دراسة الخصائص الكهربائية لثنائي شوتكي Cu/ZnO/Al

زينب الحسن[1] أ.د. عبد الرزاق الصوفي[2] أ.د عبد الله رستناوي[3]

الملخص

في هذا البحث، تم تحضير ثنائي شوتكي مؤلف من أكسيد الزنك البلوري بسماكة 50μm وطبقة رقيقة من الألمنيوم على شرائح نحاس من النم $Cu/\mathrm{ZnO}/\mathrm{Al}$.تم إجراء تحليل منهجي على الثوابت الكهربائية لثنائي شوتكي بمساعدة قياسات التيار والجهد (I—V)وحساب تيار الإشباع وارتفاع كمون الحاجز، وعامل المثالية وفقاً لنظرية الانبعاث الحراري. لدمج تأثير المقاومة المتسلسلة في تحديد ثوابت ثنائي شوتكي (ارتفاع الحاجز وعامل المثالية وتيار التشبع)، تم استخدام طريقة تشيونغ جنباً إلى جنب مع نموذج الانبعاث الحراري والتي أظهرت جهد حاجز مرتفع. حُسبت طاقة التنشيط لأوكسيد الزنك، وتبين أنها متوافقة مع وجود عيب بالقرب من منطقة الناقلية، تم أيضاً تحديد ثابت ريتشاردسون لأوكسيد الزنك ولاحظنا انحراف عن القيمة النظرية بسبب وجود مقاومة متسلسلة مما تسبب بارتفاع حاجز الكمون. تمت دراسة ألية النقل في وصلة ZnO/ Al ووجد أنها تعتمد خطياً على درجة الحرارة وهو ما يتوافق مع نموذج الانبعاث الحراري. تم تحديد مناطق عمل الثنائي وهي ثلاثة مناطق مميزة، أظهرت ثلاثة أليات نقل: نقل الشحنة الفراغية، وإعادة الاتحاد، والمصائد.

الكلمات المفتاحية: ثنائي شوتكي، أوكسيد الزنك، نحاس، ألمنيوم، نموذج الانبعاث الحراري، نموذج تشيونغ، الميزة $(I-V)$، ثابت ريتشاردسون.

[1] طالبة دكتوراه [2] دكتور في فزياء البلورات والأشعة السينية [3] دكتور في الفيزياء النووية

Study of the electrical properties of Cu/ZnO/Al Schottky diode

Abstract

In this research, a Schottky diode consisting of 50μm Crystalline zinc oxide and a thin layer of aluminum on Cu/ZnO/Al foil was prepared. A systematic analysis was performed on the electrical constants of the Schottky diode with the help of current–voltage (I— V) measurements and calculation of saturation current ،barrier voltage height, and ideality factor according to the thermionic emission theory.
To incorporate the effect of series resistance in determining the Schottky diode constants (barrier height ،ideality factor ،and saturation current) ،Cheung's method was used with the thermionic emission model ،which showed high barrier voltage.

The activation energy of ZnO was calculated and found to be consistent with the presence of a defect near the conduction region. The Richardson constant of ZnO was also determined, and a deviation from the theoretical value was observed due to the presence of series resistance causing a high Voltage barrier.
The transport mechanism in the ZnO/ Al junction was studied and found to be linearly dependent on temperature ،which is consistent with the thermal emission model. The diode operating regions were identified as three distinct regions that exhibited three transport mechanisms: vacuum charge transfer، recombination and traps.

Keywords: Schottky diode ، zinc oxide ،copper ،aluminum،thermionic emission model ،Cheung model ، (I— V) feature ،Richardson constant.

1. مقدمة

1.1. أوكسيد الزنك *Zinc-oxide*

اجتذب أكسيد الزنك (ZnO) اهتماماً كبيراً في مجال الكواشف عن الأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء والكواشف الضوئية، بسبب فجوة الطاقة العريضة المباشرة 3.37 eV~ (في درجة حرارة الغرفة)، وطاقة ربط الإكسيتون العالية. ازداد الاهتمام البحثي به لفترة طويلة بما يتميز بخصائص تركيبية متنوعة، وملاءمة للبيئة، وقوة ميكانيكية عالية واستقرار حراري ممتاز، والأداء الكهربائي الانضغاطي القوي، والخلايا الشمسية ومجالات أخرى. يمكن تنظيم الخصائص الفيزيائية لـ ZnO والتحكم فيها عن طريق شكل السطح أو المنشطات، العيوب القابلة للضبط داخله، مما يؤدي إلى استجابة أوسع في مجالات الضوئيات والاستشعار والإلكترونيات الضوئية. على سبيل المثال، يُظهر ZnO المشاب ب N (النتروجين) تطبيقات واعدة في مجال الإلكترونيات. بالنظر إلى الحالات السطحية لـ ZnO فيكون حساس للغازات والأيونات وما إلى ذلك.

يمكن توسيع تطبيقات ZnO لتشمل المجالات البيولوجية والكيميائية والطبية كالمبيدات الفطريات وفي أدوية التئام الجروح. بالإضافة إلى ذلك، يعتبر ZnO من المواد الواعدة من الجيل الثالث لتطبيقات الإلكترونيات الضوئية وإجراءات الليزر في درجة حرارة الغرفة وفي المجال الطيفي للأشعة فوق البنفسجية أو الأزرق.

يحتوي ZnO على معامل توليد (ثقب- إلكترون) صغير، وكما يتمتع ZnO بالمزايا الواضحة في تحقيق نسب إشارة إلى ضجيج أفضل للكواشف الضوئية. [1].

2.1. التوصيف الكهربائي لثنائي شوتكي:

يمكن للأفلام الرقيقة من أكسيد الزنك تكوين ثنائي شوتكي مع المعادن النبيلة ذات تابع العمل العالية مثل Pt, Au, Al و Pd.حيث تعد ديودات شوتكي بالغة الأهمية لفهم إمكانية

التحكم في وصلات أنصاف – النواقل المعدنية، في سياق استخدامها المكثف في تطبيقات الأجهزة الإلكترونية [1].

في عام(2010) Ali وآخرون، قاموا بدراسة خصائص الوصلة وسلوك النواقل لوصلات شوتكي Pd على الأفلام الرقيقة من ZnO المودعة بواسطة طريقة الترسيب في الخلاء على ركائز $p - Si$ تم استخراج قيمة الثوابت الكهربائية، مثل عامل المثالية، تيار التسرب، المقاومة، تركيز الناقل وارتفاع الحاجز من قياسات $I - V$[2].

في عام(2008) ، قام Klason وآخرون بدراسة الخصائص الكهربائية واستقرار وصلات شوتكي Pd و Au على ZnO النانوي المنمى على ركيزة زجاجية. أبلغوا عن أفضل القيم الممكنة لعامل المثالية وارتفاع حاجز الكمون لوصلات Pd/ZnO [2].

في عام (2014) أبلغ Yadavوآخرون، عن اعتماد خصائص $I - V$ المقاسة لديودات شوتكي المستندة إلى الأفلام الرقيقة Pd/ZnO على درجة الحرارة، ووجد قيمة ثابت ريتشاردسون البالغ$\sim 31.67\ A\ K^{-2}\ cm^{-2}$ ، وهو ليس قريباً جداً من قيمته النظرية $\sim 32\ A\ K^{-2}\ cm^{-2}$. [2]

عند تحضير الوصلات القائمة على أنصاف – النواقل، يجب مراعاة عملية تحضير السطح، ارتفاع الحاجز بين المعدن ونصف الناقل، كثافة الخلع، الجهد المطبق والمقاومة التسلسلية (R_s). هناك تقنيات مختلفة لتقييم الثوابت الكهربائية الرئيسية من قياسات $I - V$ للتحيز الأمامي مثل طريقة Cheung و Cheung وقانون أوم. تقدم طريقة Cheung و

Cheung نهجاً بديلاً من قانون أوم لتحديد ارتفاع الحاجز وعامل المثالية و (R_s)من قياسات I – Vالأمامية، والتي تعد الثوابت الكهربائية الرئيسية في توصيف وتوفر معلومات مفيدة بشأن طبيعة الديودات [3].

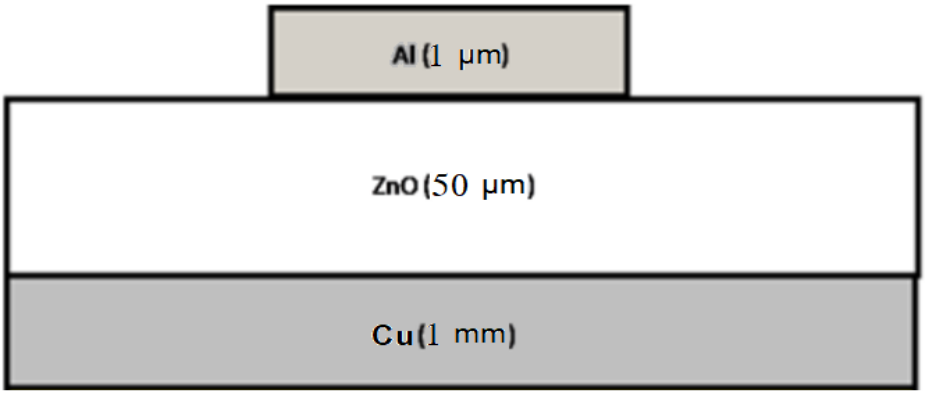
2. هدف البحث

- دراسة الميزة جهد –تيار لثنائي شوتكي.
- الحصول على قيم عامل المثالية وتيار الإشباع وكمون الحاجز حسب نظرية الانبعاث الحراري، ومقارنتها مع نتائج نظرية تشيونغ.
- حساب ثابت ريتشاردسون ومقارنة مدى تطابقه مع القيمة النظرية.
- حساب طاقة التنشيط.
- تحديد أليات النقل في ثنائي شوتكي.
- دراسة مجالات عمل ثنائي شوتكي.

3. مواد وطرق البحث

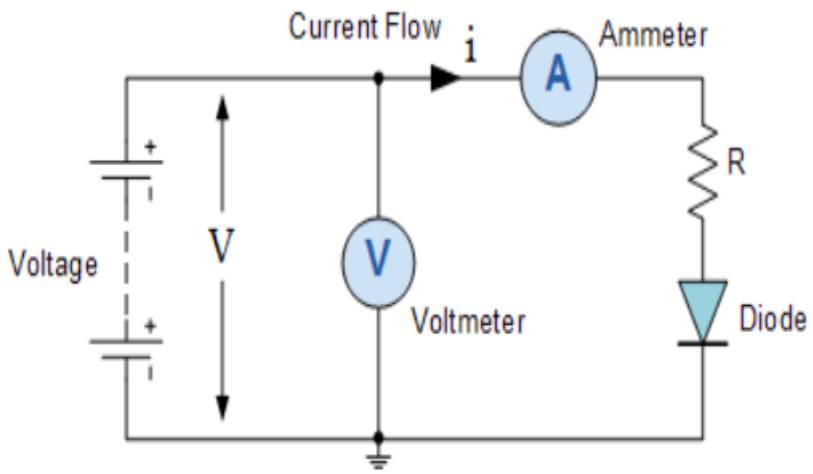
استعمل ZnO (99.5٪ من Honeywell Riedel-de Haën®) كعينة أساسية، تم ترسيب فيلم ZnO على شرائح Cu لتحقيق الوصلة الأومي بواسطة طريقة البخ بالطلاء(وهي طريقة باستخدام ضغط الغاز يتم بخ المادة المراد التصاقها على المعدن)[4,5,6] . حيث أولاً حضرت الأقراص النحاسية بنصف قطر متماثل من أجل جميع العينات 1.0cm ، غسلت بالماء المقطر وجففت لمدة 24 ساعة عند درجة حرارة المخبر. ثم جرى ترسيب الأكسيد بسماكة50μm على القرص

باستعمال طريقة البخ بالطلاء بمساعدة الغاز المضغوط [4,5,6]. رسبت طبقة Al ذات سماكة 1µm على الوجه العلوي من ZnO ، باستعمال طريقة البخ الحرارية على حوامل سيليكونية للتمكن من إعادة فصلها عن الحامل، وأضيفت لاحقاً على سطح طبقة الأكسيد. حيث يمكن تمثيل الطبقات كما في الشكل (1).



الشكل (1) تمثيل للطبقات المتشكلة لثنائي شوتكي

خصائص التحيز الأمامي والتحيز العكسي I—V تم الحصول عليها باستخدام دارة إلكترونية مؤلفة من مقياس أمبير – مقياس فولت ومغذية كهربائية ومجموعة من المقاومات والمكثفات. كما في الشكل(2) .



الشكل (1) : الدارة الإلكترونية المستخدمة للقياسات الميزة $(I-V)$.

5. القسم العملي:

5.1 توصيف الميزة I—V والتوصيف الكهربائي لثنائيشوتكي:

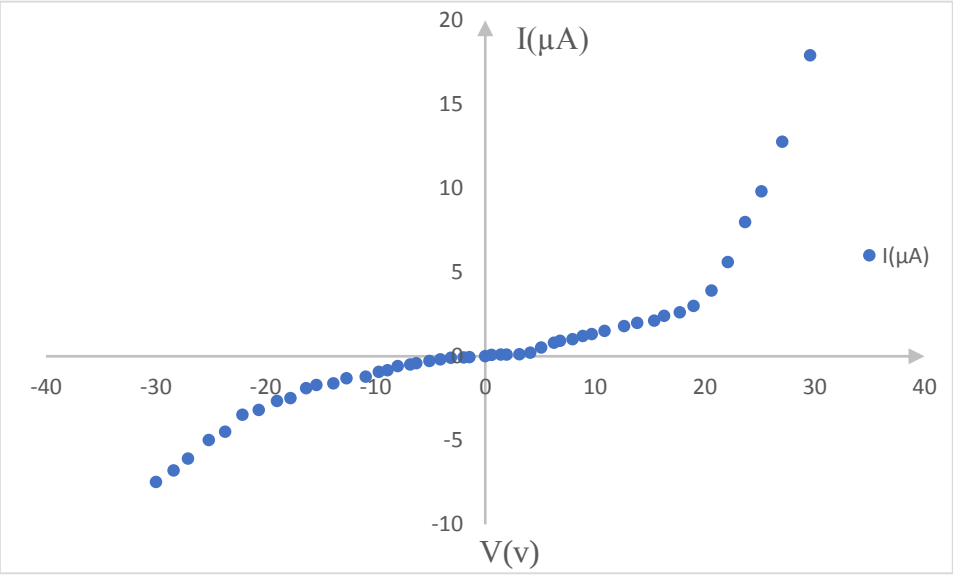
يظهر الرسم التخطيطي المستخدم لتوصيف I—V في الشكل (3)، ويوضح خصائص I—V لثنائي شوتكي Cu/ZnO/Al، مما يشير إلى طبيعة ثنائي شوتكي مع نسبة تصحيح (I_F/I_R) تبلغ 1.23 . لقد قمنا بتحليل خصائص I—V لثنائي شوتكي المقترح باستخدام نظرية الانبعاث الحراري التقليدية، حيث تُكون الثوابت التجريبية لثنائي شوتكي، مثل عامل المثالية والحاجز ومن المفترض أن يكون الارتفاع مستقلاً عن الجهد. يتم إعطاء العلاقة I—V بواسطة [7,8,9,10,11]

$$I = I_0 \left[\exp \frac{q(V - IRs)}{\eta kT}\right] \qquad (1)$$

حيث I_0 هو تيار التشبع المعطى بواسطة:

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

q هو الشحنة الإلكترونية، ϕ_b هو ارتفاع الحاجز الفعال عند انحياز صفر، V هو الجهد المطبق، A هي منطقة الديود، A^* $(32\ cm^2\ K^2)$ هو ثابت ريتشاردسون، K هو ثابت بولتزمان، η وهو عامل المثالية.



الشكل (3) الميزة جهد– تيار لثنائي شوتكي Cu/ZnO/Al عند درجة حرارة الغرفة.

يوضح الشكل (3) الميزة جهد– تيار لثنائي شوتكي Cu/ZnO/Al عند درجة حرارة الغرفة. من خلال تركيب الجزء الخطي من هذا المخطط واستخدام التقاطع والميل، حصلنا على قيمة عامل المثالية وارتفاع الحاجز باستخدام المعادلات التالية[4,12,13,14,15]:

$$n = \frac{q}{\mathrm{KT} \times \mathrm{slope}} \tag{3}$$

$$\emptyset_{B(I-V)} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{AA^{*}T^{2}}{I_S}\right) \tag{4}$$

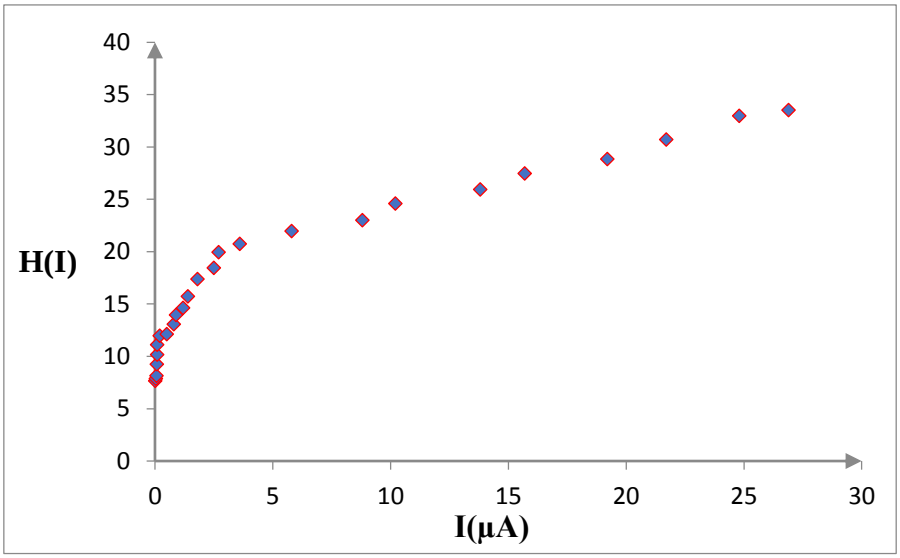
حيث $K = 8.617\times 10^{-5}\mathrm{eV/K}$ ، T هي درجة الحرارة بالكلفن، A هي منطقة الديود= $2.541\ cm^{2}$. كانت قيمة عامل المثالية عند درجة حرارة الغرفة 9.45 . وتشير القيمة المقدرة لعامل المثالية إلى أن الانبعاث الحراري ليس آلية النقل السائدة. وهذا يعني وجود آليات أخرى مثل توليد إعادة التركيب، والنفق، وحالات النقل بمساعدة النقل[16]. لاحظنا أن العوامل المثالية لديودات أكسيد الزنك شوتكي المعالجة كيميائياً عادةً ما تكون أكبر بكثير من الوحدة، تعزى إلى النفق وحالات الواجهة و/أو تأثير مراكز إعادة التركيب العميقة وتعزى القيم العالية لـ η أيضاً إلى وجود طبقة أكسيد أصلية رقيقة بينية في واجهة Al و ZnO ، وارتفاع حاجز شوتكي (أو عدم تجانس الحاجز)، وإلى تأثير المقاومة المتسلسلة وإلى الاعتماد على الجهد، وإلى آليات التوصيل الحالية بخلاف الانبعاث الحراري وكذلك يرجع ذلك إلى البنية المسامية ومتعددة التبلور لأفلام ZnO الرقيقة التي تخلق مسارات متعددة التيار [17,3]. وقيمة ارتفاع الحاجز المقابل 0.776 eV هو متوافق مع المرجع [8, 20,18]. يُعزى الانحراف بقيم Φ_{B0} إلى تكوين حاجز كمون غير متجانس، وإلى المناطق التي لا تساهم في نقل التيار عبر حاجز شوتكي(المناطق المظلمة)، وهذا يتم في الوصلة غير المتجانسة، يوفر رسم منحنى $\ln I — V$ عند المحور y قيمة تيار التشبع $I_0 = 0.6688 \times 10^{-6}$ A. تجدر الإشارة إلى أنه تجريبياً تم حساب ثوابت ثنائي

شوتكي باستخدام نموذج الانبعاث الحراري، من منطقة الجهد المنخفض (المنطقة الخطية) لخصائص الجهد – التيار دون دمج تأثير المقاومة المتسلسلة(الموصولة على التسلسل) R_s. كما اشتق Cheung طريقة بديلة للحصول على ثوابت ثنائي شوتكي، متضمنة تأثير المقاومة المتسلسلة. يمكن إعطاء علاقات تشيونغ[4,9]:

$$\frac{dV}{d(ln\ I)} = \frac{\eta kT}{q} + IR_s \qquad (5)$$

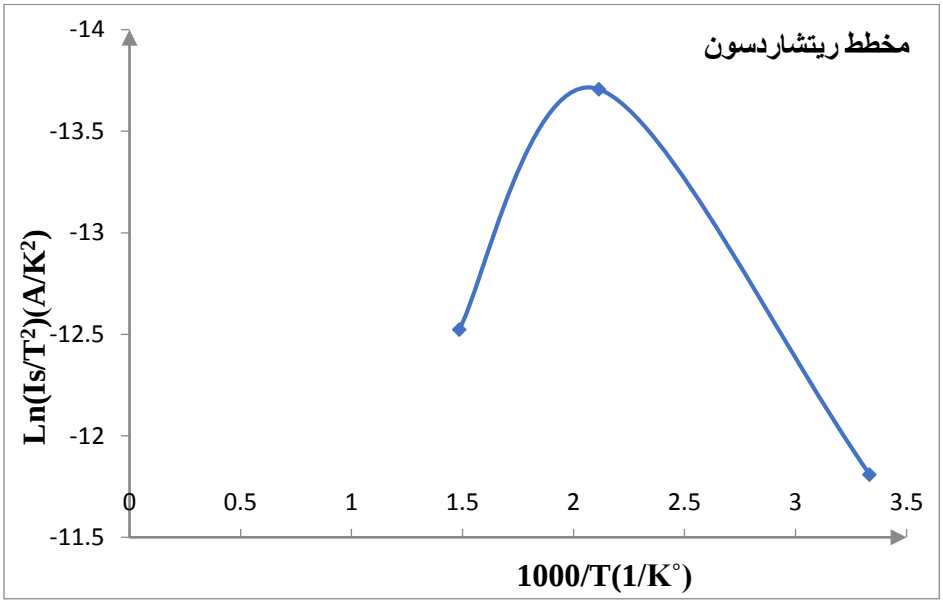
$$H(I) = V - \frac{\eta kT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) \qquad (6)$$

$$H(I) = \eta\phi_b + IR_s \qquad (7)$$



الشكل (4) منحنى H(I) مقابل I لثنائي شوتكي Cu/ZnO/Alعند درجة حرارة الغرفة.

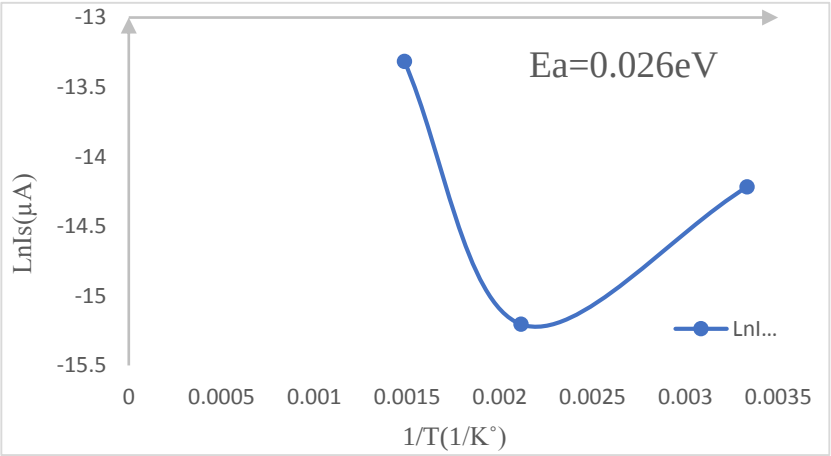
تم الحصول على المقاومة المتسلسلة من ميل منحنى I، H(I)، $R_s = 0.878\mu\Omega$ حيث أن نقطة التقاطع المحور Y مع منحنى H(I) مقابل I سيوفر ارتفاع الحاجز وفقًا للمعادلة (7) وتم الحصول عليه بقيمة 1.34 eV. يشير الفرق النسبي بين قيمة ارتفاعات الحاجز التي تم الحصول عليها من نموذج الانبعاث الحراري وطريقة Cheung إلى حدوث مقاومة متسلسلة وحالات واجهة عبر المعادن وأنصاف – النواقل. إن التناقض في قيمة ارتفاع الحاجز المحدد من خصائص $(I—V)$ يلقي الضوء على وجود حالات الواجهة، والتي يمكن يستفاد منها كمرشح في العديد من تطبيقات الأجهزة الإلكترونية [9].



الشكل(5). مخطط ريتشاردسون للديود Cu/ ZnO/Al في مجال درجة الحرارة 273 – 673 K.

يوضح الشكل (5) مخطط ريتشاردسون لمجال درجة الحرارة 273 – 673 K. وقد وجدنا أن قيمة ثابت ريتشاردسون هي $15AK^{-2}cm^{-2}$. تم تحديد الثابت في مجال درجة الحرارة 273 – 673 K من التدرج وتقاطع المحور y في الشكل (5)، هذه القيم أقل بكثير مقارنة بالقيمة النظرية

$32\ A\ cm^{-2}\ K^{-2}$ في $n-ZnO$.إن انحراف ثابت ريتشاردسون عن القيمة النظرية يرجع إلى ارتفاع الحاجز غير المتجانس مكانياً والتقلبات المحتملة عند الواجهة التي تتكون من مناطق حاجز منخفضة وعالية، أي عندما تنخفض درجة الحرارة، سيتدفق التيار بشكل تفضيلي عبر الحواجز السفلية في توزيع الجهد. ويوضح الشكل (5) رسماً بيانياً لـ $\ln(I_s/T^2)$ مقابل $10^3/T$ في مجال درجة الحرارة $273-673\ K$. وعلى الرغم من أن الدراسة الكاملة لقياسات $I-V$ المعتمدة على درجة الحرارة أجريت في مجال درجة الحرارة $273-673\ K$، فلقد لوحظ سلوك غير خطي عند درجات حرارة منخفضة. وبالتالي يمكن أن تُعزى عدم خطية الرسم البياني إلى اعتماد ارتفاع الحاجز وعامل المثالية على درجة الحرارة[3].



الشكل(6) مخطط التشبع لثنائي $Al\ ZnO/Cu$ في مجال درجة الحرارة $100-400K$

الشكل (6) يبين مخطط الاشباع لثنائي شوتكي Cu /ZnO/ Al في مجال درجة الحرارة من $273 - 673K$. طاقة التنشيط لعيب المستوى العميق الذي يحبس الناقل ويمكن العثور عليها من خلال تدرج التوافق الخطي للمعادلة التالية [21]:

$$I_s = I_o \exp(-E_a/kT) \qquad (8)$$

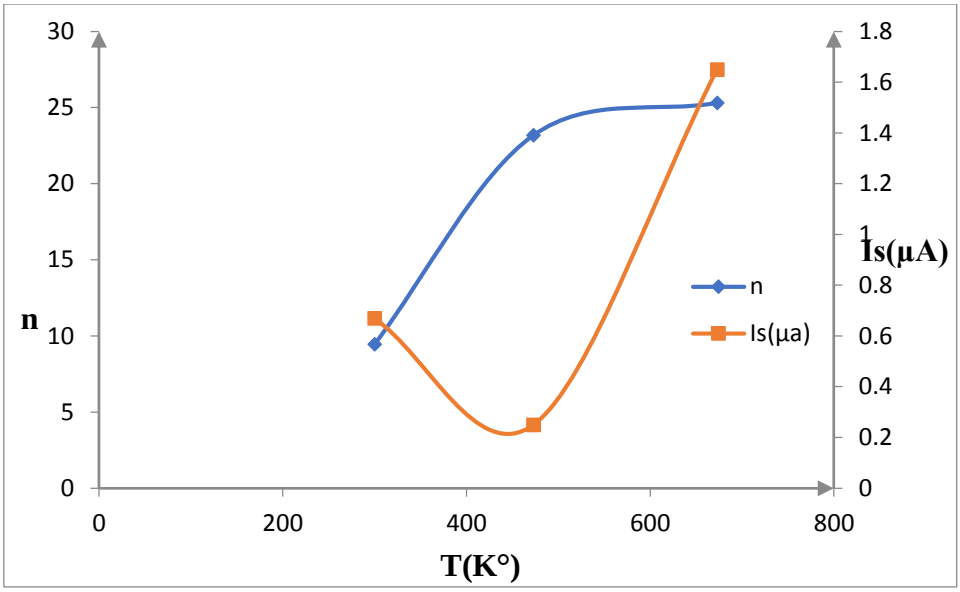
حيث I_s هو تيار التشبع المقاس عند درجات حرارة مختلفة، E_a هي طاقة التنشيط. تم العثور على طاقة التنشيط لتكون $0.224\mu eV$ وهي تدل على عيب بالقرب من عصابة الناقلية [7,8] .

2.5علاقة تيار الاشباع وعامل المثالية بتغير درجة الحرارة:

يبين الجدول (1) تغيرات تيار الإشباع وعامل المثالية عند تغير درجة الحرارة.

$T(K^{\circ})$	300	473	673
η	9.45	23.17	25.3
$I_s(\mu A)$	0.6688	0.2495	1.6499

الرسم البياني يبين تغيرات تيار الإشباع وعامل المثالية عند ازدياد درجة الحرارة، حيث نلاحظ ازياد عامل المثالية مع ازدياد درجة الحرارة، وكذلك يزداد تيار الإشباع باعتبارهما يرتبطان ارتباط مباشر بدرجة الحرارة، وكذلك يرتبط بعامل المثالية من خلال اعتماده على كمون الحاجز حسب العلاقة(2) [22] .

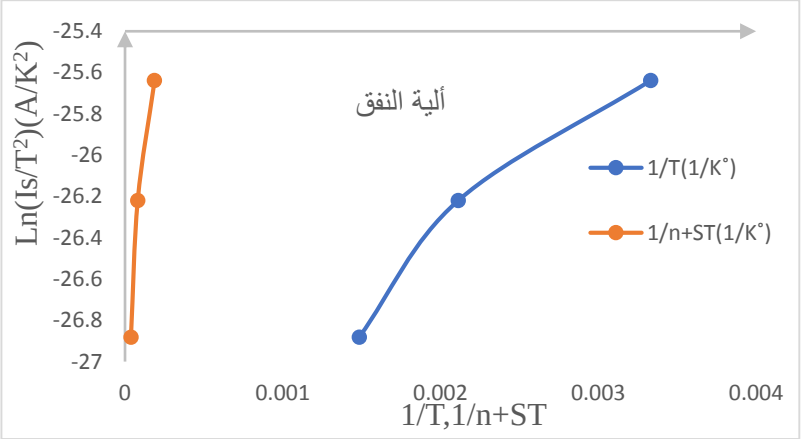


الشكل البياني (7) تغيرات تيار الإشباع وعامل المثالية عند ازدياد درجة الحرارة.

توضح القيم المتزايدة لـ n مع زيادة درجة الحرارة أن آلية النقل الحراري تتأثر بشدة في منطقة درجات الحرارة المنخفضة، وأن الأنفاق المساعدة المحاصرة هي المسؤولة عن آلية النقل[10] .

3.5 دراسة ألية النقل في ثنائي شوتكي :

الرسم البياني (8) يوضح ألية النقل الحاصلة في الثنائي شوتكي Cu /ZnO/ Al



الشكل (8) ألية النقل الحاصلة في ثنائي شوتكيCu /ZnO/ Al

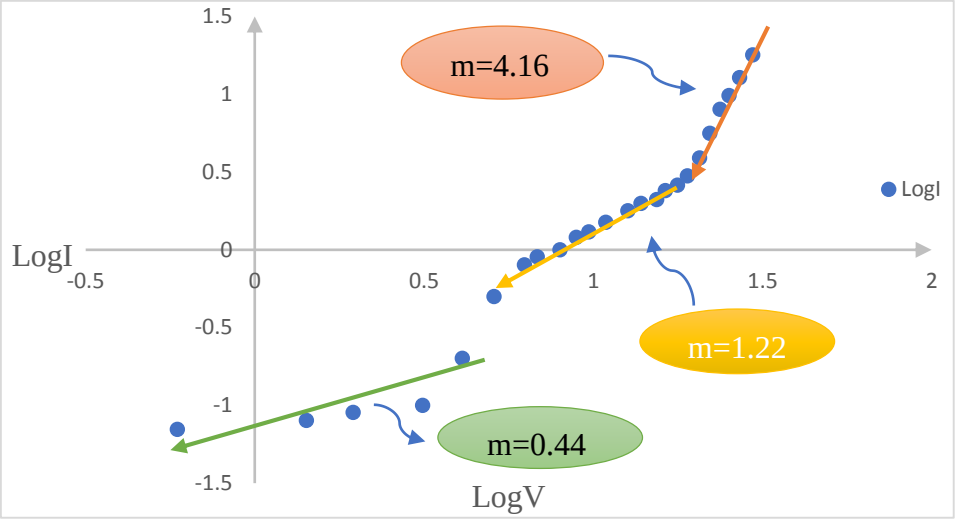
كما هو موضح في الشكل (8)، إن علاقة ارتباط درجة الحرارة $\ln(I_0 / T^2)$ مقابل $1 / nT$ له سلوك خطي مقارنة برسم$\ln(I_0 / T^2)$ مقابل $1 / T$. لذلك، يمكن اعتبار هذه الحقيقة بمثابة مؤشر على آلية النفق المحتملة في توصيل الناقل من المعدن عبر واجهة الأكسيد وإلى طبقة أنصاف النواقل [24,20]. تحت هذا الافتراض، يمكن التعبير عن المعادلة (2) بارتفاع الحاجز الفعال اعتماداً على التباين في n مع درجة الحرارة [9]،

$$I = I_0 = AA^{*}T^{-2}\exp(a\chi^{0.5}\delta)\exp\left(-\frac{q\emptyset_{beff}}{nkT}\right) \quad (9)$$

حيث يتم استخدام $(a\chi^{0.5}\delta)$ في العلاقة المعادلة (المعادلة 9) لمناقشة النقل عبر الواجهة. كما يتم تعريف المصطلح $(a\chi^{0.5}\delta)$ كعامل نفق ثابت a يعتمد على كتلة النفق الفعالة m^*,χ هو متوسط ارتفاع حاجز النفق في طبقة الواجهة و δ هو سمك الطبقة التي يحدث فيها النفق. لذلك، بافتراض أن طبقة الوصلة هي طبقة ZnO المترسبة بين ملامسة معدن الألمنيوم والنحاس، يتم تقريب $(a\chi^{0.5}\delta)$ إلى 17.6 وفقاً للمعادلة(9). يتم الحصول على القيمة دون أي مساهمة محتملة للتيار العكسي في نفق الناقل وبافتراض الحد الأقصى لـ $V > 3kT / q$. يتم الحصول على قيم ارتفاع الحاجز الفعال $\emptyset_{beff}$ من تعبير I_0 المعدل المعطى في المعادلة (9) لإعادة تقييم القيم التجريبية المستخرجة من نموذج TE. بالتوافق الجيد مع النتائج التي أبلغ عنهاSheng .يمكن استخدام تقريب ارتفاع حاجز الكمون هذا لتقييم خصائص I–V للثنائي تحت تأثير عدم التجانس الملحوظ كسلوك شوتكي غير مثالي.

4.5 دراسة مناطق عمل ثنائي شوتكي:

الشكل 9 يبين خاصية الجهد – التيار (I–V) في مخطط لوغاريتمي مزدوج للثنائي n – ZnO/ Al ويحدد مناطق عمل ثنائي شوتكي



الشكل9. خاصية الجهد – التيار (I– V) في مخطط لوغاريتمي مزدوج للثنائي Cu/ZnO/Al

تمت دراسة آليات النقل في الديودات المصنعة لدينا باستخدام خصائص $I-V$ اللوغاريتمية المزدوجة للتحيز الأمامي، تم عرض مخطط اللوغاريتمي المزدوج I– V لبنية Cu/ZnO/Al في الشكل(9) . تم استخدام قانون الطاقة $I = kV^m$ حيث I هو التيار، و k ثابت، و V هو الجهد و m عبارة عن آلية نقل الشحنة التي تصف ثابتاً والتي تساوي ميل الرسم البياني log I– log V. يعزى اختلاف المنحني، أن خاصية التحييز الأمامي لبنية الوصلة Cu/ZnO/Al لها ثلاث مناطق خطية متميزة. تشير هذه الحالة إلى وجود آليات نقل متنوعة للبنية بقيمة انحدار، تبلغ 4.16، 1.22، 0.4. تم الحصول على ميل I – V كقيمة أكبر من 2.0 والتي تنسب إلى إمكانية آلية التيار المحدود للشحنة الفضائية (SCLC) وفقاً لقانون($J \sim V^2/d^3$) Mott-Gurney. عند الفولتية المنخفضة لا توجد خاصية أومية على النقيض من الكلاسيكية والتي يمكن أن تكون ناجمة عن طبقة النضوب مع بنية بئر تقييد الإلكترون بين n – ZnO و Al (وصلة شوتكي) على Cu يتضح أن كلا المنطقتين I و II تتبعان قانون الطاقة ($I \approx V^m$)،حيث كان الميل في المنطقة الأولى منخفض $m = 0.44$ ويدل على أن الثنائي المصنع يقترب من الحد "المملوء بالمصيدة" عندما يكون مستوى الحقن مرتفعاً والذي يكون اعتماده هو نفسه كما في التيار المحدود ذي الشحنة الفراغية الخالية من المصيدة.

في المنطقة II، يزداد ميل اللوغاريتمي المزدوج I−V ويكون مساوياً $m = 1.22$ مما يعني أنه يمكن زيادة حركة حاملات الشحن مع زيادة الجهد المطبق. في المنطقة III، عند الفولتية العالية، يميل ميل المنحني إلى الازدياد $m = 4.16$ لأن الثنائي يعمل على إعادة الاتحاد بين الأزواج (إلكترون− ثقب) وبالتالي تزداد حركية حوامل الشحنة مما يسبب بازدياد التيار، وفقاً لقانون الطاقة، وجد أن التيار المحدود لإعادة الاتحاد للشحنة الفراغية (SCLC) هو آلية النقل المهيمنة في مجال الجهد العالي للتحيز الأمامي. [18]

المراجع

[1]. XU, Zhixing; ZHANG, Yongle; WANG, Zhaona. (2019)-**ZnO-based photodetector: from photon detector to pyro-phototronic effect enhanced detector**. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol 52, No 22, Pp 223001.

[2]. AL-AHMADI, Noorah A**, (**2020)-**Metal oxide semiconductor-based Schottky diodes: a review of recent advances**. *Materials Research Express*, Vol 7, No 3, Pp 032001.

[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**. *Physica B: Condensed Matter*, Vol 480, Pp 58-62.

[4] Varma, T. (2017)-**Design and Development of Zinc Oxide thin film based Schottky Diodes and TFTs and their application as UV Detectors**. (PhD Thesis Doctoral dissertation, MNIT Jaipur).

[5] SHWEIKANI, Pr R, ISMAIL A, JERBY, B. (2017)-**Preliminary study on the properties of zinc oxide (ZnO) for alpha particles detection**. International Journal of Radiation Research, Vol 15, No 3, Pp 301-306.

[6]A. ISMAIL, J. AL ABDULLAH, R. SHWEIKANI, B. JERBY. (2017)-**Radioluminescence in ZnO: effect of chemical modification**. journal OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS, Vol 19, No. 5 – 6, p. 389 – 394.

[7]ASGHAR, M. (2013)-**Electrical characterization of Au/ZnO/Si Schottky contact**. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, Vol 439, Pp 012030

[8] AZHAR, Ebraheem Ali, (2018) **- ZnO-based Schottky and oxide multilayer devices for visibly transparent photovoltaic**

applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol 65, No 8 Pp 3291-3299.

[9] 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, No 20, Pp 297- 300.

[10] XU, Zhixing; ZHANG, Yongle; WANG, Zhaona. (2019)- **ZnO-based photodetector: from photon detector to pyro-phototronic effect enhanced detector**. Journal of Physics D: Applied Physics, Vol 52No 22, Pp 223001.

[11] Coppa, B J, Davis, R F, &Nemanich Rn J, (2003)- **Gold Schottky contacts on oxygen plasma-treated, n-type ZnO (0001)**. *Applied Physics Letters*, Vol 82, No 3, Pp 400-402.

[12] 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

[13] JIN, Jidong, (2017)- **Schottky diodes on ZnO thin films grown by plasma-enhanced atomic layer deposition**. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol 64, No3, Pp 1225-1230

[14] Semple J, Rossbauer, S, Anthopoulos T. D. (2016)- **Analysis of Schottky contact formation in coplanar Au/ZnO/Al nanogap radio frequency diodes processed from solution at low temperature**. ACS Applied Materials & Interfaces,Vol 8, No 35, Pp 23167-23174.

[15] RAJAN, Lintu; PERIASAMY, C.; SAHULA, Vineet. (2016) - **Electrical characterization of Au/ZnO thin film Schottky diode on silicon substrate**. Perspectives in Science,Vol 8,Pp 66-68.

[16] KHAN, Azam. (2014)- **Analysis of junction properties of gold–zinc oxide nanorods-based Schottky diode by means of frequency dependent electrical characterization on textile.** *Journal of Materials Science*, Vol 49, Pp 3434-3441.

[17] BRILLSON, Leonard J.; LU, Yicheng. (2011)- **ZnO Schottky barriers and Ohmic contacts**. *Journal of Applied Physics*, Vol, No109, Pp12.

[18] MWANKEMWA, Benard S. (2018)- **Effects of surface morphology on the optical and electrical properties of Schottky diodes of CBD deposited ZnO nanostructures**. Physica B: Condensed Matter,Vol 535,Pp175-180.

[19] XU, Zhixing; ZHANG, Yongle; WANG, Zhaona. (2019)- **ZnO-based photodetector: from photon detector to pyro-phototronic effect enhanced detector**. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol 52, No22, Pp 223001.

[20]ENDO, Haruyuki. (2007)- **Schottky ultraviolet photodiode using a ZnO hydrothermally grown single crystal substrate**. *Applied physics letters*, Vol 90, No12.

[21]CHENG, Ke. (2007)-**Surface states dominative Au Schottky contact on vertical aligned ZnO nanorod arrays synthesized by low-temperature growth**. *New Journal of Physics*, Vol 9, No7, Pp214.

[22]KRIEG, L. (2020)-**Controlled formation of Schottky diodes on n-doped ZnO layers by deposition of p-conductive polymer layers with oxidative chemical vapor deposition**. Nano Express Vol 1, No 1, Pp 010013.

[23] MENG, Jianping; LEE, Chengkuo; LI, Zhou. (2024)- **thesis PDH :Adjustment methods of Schottky barrier height in one-and two-dimensional semiconductor devices**. *Science Bulletin*.

[24] 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, No 5, Pp 309-321.