأثير تغيير درجة حرارة الترسيب على الخصائص المورفولوجية والضوئية لأغشية (ZnO) الرقيقة ومن ثم تحديد تأثيرها على أداء المفرد المتباين (n-ZnO/p-Si) باستخدام مجهر القوة الذرية، والمطياف الضوئي ذي الحزمتين ودائرة تيار- فولتية. وفقاً لنتائج AFM، قل معدل خشونة السطح والجذر التربيعي لمربع متوسط الخشونة وكذلك انخفاض عدد الفراغات على سطح الغشاء الرقيق مع زيادة درجة حرارة الترسيب. لقد تبين أنه من خلال السيطرة على درجة حرارة الترسيب، يمكن التحكم في حافة امتصاص الأشعة فوق البنفسجية، ويمكن التحكم أيضاً في فجوة الطاقة والنفاذية لأغشية (ZnO). تم تفسير اتساع فجوة الطاقة البصرية من خلال تأثير بورشتن - موس. لقد وجد أن الثنائيات المتباينة المحضرة في درجات حرارة أعلى من 400 °C لديها أفضل نسبة تقويم مقارنة بالثنائيات المحضرة عند درجات حرارة أقل من 400 °C.

## Acknowledgments

The author is gratefully acknowledges the partial financial support from Ministry of Higher Education and Scientific Research, Iraq.

## المصادر

- 1 Fan, Z. and Lu, J. G., Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 5(10) 1561-1573 (2005)
- 2 Özgür, Ü., Alivov, Y. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S.-J. and Morkoç, H., Journal of Applied Physics, 98(4) 041301 (2005)
- 3 Choi, Y., Kang, J., Hwang, D. and Park, S., IEEE Transactions on Electron Devices, 57(1) 26-41 (2010)
- 4 Faÿ, S., Steinhauser, J., Nicolay, S. and Ballif, C., Thin Solid Films, 518(11) 2961-2966 (2010)
- 5 Fernández, S. and Naranjo, F. B., Solar Energy Materials and Solar Cells, 94(2) 157-163 (2010)
- 6 Yamamoto, N., Makino, H., Osone, S., Ujihara, A., Ito, T., Hokari, H., Maruyama, T. and Yamamoto, T., Thin Solid Films, 520(12) 4131-4138 (2012)
- 7 Echresh, A., Chey, C. O., Zargar Shoushtari, M., Khranovskyy, V., Nur, O. and Willander, M., Journal of Alloys and Compounds, 632 165-171 (2015)
- 8 Klingshirn, C., physica status solidi (b), 244(9) 3027-3073 (2007)
- 9 Adamopoulos, G., Bashir, A., Wöbkenberg, P. H., Bradley, D. D. C. and Anthopoulos, T. D., Applied Physics Letters, 95(13) 133507 (2009)
- 10 Jagadish, C. and Pearton, S. J., "Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures: Processing, Properties and Applications". New York, Elsevier, (2006)

- 11 Echresh, A., Ali Abbasi, M., Zargar Shoushtari, M., Farbod, M., Nur, O. and Willander, M., *Semiconductor Science and Technology*, 29(11) 115009 (2014)
- 12 Chen, T., Liu, S.-Y., Xie, Q., Detavernier, C., Van Meirhaeghe, R. L. and Qu, X.-P., *Applied Physics A*, 98(2) 357 (2009)
- 13 Henley, S. J., Ashfold, M. N. R. and Cherns, D., *Surface and Coatings Technology*, 177-178(Supplement C) 271-276 (2004)
- 14 Heo, Y. W., Norton, D. P. and Pearton, S. J., *Journal of Applied Physics*, 98(7) 073502 (2005)
- 15 Li, X.-Y., Li, H.-J., Wang, Z.-J., Xia, H., Xiong, Z.-Y., Wang, J.-X. and Yang, B.-C., *Optics Communications*, 282(2) 247-252 (2009)
- 16 Mohammed, Y. H., *Superlattices and Microstructures*, 131 104-116 (2019)
- 17 Xiang, B., Wang, P., Zhang, X., Dayeh, S. A., Aplin, D. P. R., Soci, C., Yu, D. and Wang, D., *Nano Letters*, 7(2) 323-328 (2007)
- 18 Pierson, H. O., "Handbook of Chemical Vapor Deposition: Principles, Technology and Applications". New Jersey, NOYES PUBLICATIONS, (1999)
- 19 Sahu, V. K., Misra, P., Ajimsha, R. S., Das, A. K. and Singh, B., *Materials Science in Semiconductor Processing*, 54 1-5 (2016)
- 20 Zhang, Z., Bao, C., Yao, W., Ma, S., Zhang, L. and Hou, S., *Superlattices and Microstructures*, 49(6) 644-653 (2011)
- 21 Eckertová, L., "Physics of Thin Films". New York, Springer US, (1977)
- 22 Shiau, J.-S., Brahma, S., Liu, C.-P. and Huang, J.-L., *Thin Solid Films*, 620(Supplement C) 170-174 (2016)
- 23 Chen, H., Ding, J., Guo, W., Shi, F. and Li, Y., *Applied Surface Science*, 258(24) 9913-9917 (2012)
- 24 Ramakrishna Reddy, K. T. and Miles, R. W., *Journal of Materials Science Letters*, 17(4) 279-281 (1998)
- 25 Yahya, N., "Carbon and Oxide Nanostructures: Synthesis, Characterisation and Applications". New York, Springer Berlin Heidelberg, (2011)
- 26 Lemlikchi, S., Abdelli-Messaci, S., Lafane, S., Kerdja, T., Guittoum, A. and Saad, M., *Applied Surface Science*, 256(18) 5650-5655 (2010)
- 27 Kasap, S. and Capper, P., "Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials". New York, Springer, (2006)
- 28 Soyulu, M. and Savas, O., *Materials Science in Semiconductor Processing*, 29(Supplement C) 76-82 (2015)

- 29 Stenzel, O., "The Physics of Thin Film Optical Spectra: An Introduction", Springer International Publishing, (2015)
- 30 Singh, S. K. and Hazra, P., Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 29(6) 5213-5223 (2018)
- 31 Sze, S. M., "Physics of Semiconductor Devices", John Wiley and Sons, (1981)