

## دراسة تأثير أشعة غاما على الخصائص الكهربائية لديود شوتكي من النمط Cu/ZnO/Al وتحديد مناطق عمله

زينب الحسن أ.د. عبد الرزاق الصوفي أ.د. عبد الله رستناوي

### الملخص

في هذا البحث، قمنا بدراسة تأثير أشعة غاما الصادرة من منبع  $^{137}\text{Cs}_{55}$  على الخصائص الكهربائية لديودات شوتكي من النمط Cu/ZnO/Al عند زمن تقادم 5 يوم. واعتماداً على طريقة الانبعاث بالتأين الحراري (TE)، تم تحليل ميزة التحيز الأمامي  $I - V$  لاستخراج ثوابت ديود شوتكي Cu/ZnO/Al، حيث لوحظ أن تيار التسرب يزداد بينما يتناقص جهد الانهيار. كما تبين أن ارتفاع حاجز الكمون وتيار الإشباع وثابتة سلوك الوجه البيني كلها تتغير بعد التشعيع، إن تيار الإشباع على علاقة عكسية مع حاجز الكمون، بينما كانت المقاومة الكهربائية وجهد التشغيل يتناقصان، أما تيار الفتح وعامل المثالية متزايدان عند التشعيع. بمقارنة طريقة TE مع طريقة Cheung و Cheung لاستخراج المقاومة التسلسلية، لوحظ أنه مع التشعيع، انخفضت كل من المقاومة التسلسلية وارتفاع حاجز الكمون، وثابتة سلوك الوجه البيني. لقد كانت نظرية (TE) متطابقة مع نتائج نظرية Cheung و Cheung. أجريت الدراسة السابقة من أجل تحديد مناطق عمل ديود شوتكي ككاشف فتيين وجود ثلاث مناطق لآليات نقل الشحنة وهي ظاهرة النفق، الانبعاث الحراري، والتيار المحدود بالشحنة الفضائية.

**الكلمات المفتاحية:** ديود شوتكي، نظرية Cheung، حاجز الكمون، نظرية الانبعاث الحراري (TE)، عامل المثالية، المقاومة المتسلسلة، الميزة  $I - V$ .

## Study the effect of gamma rays on the electrical properties of a Schottky diode of the type Cu/ZnO/Al and determine its operating regions

### Abstract

In this paper, we investigate the effect of gamma rays emitted from a  $^{137}_{55}\text{Cs}$  source on the electrical properties of Cu/ZnO/Al Schottky diodes after an aging time of 5 days. Using the thermionic emission (TE) method, the forward bias  $I-V$  characteristic of the Cu/ZnO/Al Schottky diode was analyzed to extract the leakage current and breakdown voltage. It was observed that the leakage current increased while the breakdown voltage decreased. The potential barrier height, saturation current, and interface conductance constant all changed after irradiation. The saturation current was inversely related to the potential barrier, while the electrical resistance and on-off voltage decreased. The opening current and ideality factor increased upon irradiation. Comparing the TE method with the series resistance extraction method of Cheung and Cheung, it was observed that the series resistance, potential barrier height, and interface conductance constant decreased with irradiation. The TE theory was consistent with the results of Cheung and Cheung's theory. The previous study was conducted to determine the operating regions of the Schottky detector diode and revealed three regions of charge transport mechanisms: tunneling, thermionic emission, and space charge-limited current.

**Keywords:** Schottky diode, Cheung's theorem, potential barrier, thermionic emission (TE) theorem, ideality factor, series resistance,  $(I-V)$  characteristic.

## 1. مقدمة

### 1.1. أهمية الكواشف الإشعاعية:

اهتم العلماء في السنوات القليلة الماضية بتطوير أنواع جديدة من الكاشف الكواشف وخصوصاً منها الكواشف الإشعاعية واختيار البدائل الممكنة المعتمدة على أنصاف النواقل، ومن ضمن هذه البدائل المستخدمة الأكاسيد نصف الناقلة التي لاقت اهتماماً هائلاً مؤخراً. تتميز هذه الأكاسيد نصف الناقلة بمجال محظور عريض وناقلية كهربائية مرتفعة وخصائص ضوئية وإشعاعية مهمة تجعل منها مناسبة للعديد من التطبيقات أهمها وصلات نصف ناقلة للكشف عن أشعة متنوعة. لذا كان الدافع من هذه الدراسة تحضير طبقات نصف ناقلة ذات سماكة كبيرة من أوكسيد الزنك بأفضل شروط تحضير، تم استخدام طريقة الطلاء بالبخ الكيميائي فهي طريقة كيميائية ممكنة للحصول على طبقات ذات سماكات عالية حيث كان من الصعب جداً الحصول على مثل هذه السماكات من الأكاسيد نصف الناقلة.

لكي يتم الكشف عن الإشعاع، يجب أن يكون هناك تفاعل بين الإشعاع الوارد والجزيئات الماصة في الكاشف. يجب اختيار مادة الكاشف وسماكتها حسب نوع الإشعاع الذي يريد المرء كشفه والمعلومات التي يراد الحصول عليها. في حالة الكشف عن جسيمات ألفا  $\alpha$  من التفكك الإشعاعي الكاشف رقيقة جداً كافية، وعادة ما تكون أقل من  $100 \mu\text{m}$  في معظم المواد الصلبة. بالنسبة للإلكترونات، مثل المنبعثة من تفكك  $\beta$ ، يلزم وجود مواد صلبة من  $0.1$  إلى  $1 \text{ mm}$ ، بينما بالنسبة لأشعة غاما، قد لا يكون كاشف سماكته  $5 \text{ cm}$  كافياً لاكتشاف كل الإشعاع الوارد، لذلك تم اختيار سماكات كبيرة لإمكانية توسيع منطقة النضوب وبالتالي احتمالية الكشف أكبر وبالتالي زيادة احتمال تشكيل أزواج (ثقوب-إلكترونات) أكثر فيزيد احتمالية تطبيق جهود أكبر فنستطيع الكشف عن التيارات [1]

تُستخدم مقاييس جرعات الإشعاع في مجموعة واسعة من التطبيقات؛ الطب والصناعة والعلوم. قد يحدث التعرض للإشعاع المؤين (أشعة  $X$  وأشعة  $\gamma$ ) في هذه

التطبيقات مخاطر كثيرة، لذلك يعتبر الكشف الكافي عن الإشعاع ضرورياً للسلامة البيئية. يعتمد اختيار نوع مقياس جرعات معين للتطبيق على مجال الطاقة، أكاسيد المعادن هي نوع مشهور من المواد المستخدمة في قياس الجرعات [2].

## 2-1 آلية عمل الكواشف الإشعاعية

يعتبر الكواشف الإشعاعية من الاهتمامات الرئيسية للباحثين، حيث أن جميع أنواع الجسيمات المنتجة في الفيزياء الذرية والنوية تتم دراستها بواسطة الكاشف. تعد كفاءة الكشف أحد الثوابت الرئيسية في نظام الكشف إلى جانب العديد من الثوابت المختلفة للكاشف. حيث تستخدم تقنيات الكشف عن غاما على مجال واسع في مطيافية غاما، يفقد الإشعاع كل أو جزء من الطاقة عن طريق حدوث تأثيرات متبادلة منذ دخوله في المادة، فإذا ما صدم فوتون غاما إلكترون فإن هذه الذرة تصبح ذرة متأينة، أو إذا ما صدم نواة فإنها تصبح في حالة إثارة. ثم تعود النواة من الحالة المثارة إلى الحالة المستقرة مصدرة الطاقة على شكل إشعاع. إن تحرير هذا الإشعاع هو المبدأ الأساسي للكشف. إن أنظمة الكشف الأكثر استخداماً في قياس طيف غاما هي كواشف NaI(Tl) و HPGe. يمكن استخدام أنواع مختلفة من مصادر التشعيع لإثارة العينات في القياس مثل أشعة غاما  $\gamma$  وأشعة X والأشعة فوق البنفسجية. إن الاعتماد الأساسي يكون على الطاقة الممتصة أثناء التشعيع، والذي يُطلق عليه "جرعة الإشعاع" والمُعَرَّف على أنه معدل الجرعة  $\times$  زمن التعرض [3]، [4].

يعتمد تشغيل أي كاشف إشعاع بشكل أساسي على الطريقة التي يتبادل بها التأثير الإشعاع المراد اكتشافه مع مادة الكاشف نفسه. لذلك يجب أن يعتمد فهم استجابة نوع معين من الكاشف على الإلمام بالآليات الأساسية التي يتبادل بها الإشعاع التأثير ويفقد طاقته في المادة. تتوفر العديد من الأعمال المرجعية العامة بشأن هذا الموضوع الواسع؛ المقال الذي كتبه Evans على سبيل المثال لا الحصر، كان بمثابة مرجع معياري لعدة عقود [2]، [3].

في العديد من تطبيقات الكواشف الإشعاعية، إن استخدام وسيط كشف صلب يكون ميزة عظيمة لقياس أشعة غاما أو بيتا، ويمكن الاحتفاظ بأبعاد الكاشف أصغر بكثير من الكاشف الغازي، لأن الكثافة تزيد بنحو 1000 مرة عن تلك الخاصة للغاز. توفر الكواشف الوميضية إمكانية واحدة لتوفير وسيط كشف صلب، حيث إن الزمن اللازم لتجميع حوامل الشحنة على أبعاد نموذجية تبلغ 0.1 cm أو أقل سيكون أقل من 10 ns. يمكن أن تكون الكواشف نصف-ناقلة من أسرع الكواشف الإشعاعية استجابةً لجميع أنواع الإشعاع [5]، [6].

يمكن استخدام عداد غايغر حيث تعطي أنواع الأشعة الساقطة نفس الناتج. لقياس طاقة الإشعاع، كما يمكن اختيار كاشف يقوم بتحويل طاقة النبضة من خلال سعة النبضة الناتجة من الإلكترونات المجمعة. للقيام بذلك، يجب إطلاق عدد كبير من الإلكترونات في الكاشف بحيث لا يكون للتقلبات الإحصائية للإلكترونات، تأثيراً كبيراً على تعيين طاقة الإشعاع. لتحديد زمن انبعاث الإشعاع، هناك حاجة إلى كاشف يجمع الإلكترونات بسرعة، ويجب تحديد نوع الجسيم الذي يدخل الكاشف [1]، [7].

تحتل ديودات شوتكي، باهتمام متزايد نظراً لإمكانية تطبيقها في الإلكترونيات الراديوية والإلكترونيات الضوئية. تم تخصيص الأبحاث الحديثة لتطوير ديودات شوتكي عالية الجودة المستندة إلى ZnO والمصنعة باستخدام مجموعة من تقنيات المعالجة ومواد الاتصال لما لها من أهمية في الكواشف الضوئية. السليكون والجرمانيوم هما من أنصاف-النواقل التي تستخدم بشكل أساسي لهذه الكواشف. حيث يعتبر السليكون المادة الأكثر استخداماً في الكواشف المصممة للكشف عن الجسيمات المشحونة بينما يستخدم الجرمانيوم على مجال واسع في قياسات أشعة غاما [8].

تمت دراسة (GaAs) ككاشف إشعاعي منذ أوائل 1960 وكان من أوائل أنصاف - النواقل المركبة التي تم تشغيلها عند درجة حرارة الغرفة التي تمتلك طاقة فصل جيدة لغاما 1.43 eV ومتوسط طاقة التأين هو  $4.3 \text{ eV/e} - h$ ، مما يشير إلى أن طاقة الفصل المقبولة تمكن الكاشف من التشغيل عند درجة حرارة الغرفة. حيث يتوجب أن تكون

التأثيرات المتبادلة لأشعة غاما ومردود الكشف لكل وحدة كتلة من (GaAs) مشابهة لكواشف الجرمانيوم Ge وهي (31) Ga، (33) As [5].

إن يوديد الرصاص  $PbI_2$  هو مادة مثيرة للاهتمام باعتباره من أنصاف-النواقل المستخدم للكشف عن أشعة غاما. تدل الأرقام الذرية الكبيرة للرصاص (82) واليود (53) على أن المادة سيكون لها تأثير متبادل جيد للغاية لأشعة غاما ومردود كشفها. إن طاقة فجوة الحزمة العصبية الخاصة بها هي 2.55 eV ، مما يعني أنه يمكن تشغيل المواد في بيئات أعلى بكثير من درجة حرارة الغرفة. على الرغم من أن  $PbI_2$  تمت دراسته لأول مرة في أوائل السبعينيات 1970s ككاشف إشعاعي، إلا أن المشكلات المادية المتعلقة باستخدامه مازال قيد الدراسة [5].

### 3-1 آلية تفاعل أشعة غاما مع المادة:

يمكن لأشعة X أو أشعة غاما نقل كل طاقتها أو جزء منها إلى الإلكترونات داخل الوسط. تحمل الإلكترونات الثانوية الناتجة التشابه الوثيق مع الإلكترونات السريعة (مثل جسيم بيتا). على الرغم من أن عدداً كبيراً من آليات التأثير المتبادل المحتملة معروفة لأشعة غاما في المادة، إلا أن ثلاثة أنواع رئيسية فقط تلعب دوراً مهماً في قياسات الإشعاع وهي: مفعول (الامتصاص) الكهروضوئي، وتشتت كومبتون، وإنتاج الأزواج. كل هذه العمليات تؤدي إلى التحويل الجزئي أو الكامل لطاقة فوتون أشعة غاما إلى طاقة الإلكترون. إنها تؤدي إلى تغيرات مفاجئة في فوتونات أشعة غاما، حيث يختفي الفوتون تماماً أو يتشتت من خلال زاوية ما. هذا السلوك يختلف بشكل ملحوظ مع الجسيمات المشحونة والتي تتباطأ تدريجياً نتيجة تأثيرات متبادلة مستمرة ومتزامنة مع العديد من الذرات الماصة. للكشف عن الإشعاع يجب أن يكون هناك تفاعل بين الإشعاع ومادة الكاشف الماص نظراً لوجود أنواع مختلفة من الإشعاع، ولكل إشعاع نوع معين من التأثير المتبادل مع المادة، فقد تم تطوير أنواع مختلفة من الكاشف. في جميع أنواع الإشعاع، ينقل التأثير المتبادل الطاقة من الإشعاع إلى المادة الماصة. يتم نقل هذه الطاقة كلياً أو جزئياً من الإشعاع

الوارد إلى الإلكترونات أو النواة في مادة الكاشف أو إلى الجسيمات المشحونة كمنتج لتأثيرات متبادلة مع النواة [3]، [6]، [9]، [10]، [11] .

ويمكن أيضاً عند تشعيع الكاشف نصف-الناقلة بغاما، التقاط بعض أشعة غاما بواسطة ذرات الكاشف. إذا خضعت هذه الذرات لتفاعل نووي، تتشكل ذرة أخرى ويصبح الكاشف مشابهاً. على سبيل المثال إذا تم تشعيع كاشف السيليكون بأشعة غاما، فإن بعض ذرات السيليكون يتحول فيها أحد النيوترونات إلى بروتون نووي متحولة إلى ذرة فوسفور، وبالتالي فإن السيليكون يصبح مشابهاً بالفوسفور [3]، [12]، [13].

## 2. هدف البحث

- دراسة تأثير أشعة غاما على الميزة جهد-تيار وتحديد جهد الانهيار وتيار التسرب.
- تحديد الاختلاف في قيم ارتفاع حاجز الكمون وتيار الإشباع وثابتة سلوك الوجه البيني قبل التشعيع بغاما وبعده.
- حساب قيمة المقاومة الكهربائية قبل التشعيع وبعده ومعرفة التغيرات الحاصلة عليها.
- دراسة تأثير أشعة غاما على جهد التشغيل للديود المحضر وتيار الفتح وعامل المثالية.
- تحديد التغيرات الحاصلة على ارتفاع حاجز الكمون والمقاومة المتسلسلة وفق نظرية الانبعاث الحراري و Cheung قبل وبعد التشعيع.
- تحديد مناطق عمل هذا الديود قبل وبعد التشعيع وتحديد آليات نقل الشحنة.

## 3. مواد وطرق البحث

استخدم ZnO (99.5% من Honeywell Riedel-de Haën) كمادة أساسية، ثم رسبت طبقة ZnO على Cu لتحقيق الاتصال الأومي بواسطة طريقة الطلاء بالبخ (وهي طريقة تتم باستخدام ضغط الغاز يتم بخ المادة المراد التصاقها على المعدن). في

البداية حضرت أقراص نحاسية بنصف قطر متماثل من أجل جميع العينات  $1.0\text{cm}$  ، غسلت بالماء المقطر وجففت لمدة 24 ساعة عند درجة حرارة المخبر. ثم جرى ترسيب الأكسيد بسماكة  $50\mu\text{m}$  ، وبعدها رسبت طبقة الألمنيوم ذات السماكة  $1\mu\text{m}$  ، فوق طبقة الأكسيد لتحقيق اتصال ثوتكي.

تم الحصول على الميزة  $I-V$  للتحيز الأمامي والعكسي عليها باستخدام دائرة إلكترونية مؤلفة من مقياس أمبير - مقياس فولت ومغذية كهربائية ومجموعة من المقاومات (تم شرح أليات التوصيل للدائرة الإلكترونية وكيفية استخراج القيم والحسابات في مقالات سابقة منشورة في مجلة جامعة حمص لم اذكرها في المراجع لعدم نشرها بعد بمجلد).

#### 4- الدراسة الكهربائية :

تم تشيع الكاشف بجرعة زائدة خطياً بمقدار  $2\mu\text{Gy}$  حتى  $970\mu\text{Gy}$  خلال أزمنة تشيع مختلفة. يتم امتصاص الفوتونات بشكل أساسي في طبقة  $\text{Al}$  في الوصلة  $\text{Cu/ZnO/Al}$  حيث يتم توليد أزواج إلكترونات-ثقوب. تنتشر الإلكترونات المولدة إشعاعياً في منطقة النضوب ثم تصل إلى طبقة  $\text{ZnO}$  بواسطة الحقل الكهربائي. لمقاومة التيار الناتج، يجب إنشاء حقل كهربائي بين قطبي الوصلة غير المتجانسة، مما يؤدي إلى حدوث جهد إشعاعي بما يوافق المرجع [14]. ولمعرفة مدى استقرار وعمل الكاشف المدروسة تمت دراسة تأثير تقادم الزمن وتحديد جهد الانهيار. بعد إجراء مجموعة من القياسات على عدد من الكاشف، ولكن في مقالتنا ذكرنا تأثير أشعة غاما على كاشف واحد فقط ذو سماكة  $50\mu\text{m}$ ، وتمت كامل الدراسة عليه عند زمن تقادم 5 يوم.

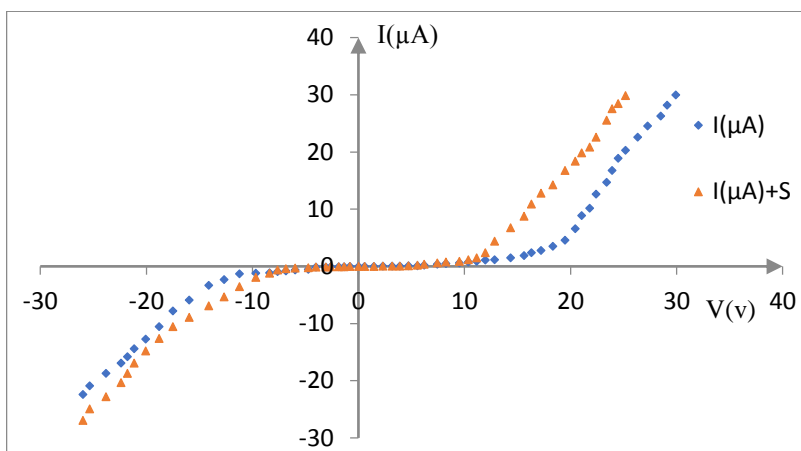
#### 5. القسم العملي:

##### 5-1 دراسة تأثير أشعة غاما على الميزة جهد-تيار في ديود ثوتكي

##### $\text{Cu/ZnO/Al}$ :

الشكل (1) يوضح الميزة جهد-تيار لـ  $\text{Cu/ZnO/Al}$  ثوتكي من النمط عند زمن تقاضم 5 يوم.





الشكل (1) الميزة جهد-تيار لـ ديود شوتكي من النمط Cu/ZnO/Al عند زمن تقاضم 5 يوم<sup>1</sup>.

يبين الجدول (1) جهد الانهيار ونسبة التصحيح و تيار التسرب للكاشف المحضر عند زمن تقاضم 5 يوم.

Sample	V كمون الانهيار		$RR = \frac{I_F}{I_R}$		تيار التسرب I (μA)	
	before	After	before	After	Before	After
Sample	-24	-13	0.35	0.416	0.378	<b>0.88</b>

الجدول (1)

تمت دراسة الشكل السابق للميزة I-V لكاشف شوتكي، وقد أظهر الكاشف سلوكاً غير خطي تقويمياً (تقويم تيار) بجهد تشغيل يختلف قبل التشعيع عما بعده (Simulated current) (I + S)، سوف نورد فيما بعد. يوضح الشكل السابق الميزة I-V كدالة لجهد التحيز كما هو موافق للمراجع [15]، [16]. يزداد التيار الأمامي بشكل كبير، وعند الفولتية الأعلى 14-20 V ، خطياً تقريباً. من هذه النتيجة، من الواضح أن معدن Al قد تم

<sup>1</sup> I: التيار قبل التشعيع  
I+S: التيار بعد التشعيع.

ترسيبه بنجاح على بنية الأوكسيد التي تشكل وصلة أنصاف-النواقل المعدنية (M/S) [8] مع مقاومة متسلسلة كبيرة نوعاً ما. كما تبدي الميزة اختلافاً قبل التشعيع عما بعده، وقيم الجهد الأمامي للكاشف قبل التشعيع أكبر عما بعده، حيث أدى التشعيع إلى تكون عيوب تؤثر على حركة حوامل الشحنة (إلكترونات- ثقب) تؤدي إلى تغير في آليات النقل الكهربائي داخل الكاشف، وقد ينخفض ارتفاع حاجز الكمون بعد التشعيع مما يؤدي إلى انخفاض جهد التشغيل وظهور منحنى الميزة جهد-تيار أقرب لمحور التيار كما أن زيادة التسرب عبر العيوب يُظهر التيار حتى عند جهود منخفضة، كما أن تغير عامل المثالية الذي في الغالب سوف يرتفع بعد التشعيع بسبب تغير آلية النقل وظهور آليات غير مثالية (مثل النقل عبر المصادد). يظهر الخط البياني بزيادة الجهد يزداد التيار في حالة التحيز الأمامي والعكسي. وجهد الانهيار يتناقص بعد التشعيع عما قبله حيث أن أشعة غاما قد أثرت على بنية نصف الناقل فعملت على التسريع من الوصول إلى حالة الانهيار. لقد تمت الدراسة السابقة كلها حتى جهد الانهيار ((ملاحظة: علماً أن جهد الانهيار يتسبب في تدهور عمل الكاشف)) من أجل تحديد مجال عمل الكاشف ومن ثم تحديد جهد عمله الذي عادةً يتم تحديده بمنتصف منطقة العمل.

لدى مقارنة نسبة التصحيح التي تم الحصول عليها، لوحظ أن لها قيم متزايدة بعد التشعيع، ويمكن أن تعزى القيم المنخفضة لنسبة التصحيح التي تم الحصول عليها إلى حقيقة أن الملامسات المعدنية قد تبخرت على سطح ZnO دون تنظيف. وفقاً [17]، [18]، كان من الصعب تحقيق تصحيح جيد لكاشف شوتكي ZnO بسبب الصعوبات في الحصول على سطح نظيف [19]، حيث ينتج عن ترسب المعادن عيوب أصلية في أسطح ZnO [20]. نلاحظ أيضاً وجود تيار تسرب بعد التشعيع متزايد عما قبل التشعيع. كما نلاحظ الانحناء المقعر للأسفل لمخطط التحيز الأمامي  $I - V$  في الشكل السابق عند الفولتية الكبيرة يرجع بشكل رئيسي إلى المقاومة المتسلسلة  $R_s$  الناتجة بشكل رئيسي عن المادة الأساسية (الركيزة) للكاشف [19]. لذلك من أجل تقدير الثوابت الكهربائية لديود شوتكي ZnO/Al بدقة، عندما يتم قياس  $I - V$  يجب تحليل الميزة من خلال أخذ تأثير المقاومة المتسلسلة في الاعتبار كما هو موضح فيما بعد.

## 5-2 دراسة تأثير أشعة غاما على ارتفاع حاجز الكمون وثابتة سلوك الوجه البيني اعتماداً على نظرية الانبعاث الحراري:

بالاعتماد على نظرية الانبعاث بالتأين الحراري (TE)، تم استخراج ارتفاع الحاجز  $\phi_{(B)}$  باستخدام المعادلة (2) والملاءمة الخطية لبيانات  $I - V$ .

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

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

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  $q$  هي شحنة الإلكترون،  $V$  هو الجهد المطبق،  $n$  هو عامل المثالية،  $k$  هو ثابت بولتزمان،  $R_s$  هي المقاومة المتسلسلة،  $A$  هي مساحة الديود،  $A^*$  هو ثابت ريتشاردسون المقدر  $32 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$  لـ  $n - \text{ZnO}$ ،  $T$  درجة الحرارة المطلقة،  $I_s$  هو تيار الإشباع و  $\phi_{(B)}$  هو ارتفاع الحاجز (بالفولت)، ويعطى  $\phi_{(B)}$  بالعلاقة [19]، [21]، [22]:

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

تعتمد ثابتة سلوك الوجه البيني (interface) على كثافة ومدى حالات الوجه البيني في الكاشف وتنشيط مستوى فيرمي، وهي تجعل ارتفاع حاجز الكمون لا يتغير بنفس مقدار تغير تابع العمل للمعدن، عندما تكون  $S \approx 1$  يكون ارتفاع حاجز الكمون متغير بشكل خطي مع تابع العمل (نموذج شوتكي المثالي)، يحدث هذا عندما تكون كثافة حالات السطح ضعيفة. أما عندما  $S = 0$  يكون مستوى فيرمي مثبتاً بشكل قوي بسبب وجود كثافة عالية من حالات السطح ويكون ارتفاع حاجز الكمون لا يتأثر بتغير تابع العمل للمعدن. وفي

الحالة التي تكون فيها  $0 < S < 1$  يوجد تأثير لحالات السطح ولكن ليس تثبيطاً كاملاً لمستوى فيرمي وتحسب من العلاقة [23]، [24]، [25]:

$$S = \frac{\phi_B}{\phi_m} \quad (4)$$

يبين الجدول (2) قيم ارتفاع حاجز الكمون الكاشف وتيار الإشباع وثابت سلوك الوجه البيني.

5	t(days)
0.756	$\phi_B(\text{eV})$
0.772	$\phi_B(\text{eV}) + S$
1.4712	$I_s(\mu\text{A})$
0.7797	$I_s(\mu\text{A}) + S$
0.172	$S$
0.176	$S + S$

الجدول (2)

وفقاً لنظرية شوتكي-موت، فإن  $\Phi_B$  المتوقع للبنات  $\text{ZnO/Al}$  تتراوح بين (0.7 – 1.2) eV. يُعزى الانحراف  $\Phi_B$  في الجداول إلى تكون حاجز متباين من كاشف لآخر، ومفعول شوتكي والمناطق المظلمة التي لا تساهم في نقل التيار عبر حاجز شوتكي [17]. ووفقاً [17] نجد أن القيم الكبيرة لـ  $\Phi_B$  قد تعزى إلى الحالات الإلكترونية التي قد تسبب انخفاضاً أو زيادة في تابع العمل المعدني في السطح البيني [19] ولكن يهيمن عليه في الغالب الحالات السطحية (العيوب) كما أشار باردين وآخرون التي تتحكم في سلوك التصحيح للميزة [26] I-V. كما تلعب التفاعلات الكيميائية بين الوجه البيني المعدني وأكسيد الزنك دوراً مهماً في تكون حاجز شوتكي. حيث تؤدي هذه التفاعلات إلى زيادة في كثافة شواغر الأكسجين ( $V_O$ ) القريبة من الوجه البيني، يصبح نشوء شواغر الأكسجين أكثر فائدة. في الحقيقة يوجد العديد من الأسباب عن تكون حالات فجوية في الوجه البيني

تم اقتراحها لشرح تأثير ثبات مستوى فيرمي. وهي تشمل الحالات السطحية، وحالات الفجوة الناجمة عن المعادن، والحالات المرتبطة بالعيوب [27] [24]، [28]، [29].

حيث إن وجود عيوب الأكسجين قد يفسر الانخفاض الكبير الذي حصلنا عليه في ثابتة سلوك الوجه البيني S عن التوقعات النظرية، حيث تم تقدير قيمة S نظرياً لتتراوح بين 0.52-0.57 للواجهات المعدنية / ZnO الخالية من العيوب بينما في دراستنا كانت حوالي 0.1 مما يشير إلى ثبات مستوى فيرمي الكبير تحت عصابة الناقلية هذا يتوافق مع المرجع [23]، [24]. بشكل عام، يمكن فهم هذه الاختلافات في  $\Phi_B$  وتدفق تيار الإشباع عبر وصلات أنصاف النواقل المعدنية مثل أكسيد الزنك (وأنصاف النواقل الأخرى) من حيث آليات نقل الشحنة المتعددة في الوجه البيني المعدني. حيث يمكن أن تنتقل الشحنة من المعدن إلى نصف - الناقل إما عبر الحاجز (الانبعاث بالتأين الحراري) (TE) للشحنات فوق الجزء العلوي من الحاجز، أو من خلال الحاجز عن طريق النفق (انبعاث الحقلي البارد) (FE) أي نفق الشحنات عبر عرض الحاجز الكامل، أو مزيج من الاثنين، وأيضاً من خلال الحاجز عن طريق القفز عبر حالات الفجوة داخل منطقة شحنة الفضاء لأنصاف النواقل، وتسمى نفق مساعد وإعادة الاتحاد لحوامل الشحنة في منطقة النضوب. إن اختلاف ارتفاع حاجز الكمون بعد التشيع عما قبله يعود ذلك لأن التشيع يمكن أن يغير من عدد أو نوع أو تركيز حاملات الشحنة المحاصرة في الطبقة نصف الناقلية أو على السطح، بالإضافة إلى إمكانية حدوث أكسدة أو تفاعلات كيميائية جديدة بعد التشيع تؤثر على الوجه البيني.

كما لاحظنا اختلاف ثابتة سلوك الوجه البيني قبل التشيع عما بعده باختلاف ارتفاع حاجز الكمون وذلك نتيجة ارتباطهما بالعلاقة (4)، فعند ازدياد ارتفاع حاجز الكمون تزداد ثابتة سلوك الوجه البيني حيث مع مرور الزمن قد يحدث إعادة ترتيب أو تحسن في الواجهة بين طبقة الألمنيوم وطبقة نصف الناقل مما يؤثر على توزيع الشحنات ويغير من ارتفاع حاجز الكمون.

### 5-3 دراسة تأثير أشعة غاما على المقاومة للكواشف الإشعاعية ZnO/Al:

تُحسب مقاومة الكاشف من خلال رسم العلاقة بين الجهد  $V$  والتيار  $I$  وتمثل ميل الخط البياني الناتج.

يبين الجدول (3) قيم المقاومة الكهربائية قبل التشعيع وبعده عند زمن تقادم 5 أيام.

5	t(days)
0.816	$R(\mu\Omega)$
0.685	$R(\mu\Omega) + S$

الجدول (3)

نلاحظ من خلال الجدول (3) أن مقاومة الكاشف تنخفض بعد التشعيع وهذا يدل على مرور تيار أكبر نتيجة وجود أشعة غاما التي تعمل على توليد شحنات نتيجة تولد عيوب مشحونة في المادة نصف الناقلة أو في الوجه البيني، حيث هذه العيوب تعمل كمراكز مساعدة لتوليد أو تمرير حوامل الشحنة، وبالتالي تقلل من الجهد المطلوب لبدء النقل. كما أن التشعيع قد يسبب تعديل في توزيع الشحنات أو خصائص التماس مما يقلل من ارتفاع حاجز الكمون بين الطبقة نصف الناقلة ومعدن الألمنيوم، والأشعة ترفع عدد الإلكترونات أو الثقوب المتاحة للنقل مما يؤدي لخفض المقاومة. كما إن زيادة كمية شواغر الأكسجين، تعمل كجهات مانحة في  $\text{ZnO}$ ، حيث تقدم طبقة رقيقة  $n^+$  في واجهة  $\text{ZnO/Al}$ ، مما يؤدي إلى انخفاض مقاومة الكاشف المحددة [30]. كما نلاحظ أن مقاومة الكاشف ترتبط بارتفاع حاجز الكمون وذلك بسبب ارتباطها بتيار الإشباع حسب العلاقة (3) بما يوافق المرجع [19]. عندما تبلغ قيمة عظمى يكون ارتفاع حاجز الكمون عند أعظم قيمة له والعكس بالعكس.

5-4 دراسة تأثير أشعة غاما على جهد التشغيل وتيار الفتح للكواشف الإشعاعية  $\text{ZnO/Al}$ :

يعرف جهد التشغيل هو قيمة الجهد الذي يستطيع عنده الكاشف أن يمرر تيار ويسمى هذا التيار بتيار الفتح، من خلال دراسة الميزة  $I - V$  يمكننا الحصول على جهد التشغيل وتيار الفتح.

يبين الجدول (4) جهد التشغيل وتيار الفتح للكاشف المحضر عند زمن تقادم 5

يوم.

5	t(days)
15	V(V)
10	V(V) + S
0.7	I <sub>oc</sub> (μA)
1.5	I <sub>oc</sub> + S(μA)

الجدول (4).

يمكن ملاحظة أن جهد التشغيل بعد التشعيع قد تناقص، ويعزى ذلك إلى ازدياد تيار الإشعاع نتيجة وجود أشعة غاما التي عملت على توليد حوامل شحنة، حيث التشعيع خلق مستويات طاقة داخل الفجوة العنصرية أو عيوب تسهل حركة حوامل الشحنة، مما يقلل من الطاقة اللازمة لبدء النقل وبالتالي انخفاض جهد التشغيل. فمرر الكاشف تيار بقيمة جهد أقل من القيمة التي احتاجها قبل وجود الإشعاع وهذا ما يؤكد أيضاً امتلاك الكاشف قيم أكبر لتيار الفتح بعد التشعيع. عند أخذ مسقط جهد التشغيل على محور الجهد لاحظنا انخفاض جهد التشغيل في حالة التحيز الأمامي وانخفاض جهد الانهيار في حالة التحيز العكسي تحت تأثير أشعة غاما. إن انخفاض جهد التشغيل يشير إلى انخفاض ارتفاع حاجز شونكي كما هو مطابق للمرجع [26]. وتعود هذه الفروقات بين قيم جهد التشغيل قبل وبعد التشعيع بسبب اختلاف دقيق في جودة التحضير وتوزيع العيوب والتجانس بين الطبقات وهذه الفروقات تؤثر على خصائص الواجهة بين المعدن ونصف الناقل وبالتالي على جهد التشغيل. حيث مع مرور الزمن قد تتحسن الناقلية بسبب استقرار البنية الذرية أو انخفاض العيوب السطحية، مما قد يؤدي إلى انخفاض بسيط في جهد التشغيل (أسهل لتحفيز الديود) أو أحياناً قد يرتفع مؤقتاً إذا حدث تلوث أو تدهور.

## 5-5 دراسة تأثير أشعة غاما على عامل المثالية للكواشف الإشعاعية $\text{ZnO/Al}$

:

من المرغوب فيه أن يكون عامل المثالية مساوياً لـ 1، لكن عامل المثالية يمكن أن يأخذ قيمة  $n < 1$ . إذا كانت  $n$  قيمة بين 1 و 2، فإن آلية تيار النفق هي المهيمنة. إذا كانت  $n = 2$ ، فإن آلية تيار إعادة الاتحاد هي المهيمنة. وتكون آلية تيار التسرب هي المهيمنة إذا كان  $n > 2$  [31].

يمكن تحديد عامل المثالية ( $n$ ) من خلال العلاقة:

$$n = \frac{q}{KT} \frac{\partial V}{\partial (\ln I)} \quad (5)$$

يبين الجدول (5) قيم عامل المثالية للكاشف عند زمن تقادم 5 يوم.

5	t(days)
15.76	n
37.2	n + s

الجدول (5)

من خلال الأشكال السابقة نلاحظ أن عامل المثالية متغير قبل التشعيع عما بعده ، لقد لوحظ أن عوامل المثالية لـ  $\text{ZnO/Al}$  شوتكي القائمة على أكسيد الزنك المعالجة كيميائياً عادةً ما تكون أكبر بكثير من الواحد وهي موافقة للمرجع [14]، [31] وسبب انحرافه عن القيم الواردة في المراجع العلمية وعن الديود التقليدي، يعود إلى الأنفاق وحالات الوجه البيني و/أو تأثير مراكز إعادة الاتحاد [14]، [30]، [32]، [33] وإلى وجود طبقة أكسيد رقيقة بينية في واجهة  $\text{ZnO}$  و  $\text{Al}$ ، و ارتفاع حاجز شوتكي أو عدم تجانس الحاجز عند السطح البيني حسب ما ناقشها Güttler و Werner في المرجع [19]، [25]، [26]، وإلى تأثير المقاومة المتسلسلة أو لوجود العيوب الناجمة عن الحالات السطحية [26] أو عدم تجانس السطح العلوي لبنية الأوكسيد، وعدم انتظام توزيع الشحنات البينية وانخفاض الجهد عبر وصلة  $M / S$  وحالات خلل الوجه البيني [17]، [34]، [35]، [36] والانبعاث بالتأين



الحراري [30]. وتبين حسب المرجع [14] أن قيمة  $n$  إذا كانت ( $n > 20$ ) المرصودة ترجع على الأرجح إلى وجود حالات عيب في شبكة ZnO و/أو وجود مصائد عند الوجه البيني من ناحية أخرى [37].

## 5-6 دراسة تأثير أشعة غاما على تغيرات ارتفاع حاجز الكمون والمقاومة

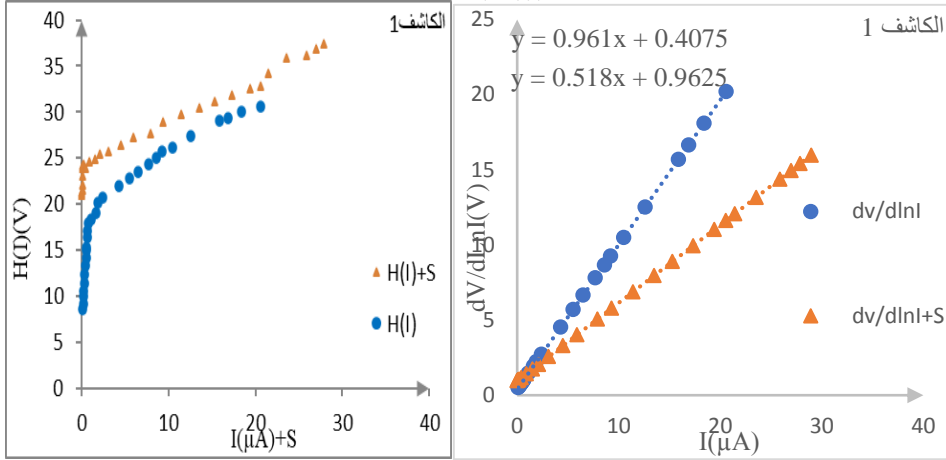
المتسلسلة اعتماداً على نظريتي الانبعاث بالتأين الحراري و Cheung- Cheung:

وفقاً ل Tung في [19] تمت دراسة الميزة  $I - V$  لوصلة شوتكي التي تكون 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 الواضح أنه في حين 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  $IR_s$  [19]. اعتماداً على نظرية الانبعاث بالتأين الحراري يتغير ارتفاع حاجز الكمون بعد إضافة المقاومة المتسلسلة للحسابات المأخوذة، ويتم حسابه اعتماداً على العلاقة (6) [5]، [8]، [19]، [35]، [38]، [39]، [40]، [41] برسم الخط البياني بين  $H(I)$  و  $I$ ، نقطة التقاطع هي ارتفاع حاجز الكمون والميل هو المقاومة المتسلسلة، وعامل المثالية محسوب من العلاقة (5) [5]، [8]، [19]، [37]، [38]، [39]، [40]، [42]. وللتأكد من صحة النتائج تم أيضاً الاعتماد على نظرية Cheung- Cheung [5]، [8]، [18]، [23]، [37]، [38]، [39]، [41] حيث ترسم العلاقة (7) بين  $\frac{dV}{d(\ln(I))}$  و  $I$  [5]، [19]، [23]، [39]، [41]، [43]، من خلال ميل المنحني يتم تحديد  $R_s$  ومن نقطة التقاطع نحدد عامل المثالية. ولمنع تكرار النتائج تمت الدراسة والنتائج للنظريتين معاً.

$$H(I) = V - n \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I}{AA^* T^2} \right) = n\phi_B + IR_s \quad (6)$$

$$\frac{dV}{d(\ln(I))} = n \frac{KT}{q} + R_s I \quad (7)$$

يبين الشكل (2) العلاقة بين  $H(I)$  و  $\frac{dV}{d(\ln(I))}$  مع  $I$  للكاشف عند زمن تقادم 5 يوم.



الشكل (2) العلاقة بين  $H(I)$  و  $\frac{dV}{d(\ln(I))}$  مع  $I$  للكاشف عند زمن تقادم 5 يوم.

يبين الجدول (6) قيم ارتفاع حاجز الكمون والمقاومة المتسلسلة وثابتة سلوك الوجه البيني للكاشف الأول عند زمن تقادم 5 يوم.

S + S	S	$R_s(\mu\Omega)$ + S	$R_s(\mu\Omega)$	$\phi_B(\text{eV})$ + S	$\phi_B(\text{eV})$	Theor y
0.134	0.2109	0.518	0.961	0.59	0.924	TL
		0.518	0.961	0.59	0.924	Cheung-Cheung

الجدول (6)

من خلال الجدول السابق المعتمد في حساباته على نظرية الانبعاث بالتأين الحراري ونظرية Cheung-Cheung وجد أن ارتفاع حاجز الكمون للكاشف قد ازداد بعد إضافة المقاومة المتسلسلة قبل التشعيع. أما بعد التشعيع، كان ارتفاع حاجز الكمون أخفض نتيجة انخفاض قيم المقاومة المتسلسلة، نتيجة تأثير أشعة غاما التي تؤدي لتوليد حوامل شحنة مما يؤدي لزيادة التيار. ولقد تم التوصل أيضاً حسب نظرية Cheung-Cheung إلى ما تم التوصل إليه وفق نظرية الانبعاث بالتأين الحراري، كما لم نلاحظ تابعة اختلاف حاجز الكمون والمقاومة المتسلسلة بينهم. يشير الفرق النسبي بين قيم ارتفاعات حاجز الكمون التي تم

الحصول عليه من نموذج الانبعاث بالتأين الحراري (قبل إضافة المقاومة المتسلسلة) وطريقة Cheung- Cheung إلى حدوث مقاومة متسلسلة وحالات واجهة (العيوب) عبر المعادن وأنصاف - النواقل interface states [41]. ولكن وجدنا في النتائج بعد إضافة المقاومة المتسلسلة تطابق شبه تام بين النظريتين.

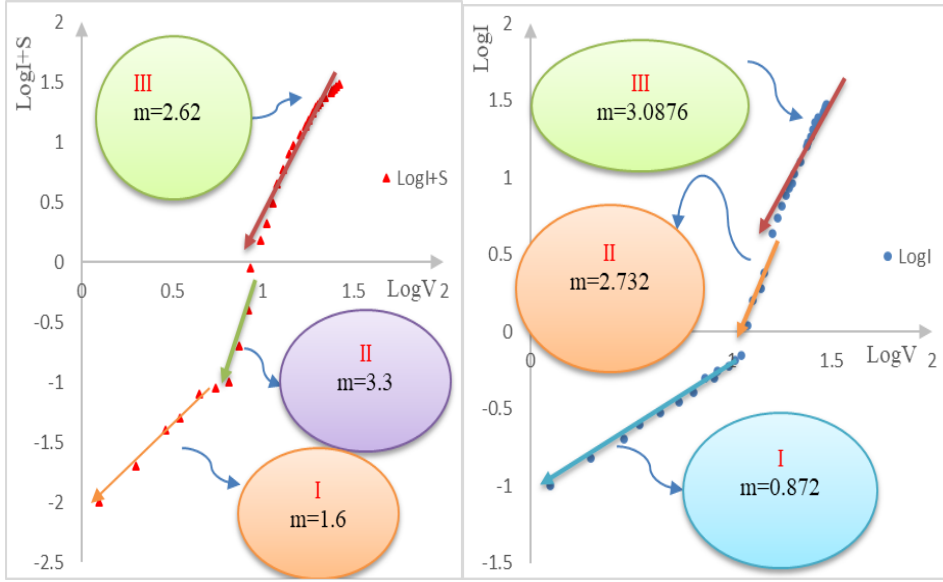
من المناقشة أعلاه، من الواضح أن المقاومة المتسلسلة  $R_S$  ليس لها أي تأثير يذكر على الثوابت المقدرة  $n$ ،  $I_S$  ولكن لوحظ تأثيرها على ارتفاع حاجز الكمون، حيث يتم تقديرها في منطقة التيار المنخفض حيث  $I \sim I_S$ . ومع ذلك، قد تلعب  $R_S$  دوراً مهماً في تحديد خصائص الكاشف في منطقة التيار العالي حيث لا يمكن إهمال انخفاض جهد الـ  $IR_S$  فيما يتعلق بجهد التحيز المطبق [19]. وهذا ما يؤكد صحة النتائج وتعتبر كلا النظريتين صحيحتان عند استخدامها في ديودات شوتكي وهو مطابق للمرجع [23]، [39]. كما لاحظنا اختلاف ثابتة سلوك الوجه البيني قبل التشعيع عما بعده، وذلك بسبب اختلاف ارتفاع حاجز الكمون، والتي ترتبط معه حسب العلاقة (4).

## 5-7 دراسة تأثير أشعة غاما على مناطق عمل الكواشف الإشعاعية

### ZnO/Al:

تمت دراسة آليات النقل في الكاشف المصنعة باستخدام الميزة  $I-V$  اللوغاريتمية للتحيز الأمامي كما هو موضح بالأشكال التالية. 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  $\log I - \log V$ . عندما تكون تابعة التيار للجهد خطية، أي  $I \propto V$  فإن قيمة الميل، من المخطط  $m < 2$ ، تشير على الأرجح إلى أن ظاهرة النفق (النفذ الكمومي) هو آلية نقل الشحنة المهيمنة في هذه المنطقة وتسمح للإلكترونات بالمرور عبر الحاجز دون الحاجة إلى الطاقة الكافية لتجاوزه. في المنطقة التي يزداد فيها التيار بشكل كبير بدلالة  $(m = 2)$   $I \propto \exp(V)$  تكون آلية النقل السائدة هي الانبعاث بالتأين الحراري وذلك بسبب العيوب، تماماً كما هو متوقع في المنطقة التي يتبع التيار قانون الطاقة  $(I \propto V^2)$ . أخيراً تشير العلاقة المميزة  $(m > 2)$   $I \propto V^m$  إلى أن آلية نقل التيار مرتبطة بالشحنة الفضائية (SCLC Region) (Space Charge Limited Current)،

حيث هنا التيار يكون محدوداً بكمية الشحنات المحصورة داخل الطبقة نصف الناقلة، وهذه الآلية تظهر عادةً في الطبقات السميكة التي تحتوي على عيوب أو شوائب كثيرة، وبالتالي يحدث تدفقاً قوياً لحاملات الشحنة مع تأثر بوجود المصائد والعيوب [29]، [30]، [34].  
يبين الشكل (3) مناطق عمل الكاشف عند زمن تقادم 5 يوم.



الشكل (3) مناطق عمل الكاشف عند زمن تقادم 5 يوم.

يتم نسب كل منطقة لآلية نقل شحنة مختلفة، تختلف قيم  $m$  في هذه المناطق باختلاف الكاشف المحضر وباختلاف زمن التقادم، كما كانت الاختلافات الناتجة بعد التشعيع نتيجة تأثر المادة بأشعة غاما حيث طاقتها تؤدي إلى زيادة عرض منطقة النضوب، مما يؤدي إلى ازدياد فعالية الديدود وبالتالي يؤثر ذلك على آلية نقل الشحنة. ومع ذلك، فإننا نرى أن الميول في المنطقة 1، 2، لمعظم الكاشف قد انخفضت قليلاً مقارنة بتلك الموجودة في المنطقة 3. وقد يكون هذا بسبب حقيقة أن الديدود يقترب مما يسمى الحد المملوء بالمصيدة [17]. التيار في المنطقة (I) له تابعة خطية للجهد، أي  $I \propto V$  ويكون الميل من المخطط  $m < 2$  يشير على الأرجح إلى أن ظاهرة النفق هو آلية نقل الشحنة المهيمنة في هذه المنطقة. في المنطقة (II)، يزداد التيار بشكل كبير مع العلاقة  $m = \exp(V)$

2 تكون آلية النقل السائدة هي الانبعاث بالتأين الحراري. في المنطقة (III)، يتبع التيار قانون الطاقة ( $I \propto V^2$ )، تشير العلاقة المميزة ( $I \propto V^m$  ( $m > 2$ )) مما يشير إلى آلية نقل التيار مرتبط بالشحنة الفضائية [8]، [28]، [30].

## 6. النتائج و مناقشتها

- ❖ تمت دراسة الميزة جهد - تيار عند تعريض الديودات لأشعة غاما، لاحظنا تأثير واضح لأشعة غاما على الميزة.
- ❖ استنتجنا أن الانحناء المقعر في الميزة يعود إلى المقاومة المتسلسلة لذلك اقترحنا أن تتم الدراسة بأكثر من طريقة.
- ❖ حددنا قيم جهد الانهيار والتيار التسرب حيث لاحظنا اختلافهما بوجود الإشعاع عن قبله.
- ❖ لاحظنا تأثير واضح لأشعة غاما على ارتفاع حاجز الكمون وثابتة سلوك الوجه البيني اللذان يتناقضان، بينما كان تيار الإشعاع متزايد بوجود التشعيع.
- ❖ حسبنا قيم عامل المثالية قبل وبعد التشعيع ووجدنا أن القيم متزايدة بعد التشعيع ويعود ذلك إلى وجود عيوب في شبكة أكسيد الزنك ووفرة في شواغر الأوكسجين.
- ❖ يتناقص جهد التشغيل مع التشعيع بينما يزداد تيار الفتح وبهذا يظهر جلياً تأثير أشعة غاما على عمل هذه الديودات.
- ❖ توصلنا إلى أن قيم المقاومة المتسلسلة متناقصة بعد التشعيع عما قبله.
- ❖ تبين أن نظرية الانبعاث بالتأين الحراري غير كافي لمثل الديودات المحضرة، لم تظهر تأثير المقاومة المتسلسلة على تغير ارتفاع كمون الحاجز 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 كمون الحاجز والمقاومة المتسلسلة وثابتة سلوك الوجه البيني عند التشعيع.
- ❖ وجدنا تطابق في القيم المحسوبة بنظرية الانبعاث بالتأين الحراري ونظرية Cheunge و Cheunge قبل التشعيع وبعده.
- ❖ حددنا مناطق عمل الكاشف المحضر قبل التشعيع وبعده وتبين أن الآليات التي يعمل فيها هذا الكاشف هي ظاهرة النفق والانبعاث الحراري والتيار المحدود بالشحنة الفضائية.

## المراجع

- [1]. J Rohlen, ENett, J Millet, **Studies of pulse shapes from semiconductor detectors**, Chalmers University of Technology and Göteborg University, Chapter 1-7, pp1-35.
- [2] OMAR, Ahmed, (2015)-**Metal oxide films/structures for gamma radiation detection**, *International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS)*, p. 685-688.
- [3] SAADATKIA, Pooneh, VARNEY, Chris, SELIM, Farida, (2016)-**Trap Level Measurements in Wide Band Gap Materials by Thermoluminescence. Luminescence-An Outlook on the Phenomena and their Applications**, no10, Chapter 10.
- [4] Glenn F, KNOLL, (2010)-**Radiation detection and measurement**, John Wiley & Sons, Inc, Fourth edition, chapter 13, pp 415-467.
- [5]. 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.

- [6] Glenn F, KNOLL, (2010)-**Radiation detection and measurement**, *john wiley & sons, Inc*, Fourth edition, chapter 13, pp 415-467.
- [7] k Aswin, (2020)- **Gamma Ray Irradiation Enhances the Linkage of Cotton Fabrics Coated with ZnO Nanoparticles** *ACS Omega* 2020, 5, 15129-15135
- [8] SEMPLE, James; ROSSBAUER, Stephan, ANTHOPOULOS, Thomas D. (2015)- **Analysis of Schottky contact formation in coplanar Au/ZnO/Al nano-gap RF diodes processed from solution at low temperature**, *Department of Physics and Centre for Plastic Electronics*, vol 88, pp1-29.
- [9] Glenn F, KNOLL, (2010)-**Radiation detection and measurement**, *john wiley & sons, Inc*, Fourth edition, chapter 11, pp 415-467.
- [10] F. J. Ramírez-Jiménez, (2006) - **X-Ray Spectroscopy with PIN diodes**, *ResearchGate*, vol 57150.
- [11] Goran S. Ristić, RISTICJ, S. Goran, (2013)- **The digital flat-panel x-ray detectors**, *Ristic: The Digital Flat Panel X-Ray Detectors*, vol 621, no 4, pp65-71.
- [12] Glenn F, KNOLL, (2010)-**Radiation detection and measurement**, *john wiley & sons, Inc*, Fourth edition, chapter 2, pp 415-467.
- [13] S Das, A Chakraborty, A Mondal, K Shaw, A Sur, S Das, R Laha, (2015) -**Silicon PIN Diode for detection of electrons, alphas, X-rays and gamma rays**, *Indian Institute of Engineering Science and Technology*, Vol 60, Pp 976-977.
- [14] 35] j MA Jing, X JIN Ke, Ch LUO Bing, (2010)- **Rectifying and Photovoltage Properties of ZnO: Al/p-Si Heterojunction**, *Chinese physical society*, vol 27, no 10, pp194-197.
- [15] VOLK, J., et al, (2009)-**Highly uniform epitaxial ZnO nanorod arrays for nanopiezotronics**, *Nanoscale research letters*, Vol 4, pp 699-704.

- [16] 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.
- [17] MWANKEMWA, Benard S., et al, (2018)-**Effects of surface morphology on the optical and electrical properties of Schottky diodes of CBD deposited ZnO nanostructures.** *Physical B: Condensed Matter*, Vol 535, Pp 175-180.
- [18] LORD, Alex M-(2020)-**Schottky contacts on polarity-controlled vertical ZnO nanorods.** *ACS applied materials & interfaces*, Vol 12, No11, Pp13217-13228.
- [19] 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.
- [20] BRILLSON, L. J, (2007)-**Dominant effect of near-interface native point defects on ZnO Schottky barriers.** *Applied Physics Letters*, vol 90, no10.
- [21] D. C. Oh *et al*, (2005)-**Characteristics of schottky contacts to ZnO: N layers grown by molecular-beam epitaxy**, *Appl Phys Lett*, vol. 86, no. 4, pp 042110-1-042110-3.
- [22] ASGHAR, M, et al, (2013)-**Electrical characterization of Au/ZnO/Si Schottky contact.** *In: Journal of Physics: Conference Series*, pp 012030.
- [23] Gullu, H. H., Bayraklı Sürücü, Ö., Terlemeszoglu, 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*, vol 30, pp 15371-15378.
- [24] ,()-*Journal 2024 Resch ergate*, Vol 2401, no 06778, Pp1-23.
- [25] KRIEG, L., et al, (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*, Vol1, No 1, pp010013.



[26] 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, NO7, PP 214.

[27] MENG, L Jianping, L Chengkuo (2024)-**Adjustment methods of Schottky barrier height in one-and two-dimensional semiconductor devices.** *Science Bulletin*, Vol 69, No9, Pp1342-1352.

[28] ALLEN, M. W., et al, (2009)-**Oxidized noble metal Schottky contacts to n-type ZnO.** *Applied Physics Letters*, 94NO10.

[29] 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

[30] L. J. Brillson and Y. Lu, (2011)- **ZnO Schottky barriers and Ohmic contacts,** *Journal of applied physics* Vol 109, No 12, Pp121301-121301-33.

[31] 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.

[32] KHAN, Muhammad Arif, (2020) -**ZnO nanowires based Schottky contacts of Rh/ZnO interfaces for the enhanced performance of electronic devices.** *Surfaces and Interfaces*, Vol 21, Pp100649.

[33] BRILLSON, Leonard J, (2012)- **Interplay of native point defects with ZnO Schottky barriers and doping.** *Journal of Vacuum Science & Technology B*, vol 30, no 5.

- [34] AHMED M, MEYER, E Walter, Jackie M, (2019)- **Structural, optical and electrical properties of the fabricated Schottky diodes based on ZnO, Ce and Sm doped ZnO films prepared via wet chemical technique.** *Materials Research Bulletin*, Vol 115, pp 12-18.
- [35] XU, Zhixing; ZHANG, Yongle; WANG, Zhaona. ZnO-based photodetector: from photon detector to pyro-phototronic effect enhanced detector. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52.22: 223001.
- [36] JIN, Jidong, et al. **Schottky diodes on ZnO thin films grown by plasma-enhanced atomic layer deposition.** *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64.3: 1225-1230.
- [37] 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.
- [38] Yadav, V. K. S., Raveesh, S., Daniel, T. T., & Paily, R. (2020)- **Microcantilever printed back-to-back ZnO single-nanowire Schottky diodes.** *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol 67, No8, 3309-3314.
- [39] 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.
- [40] 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.

- [41] 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.
- [42] JIN, Jidong, (2018)-**A high speed PE-ALD ZnO Schottky diode rectifier with low interface-state density.** *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol 51, No 6, Pp 065102.
- [43] Faraz, S. M., Khranovskyy, V, Yakimova, R, Ulyashin, A., & Wahab, Q, (2011)- September). **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.

