

تحليل خصائص التيار والجهد كنظام لدرجة الحرارة واستخراج المقاومة

المتسلسلة لديدوت شوتكي Cu/ZnO/Al

زينب الحسن¹ أ.د. عبد الرزاق الصوفي² أ.د. عبد الله رستناوي³

الملخص

في هذا البحث تم تحليل قياسات الجهد-التيار ($I - V$) التي أجريت على ديدوتات شوتكي من النمط Cu/ZnO/Al عند درجات حرارة ($27 - 200 - 400^\circ\text{C}$)، اعتماداً على نظرية الانبعاث بالتأين الحراري (TE). تم تحليل الميزة الأمامية $I - V$ لاستخراج ثوابت ديدوت شوتكي Cu/ZnO/Al. لوحظ أن ارتفاع حاجز الكمون ازداد مع زيادة درجة الحرارة حتى الدرجة 200°C ثم بدأ بالتناقص، كما وجد أنه على علاقة عكسية مع تيار الإشباع، بينما عامل المثالية ازداد. وبالمقارنة مع طريقة Cheung و Cheung لاستخراج المقاومة التسلسلية، وجد أنه مع زيادة درجة الحرارة، انخفضت المقاومة التسلسلية وارتفاع حاجز الكمون، وإيضاً ازداد عامل المثالية. يعود سبب ذلك إلى وجود عدم تجانس في ارتفاع الحاجز. تمت دراسة تغيرات المقاومة التسلسلية وارتفاع حاجز الكمون حسب نظرية (TE) وكانت النتائج متطابقة مع نتائج نظرية Cheung و Cheung. إضافة لذلك، تم إجراء الدراسة بالاعتماد على نظرية Norde وتم الحصول على قيم المقاومة التسلسلية وارتفاع حاجز الكمون والتي كانت أصغر بكثير من القيم في نظرية Cheung و Cheung وتوافق نظرية (TE) إلى حد كبير في قيم عامل المثالية.

الكلمات المفتاحية: ديدوت شوتكي، أكسيد الزنك، نظرية Cheung، نظرية Norde، نظرية

الانبعاث الحراري (TE)، عامل المثالية، المقاومة التسلسلية، ارتفاع حاجز الكمون، الميزة $I - V$.

¹ طالبة دكتوراه ² دكتور في فيزياء البلورات والأشعة السينية ³ دكتور في الفيزياء النووية.

**Analysis of temperature dependent current and voltage
characteristics and extraction of series resistance in Cu/ZnO/Al
Schottky diodes**

Abstract

In this research, we analyze the current–voltage (I–V) measurements performed on Cu/ZnO/Al Schottky diodes at temperatures of (27 – 200 – 400°C). Based on the TE theory, the forward bias I – V characteristic was analyzed to extract the Schottky diode constants for the Cu/ZnO/Al Schottky diode. It was observed that the potential barrier increased with increasing temperature up to 200°C. and then started to decrease. It was also found to be inversely related to the saturation current, while the ideality factor increased. Compared with Cheung and Cheung's method for extracting the series resistance, it was observed that the series resistance and potential barrier decreased with increasing temperature, and the ideality factor increased. This is attributed to the presence of inhomogeneity in the barrier height. The variations of the series resistance and potential barrier height were studied according to the TE theory, and the results were consistent with those of Cheung and Cheung. The study was carried out based on Norde's theory and the values of series resistance and potential barrier were obtained which

were much smaller than the values in Cheung and Cheung's theory and in good agreement with TE theory in ideality factor values.

Keywords: Schottky diode, zinc oxide, Cheung's theorem, Norde's theorem, thermionic emission (TE) theory, ideality factor, series resistance, potential barrier, (I – V) characteristic.

1. مقدمة

1.1. أهمية أكسيد الزنك في التطبيقات الإلكترونية:

يعد ZnO مادة مهمة للبحث عن التيار نظراً للأهمية الإلكترونية الضوئية والإلكترونية النانوية، مما يجعله مرشحاً مثالياً للديودات الباعثة للضوء فوق البنفسجي، لتحقيق هذه الأجهزة للتطبيقات يجب أن تكون مناسبة. ولكن يصعب تصنيع وصلات شوتكي جيدة من المواد نصف الناقلة بسبب وجود حالات الوجه البيني بين الفيلم والمعدن والتي يمكن أن تؤدي إلى انحراف كبير عن السلوك المثالي، حيث استخدم الباحثون معادن مختلفة مثل Al, Au, Ag, Pt و Pd لتحقيق وصلات شوتكي موثوقة. تحتوي وصلات شوتكي هذه على ارتفاعات حاجز كمون تتراوح بين 0.6 eV إلى 0.8 eV مما يشير إلى التأثير غير المهم لحالات عيوب الوجه البيني (interface) (السطح البيني). علاوة على ذلك، تعتمد حالات الوجه البيني هذه بشدة على الخل في كثافة الفيلم المزروع وبالتالي على تقنية النمو المستخدمة [1].

يعتبر أكسيد الزنك ZnO من أنجح أنصاف-النواقل لأكسيد المعدن في شكل بنيته النانوية نظراً لتطبيقاته العديدة في الأجهزة الإلكترونية الضوئية. ترجع العديد من هذه التطبيقات المحتملة لأكسيد الزنك إلى الأسباب التي تجعله يتمتع بطاقة الفجوة العنصرية (طاقة المجال المحظور) واسعة تبلغ 3.37 eV وميزة بارزة تتمثل في وجود طاقة إكسيتون عالية تبلغ 60 meV. تكون وصلة شوتكي

أمراً حيوياً بين المعدن وأنصاف النواقل، والتي تنشأ بسبب (I) التباين بين الألفة الإلكترونية لأنصاف-النواقل وتابع عمل المعادن، وكذلك (II) تثبيت مستوى فيرمي لأنصاف - النواقل. فيتشكل بين المعدن ونصف الناقل حاجز شوتكي هو حاجز طاقة يمكن ضبطه عن طريق التحكم بعرض منطقة النضوب ونقل الشحنات عبر الوصلة. عند جهد تحيز ثابت، يُظهر ارتفاع التيار والحاجز علاقة أسية، مما يجعل حاجز شوتكي حاسماً لتشغيل أي وصلة من وصلات أنصاف النواقل [2].

1-2 تحديد ثوابت ديودات شوتكي:

في تحقيق الأجهزة القائمة على أنصاف-النواقل، هناك العديد من الثوابت التي يجب أخذها في الاعتبار: عملية تحضير السطح، تكوين ارتفاع الحاجز بين المعدن وأنصاف-النواقل وتجانسه، كثافة حالات الوجه البيني والخلع، الجهد المطبق والمقاومة التسلسلية (R_s). وتعتبر من بين كل هذه معامل هام يتسبب في أن تكون الميزة الكهربائية للأجهزة غير مثالية. هناك تقنيات مختلفة لتقييم الثوابت الكهربائية الرئيسية من قياسات $I - V$ للتحيز الأمامي مثل طريقة Cheung و Cheung وقانون أوم. تقدم طريقة Cheung وطريقة Norde نهجاً بديلاً من قانون أوم لتحديد ارتفاع الحاجز وعامل المثالية و (R_s) من قياسات $I - V$ الأمامية، والتي تعد الثوابت الكهربائية الرئيسية في توصيف وتوفر معلومات مفيدة بشأن طبيعة الديودات وتحديد ارتفاع حاجز الكمون.

لا يعطي تحليل الميزة $I - V$ الأمامية والعكسية لهذه الديودات عند درجة حرارة الغرفة فقط وصفاً تفصيلياً لآلية نقل التيار، بل تعطي الميزة $I - V$ في مجال واسع من درجات الحرارة فهماً واضحاً لجوانب آلية نقل التيار وتكوين الحاجز. بشكل عام، تتحرف الميزة $I - V$ الأمامية لهذه الأجهزة عن نظرية TE المثالية وفقاً لطريقة Cheung و Cheung. لا تزال هناك بعض الصعوبة في التنبؤ بظاهرة النقل الدقيقة. يوفر التحليل الدقيق للميزة $I - V$ للديودات عند درجات

حرارة مختلفة معلومات مفصلة عن عملية النقل وطبيعة تكوين الحاجز عند واجهة أنصاف-النواقل المعدنية. ومع ذلك، في حالة وجود جهد حاجز غير متجانس بين المعدن وأنصاف-النواقل، فإن كمون حاجز يشبه حاجزاً يتكون من بقع أعلى وأسفل يمر التيار من خلالها. وبالتالي، من الممكن تفسير ذلك من خلال نظرية TE مع التوزيع الغاوسي لجهد حاجز الكمون. في هذه التحليل، تمت دراسة الميزة $I - V$ الأمامية والعكسية كتابع لدرجة الحرارة لديود شوتكي $Cu/ZnO/Al$ عند درجات حرارة ($27 - 200 - 400^{\circ}C$). تم حساب المقاومة المتسلسلة وارتفاع حاجز شوتكي وعوامل المثالية باستخدام الطرق التقليدية وكذلك الطرق البديلة. تم الحصول على ارتباط عادل مع الطرق البديلة والطرق التقليدية في مناطق معينة من المخططات. كان الانحراف عن آلية نقل TE المثالية مشكلة مع مواد ZnO [3].

2. هدف البحث

- دراسة الميزة جهد-تيار $I - V$ لديود شوتكي عند درجات حرارة مختلفة.
- دراسة تأثير درجة الحرارة على الميزة جهد - تيار.
- حساب ارتفاع كمون الحاجز وعامل المثالية وتيار الإشباع وفقاً لنظرية الانبعاث الحراري.
- حساب كمون الحاجز وعامل المثالية وتيار الإشباع وفقاً لنظرية Cheunge و Cheunge
- حساب كمون الحاجز وعامل المثالية وتيار الإشباع وفقاً لنظرية Norde.
- مقارنة النتائج التي حصلنا عليها من النظريات الثلاثة.
- تحديد الطريقة المناسبة والأفضل لدراسات كديودات شوتكي.
-

3. مواد وطرق البحث

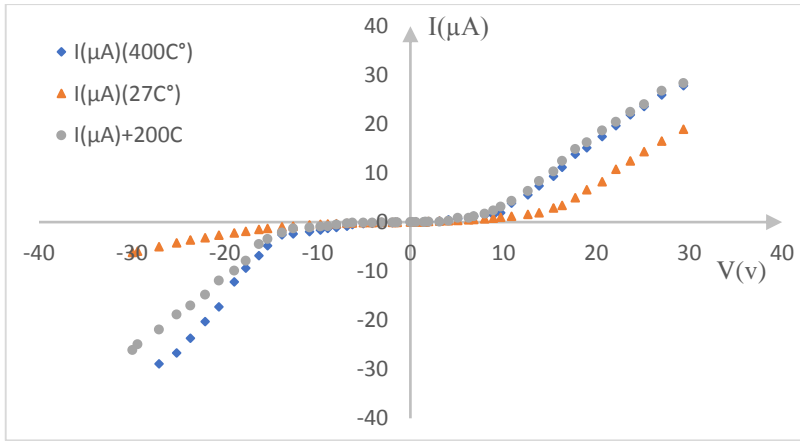
استعمل ZnO (99.5% من Honeywell Riedel-de Haën) كعينة أساسية، تم ترسيب فيلم ZnO على Cu لتحقيق الوصلة الأومي بواسطة طريقة الطلاء بالبخ (وهي طريقة تتم باستخدام ضغط الغاز يتم بخ المادة المراد التصاقها على المعدن). حيث أولاً حضرت الأقراص النحاسية بنصف قطر متماثل من أجل جميع العينات 1.0cm، غسلت بالماء المقطر وجففت لمدة 24 ساعة عند درجة حرارة المخبر. ثم جرى ترسيب الأكسيد بسماكة 50µm على القرص باستعمال طريقة الطلاء بالبخ بمساعدة الغاز المضغوط (غاز النيتروجين) [4.5]. حضرت وصلة شوتكي Al ذات سماكة 1µm تقريباً التي تم بخها على الوجه العلوي من ZnO ، باستعمال طريقة البخ الحرارية.

تم الحصول على الميزة $I - V$ الأمامية والعكسية باستخدام دائرة إلكترونية مؤلفة من مقياس أمبير - مقياس فولت ومغذية كهربائية ومجموعة من المقاومات (تم شرح آليات التوصيل للدائرة الإلكترونية كما في الشكل (6) واخذت القيم من الملحق (1) المذكور في نهاية المقال.

4. القسم العملي:

4.1 دراسة تأثير درجة الحرارة على الميزة $I - V$ في ديود شوتكي Cu/ZnO/Al:

يوضح الشكل (1) الميزة $I - V$ لديودات شوتكي من النمط Cu/ZnO/Al عند درجات حرارة (27 - 200 - 400 °C).



الشكل (1) الميزة $I - V$ لديودات شوتكي من النمط Cu/ZnO/Al عند درجات حرارة
(27 – 200 – 400 K°)

تم رسم الميزة $(I - V)$ لديودات شوتكي من النمط Cu/ZnO/Al عند درجات حرارة (27 – 200 – 400°C). يُظهر سلوك المنحنيات اعتماداً قوياً على درجة الحرارة وانحرافاً عن ديودات شوتكي المثالية، حيث تبدي الديودات سلوكاً تقويمياً غير خطي.

إن الانحناء المقعر للأسفل لمخطط الميزة الأمامية $I - V$ (كما هو موضح في الشكل (1) عند الفولتية الكبيرة يرجع بشكل رئيسي إلى المقاومة المتسلسلة R_s الناتجة بشكل رئيسي عن المادة الأساسية (الركيزة) للديود. وبالتالي، من أجل تقدير الثوابت الكهربائية لديود شوتكي Cu/ZnO/Al بدقة، عند قياس $I - V$ يجب تحليل الميزة من خلال أخذ تأثير المقاومة المتسلسلة [1]، [3]، [4]. يمكن أن تهيمن حالات الوجه البيني [2]، [5] في المنطقة بين نصف الناقل والمعدن. وُجد أن منطقة التحيز الأمامي تخضع لتأثير حالات الوجه البيني، بينما تظهر تأثيرات R_s في منطقة التحيز الأمامي العالية. من خلال الشكل (1) نلاحظ تناقص جهد التشغيل الذي يعزى إلى انخفاض ارتفاع حاجز الكمون مع ازدياد درجة الحرارة، حيث الطاقة الحرارية المكتسبة تساعد حوامل الشحنة (إلكترونات-ثقوب) على تجاوز ارتفاع حاجز الكمون بسهولة أكبر، هذا يعني أن

التيار نفسه يمكن تحقيقه بجهد أقل لأن الطاقة الحرارية تساعد على تنشيط حوامل الشحنة وبالتالي زيادة عددهم مما يحسن في الناقلية الكهربائية للطبقة نصف الناقلة، وتقلل درجات الحرارة المرتفعة من مقاومة النقل داخل المادة مما يقلل من الجهد المطلوب.

وجهد الانهيار عند تعرض الديودات للحرارة، كما أن الحرارة قد عملت على تدهور الديودات بشكل أكبر وهذا ما بينه تناقص جهد الانهيار مع ازدياد درجة الحرارة.

4.2 دراسة تأثير درجة الحرارة على ارتفاع حاجز الكمون اعتماداً على نظرية الانبعاث الحراري:

بالاعتماد على نظرية الانبعاث بالتأين الحراري (TE) [6]، [7].

$$I = I_s \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right)$$

$$I_s = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (1)$$

إلى المعادلة التالية:

$$I \approx I_s \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right\} \approx I_s \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right\} \quad (2)$$

$$V > \frac{3kT}{q} \text{ من أجل}$$

حيث q شحنة الإلكترون، V الجهد المطبق، n عامل المثالية، k ثابت بولتزمان، R_s المقاومة المتسلسلة، A مساحة الديود، A^* ثابت ريتشاردسون المقدر $32 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ n ZnO .

، T درجة الحرارة المطلقة، I_s تيار الإشباع و $\phi_{(B)}$ ارتفاع الحاجز (بالفولت)، ويعطى $\phi_{(B)}$ بالعلاقة:

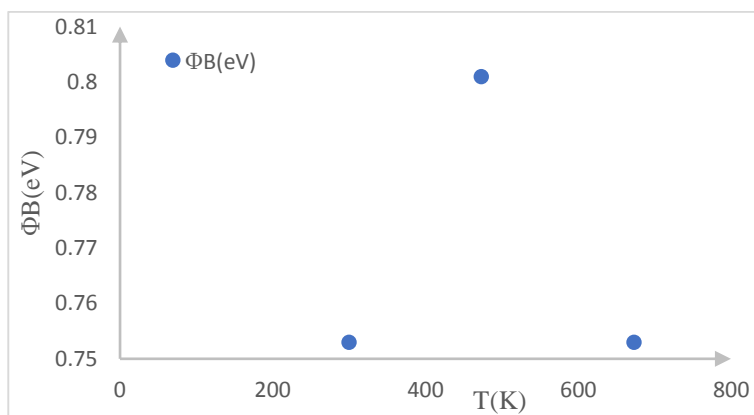
$$\phi_{(B)} = \frac{(kT) \ln(AA^* T^2)}{q I_s} \quad (3)$$

تعطى قيم حاجز الكمون وفقاً للجدول التالي (1):

673	473	300	T(K)
0.753	0.801	0.7756	$\phi_B(eV)$

الجدول (1) قيم حاجز الكمون بدلالة درجة الحرارة.

يبين الشكل (2) ارتفاع حاجز الكمون بدلالة درجات الحرارة المختلفة.



الشكل (2) ارتفاع حاجز الكمون بدلالة درجات الحرارة المختلفة.

يوضح الشكل (3) مخطط ارتفاع الحاجز $\phi_{B(I-V)}$ مقابل درجة الحرارة، عند درجات حرارة $(27 - 200 - 400^\circ C)$ ، نلاحظ أن حاجز الكمون يزداد بازدياد درجة الحرارة حتى الدرجة $200^\circ C$ ثم يبدأ بالتناقص. في الظروف المثالية حاجز الكمون يميل للانخفاض أو أن يبقى ثابتاً مع زيادة درجة الحرارة بسبب الطاقة الحرارية. ولكن في الطبقات السميكة عند التسخين حتى الدرجة

200°C غالباً ما يحدث تحسن في جودة التماس بين الألمنيوم وطبقة أكسيد الزنك باعتبار أن التسخين يزيل الرطوبة والملوثات أو الغازات المحبوسة في التماس ويعزز الارتباط بين الذرات، مما يؤدي إلى تقليل العيوب والتداخلات عند التماس. هذا يؤدي إلى زيادة حاجز الكمون حيث قد تظهر ظاهرة ارتفاع حاجز الكمون الظاهري بسبب إعادة الشحنات المحاصرة (مثل العيوب والمصائد) التي قد تتحرر أو تتوزع مما يؤدي إلى تغيير في ارتفاع الحاجز الظاهري، حيث يتحسن التبلور الجزئي أو إعادة ترتيب الذرات في التماس الذي يمكن أن يزيد من حاجز الكمون وبالتالي يؤدي ذلك إلى زيادة حوامل الشحنة المتاحة عبر الحاجز هو السبب المحتمل لزيادة ارتفاع الحاجز مع درجة الحرارة. عند درجة الحرارة الأعلى 400°C قد تبدأ بعض الظواهر السلبية مثل انتشار (Diffusion) ذرات الألمنيوم داخل أكسيد الزنك، مما يؤدي إلى تغيير تركيب التماس فتتكون مناطق غير متجانسة أو تتشكل طبقات أكسيد جديدة أو تحدث تفاعلات كيميائية غير مرغوبة فزيادة العيوب أو حدوث هذه التفاعلات تعمل على زيادة ارتفاع حاجز الكمون. أيضاً قد يؤدي التسخين العالي إلى تدهور البنية البلورية أو زيادة المصائد مما يقلل ارتفاع الحاجز [8].

4.3 دراسة تأثير درجة الحرارة على تيار الإشباع:

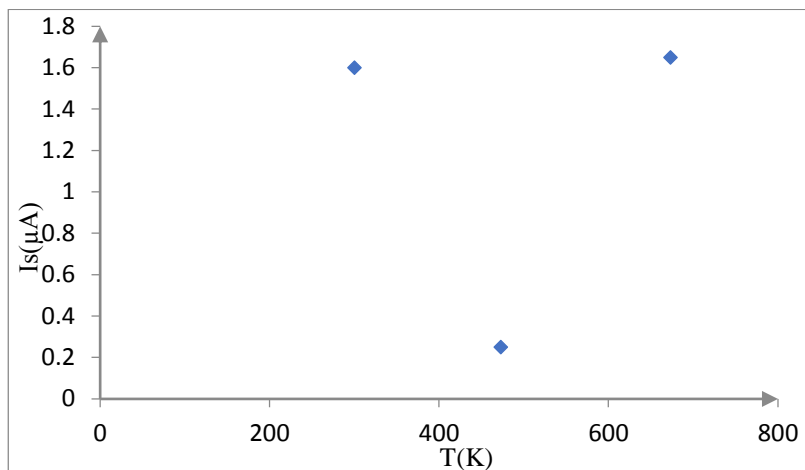
يتم حساب تيار الإشباع لمعرفة مدى التغيرات الحاصلة عليه بتغير درجة الحرارة باستخدام المعادلة (1)، يمكن حساب قيمة تيار الإشباع I_s من مخطط $\ln I$ مع V . من الميزة المقاسة $I - V$ الموضحة في الشكل (1).

يبين الجدول التالي (2) قيم تيار الإشباع المتعلقة عند درجات حرارة مختلفة:

673	473	300	T(K)
1.649	0.249	1.6	$I_s(\mu A)$

الجدول (2) قيم تيار الإشباع المتعلقة عند درجات حرارة مختلفة.

يوضح الشكل (3) تغيرات تيار الإشباع لديود شوتكي Cu/ZnO/Al بتغير درجة الحرارة.



الشكل (3) تيار الإشباع لديود شوتكي Cu/ZnO/Al عند درجات حرارة مختلفة.

نلاحظ من خلال الشكل (3) نلاحظ أن ارتفاع حاجز الكمون يرتبط ارتباطاً مباشراً بتيار الإشباع حسب العلاقة (1)، فكلما ازداد تيار الإشباع تناقص ارتفاع حاجز الكمون، فهو يتناسب معه عكساً وهذا ما يفسر أن عند كل قيمة عظمى لتيار الإشباع. تمتلك الكواشف أصغر قيمة لارتفاع حاجز الكمون وبالعكس. كما لاحظنا تغير تيار الإشباع بتغير درجة الحرارة حيث تتناقص قيمته مع ازدياد درجة الحرارة ويتصف بعدم الخطية، وعند الدرجة 400°C يزداد قليلاً مع تناقص ارتفاع حاجز الكمون عند هذه القيم. إن تيار الإشباع العكسي I_s في هذه الدراسة هو في حدود 10^{-6}A ، مما يشير إلى أنه حتى عند إيقاف تشغيل الديود، يستمر تيار صغير في التدفق عبر الديود مرة أخرى. كلما كان التيار العكسي أكبر، كلما ظهرت مشاكل أكثر في بعض التطبيقات حيث يجب مراقبة كميات صغيرة من التيار [8].

4.4 مقارنة تغير تيار الإشباع وعامل المثالية لديود شوتكي Cu/ZnO/Al عند درجات

حرارة المختلفة:

يمكن الحصول على قيم عامل المثالية من خلال حساب ميل الخط البياني للميزة جهد - تيار وذلك باستخدام العلاقة [9]، [10]:

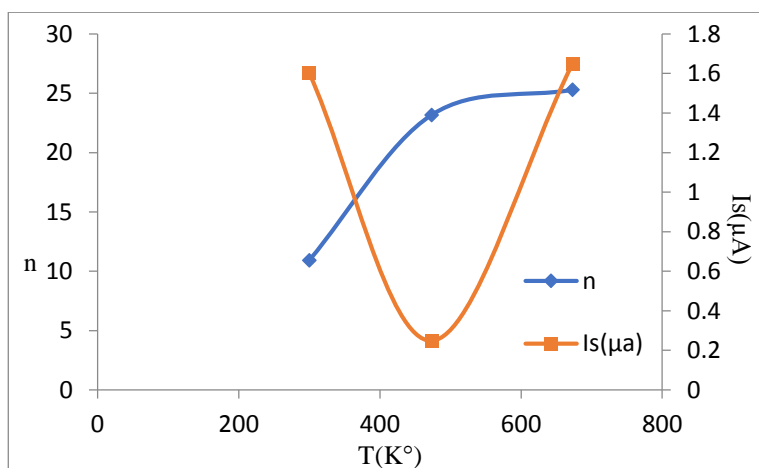
$$n = \frac{q}{(KT \times \text{slope})} \quad (4)$$

يوضح الجدول (3) التالي التغيرات الحاصلة لعامل المثالية مع تغيرات تيار الإشباع عند درجات حرارة مختلفة.

673	473	300	T(K)
25.3	23.17	10.93	n

الجدول (3)

يوضح الشكل (4) تغيرات تيار الإشباع وعامل المثالية لـ ديود شوتكي Cu/ZnO/Al عند درجات الحرارة مختلفة.



الشكل (4) تغيرات تيار الإشباع وعامل المثالية لـ ديود شوتكي Cu/ZnO/Al عند درجات حرارة مختلفة.

نلاحظ ارتباط عامل المثالية و تيار الإشباع وفق العلاقة (2)، من المتوقع أن يكون n صغيرة وقريبة من الواحد؛ ومع ذلك، يمكن ملاحظتها أكبر من هذه القيمة اعتماداً على التأثيرات المحتملة حتى لو كانت الانبعاث بالتأين الحراري TE (انبعاث إلكترونات بالحرارة) (thermionic emission) مهمين في تدفق التيار. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يُعزى الانحراف عن افتراض TE إلى مجموعة متنوعة من التأثيرات المهمة لآلية التوصيل اعتماداً على تيار التوليد وإعادة الاتحاد في منطقة الوصلة، وتدفق تيار النفق بسبب الطبقة البينية. وبالتالي، فإن قيم n تعتمد على درجة الحرارة وهي في اتجاه تصاعدي مع زيادة درجة الحرارة [8]. ويمكن أيضاً أن تُعزى القيم العالية لـ n إلى عدم تجانس ارتفاع الحاجز عند الوجه البيني (interface) (السطح البيني) (وهو الوجه بين الطبقة نصف الناقلة والمعدن)، والنقل عبر حوامل الشحنة الأقلية، وإلى تيارات التسرب العالية. وبما أن قيمة ($n > 20$) فترجع على الأرجح إلى وجود عيوب في شبكة ZnO أو وجود مصائد عند الوجه البيني. من ناحية أخرى، تُظهر هذه الاختلافات في ارتفاع الحاجز وعامل المثالية مع درجات الحرارة ($27 - 200 - 400^\circ\text{C}$) أن نقل التيار عبر واجهة ZnO/Al هو عملية نشطة بدرجة الحرارة، نظراً لأن ارتفاع الحاجز يتم توزيعه بشكل عشوائي بسبب ظاهرة عدم تجانس الحاجز، بالإضافة إلى مساهمة آليات نقل أخرى غير الانبعاث الحراري هذا يؤدي إلى سلوك أكثر تعقيداً وقيم عامل مثالية أكبر.

كما نستنتج أن ارتفاع حاجز الكمون المقاس يكون أكبر وعامل المثالية أقل عند درجات الحرارة المنخفضة. ولكن مع ارتفاع درجة حرارة الكاشف، تكتسب الإلكترونات طاقة حركية أكبر للتغلب على ارتفاعات حاجز الكمون العالية مما يؤدي إلى قيم أصغر لارتفاعات الحاجز المقاسة وقيم أعلى لعامل المثالية عند ازدياد درجة الحرارة بما يتوافق مع المرجع [4]، [11]، [12].

4.5 تحديد حاجز الكمون والمقاومة المتسلسلة لديود شوتكي Cu/ZnO/Al عند

درجات الحرارة المختلفة اعتماداً على نظرية TE و Cheung و Cheung:

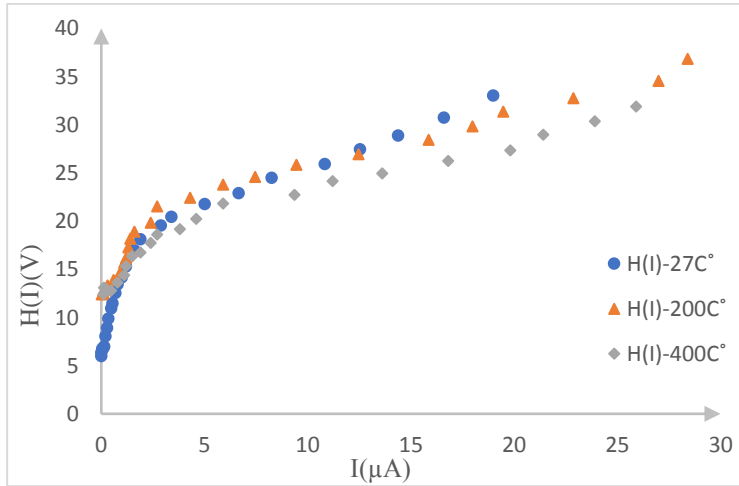
إن دراسة الميزة الكهربائية لديودات شوتكي وتحديد الثوابت الكهربائية اعتماداً على نظرية الانبعاث بالتأين الحراري غير كافي حيث لم تُظهر النظرية مدى تأثير المقاومة المتسلسلة على تغير ارتفاع حاجز الكمون وعامل المثالية، لذلك لابد من دراستهم عن طريق نظرية الانبعاث بالتأين الحراري ونظرية Cheung و Cheung بإضافة المقاومة المتسلسلة اللتان تبيانان التغيرات الحاصلة في الثوابت عند وجود المقاومة المتسلسلة. لتحديد n , $\phi_{(B)}$ تم قياس R_s من الميزة الأمامية $V - I$ باستخدام العلاقات التالية [10], [13]:

$$\frac{(dV)}{d(\ln I)} = \frac{(nkT)}{q} + IR_s \quad (4)$$

$$H(I) = V - \left(\frac{(nkT)}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (5)$$

$$H(I) = n\phi_{(B_{eff})} + IR_s \quad (6)$$

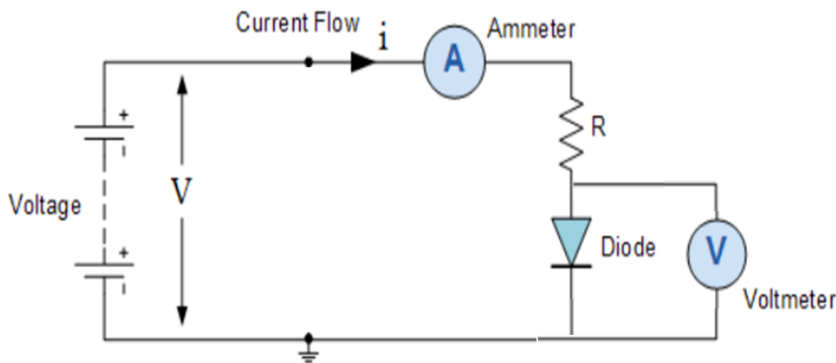
يبين الشكل (5) ارتفاع حاجز الكمون لديود شوتكي عند درجات حرارة مختلفة.



الشكل (5) ارتفاع حاجز الكمون لديود شوتكي عند درجات حرارة مختلفة.

باستخدام العلاقة (6) تم الحصول على الشكل (5) الذي يبين ارتفاع حاجز الكمون لديودات شوتكي عند درجات حرارة مختلفة حسب نظرية الانبعاث بالتأين الحراري بعد إضافة المقاومة المتسلسلة، ومن خلالها استطعنا تحديد المقاومة التسلسلية وحساب ارتفاع حاجز الكمون لديودات شوتكي وذلك من ميل الخطوط البيانية السابقة ونقطة التقاطع.

من الشكل (5) وبمقارنة القيم التي حصلنا عليها سابقاً لارتفاع حاجز الكمون وهذه القيم سوف نجد اختلاف، من الواضح وجود تأثير للمقاومة المتسلسلة R_s على الثوابت المقدرة I_s , n , $\phi(B)$. حيث أدى وجودها إلى انخفاض قيم ارتفاع كمون الحاجز مع ارتفاع درجة الحرارة. كما نلاحظ أن عامل المثالية قد حافظ على قيم ثابتة بعد إضافة المقاومة المتسلسلة. وبالتالي، لا يمكن إهمال انخفاض جهد الـ R_s فيما يتعلق بالجهد المطبق. وفقاً لـ Tung (1992)، تكون الميزة $I - V$ لوصلة شوتكي خطية عند جهد تحيز أمامي منخفض ولكنها تصبح غير خطية بشكل ملحوظ بطبيعتها عند جهد تحيز أمامي أعلى بسبب المقاومة المتسلسلة R_s الناتجة من المادة الأساسية (الركيزة). من الواضح أن R_s لها تأثير صغير جداً في منطقة التحيز الأمامي المنخفض، إلا أن لها تأثيراً كبيراً في منطقة التيار الأعلى بسبب الانخفاض الكبير في الجهد IR_s ، وتكون الدارة الإلكترونية المكافئة لديودات شوتكي ذات المقاومة التسلسلية R_s في الشكل (6) [14]، [15].

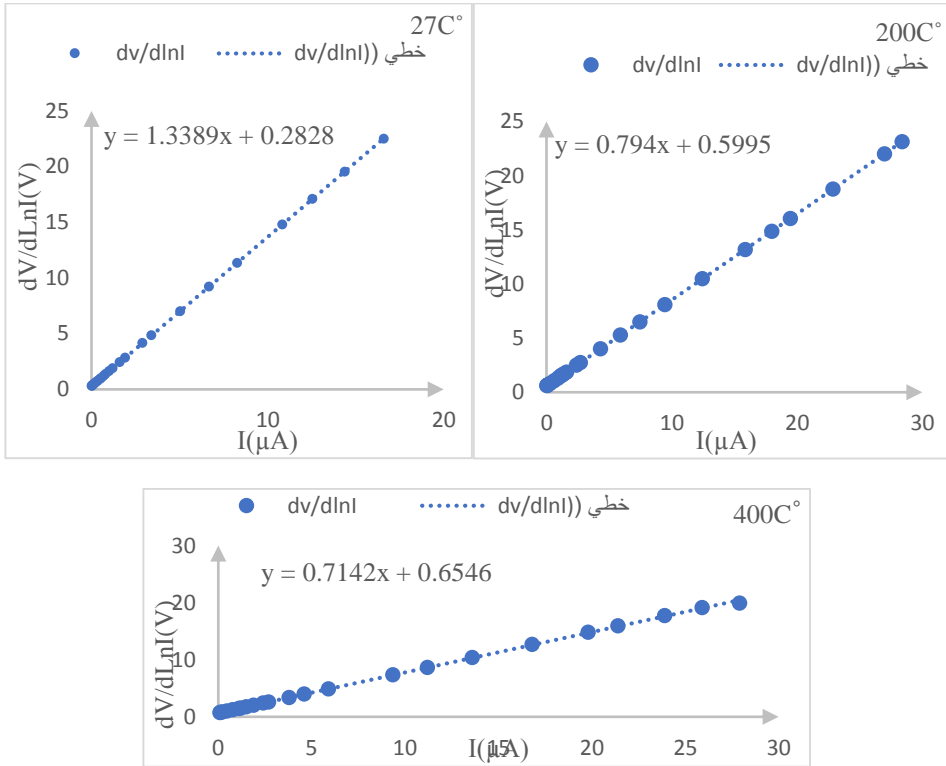


الشكل (6) الدائرة المكافئة لديودات شوتكي ذات المقاومة التسلسلية

تحليل خصائص التيار والجهد كتابع لدرجة الحرارة واستخراج المقاومة المتسلسلة لـ Cu/ZnO/Al شوتكي

بالاعتماد على نظرية Cheung و Cheung وذلك برسم $\frac{dV}{d(\ln I)}$ مقابل I الموضح في الشكل (7) يعطي قيمة للمقاومة المتسلسلة عند درجات الحرارة المختلفة. وذلك من المعادلة (4) بوصلة المخطط عند محور التيار الصفري بـ $\frac{\eta kT}{q}$ ، يتم تحديد قيمة n . تمثل الدوائر الممتلئة البيانات التجريبية بينما يمثل الخط المنقط (خط الاتجاه) مطابقتها. إن وجود المقاومة المتسلسلة R_s في طبقات أكسيد الزنك Cu/ZnO/Al يجعل أداء الديودات غير مثالي بطبيعته.

يبين الشكل (7) مخطط $\frac{dV}{d(\ln I)}$ مقابل الديودات شوتكي Al/ZnO عند درجات حرارة مختلفة.



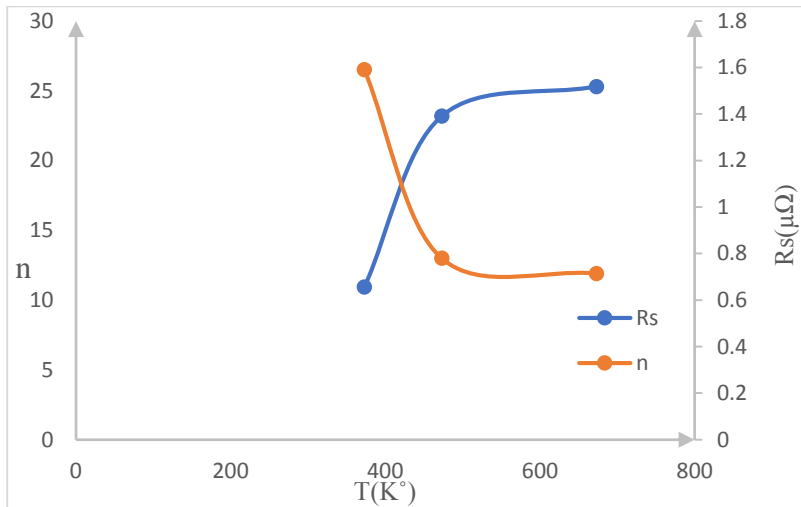
الشكل (7) مخطط $dV/d \ln(I)$ مقابل الديودات شوتكي Cu/ZnO/Al عند درجات حرارة مختلفة.

يبين الجدول (4) قيم ارتفاع حاجز الكمون والمقاومة المتسلسلة وعامل المثالية بالاعتماد على نظرية الانبعاث بالتأين الحراري ونظرية Cheung و Cheung.

673	473	300	T(K)
0.58	0.67	0.993	$\phi_{(Beff)}(eV)$
0.7142	0.794	1.338	$R_s(\mu\Omega)$
25.3	23.17	10.93	n

الجدول (4)

يبين الشكل (8) تغيرات المقاومة المتسلسلة وعامل المثالية لديودات شوتكي Cu/ZnO/Al عند درجات حرارة مختلفة.



الشكل (8) تغيرات المقاومة المتسلسلة وعامل المثالية لديودات شوتكي Cu/ZnO/Al عند درجات حرارة مختلفة.

يوضح الشكل (8) تغير المقاومة المتسلسلة وعامل المثالية لديودات شوتكي Cu/ZnO/Al عند درجات حرارة مختلفة. يظهر من الشكل (8) اعتماد المقاومة المتسلسلة بشكل كبير على درجة الحرارة، حيث نلاحظ تناقص قيمتها مع ازدياد درجة الحرارة، بينما يزداد عامل المثالية وهذا يدل على زيادة العيوب داخل بنية نصف الناقل وكذلك العيوب المتشكلة عند الوجه البيني بين نصف الناقل والمعدن [16]، [17]، [18]، [15]. وبالمقارنة مع القيم المحسوبة في الجدول (4) حسب نظرية الانبعاث بالتأين الحراري بعد إضافة المقاومة المتسلسلة نلاحظ تطابق في القيم مع نظرية Cheung و Cheung وهذا يدل على دقة النتائج.

4.6 تحديد حاجز الكمون والمقاومة المتسلسلة لديود شوتكي Cu/ZnO/Al عند درجات حرارة مختلفة اعتماداً على نظرية Norde:

سنحدد قيمة المقاومة المتسلسلة باستخدام دالة نورد [4]، [11] الموصوفة بالعلاقة التالية

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (7)$$

حيث ($\gamma > n$) هو أصغر عدد صحيح (بدون أبعاد) مقاساً بالطريقة التقليدية.

باستخدام القيم المقاسة الميزة $I - V$ ، يظهر اختلاف $F(V)$ كدالة لجهد التحيز المطبق V في الشكل (9) وفقاً لطريقة نورد، يتم تحديد قيمة ارتفاع الحاجز بواسطة

$$\phi_{(Beff)} = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (8)$$

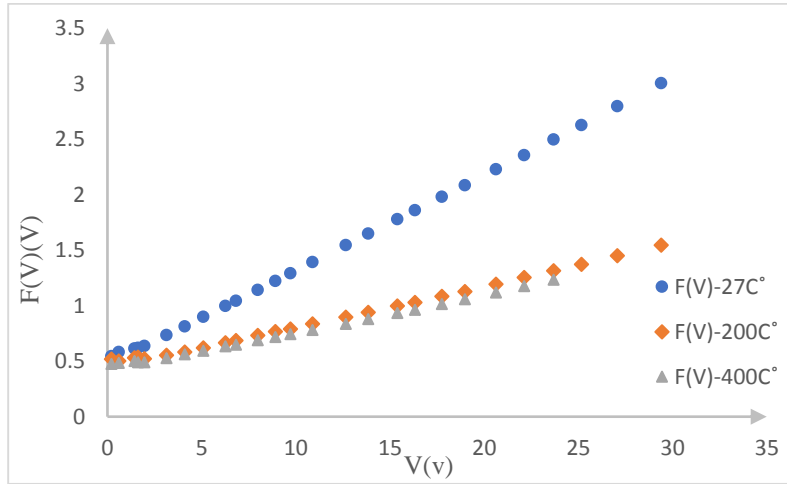
حيث $F(V_0)$ هي النقطة الدنيا لـ $F(V)$ التي تحدث عند $V = V_0$.

تم تحديد قيمة R_s لديودات Cu/ZnO/Al باستخدام العلاقة التالية:

$$R_s = \left(\frac{kT(\gamma - \eta)}{q I_{min}} \right) \quad (9)$$

حيث I_{min} هو الحد الأدنى للتيار المطابق للجهد V_0 حيث تمتلك $F(V)$ أدنى قيمة لها كما هو موضح أيضاً في الشكل (9).

يبين الشكل (9) ارتفاع حاجز الكمون لديودات شوتكي Cu/ZnO/Al عند درجات حرارة مختلفة.



الشكل (9) ارتفاع حاجز الكمون لديودات شوتكي Cu/ZnO/Al عند درجات حرارة مختلفة.

يبين الجدول (5) الكمون الأصغري وقيمة ارتفاع حاجز الكمون والتيار الأصغري وعامل المثالية والمقاومة المتسلسلة عند درجات حرارة مختلفة

$R_s (\mu\Omega)$	$(\phi_{(Beff)})(eV)$	n	$F(V_0)(V)$	$I_{min} (\mu A)$	$V_0 (V)$	$T(K)$
0.181	0.53	10.93	0.54	0.01	0.2	300
0.306	0.507	23.17	0.502	0.07	0.2	473
0.181	0.45	25.3	0.47	0.1	0.2	673

من خلال الجدول (5) كانت جميع قيم ارتفاع حاجز الكمون المقاسة أقل من قيمة شوتكي-موت المتوقعة البالغة 1.0 eV، مما يشير إلى أن بنية الوجه البيني وحالاته المرتبطة به تؤثر على

حاجز شوتكي [19]. وخصوصاً وفق لنظرية نورد، ولكن لا نستطيع في هذه النظرية حساب قيمة عامل المثالية دون نظريتي الانبعاث بالتأين الحراري ونظرية Cheung و Cheung، على الرغم من أن قيمة ارتفاع حاجز الكمون هنا تعتبر الأفضل حسب نورد من باقي القيم المحسوبة وفق النظريات السابقة، كم ورد في الجدول (4). كما لاحظنا أن قيم ارتفاع حاجز الكمون والمقاومة المتسلسلة متناقصة مع ازدياد درجة الحرارة حسب نورد. يمكن أن يعزى الأداء الضعيف لديودات شوتكي المصنعة إلى عدة عوامل، مثل عدم التساوي على سطحها العلوي، والمقاومة العالية على التوالي، والتوزيع غير المتساوي للشحنات في الوجه البيني، انخفاض الجهد عبر وصلة M/S ووجود عيوب وتيارات تسرب ناتجة عن مستويات عالية من إعادة التركيب. علاوة على ذلك وبالتالي، قد تكون شواغر الأكسجين موجودة على سطح ZnO، تعمل كمراكز تشبه الجهات المانحة، مما يؤدي إلى تسرب كبير في نفق التيار من Al إلى بنية ZnO المودع [8].

علاوة على ذلك، فقد تبين أن الطبقات المحضرة باستخدام الطرق الكيميائية في الهواء تنتج طبقة عازلة تؤثر على ارتفاع الحاجز، لذلك كانت قيم n التي تم الحصول عليها لجميع العينات أعلى بكثير من الوحدة ويشير هذا إلى أن سلوك ديود شوتكي غير مثالي ويمكن أن يعزى إلى المقاومة المتسلسلة وتوزيعات الشحنة البينية وانخفاض الجهد عبر الوصلة المعدنية/أنصاف-النواقل [20].

قمنا بتلخيص قيم جميع الثوابت مثل ارتفاع الحاجز، وعامل المثالية والمقاومة المتسلسلة التي تم الحصول عليها بالطريقة التقليدية، وطريقة Cheung وطريقة Norde إن تحليل الانبعاثات الحرارية التقليدية وطريقة Cheung يعطي ارتفاع في الحاجز وعامل المثالية والمقاومة المتسلسلة أكبر من طريقة Norde.

5. النتائج و مناقشتها

❖ تمت دراسة الميزة $I - V$ عند تعريض الديودات للحرارة، لاحظنا تأثير واضح

لدرجة الحرارة على الميزة.

- ❖ استنتجنا أن الانحناء المقعر في الميزة يعود إلى المقاومة المتسلسلة لذلك اقترحنا أن تتم الدراسة بأكثر من طريقة.
- ❖ طريقة الانبعاث التأين الحراري غير كافية لديودات شوتكي حيث لم تعطي تصور كامل عن تغيرات في ارتفاع حاجز الكمون وعامل المثالية.
- ❖ يزداد ارتفاع حاجز الكمون مع ازدياد درجة الحرارة ثم ينخفض وبالتالي يُظهر سلوك غير خطي مع تغير درجة الحرارة عند $(27 - 200 - 400\text{ }^{\circ}\text{C})$
- ❖ تيار الإشباع لأغلب الديودات هو من رتبة 10^{-6} A ويتناقص مع بازدياد درجة الحرارة ويتصف بعدم الخطية.
- ❖ توصلنا إلى وجود علاقة ارتباط بين عامل المثالية وتيار الإشباع حيث لاحظنا زيادة في عامل المثالية يقابلها تناقص في تيار الإشباع مع ازدياد درجة الحرارة.
- ❖ تبين أن نظرية الانبعاث بالتأين الحراري غير كافية لمثل الديودات المحضرة، لم تظهر تأثير المقاومة المتسلسلة على تغير ارتفاع حاجز الكمون وعامل المثالية لذلك كان لابد من تطبيق نظرية الانبعاث وذلك بعد إضافة المقاومة المتسلسلة.
- ❖ بدراسة نظرية Cheunge و Cheunge ونظرية الانبعاث بالتأين الحراري بإدخال تأثير المقاومة المتسلسلة لاحظنا تناقص قيم ارتفاع حاجز الكمون والمقاومة المتسلسلة عند ازدياد درجة الحرارة.
- ❖ وجدنا تطابق في القيم المحسوبة بنظرية الانبعاث بالتأين الحراري ونظرية Cheunge و Cheunge .
- ❖ حسبنا المقاومة المتسلسلة وارتفاع حاجز الكمون باستخدام طريقة Norde، فلاحظنا تناقص في قيم كل من ارتفاع كمون الحاجز والمقاومة المتسلسلة.

- ❖ توصلنا إلى أن أفضل القيم هي التي حصلنا عليها من نظرية Norde ولكن بسبب عدم القدرة على حساب عامل المثالية ووجود العامل الذي يسبب انحراف عن القيم المطلوبة تم الاعتماد على نظريتي الانبعاث ونظرية Cheung.
- ❖ توصلنا إلى أن طريقة Cheung ونظرية الانبعاث بالتأين الحراري هي الطريقة المثلى لدراسة ديودات شوتكي بحالة التي يكون فيها عامل المثالية كبير، أما طريقة نورد فهي متبعة بالحالة التي يكون فيها عامل المثالية مساوي أو أصغر من 1.

المراجع

- [1]. ASGHAR, M. (2013)– Growth and interface properties of Au Schottky contact on ZnO grown by molecular beam epitaxy.
In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, p012031.
- [2].A. Lord et al, (2020)– **Schottky Contacts on Polarity–Controlled Vertical ZnO Nanorods**, *ACS Appl Mater Interfaces*, vol 2020, no 11, pp 13217–13228.
- [3] Mayimele, M. A, van Rensburg, J. P. J, Auret, F. D, Diale, M, (2016)– Analysis of temperature–dependant current–voltage characteristics and extraction of series resistance in Pd/ZnO Schottky barrier diodes. *Physical B: Condensed Matter* Vol 480, Pp 58–62.
- [4]. SOMVANSI, Divya; JIT, Satyabrata. (2014)– Effects of Sn and Zn seed layers on the electrical characteristics of Pd/ZnO thin–film Schottky diodes grown on n–Si substrates. *IEEE Electron Device Letters*, Vol 35. No 9, Pp 945–947.
- [5].CHENG, Ke, et al, (2007)–Surface states dominative Au Schottky contact on vertical aligned ZnO nanorod arrays synthesized by low–temperature growth. *New Journal of Physics*, Vol 9, No 7, pp 214.

[6] ASGHAR, M. (2013)–**Electrical characterization of Au/ZnO/Si**

Schottky contact. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP

Publishing, Pp 012030.

[7]. RAJAN, Lintu; PERIASAMY, C.; SAHULA, Vineet. (2016)–**Electrical characterization of Au/ZnO thin film Schottky diode on silicon substrate**. Perspectives in Science. Vol 8, Pp66–68.

[8]Gullu, H. H, Bayraklı Sürücü, Ö, Terlemozoglu, M. A. K, B. U. L. E, Yildiz, D. E, & Parlak, M. (2019)– **Investigation of electrical characteristics of Ag/ZnO/Si sandwich structure**. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 15371–15378.

[9]I. Hussain, M. Y. Soomro, N. Bano, O. Nur, (2012) – **Interface trap characterization and electrical properties of Au–ZnO nanorod Schottky diodes by conductance and capacitance methods**.

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS. Vol 112, No 064506, Pp1–6

[10]KESKENLER, E. F.; HAIDAR, M. (2020)–**Schottky diode fabrication via cold substrate evaporated ag on sol–gel derived ZnO ultra–thin films for semiconductor devices**. *Journal of Ovonic Research*. Vol 16, no5, pp 309–321.

[11]Varma, T, (2017)–**Design and Development of Zinc Oxide thin film based Schottky Diodes and TFTs and their application as UV**

Detectors. (Doctoral dissertation, MNIT Jaipur) Vol 2, No 5, PP1–23.
von Research Vol, 2020, 16.5: 309–321.

[12] MWANKEMWA, Benard S, (2023)– **Synthesis of Template-free**

Flower-like ZnO Nanorods using a Simple Chemical Bath

Technique. *Tanzania Journal of Science*, Vol 49, no 5, pp 1138–1150.

[13] Coppa, B. J., Davis, R. F., & Nemanich, R. J, (2003). **Gold**

Schottky contacts on oxygen plasma-treated, n-type ZnO

(0001). *Applied Physics Letters*, 82(3), 400–402.

[14] M. Özer, D. E. Yildiz, Ş. Altındal, and M. M. Bülbül, (2007)–

Temperature dependence of characteristic parameters of the

Au/SnO₂/n-Si (MIS) Schottky diodes, *Solid State Electron*, vol. 51, no 6, pp 941–949.

[15] Faraz, S. M., Khranovskyy, V., Yakimova, R., Ulyashin, A., &

Wahab, Q, (2011)–**Temperature dependent current transport in**

Schottky diodes of nano structured ZnO grown on Si by magnetron

sputtering. *Regional Symposium on Micro and Nano Electronics*, Vol

978, No1, pp. 48–51

- [16] BRILLSON, Leonard J.; LU, Yicheng, (2011)–**ZnO Schottky barriers and Ohmic contacts**. *Journal of Applied Physics*, Vol 109, no12.
- [17] ASGHAR, M. et al, (2013)–**Electrical characterization of Au/ZnO/Si Schottky contact**. *In: Journal of Physics: Conference Series*. pp 012030.
- [18] MIRANDA, Enrique; MILANO, Gianluca; RICCIARDI, Carlo, (2020)–**Compact modeling of the IV characteristics of ZnO nanowires including nonlinear series resistance effects**. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol 19, pp 297–300.
- [19] COPPA, B. J. (2005)–**Structural, microstructural, and electrical properties of gold films and Schottky contacts on remote plasma-cleaned, n-type ZnO {0001} surfaces**. *Journal of applied physics*, Vol,97, No 10.
- [20] AZHAR, Ebraheem Ali, et al. (2018)–**ZnO-based Schottky and oxide multilayer devices for visibly transparent photovoltaic applications**. *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol 65, no8, pp 3291–3299.