

جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم الدقيقة وعلوم الطبيعة والحياة
قسم علوم المادة



مذكرة ماستر

علوم المادة
شعبة الفيزياء
تخصص فيزياء المواد

رقم: أدخل رقم تسلسل المذكرة

إعداد الطالب:
بن كيجول خالد
يوم:

محاكاة تأثير وصلة شوتكي لثنائية من أوكسيد الغاليوم (Ga_2O_3)

لجنة المناقشة:

مشرف	أ. د.	جامعة بسكرة	سنفوقة نور الدين
رئيس	أ. د.	جامعة بسكرة	أمجاد مفتاح
ممتحن	أ. د.	جامعة بسكرة	عبد الوهاب وهاب

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



شكر و عرفان

الحمد لله حمدا يليق بجلاله وعظيم سلطانه الحمد لله الذي بنعمه
تتم الصالحات والصلاة والسلام على رسول الله.

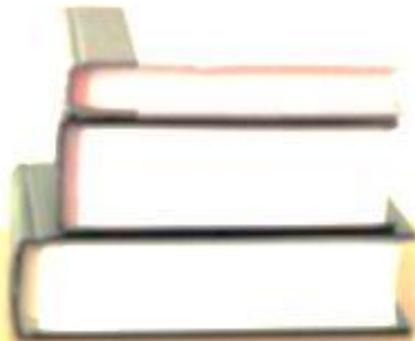
الهي لا يطيب النهار الى بذكرك ولا يطيب الليل الى بشكرك ولا
تطيب الجنة الى برؤيتك

الحمد لك يا الله على حسن توفيقك وكريم عونك وعلى ما فتحت
به علي من تيسيرك لتجاوز هذا العمل المتواضع.

الهي قد انعمت علي بنعمة العقل والدين فجعلها نعمة لا نقمة
وقبل ان نمضي نتقدم بأسمى عبارات الشكر والعرفان والتقدير الى
الذين حملوا اقدس رسالة في الحياة.

الى الذين مهدوا لنا طريق العلم والمعرفة بدءا من معلمي
الابتدائي وصولا الى اساتذة جامعة محمد خيضر ببسكرة ، للسيد
مداني العابد على مجهوداته ومساعدته لي في انجاز المذكرة الى
الزملاء والى كل من له فضل علي.

تحية عطرة وشكر خاص للأستاذ المشرف على مذكرتي الاستاذ
سنقوقة نور الدين على كرم صبره وتعاونه معي له مني أرقى
وأسمى عبارات التقدير و العرفان.



إهداء

الى من كلفه الله بالهبة والوقار... الى من علمني العطاء دون
انتظار... الى من احمل اسمه بكل افتخار... والدي العزيز
الى ملاكي في الحياة الى معنى الحب والتفاني... الى بسمة
الحياة وسر الوجود..
الى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي الى أمي
الغالية
الي إخواني وأخواتي .
الى الإخوان الذين لم تلدهم أمي... الى من تحلوا وبالإخاء فتميزوا
بالوفاء والعطاء
الى ينابيع الصدق الصافي الى من معهم سعدت وبرفقتهم في
دروب الحياة سرت...
الى من كانوا معي على طريق النجاح والخير...
الى أصدقائي وأحبابي و الى كل زملاء.

الخلاصة

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة خصائص الوصلة شوتكي القائمة على أكسيد الغاليوم التي تم الحصول عليها بعد المحاكاة باستخدام برنامج المحاكاة سيلفاكو SILVACO ، أنجزنا جزء نظري يحتوي على عموميات حول الوصلة شوتكي و مميزات أكسيد الغاليوم .

سمحت لنا المحاكاة بدراسة تأثير درجة الحرارة و تأثير تغير المعدن على الخاصية جهد-تيار والخواص المرتبطة بها والمنتلة في معامل المثالية ، المقاومة على التسلسل ، ارتفاع الحاجز شوتكي.

الكلمات المفتاحية : وصلة معدن-نصف ناقل ، شوتكي ، خاصية جهد-تيار ، معامل المثالية ، المقاومة على التسلسل ، ارتفاع الحاجز شوتكي.

الفهرس

الإهداء

تشكرات

ملخص

1.....مقدمة عامة

الفصل 1 أكسيد الغليوم وتطبيقاته

3..... 1-1 مقدمة :

3 2-1 البنية البلورية لـ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

4..... 3-1 خصائص $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

4..... 1-3-1 الخصائص الحرارية

4..... 2-3-1 الخصائص البصرية

5..... 3-3-1 الخصائص الإلكترونية

6..... 4-1 تطبيقات أكسيد الغاليوم $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

7..... 5-1 الوصلة شوتكي

9.....	استقطاب ديود شوتكي	6-1
9.....	الاستقطاب الامامي (المباشر)	1-6-1
10.....	الاستقطاب العكسي	2-6-1
11.....	منطقة شحنة الفضاء	7-1
12.....	الخاصية تيار - كمون	8-1
12.....	الانبعاث الايوني الحراري (Émission thermoionique)	1-8-1
12.....	تأثير النفق (Effet tunnel)	2-8-1
12.....	تأثير الإلتحام (Effet recombinaison)	3-8-1
13.....	نظريات نقل الشحنات	9-1
13.....	نظرية الانبعاث الايوني الحراري	1-9-1
14.....	نظرية الانتشار	2-9-1
15.....	thermoïonique-diffusion الانتشار - النظرية المختلطة الايونية الحرارية - الانتشار	3-9-1
16.....	conduction par effet tunnel آلية النقل عبر تأثير النفق	4-9-1
16.....	انخفاض الحاجز (تأثير شوتكي Effet Schottky)	5-9-1

الفصل 2 برنامج المحاكاة المستخدم SILVACO

19.....	1-11 المقدمة
20.....	2-11 الهدف من المحاكاة

20.....	3-برنامج المحاكاة ATLAS	II-3
20.....	DECKBUILD	II-3-1
21.....	TONYPLOT	II-3-2
22.....	4-ترتيب الأوامر في ATLAS	II-4
22.....	5-تحديد البنية	II-5
22.....	الشبكة	II-5-1
24.....	تحديد المناطق وطبيعة المواد	II-5-2
25.....	تحديد الاقطاب (الالكترودات)	II-5-3
26	تحديد التطعيم(doping)	II-5-4
26.....	6-تحديد المواد	II-6
27.....	7-تحديد النماذج les Modèles	II-7
28.....	نماذج الحركية	II-7-1
29.....	نماذج الالتحام وتوليد حاملات الشحنة	II-7-2
29.....	نماذج احصاء حاملات الشحنة	II-7-3
30.....	نماذج التأين بالتصادم	II-7-4
30	8-التصريح بالناقل (contact)	II-8
31.....	9-الطرق الرقمية	II-9
32.....	10-تحديد الحل	II-10
33.....	11-التحليل	II-11

الفصل 3 نتائج المحاكاة ومناقشتها

35.....	1-III	مقدمة.....
35.....	2-III	الخاصية جهد - تيار لديود شوتكي.....
35.....	1-3-III	تأثير تغير درجة الحرارة.....
39.....	2-3-III	تأثير تغير المعدن.....
41.....	3-III	استخراج الخصائص باستخدام طريقة نورد Nord methode.....
41.....	1-3-III	حساب معمل المثالية.....
42.....	2-3-III	طريقة نورد Nord methode.....
44.....	4-III	تأثير تغير المعدن على خواص الوصلة.....
45.....	5-III	تأثير تغير درجة الحرارة على خواص الوصلة.....
48.....		الخاتمة.....

المراجع

فهرس الاشكال

فصل 1

4.....	شكل 1-1: بنية وحدة الخلية ل $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$
5.....	شكل 1-2: بنية النطاق الخاص ب Ga_2O_3
8.....	شكل 1-3: معدن - نصف الناقل قبل التلامس.....
9.....	شكل 1-4: معدن - نصف ناقل بعد التلامس.....
10.....	شكل 1-5: معدن - نصف ناقل في استقطاب مباشر.....
10.....	شكل 1-6: معدن - نصف ناقل بعد في استقطاب عكسي.....

- شكل 1-7: ظواهر النقل في الاتصال معدن -نصف ناقل.....13
- شكل 1-8: تغير مستوى فارمي ومنطقة شحنة الفضاء في حالة توصيل مختلط.....16
- شكل 1-9: انخفاض حاجز شوتكي بتأثير شوتكي.....17

فصل 2

- شكل 1-11: التخصصات المتضمنة في المحاكاة.....19
- شكل 1-2: رسم الشبكة في سيلفاكو (توني بلوت).....23
- شكل 1-3: الشبكة مقسمة لمناطق وطبيعة المادة في كل منطقة.....24
- شكل 1-4: البنية بعد تحديد الاقطاب.....25

فصل 3

- شكل III-1: الخاصية جهد-تيار ل $\beta\text{-Ga2O3} / \text{m\acute{e}tal}$ لمعدن البلانتيوم بدلالة تغير درجة الحرارة. A: السلم الخطي، B: السلم الشبه اللوغارتمي.....35
- شكل III-2: الخاصية جهد-تيار ل $\beta\text{-Ga2O3} / \text{m\acute{e}tal}$ لمعدن النيكل بدلالة تغير درجة الحرارة. A: السلم الخطي، B: السلم الشبه اللوغارتمي.....36
- شكل III-3: الخاصية جهد-تيار ل $\beta\text{-Ga2O3} / \text{m\acute{e}tal}$ لمعدن الذهب بدلالة تغير درجة الحرارة. A: السلم الخطي، B: السلم الشبه اللوغارتمي.....37
- شكل III-4: A: حركية الالكترونات بدلالة درجة الحرارة ، B: حركية الالكترونات بدلالة تركيز الالكترونات.....38
- شكل III-5: الخاصية جهد تيارل $\beta\text{-Ga2O3} / \text{metal}$ بدلالة تغير المعدن A: السلم الخطي، B: السلم الشبه اللوغارتمي عند درجة حرارة 200 K.....39
- شكل III-6: الخاصية جهد تيارل $\beta\text{-Ga2O3} / \text{metal}$ بدلالة تغير المعدن A: السلم الخطي، B: السلم الشبه.....40
- شكل III-7: الخاصية جهد تيارل $\beta\text{-Ga2O3} / \text{metal}$ بدلالة تغير المعدن A: السلم الخطي، B: السلم الشبه.....40
- شكل III-8: ميل منحنى الدالة $\log(I) = f(V)$42
- شكل III-9: مخطط دالة الجهد $F(V)$43
- شكل III-10: تغير معامل المثالية بدلالة دالة الشغل للمعدن في درجات حرارة مختلفة.....44
- شكل III-11: تغير المقاومة على التسلسل بدلالة دالة الشغل للمعدن في درجات حرارة مختلفة.....44
- شكل III-12: تغير ارتفاع الحاجز بدلالة دالة الشغل للمعدن في درجات حرارة مختلفة.....45
- شكل III-13: تغير معامل المثالية بدلالة درجة الحرارة.....46
- شكل III-14: تغير المقاومة على التسلسل بدلالة درجة الحرارة.....46
- شكل III-15: تغير معامل المثالية بدلالة درجة الحرارة.....47

فهرس الجداول

فصل 1

جدول 1-1: خصائص β -Ga₂O₃ مقارنة مع أنصاف نواقل أخرى.....7

فصل 2

جدول 2-1: مجموعة التعليمات الأساسية في برنامج أطلس.....22

جدول 2-2: نماذج الحركية.....28

جدول 2-3: نماذج تتعلق بالالتحام وتوليد حاملات الشحنة.....29

جدول 2-4: نماذج لحصاء حاملات الشحنة.....29

جدول 2-5: نماذج التأين بالتصادم.....30

جدول 2-6: الطرق العددية.....32

المقدمة العامة

المقدمة العامة

المركبات النصف ناقلة من أكثر الاشياء التي شهدت تطور تكنولوجي كبير ، ساهم هذا التطور في إعطاء نتائج مذهلة في كل الجوانب وبالخصوص التكنولوجية والعلمية ، يعتبر السيليكون من أقدم وأشهر انصاف النواقل الى أن له خصائص ضعيفة مما دفع الباحثين للبحث عن مواد نصف ناقلة بمميزات أحسن. حيث ظهرت الاكاسيد النصف الناقلة كمنافس للإملاكها خصائص ومميزات خدمت جانب كبير من التكنولوجيا الحديثة.

وحديثا ظهر أكسيد الغاليوم كمادة تنتقل بين السلوك العازل والنصف ناقل، حيث اعطت نتائج ممتازة وفريدة من نوعها كمادة نصف ناقلة، تمتاز بي اشتغالها في مجال حراري عريض جدا، إمتلكها فجوة طاقة عريضة جدا بين 4.7 eV و 4.9 eV . كما انها تشتغل في مجال الاشعة تحت البنفسجية، وتكلفة إنتاجها أقل من الاكسيد النصف الناقلة.

في دراستنا هذه نقوم بدراسة خصائص (الخاصية جهد- تيار) لديود شوتكي SBD يعتمد على أكسيد الغاليوم كمادة نصف ناقلة حيث نقوم بالمحاكاة باستعمال برنامج SILVACO ونستخرج الخواص المتعلقة بالوصلة شوتكي و المتمثلة في معامل المثالية η ، المقاومة على التسلسل R_s ، ارتفاع حاجز شوتكي ϕ_b و ملاحظة سلوكها مع تغير درجة الحرارة وكذا تغير المعدن.

تم تقسيم هذا العمل على ثلاثة فصول:

الفصل الاول يحتوي على خصائص ومميزات أكسيد الغاليوم وكذا تطبيقاته كما يحتوي على أساسيات وعموميات عن الوصلة شوتكي.

الفصل الثاني يحتوي على وصف برنامج المحاكاة SILVACO و مكوناته ، كما يحتوي على كيفية محاكاة وصلة شوتكي.

الفصل الثالث يحتوي على نتائج المحاكاة و الخواص المستخرجة منها ثم مناقشة هذه النتائج.

الفصل الاول :

أكسيد الغاليوم وتطبيقاته

1-1 مقدمة :

ينتمي أكسيد الغاليوم Ga_2O_3 إلى عائلة الأكاسيد النصف الناقلة الشفافة (TCO). و يعود تاريخ أكسيد الغاليوم إلى عام 1875 عندما وصف Lecoq de Boisbaudran عنصر الغاليوم المكتشف حديثاً ومركباته [1].

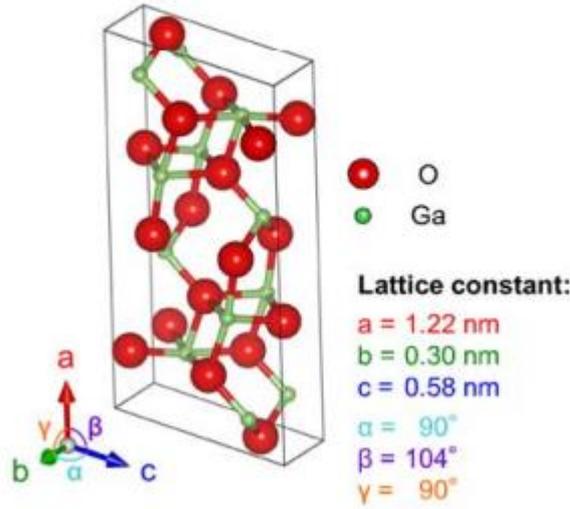
إن مركبات الطاقة القائمة على أشباه الموصلات ذات فجوة نطاق E_g عريضة مثل SiC و GaN قادرة على توفير جهد انهيار (V_{br}) أعلى مما هو عليه في مركبات Si ، ومع ذلك فإن مركبات الطاقة المصنوعة من SiC و GaN غير قابلة للإنتاج الضخم نظراً لأن الركائز عالية الجودة باهظة الثمن ، مما يترك مجالاً واسعاً لاستعمال مواد جديدة. أكسيد الغاليوم (Ga_2O_3) يعتبر مادة مثالية لمركبات الطاقة لإملاكه خصائص ممتازة وأفضلية من حيث الأداء والتكلفة مقارنة بأنصاف النواقل الأخرى [2].

1-2 البنية البلورية لـ $\beta-Ga_2O_3$

يتواجد أكسيد الغاليوم في خمسة أطوار بلورية مختلفة الطور ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$). $\beta-Ga_2O_3$ الأحادي التبلور هو الأكثر استقراراً كيميائياً وحرارياً و يمكن الوصول إليه من أي طور من الأطوار الأخرى [1] و له بنية أحادية الميل تتمحور حول القاعدة مع ثوابت الشبكة التالية :

$a = 1.22 \text{ nm}$, $b = 0.3 \text{ nm}$, $c = 0.58 \text{ nm}$, $\beta = 103.83^\circ$ حيث β الزاوية بين المحور a و b والزاوية بين المحاور الأخرى 90° . وينتمي إلى مجموعة الفضاء (C2/m).

تحتوي خلية الوحدة الخاصة بـ Ga_2O_3 على موقعين غير متكافئين Ga(I) و Ga(II) وثلاثة مواقع O غير متكافئة O(I) و O(II) و O(III). Ga(I) له هندسة رباعية السطوح بينما Ga(II) ثماني السطوح [3] ، متوسط المسافات البينية: رباعي السطوح Ga-O هو 1.83 Å ، ثماني السطوح Ga-O هو 2.00 Å ، رباعي السطوح O-O هو 3.02 Å ، ثماني السطوح O-O هو 2.84 Å [4]. يظهر الشكل (1-1) بنية وحدة الخلية لـ $\beta-Ga_2O_3$:

شكل 1-1: بنية وحدة الخلية ل $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ [2].

3-1 خصائص $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

1-3-1 الخصائص الحرارية

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ هو موصل حراري ضعيف بالمقارنة مع أشباه الموصلات الأخرى. عند المقارنة ، فإن الموصلية الحرارية له هي نصف تلك الموجودة في Al_2O_3 والتي تبلغ 23.2 W/mK . تختلف الموصلية الحرارية على طول اتجاهات مختلفة بسبب التباين البلوري لـ Ga_2O_3 . تكون أكبر موصلية حرارية في الاتجاه [010] وأصغر موصلية في الاتجاه [100] عند جميع درجات الحرارة. الموصلية الحرارية في الاتجاه [100] هي 13 W/mK و 21 W/mK في الاتجاه [010] [5]. ينصهر $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ عند درجة حرارة 1780° [7].

2-3-1 الخصائص البصرية

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ عديم اللون و شفاف الى غاية نطاق الأشعة فوق البنفسجية UV-C و الطول الموجي 280 nm . تكون بلورات $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ العازلة عديمة اللون أو صفراء ، و بلورات $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ الموصلة لها اللون الأزرق الذي يرجع إلى زيادة امتصاص الناقل الحر في المناطق الحمراء من الطيف الضوئي.

قد تظهر أطراف الامتصاص عند حد امتصاص 255 nm - 260 nm. يرجع الامتصاص الذي يحدث عند الطول الموجي 255 nm - 260 nm إلى انتقال الإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل [1].

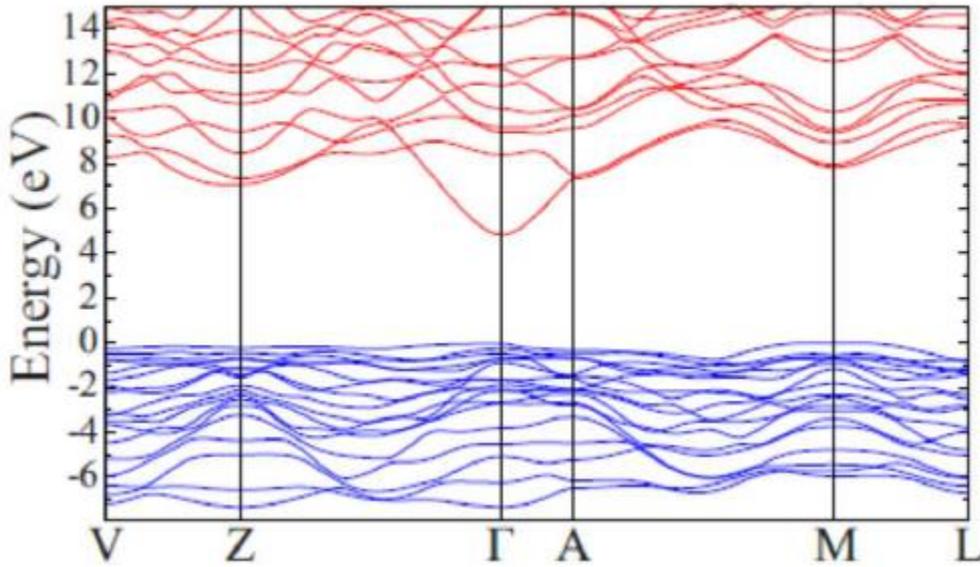
يمكن أن يُظهر $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ثلاثة أنواع من الانبعاثات ، فوق بنفسجية (3.2 eV-3.6 eV).

الزرقاء (2.8 eV-3.0 eV) والانبعاثات الخضراء (2.4 eV).

يكون انبعاث الحزمة فوق البنفسجية بسبب الإلتحام (recombination) بين الإلكترونات الحرة والثقوب. وجود علاقة بين المقاومة و الحزمة الزرقاء من الطيف الضوئي في بلورة $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ يدل على أن شواغر الأكسجين تساهم في التوصيل من النوع n ل بلورات Ga_2O_3 . يحدث انبعاث النطاق الأخضر الفعال فقط بعد تطعيم Ga_2O_3 مع معادن محددة مثل Sn و Si و Ge و إلى حد أقل Cu و Fe و L [5].

3-3-1 الخصائص الإلكترونية

يوجد في Ga_2O_3 انتقالات طاقة مباشرة وغير مباشرة كشفت الدراسات أن الانتقالات غير المباشرة ضعيفة عند مقارنتها بالانتقالات المباشرة و فرق الطاقة بينها صغير جدا مما يجعل من Ga_2O_3 نصف ناقل ذو فجوة نطاق (طاقة) مباشرة [5]. يوضح الشكل (1-2) بنية النطاق الخاص بـ Ga_2O_3 .



شكل 1-2: بنية النطاق الخاص بـ Ga_2O_3 [6]

فجوة الطاقة بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل تبلغ حوالي 4.9 eV . يكون الحد الأقصى لحزمة التكافؤ (VBM) مسطح تقريباً. محاذاة VBM مع الحد الأدنى لنطاق التوصيل (CBM) يجعله نصف ناقل ذا فجوة نطاق مباشر. في أشباه الموصلات ذات فجوة النطاق المباشرة، يحدث الإلتحام المباشر مع إطلاق طاقة مساوية لفجوة النطاق. هذه الميزة لأنصاف النواقل ذات فجوة النطاق المباشرة مهمة للتطبيقات البصرية [5].

4-1 تطبيقات أكسيد الغاليوم $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

تستخدم الأقلام الرقيقة من Ga_2O_3 في الوقت الحاضر على نطاق واسع في العديد من التطبيقات ذات الطاقة العالية و الجهد الكبير مثل الترانزستورات ذات التأثير الحثلي، والخلايا الكهروضوئية، والأجهزة القائمة على أنصاف النواقل III-V لتقليل تيار التسرب.

نظراً لإمكانية التحكم في الموصلية الكهربائية بين سلوك العزل و نصف الناقل (عادةً من النوع n) وبسبب شفافيته الضوئية العالية (حوالي 80 %)، فإن Ga_2O_3 هو مرشح واعد لأكاسيد التوصيل الشفافة وترانزستورات الأغشية الرقيقة [8]. بالإضافة إلى ذلك، $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ كنصف ناقل من نوع n الموصلية الخاصة به حساسة جداً لضغط الأكسجين المحيط به مما يجعله مفيداً في تطبيقات استشعار الأوكسجين [7] و يُظهر Ga_2O_3 سلوك توصيل يعتمد على الغاز في درجات حرارة مرتفعة، مما يجعله أحد أكثر المواد قابلية للتطبيق في إستشعار الغاز [8]، يُظهر $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ موصلية أصلية من النوع n. حيث يمتلك فجوة نطاق E_g ($4.6\text{--}4.9 \text{ eV}$) [9] أعلى من تلك الموجودة في SiC و GaN، جهد انهيار ($V_{br}=8 \text{ MV}$) أكبر بكثير ومقاومة فتح R_{ON} أقل من أنصاف النواقل ذات الفجوة العريضة مثل SiC، GaN. و تظهر المقاومة (R_{ON}) كدالة لجهد الانهيار (V_{br}) وبالتالي بهذه الخصائص يعتبر $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ مادة مناسبة للمركبات أحادية القطب مثل ترانزستورات التأثير الحثلي (FET). يتم استخدام Sn و Si و Ge في تطعيم $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ بتركيز في حدود $10^{15}\text{--}10^{19} \text{ cm}^{-3}$ [10].

يستخدم $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ في مركبات الكشف عن الأشعة فوق البنفسجية والليزر. كونه يعمل في نطاق هذه الأشعة عكس الأكسيد الموصل الشفافة (TCO) الأخرى [3].

من سلبيات $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ، الموصلية الحرارية و حركة ثقب منخفضة، صعوبة التوصيل في حالة نصف الناقل من نوع p [10]. يلخص الجدول 2-1 بعض مميزات أكسيد الغاليوم.

جدول 1-1: خصائص β -Ga₂O₃ مقارنة مع أنصاف نواقل أخرى [2].

β -Ga ₂ O ₃	Diamond	GaN	4H-SiC	GaAs	Si	
4.9-4.7	5.5	3.4	3.3	1.4	1.1	فجوة الطاقة E_g (eV)
300	2000	1200	1000	8000	1400	حركية الإلكترون μ ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)
8	10	3.3	2.5	0.4	0.3	حقل الانهيار E_b (MV cm^{-1})
10	5.5	9.0	9.7	12.9	11.8	ثابت العزل الكهربائي ϵ
[010]0.23 [100]0.13	10	2.1	2.7	0.55	1.5	الناقلية الحرارية ($\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-1}$)

5-1 الوصلة شوتكي

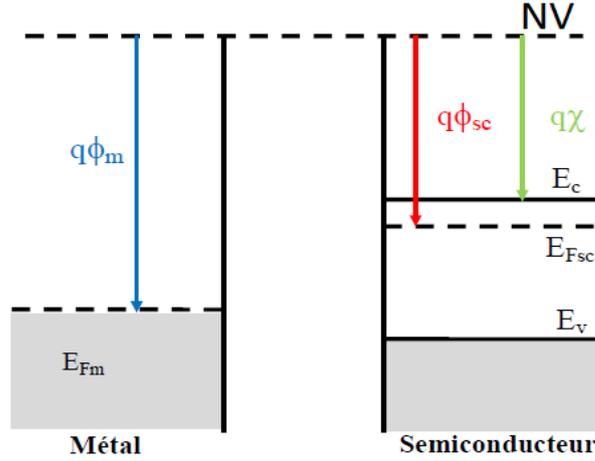
تم اكتشاف الوصلة (ديود) شوتكي عام 1874 من طرف العالم فردناند براون F. Braun ، و تمكن العالمان والتر شوتكي وموت Schottky و Mott عام 1938 من المساهمة في تطوير الوصلة شوتكي من خلال محاولاتهم المكثفة في دراسة حاجز الجهد الناتج من الشحنة الفضائية على سطح شبه الموصل [11].

تتكون الوصلة شوتكي من التلامس بين معدن ونصق ناقل ، يوضح الشكل (1-3) مستويات الطاقة للمعدن ونصف الناقل قبل التلامس.

تعرف دالة الشغل للمعدن $q\phi_m$ على أنها الحد الأدنى من الطاقة اللازمة لإقتلاع إلكترون يقع على مستوى فارمي E_{f_m} من المعدن الى مستوى الفراغ NV [12].

الألفة الإلكترونية $q\chi$ هي الفرق في الطاقة بين مستوى الفراغ NV ومستوى عصابة التوصيل E_c ، وهي خاصية مميزة لأنصاف النواقل ، ومقدارها ثابت القيمة [13].

ارتفاع حاجز شوتكي ϕ_b خاصية جوهرية لسطح التلامس M-SC لا تتعلق بالاستقطاب المطبق و مستوى التطعيم [13].



شكل 1-3: معدن-نصف الناقل قبل التلامس

عند تلامس نصف الناقل (نوع n و $E_c > E_{Fm}$) مع المعدن شكل (1-4) تنتقل الإلكترونات من عصابة التوصيل

(bande de conduction) لنصف الناقل نحو المعدن، و يحدث استواء (Alignement) لمستويات فارمي Fermi وينشئ توازن ترموديناميكي، تترك الإلكترونات أيونات مانحة موجبة الشحنة في نصف الناقل تسمى منطقة شحنة الفضاء [12]. في هذه الحالة يكون الاتصال شوتكي (contact schottky) وفي حالة $E_c < E_{Fm}$ يكون اتصال أومي (contact homic) حيث تنتقل الإلكترونات من المعدن لنصف الناقل وتنشئ شحنة فضاء سالبة بالقرب منطقة التلامس لنصف الناقل [13].

الحاجز الكموني V_i و ϕ_b لهذه البنية تعرف كما يلي:

$$1 - I \quad qV_i = (q\phi_m - q\phi_{sc})$$

$$2 - I \quad q\phi_b = (\phi_m - \chi) = qV_i + (E_c - E_f)$$

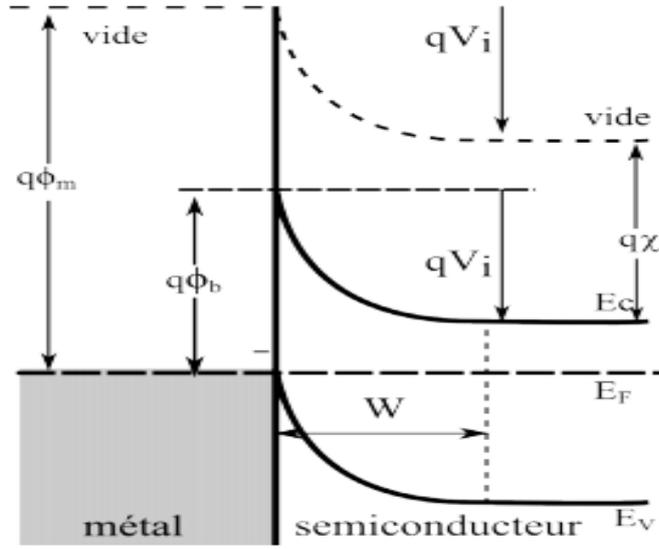
V_i : الحاجز الكموني لنصف الناقل

ϕ_b : الحاجز الكموني للمعدن

χ : الألفة الإلكترونية

E_c : طاقة عصابة التوصيل

E_f : طاقة مستوى فارمي

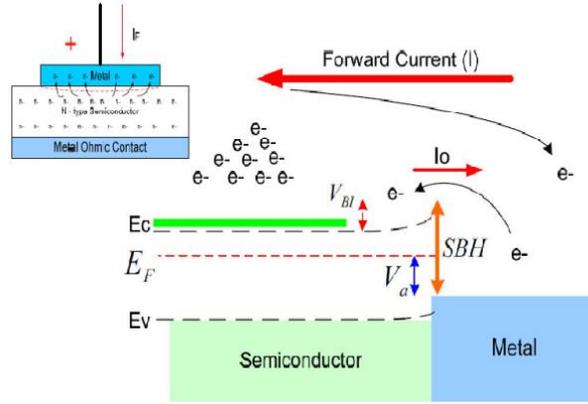


شكل 1-4: معدن - نصف ناقل بعد التلامس

6-1 استقطاب ديود شوتكي

1-6-1 الاستقطاب الامامي (المباشر)

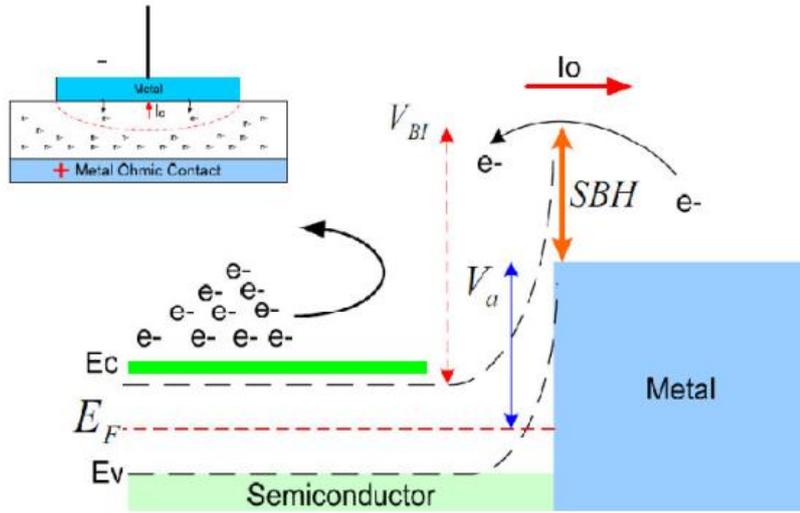
عند تطبيق تيار موجب على الوصلة معدن- نصف ناقل نوع n و ($\phi_m > \phi_{sc}$) بحيث المعدن هوالمصعد anode و المهبط cathode جهة نصف الناقل كما يوضح الشكل (1- 5) ترتفع حزمة التوصيل و يقل ارتفاع الحاجز الكموني لنصف الناقل V_i بينما لايتغير الحاجز الكموني للمعدن ، ويحدث انتقال عدد كبير من الالكترونات من نصف الناقل الى المعدن ، نتيجة هذا الانتقال ينشئ تيار ا اتجاهه من المعدن نحو نصف الناقل وهو التيار المباشر [14] .



شكل 1-5: معدن - نصف ناقل في استقطاب مباشر

1-6-2 الاستقطاب العكسي

عند تطبيق تيار موجب على الوصلة معدن - نصف ناقل بحيث نصف الناقل هو المصعد anode و المهبط cathode جهة المعدن كما هو موضح في الشكل (1-6) تتخفض حزمة التوصيل و يزداد ارتفاع الحاجز الكموني لنصف الناقل V_i بينما لا يتغير الحاجز الكموني للمعدن ، ويحدث انتقال عدد كبير من الالكترونات من المعدن الى نصف الناقل، نتيجة هذا الانتقال ينشئ تيار ضعيف اتجاهه من المعدن نحو نصف الناقل وهو التيار العكسي [14].



شكل 1-6: معدن - نصف ناقل بعد في استقطاب عكسي

7-1 منطقة شحنة الفضاء

نعتبر البنية $M-SC(n)$ و $\varnothing_m > \varnothing_{sc}$ ، تكامل معادلة بواسون ونفترض أن نصف الناقل متجانس ، وكثافة المانحين بزيادة N_d حيث تتأين في درجة حرارة الغرفة وكثافة الحالات على سطح التلامس مهمة.

الحقل الكهربائي يحسب في الاتجاه x ويعطى بالعلاقة :

$$3 - I \quad E(x) = \frac{qN_d}{\epsilon_s} (x - W)$$

W عرض منطقة شحنة الفضاء

ϵ ثابت العزل لنصف الناقل

قيمة الحقل الكهربائي في سطح التلامس هي :

$$4 - I \quad E_s = -\frac{qN_d}{\epsilon_s} W$$

التدرج الكموني يعطى ب:

$$5 - I \quad V(x) = -\frac{qN_d}{\epsilon_s} \left(\frac{x^2}{2} - Wx \right)$$

تيار الانتشار يتشئ من الفرق بين دالة الشغل للمعدن ونصف الناقل :

$$6 - I \quad V_d = \varnothing_m - \varnothing_{sc}$$

هذا التيار يتعلق بالفرق الكموني بين سطح التلامس لنصف الناقل وحجمه:

$$7 - I \quad V_d = V(x = W) - V(x = 0) = -\frac{qN_d}{\epsilon_s} \left(\frac{W^2}{2} - W^2 \right) = \frac{qN_d}{2\epsilon_s} W^2$$

الطاقة الدنيا لحزمة التوصيل هي:

$$8 - I \quad E_c(x) = qE_{bn} - \frac{q^2 N_d}{\epsilon_s} \left(Wx - \frac{x^2}{2} \right)$$

من المعادلة

$$9-1 \quad W = \left(\frac{2\epsilon_s}{qN_d} V_D \right)^{\frac{1}{2}}$$

إذا أخذنا بالاعتبار مشاركة حاملات الحرة ، كثافة الشحنة في معادلة بواسون هي

$$10-1 \quad \rho(x) = [Nd - n(x)]$$

وعرض منطقة شحنة الفضاء :

$$11-1 \quad W = \left(\frac{2\epsilon_s}{qN_d} (V_D - \frac{KT}{q}) \right)^{\frac{1}{2}}$$

8-1 الخاصية جهد - تيار

في الوصلة PN يعتمد انتقال التيار على حاملات الشحنة الاقلية والاعلبيية معا[12] بينما انتقال التيار في الوصلة معدن-

نصف ناقل يعتمد اساسا على حاملات الشحنة الاغلبية، هذا التيار مرتبط بظواهر فيزيائية مختلفة موضحة في الشكل

(7 -1) [19]:

1-8-1 الانبعاث الايوني الحراري (Émission thermoionique)

في سطح التلامس لنصف النقال يتعلق التيار بظاهرة الانبعاث الايوني الحراري (الظاهرة السائدة في ثنايات

شوتكي عندما يكون مستوى التطعيم لنصف الناقل منخفض) تمر حاملات الشحنة الاغلبية فوق الحاجز الكموني

تحت تأثير الحقل الكهربائي [19] مثلا: السليسيوم في درجة حرارة الغرفة و $N_D \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [12].

2-8-1 تأثير النفق (Effet tunnel)

الالكترونات لها القدرة على قطع الحاجز الكموني والمرور بشكل مباشر تكون هذه الالية عملية عندما يكون

مستوى التطعيم لنصف الناقل مرتفع ، أو في الحالة التي يشكل فيها نصف الناقل مع المعدن حاجز كموني

منخفض[17].

3-8-1 تأثير الإلتحام (Effet recombinaison)

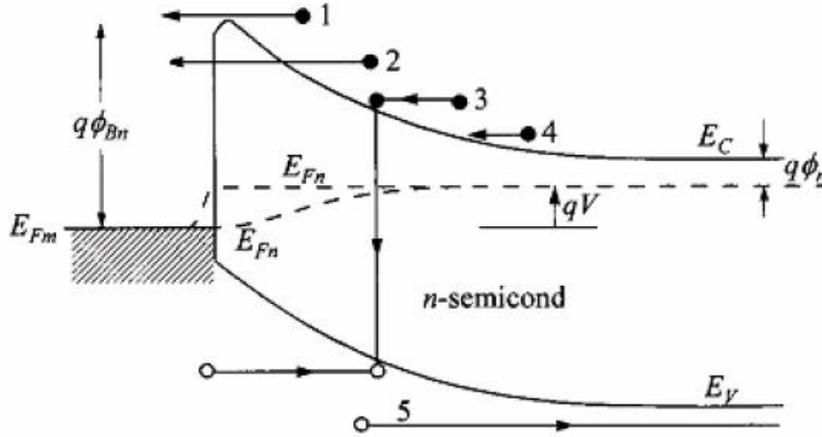
في منطقة شحنة الفضاء ZCE عندما يكون الاستقطاب المباشر يتم الإلتحام بين الالكترونات القادمة من نصف

الناقل والثقوب القادمة من المعدن[18].

4-8-1 تيار الانتشار في منطقة شحنة لفضاء لنصف الناقل [19].

5-8-1 الثقوب المحقونة في المعدن تنتشر نحو نص ف الناقل (تكافئ اعادة التركيب في المنطقة المحايدة

من نصف الناقل) [19].



شكل 1-7: ظواهر النقل في الاتصال معدن -نصف ناقل [20]

9-1 نظريات نقل الشحنات

1-9-1 نظرية الانبعاث الايوني الحراري

تعتمد هذه النظرية على الفرضيات التالية :

- ارتفاع الحاجز الكموني كبير جدا أمام $k_B T$ ($k_B T \ll q\phi_b$).
- الالكترونات في سطح التلامس لنصف الناقل في توازن حراري مع الحجم.
- تدفق التيار لا يؤثر على التوازن.

بفرض وجود تدفقين للتيار في الاتصال شوتكي الاول ينتقل من المعدن لنصف الناقل والثاني من نصف الناقل بإتجاه

المعدن ، من الفرضيات تدفق التيار يتعلق بإرتفاع الحاجز فقط .

كثافة التيار ($j_{sc} \rightarrow m$) من نصف الناقل نحو المعدن تعطى بتركيز الالكترونات والطاقة اللازمة لعبور الحاجز الكموني (

في الاتجاه x) [17]:

12 - I

$$j = j_0 \left(\frac{\exp(qV)}{K_B T} - 1 \right)$$

V: الكمون المطبق

j_0 : كثافة التيار عند التشبع تعطى بالعلاقة التالية

13 - I

$$j_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{K_B T}\right)$$

T ارتفاع الحاجز الكموني

ϕ_b : ارتفاع الحاجز

A^* ثابت رشاردسون Richardson ويعطى كمايلي :

$$A^* = 4\pi q m_e^* k^2 / h^3$$

m_e^* : الكتلة الفعالة للإلكترون.

h : ثابت بلانك.

في الحالة العملية يجب أخذ مساحة السطح للديود A والمقاومة المتسلسلة R_s في الحسبان وتكون المعادلة - كما

يلي

14 - I

$$j = j_0 \left(\frac{\exp(qV - R_s I)}{\eta K_B T} - 1 \right)$$

1-9-2 نظرية الانتشار

تنتقل الإلكترونات من نصف الناقل إلى المعدن فوق الحاجز عبر المنطقة الأقل كثافة لنصف الناقل يقتصر هذا الانتقال

على انتشار حاملات الشحنة عبر المجال الكهربائي في منطقة شحنة الفضاء ZCE. [16]

تعتمد هذه النظرية على الفرضيات التالية :

- ارتفاع الحاجز الكموني أكبر من $K_B T$

- تأثير التصادم بين الإلكترونات في منطقة الانخفاض zone de dépétion موجود.

- نصف الناقل غير مطعم بتركيز عالي [15] semi-conducteur est non dégénéré

تركيز الالكترونات في سطح التلامس (l'interface) جهة نصف الناقل (نوع n) يعطى بالشكل التالي:

$$15 - I \quad n = N_c e^{\left(-\frac{q(E_c - E_{fsc})}{KT}\right)}$$

كثافة التيار في منطقة الانخفاض تتعلق بالحقل الموضعي وتدرج التركيز

$$16 - I \quad j = qn\mu E + qD_n \frac{dn}{dx}$$

E: الحقل الكهربائي للحاجز

D_n : معامل الانتشار

μ : حركية الالكترون

المعادلة النهائية لخاصية الكثافة تيار- جهد هي :

$$17 - I \quad j = j_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right)$$

حيث

$$18 - I \quad j_0 = qN_c \mu E_{max} \exp\left(\frac{-q\phi_b}{KT}\right)$$

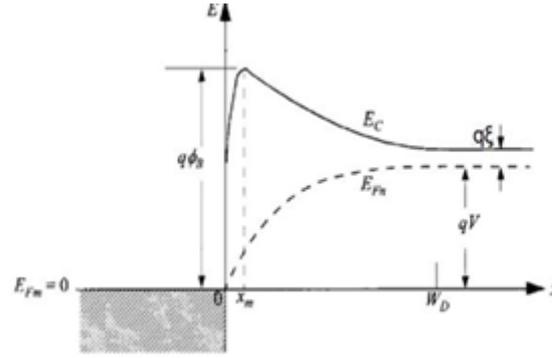
$$19 - I \quad E_{max} = qN_d \frac{W}{\epsilon_s}$$

W : عرض منطقة الانخفاض (Zone de déplétion) لنصف الناقل [16].

3-9-1 النظرية المختلطة الايونية الحرارية - الانتشار thermoïonique-diffusion

النقل في هذه الحالة يتعلق احيانا بسطح التلامس وحجمه ، تغيرات مستوى فارمي مختلطة بمعنى التغير في منطقة شحنة

الفضاء ZCE وتضهر عدم استمرارية في مستوى سطح التلامس كما في الشكل (1-8).



شكل-8: تغير مستوى فارمي ومنطقة شحنة الفضاء في حالة توصيل مختلط [20]

4-9-1 آلية النقل عبر تأثير النفق conduction par effet tunnel

من أجل نصف ناقل مطعم بتركيز عالي او يشتغل في درجة حرارة منخفضة ، النقل تحت تأثير النفق يتميز بقطع حاملات الشحنة للحاجز بتأثير كوانتي- ميكانيكي ، لامتلاك هذه الحاملات طاقة تمكنها من القفز فوق الحاجز، هذه الحاملات رقيقة بشكل كافي يمكنها من المرور من خلال قطع الحاجز [17].

5-9-1 انخفاض الحاجز (تأثير شوتكي Effet Schottky)

ارتفاع الحاجز ϕ_b من جهة المعدن ليس ثابت تماما حيث يتأثر نوعا ما بالجهد المطبق ، يلاحظ انخفاض في ϕ_b بسبب تأثير المرآة ، تنتج شحنات في المعدن من الكترونات نصف الناقل ، عندما تتواجد شحنة A بجوار معدن مثالي تنشأ داخل المعدن شحنة صورة "مرآة" لها نفس قيمة الشحنة A ومعاكسة لها في الاشارة وتبتعد عن سطح المعدن بنفس المسافة التي تبتعد بها الشحنة A عن السطح كما هو موضح في الشكل (9-1). كنتيجة الشحنات الموجودة في نصف الناقل تنجذب نحو المعدن وهذا يؤدي الى إنخفاض في ارتفاع الحاجز الكموني. هذا الانخفاض يسمى بتأثير شوتكي والذي يعطى بالعلاقة التالية [18]:

$$20 - I$$

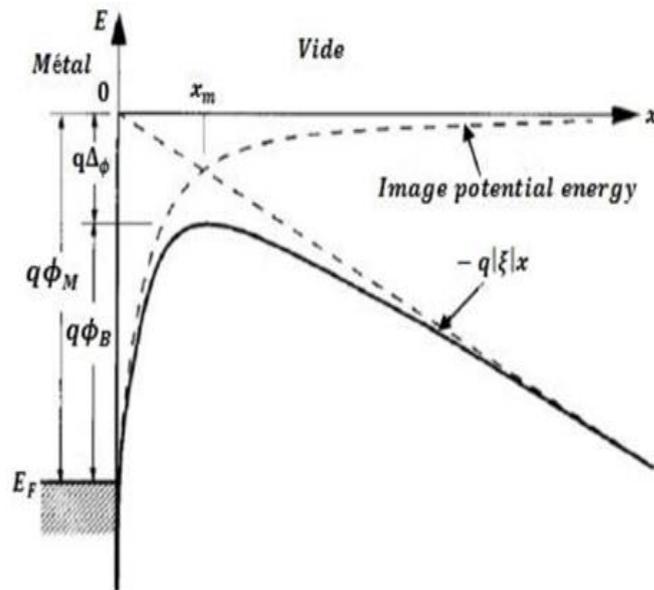
$$\Delta\phi = \frac{\sqrt{q\xi}}{4\pi\epsilon_{sc}} = 2\xi x_m$$

$\Delta\phi$: انخفاض الحاجز

x_m : المسافة الاعظمية بين الالكترتون و سطح المعدن

ξ : الحقل الكهربائي

إذا تم أخذ تأثير شوتكي في الاعتبار ، يتم استبدال الحاجز $q\phi_b$ بالحاجز الفعال $q(\phi_b - \Delta\phi)$.



شكل 1-9: انخفاض حاجز شوتكي بتأثير شوتكي [20]

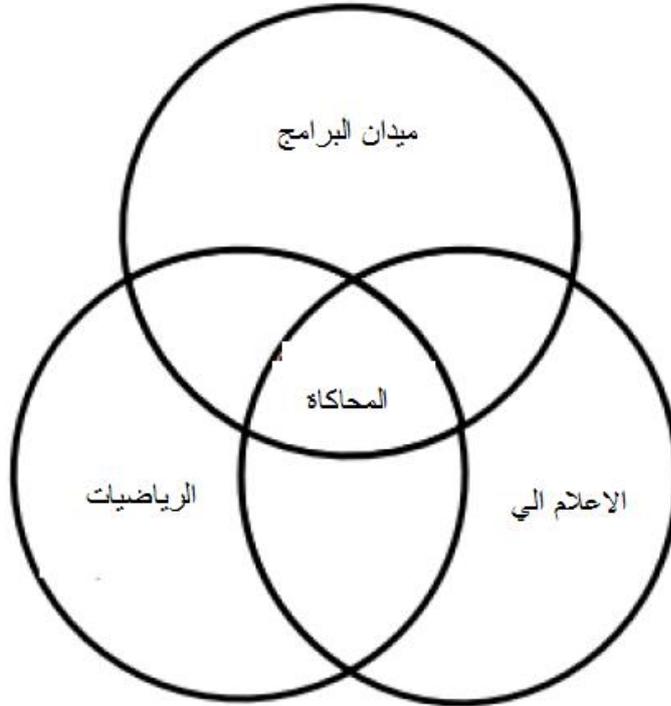
الفصل الثاني :

برنامج المحاكاة المستخدم **SILVACO**

II-1 المقدمة:

SILVACO أو (Silicon Valley Corporation) هي شركة أمريكية، أنشئت عام 1984 من قبل الدكتور إيفان بيسيتش Ivan Pesic، مقرها في سانتا كلارا ، كاليفورنيا. وهي شركة رائدة في توفير برامج محاكاة احترافية تستهدف تكنولوجيا الإلكترونيات تعمل على جهاز الكمبيوتر (TCAD) Technology Computer-Aided Design . يستخدم SILVACO على نطاق واسع ، سواء في الصناعة أو في مختبرات البحث. يعتبر مجال الإلكترونيات ، أو الإلكترونيات الدقيقة على وجه الخصوص متوافق تمامًا مع المحاكاة ، فهو يلعب دورا رئيسيا في التطور الذي يشهده هذا المجال من حيث التطور المستمر لتكنولوجيا أنصاف النواقل. يتم استخدام هذه البرامج من قبل شركات الإلكترونيات الدقيقة في مجال البحث والتطوير وتصميم المركبات[23].

المحاكاة تقنية لدراسة الأنظمة الديناميكية الحقيقية من خلال محاكاة سلوكها باستخدام نموذج رياضي للنظام يتم تنفيذه على جهاز كمبيوتر. علم المحاكاة يعتبر مجال متعدد التخصصات كما هو موضح في الشكل (II-1).



شكل II-1: التخصصات المتضمنة في المحاكاة

II-2 الهدف من المحاكاة

يتمثل الدور الرئيسي للمحاكاة في تقليل عدد خطوات التكرار المطلوبة لتصنيع مركب بخصائص محددة و مرغوب فيها.

يعطي برنامج المحاكاة لمركب نصف ناقل البيانات التالية كنتائج :

- الخصائص I-V ، C-V ، Q-V ، G-V ...

- المنحنى ثنائي البعد منحنى كمية مثل الكمون بدلالة المسافة للمركب.

- المنحنى ثلاثي الأبعاد بمعلم آخر، على سبيل المثال المسافة العمودية z [24].

II-3 برنامج المحاكاة ATLAS

يسمح برنامج ATLAS بتحليل المعادلات التفاضلية والفيزيائية للمركبات مثل المعادلات الخاصة بالانتشار أو انتقال

الشحنات ، وبالتالي فهو قادر على التنبؤ بالخصائص الكهربائية لمعظم المركبات النصف ناقلة في النظامين المستمر

والممتواب. بالإضافة إلى السلوك الكهربائي "الخارجي". يتكون من جزأين: جزء المعالجة الرقمية و جزء النماذج الفيزيائية

لأكثر مركبات أنصاف النواقل شيوعا[24].

تم تصميم ATLAS بطريقة تمكن من الاستعانة بأدوات أخرى تسهل استخدامه ، وهذه الأدوات كالتالي :

II-3-1 DECKBUILD

تعتبر النافذة الرئيسية لـ SILVACO حيث يمكن من خلالها التحكم في جميع أجهزة المحاكاة ، وهي البيئة التي يتم فيها

تعريف برنامج المحاكاة من خلال تحديد الهيكل والشبكة والخصائص الكهربائية اللازمة. DECKBUILD هو الواجهة

بين المستخدم وأجهزة المحاكاة ، يتكون من نافذتين. نافذة الإدخال التي يمكن من خلالها استدعاء المحاكيات والتحكم فيها

باستخدام أوامر DECKBUILD. بينما النافذة الثانية تعرض (إخراج وقت التشغيل) مخرجات ونتائج المحاكيات ، بما في

ذلك أخطاء البرمجة والتنبيهات بعد التجميع. و يوفر DECKBUILD العديد من الأوامر التي يمكن تنفيذها على محاكاة

التشغيل منها[25]:

• استدعاء أداة محاكاة: يمكن القيام بذلك باستخدام التعليمات "Go" التي تخبر DECKBUILD ببدء تشغيل المحاكاة المحدد (مثل Go ATLAS). ثم يمكن تنفيذ أي تعليمات للمحاكي المعني.

• تعريف متغير: يتم استخدام التعليمات "Set" لتعيين أسماء (أحرف) لقيم المتغيرات (مثلاً $Set T = 300$). يمكن استخدام قيمة المتغير لاحقاً عن طريق تسبيق اسمه بعلامة الدولار "\$" (على سبيل المثال تعيين $a = \$T$ ، في هذه الحالة ، تأخذ "a" قيمة "T" ، لذا فإن $a = 300$).

• إنهاء سطر الأوامر: في نهاية الحزمة ، يجب إغلاق المحاكيات المفتوحة باستخدام التعليمات "Quit".

يمكن إدخال التعليقات داخل برنامج ، عند القيام بذلك ، يجب أن تكون مسبوقه بالرمز "#" (لن يتم تنفيذ أي تعليمات مسبوقه بعلامة "# لأنها تعتبر تعليقا).

II-3-2: TONYPLOT

هو الاداة التي يتم فيها رسم نتائج المحاكاة. يوفر إمكانيات كاملة لتصوير وتحليل خصائص الإخراج (بنية المركب الإلكتروني ، التطعيم والخصائص الكهربائية). اعتمادا على برنامج المحاكاة المستخدم ، يمكن أن يعطي TONYPLOT خصائص الإخراج في بعد واحد أو بعدين أو ثلاثة أبعاد [24].

II-4 ترتيب الأوامر في ATLAS

يتكون ترتيب الأوامر في برنامج ATLAS من خمس مجموعات من التعليمات التي يجب أن تحدث بترتيب معين و الموضح في الجدول (II-1) [26].

جدول II-1: مجموعة التعليمات الأساسية في برنامج أطلس

التعليمات	المجموعة
Mesh	تحديد البنية
REGION	
ELCTRODE	
DOPING	
MATRIAL	
MODELS	تحديد النماذج والمواد
CONTACT	
INTERFACE	
METHODE	
LOG	تحديد الطول
SOLVE	
LOAD	
SAVE	

II-5 تحديد البنية :

II-5-1 الشبكة

تتكون الشبكة من نقاط تعريف تتميز بإحداثياتها، على طول مجموعتين من الخطوط المتوازية والعمودية ، يشكل التقاطع بين هذه الخطوط مجموعة من العقد ، تسمى الشبكة . تتطلب المحاكاة الدقيقة شبكة دقيقة قادرة على حل جميع المعادلات التي تؤدي إلى الحل. تتطلب الكفاءة العددية شبكة تقلل العدد الإجمالي لنقاط الشبكة ، وبالتالي المحاكاة السريعة. هناك شرط آخر يجب أخذه في الاعتبار وهو الحد الأقصى لعدد العقد التي يدعمها البرنامج. في (SILVACO TCAD) ATLAS ، يمكن أن تتضمن المحاكاة ثنائية الأبعاد ما يصل إلى 20000 عقدة [16].

لإنشاء شبكة في ATLAS ، ثلاث معلومات مهمة يجب تعريفها :

1. اتجاه الأسطر (x.mesh و y.mesh)

2. مواقع الأسطر الرئيسية (loc)

3. الخطوة بين كل سطر (space) التي تحدد المسافة بين الأسطر الثانوية بالميكرومتر.

التعليمة mesh auto تقوم بتحديد الاسطر تلقائيا

يمثل الشكل (II-2) شبكة المركب Ga_2O_3 التي تم إنشائها بإستخدام العبارة التالية :

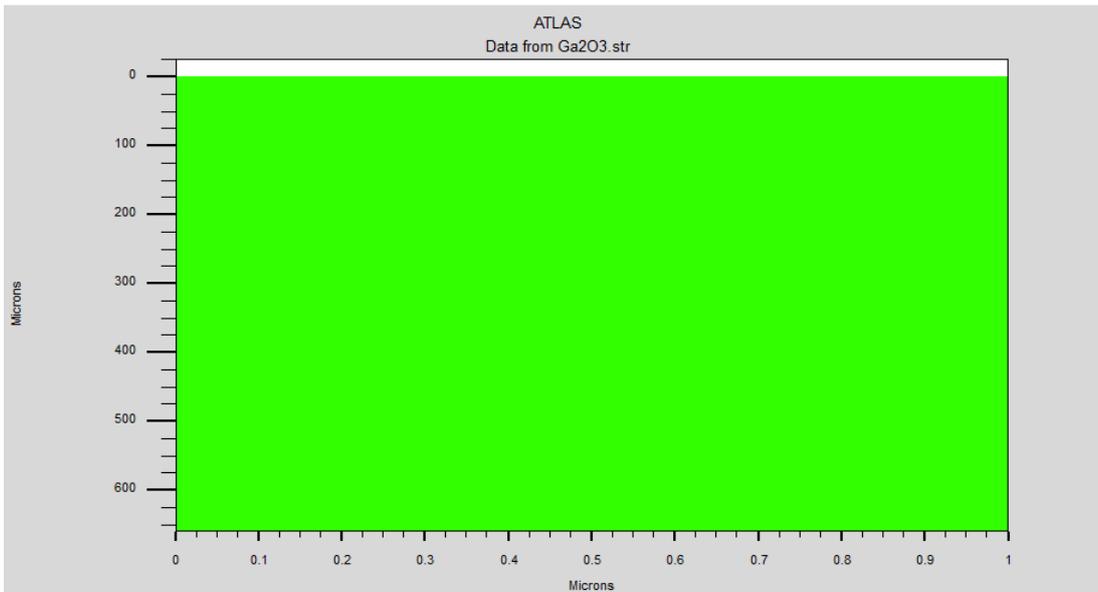
mesh auto

x.m loc=0.0 s=0.01

x.m loc=0.2 s=0.01

x.m loc=0.8 s=0.01

x.m loc=1.0 s=0.01



شكل II-2: رسم الشبكة في سيلفاكو (توني بلوت).

II-5-2 تحديد المناطق وطبيعة المواد:

بعد انشاء الشبكة نقوم بإنشاء مناطق على الشبكة وتحديد طبيعة المادة في كل منطقة. للقيام بهذه العملية نستعمل العبارة

التالية :

Region num= <integer> material= <material_type> <position parameters>

من أجل الشبكة التي نعمل عليها نحتاج إلى تعريف ثلاثة مناطق المنطقة الأولى يتواجد بها أكسيد الغاليوم المطعم بالسليسيوم Si، المنطقة الثانية نضع فيها أكسيد الغاليوم المطعم بالقصدير Sn والمنطقة الثالثة نضع فيها الهواء يوضح الشكل (II-3) الشبكة والمناطق التي تحصلنا عليها بعد ادخال العبارة التالية.

```
set surf_thick=0.3
```

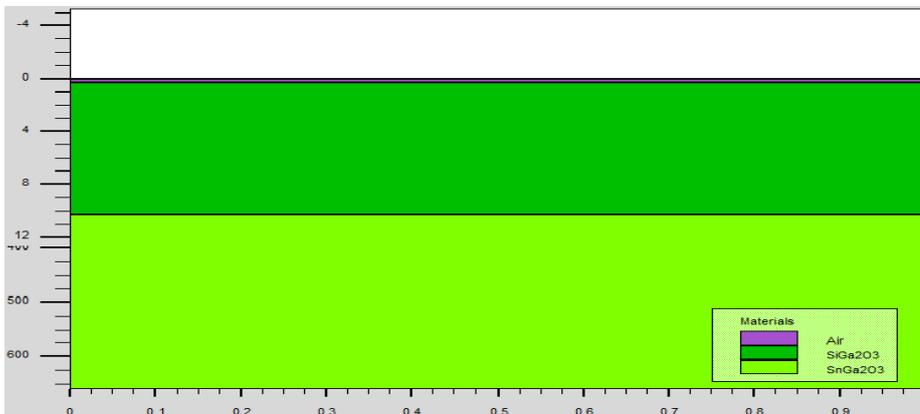
```
set Ga2O3_Sithick=10
```

```
set Ga2O3_Snthick=650
```

```
region bot thick=$surf_thick nx=10 ny=6 material=air
```

```
region bot thick=$Ga2O3_Sithick nx=10 ny=16 user.material=SiGa2O3
```

```
region bot thick=$Ga2O3_Snthick ny=25 nx=10 user.material=SnGa2O3
```



شكل II-3: الشبكة مقسمة لمناطق وطبيعة المادة في كل منطقة.

II-5-3 تحديد الاقطاب (الالكترودات):

بعد إنشاء ركيزة الترسيب والمادة النصف الناقلة نقوم بإنشاء النواقل، يجب تحديد ناقل على الاقل في البرنامج النصي (script)، الاقطاب عبارة عن معادن يتم اضافتها للبنية في اماكن محددة ، SILVACO ATLAS لديه امكانية تحديد 50 قطب كهربائي كحد أقصى [27].

يتم تحديد الأقطاب الكهربائية بالتعليمات التالية:

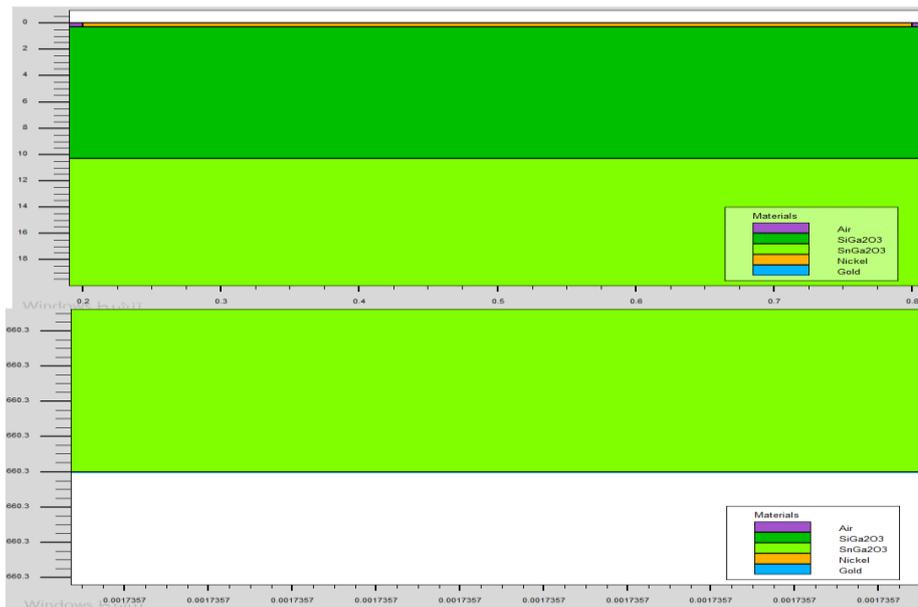
electrname =<electrodename><position_parameters>

السياق المستعمل في كتابة البرنامج الخاص بنا هو كالتالي :

electrode name=anode x.min=0.2 x.max=0.8 y.min=0 y.max=0.3 material=metal

electrode name=cathode bottom material=gold

قمنا بتحديد قطبين ، المهبط (cathode) اسفل البنية عبارة عن معدن الذهب والمصعد (anode) اعلى البنية في مكان المنطقة التي يتواجد بها الهواء عبارة عن معدن النيكل Nickel كما هو موضح في الشكل (II-4)، و نقوم كل مرة بتغييره بمعدن أخر .



شكل II-4: البنية بعد تحديد الاقطاب

II-5-4 تحديد التطعيم (doping):

التطعيم أو الاشارة يعرف بالعبارة العامة التالية:

doping<distribution_type><dopant_type><position_parameters><concentration>

حيث نحدد ما اذا كان التطعيم متجانس على طول العينة أو بتوزيع غاوصي *gaussienne* وكذا نوعه [27].

في العينة الخاصة بنا التطعيم متجانس من النوع N في منطقتين ، المنطقة الاولى مطعمة بالسليسيوم Si بتركيز

$$3.10^{16} \text{cm}^{-3} \text{ و المنطقة الثانية مطعمة بالقدير Sn بتركيز } 1.10^{18} \text{cm}^{-3}$$

عند الانتهاء من تحديد البنية ، يجب حفظها في ملف بنية (str) باستخدام التعليمات:

Save outf = <name.str>

حفظنا البنية الخاصة بنا تحت الاسم Ga2O3:

Save outf = Ga2O3.str

II-6 تحديد المواد

تصنف المواد وفقا لخصائصها الفيزيائية مثل:

- الموصلية (ناقلة ، نصف ناقلة ، عازلة).

- الألفة الألكترونية.

- فجوة الطاقة E_g .

- الحركية.

- كثافة النواقل.

- سرعة التشبع، إلخ...

مثلا ، فجوة طاقة للسيليكون (Si) عند 300 كلفن هي: 1.12 فولت ، والحركية في حقل كهربائي ضعيف ، يمكن كتابتها هذه الخصائص على ATLAS من خلال التعليمات التالية[16]:

MATERIAL MATERIAL=Silicon EG300=1.12 MUN=1100

II- 7 تحديد النماذج les Modèles

من أجل الحصول على نتائج محاكاة واقعية ، يجب مراعاة العديد من التعليمات المعقدة ، اعتمادًا على خصائص الجهاز ومحيطه ، مثل التغير في الحركية بدلالة درجة الحرارة. هذه التعليمات غير موجودة أو موجودة بشكل طفيف في بعض الحالات ، لذلك ليس ضروريا أخذها بعين الاعتبار لتجنب الحسابات الإضافية. يوفر ATLAS نماذج مستقلة لوصف علاقة كل خاصية من خواص الجهاز بشكل مستقل.

النماذج الفيزيائية في برنامج أطلس ATLAS يمكن تصنيفها الى خمس مجموعات[16]:

1. الحركية Mobilité.
2. الالتحام وتوليد حاملات الشحنة Recombinaison.
3. إحصاء حاملات الشحنة Statistiques des porteurs.
4. التأين بالتصادم Impact ionisation.
5. تأثير النفق Effet tunnel.

استخدمنا بعض هذه النماذج في كتابة البرنامج الخاص بنا وذلك من خلال العبارة التالية :

Models print temp=300 kla srh bgn fldmob Auger UST

تستخدم التعليمة print و temp بالترتيب لعرض حالة المحاكاة في نافذة الإخراج لـ DECKBUILD (إخراج وقت التشغيل) ولتحديد درجة الحرارة العامة للبنية.

يتم تحديد جميع النماذج باستثناء التأين التصادمي بعد العبارة Models. التأين بالتصادم يتم تحديده بعد العبارة Impact .
والتالي وصف لأهم النماذج :

II-7-1 نماذج الحركية

تتسارع الإلكترونات والثقوب تحت تأثير الحقل الكهربائي ، ولكنها تفقد الزخم نتيجة لعمليات التشتت ، والتي تشمل:
الاهتزازات الشبكية ، والايونات المشابهة ، وعيوب المواد[16].

يحتوي الجدول (II-2) على النماذج الرئيسية التي لها علاقة مع الحركية.

حيث n : تركيز الإلكترونات ، p : تركيز الثقوب ، T هي درجة حرارة الشبكة ، N هي تركيز التطعيم ، E الحقل الكهربائي.

جدول II-2: نماذج الحركية [16]

ملاحظات	السياق instruction	النموذج Modèle
جدول التطعيم مقابل الحركية ، صالح عند 300K فقط	Conmob	علاقة الحركية مع التركيز
تستخدم في تركيز عالي من الشوائب	Kla	علاقة الحركية مع التركيز بما في ذلك تأثيرات الانتشار في الشبكة (نموذج KLASSEN)
كوجي Coughy – صيغة توماس .Thomas يستخدم من أجل درجة حرارة بين 77-450K	Analytic	علاقة الحركية مع التركيز ودرجة الحرارة
مهم عندما يكون تركيز حاملات الشحنة مرتفع	Ccsmob	انتشار حاملات الشحنة
ضروري لنمذجة أي نوع من تأثير تشبع السرعة	Fldmob	علاقة الحركية مع الحقل الكهربائي الموازي
كامل النموذج بما في ذلك التأثيرات N و T و E // و E مستحسن للأجهزة غير المستوية	Cvt	لومباردي Lombardi
تتضمن تأثير N ، E // و E فقط عند 300K	Yamaguchi	ياما غوتشي Yamaguchi

II-7-2 نماذج الالتحام وتوليد حاملات الشحنة

الالتحام - توليد حاملات الشحنة هي الآلية التي تسلكها انصاف النواقل للعودة الى حالة التوازن، بين الجدول (II - 3)

نماذج تتعلق بالالتحام وتوليد حاملات الشحنة تتواجد في برنامج سيلفاكوا.

جدول II-3: نماذج تتعلق بالالتحام وتوليد حاملات الشحنة [21]

النموذج Modéle	السياق	ملاحظات
شوكلي رد هول Shockley-Read-Hall	Srh	يستخدم عوامل الأقلية الثابتة. يجب استخدامه في معظم عمليات المحاكاة
شوكلي رد هول بدلالة التركيز	Consrh	يشير إلى إعادة تركيب srh بإستخدام حاملات الشحنة التي تتعلق بالتركيز
أوجير Auger	Auger	يشير إلى إعادة تركيب أوجير Auger . مستحسن عندما تكون كثافة التيار عالية

II-7-3 نماذج احصاء حاملات الشحنة

تحاول نماذج إحصاء حاملات الشحنة (الجدول II - 4) أن تكون نموذجاً أفضل لظاهرة نقل الشحنة داخل المركب، مع

مراعاة العديد من الظواهر الفيزيائية التي تحكم ذلك. معادلة بولتزمان التي وصفها بولتزمان في عام 1872 لنموذج حركية

الغازات هي نقطة البداية لجميع النماذج المتاحة [16].

جدول II-4: نماذج احصاء حاملات الشحنة [21]

النموذج	السياق	ملاحظات
بولتزمان	Boltzmann	النموذج الافتراضي
فارمي ديراك	Fermi	يقلل من تركيز حاملات الشحنة في المناطق المطعمة بشدة.
التأين الجزئي Ionisation incomplète	Incomplete	تحسب في حالة تجميد التطعيم. تستخدم عادة عند درجات الحرارة المنخفضة.
عرض الفجوة (Bandgap Narrowing)	Bgn	مهم في المناطق المطعمة بشدة. حاسمة لاكتساب القطبين.

II-7-4 نماذج التأين بالتصادم

التأين الصدمي هو العملية التي يفقد فيها حامل الشحنة طاقة عن طريق إنشاء حاملات شحنة أخرى. يمكن لحامل شحنة ذوا الطاقة الكافية ، المكتسبة من خلال تطبيق حقل كهربائي كبير بما فيه الكفاية لتحريض إلكترون من حزمة التكافؤ BV و انتقاله لحزمة التوصيل BC ، مما يؤدي إلى إنشاء زوج ثقب - إلكترون. ينشأ حامل الشحنة الأصلي من امتصاص الفوتون.

التأين الصدمي عملية عكسية لإعادة تركيب أوجير Auger. يوضح الجدول (II - 5) نماذج التأين بالتصادم.

جدول II-5: نماذج التأين بالتصادم [16]

النموذج	السياق	ملاحظات
Selberherr	Impact selb	يوصى به لمعظم الحالات. يتضمن تعليمات تعتمد على درجة الحرارة.
Crowell-Sze	Impact crowell	يستخدم علاقة طول انتشار حامل الشحنة.

يقدم Atlas سياق تصنيف لمجموعة من النماذج الخاصة بتقنيات معينة ، على سبيل المثال: MOS و BIPOLAR اللذان يشكلان مجموعة أساسية من نماذج الحركة، إعادة التركيب وتأثير النفق ، للترانزستورات ذات التأثير الحثلي للاكاسيد المعدنية (موسفيت MOSFET) والأجهزة ثنائية القطب.

النموذج BIPOLAR يجمع النماذج التالية conmob, fldmob, consrh, auger , bgn

II - 8 التصريح بالناقل (contact)

يستخدم الامر "contact" لإخبار ATLAS بكيفية معالجة القطب الكهربائي. القطب في اتصال أومي ohmique contact بشكل افتراضي. إذا أردنا تحديد القطب كاتصال شوتكي ، يجب علينا تحديد دالة الشغل الخاصة بالمعدن ، وفقا للصيغة التالية:

Contact name = <electrode> workf = <value>

II-9 الطرق الرقمية :

يمكن استخدام طرق عديدة مختلفة لحل المعادلات التي تقوم بحساب كثافة حاملات الشحنة ، الجهد والتيارات المختلفة.

المعادلات التي تسمح بحساب التيار، الجهد وكثافة حاملات الشحنة :

- معادلة كثافة التيار.

- معادلة بواسون Poisson.

- معادلة الاستمرارية.

توجد ثلاث طرق محتواة في برنامج ATLAS لحل المعادلات : غوميل Gummel ، نيوتن Newton و بلاك Block .

يتم إستدعائها بالعبارة التالية :

method<method 1><method 2> <method 3>

تطبق الطرق بالترتيب Gummel ثم Block ثم Newton. إذا لم يتم تحديد الطريقة ، فسيتم تطبيق نيوتن افتراضياً.

الجدول (II-6) يلخص هذه الطرق.

جدول II-6: الطرق العددية [21]

الطريقة	المبدأ	ملاحظات
غوميل Gummel	تحل هذه الطريقة كل مجهول بدوره ، مع الحفاظ على المتغيرات الأخرى ثابتة وتكرر العملية الى غاية الوصول إلى حل ثابت.	- هذه الطريقة تتسامح مع التقديرات الأولية . - بشكل عام ، يكون مفيدًا عندما يكون نظام المعادلات مزدوج الاقتران بشكل ضعيف ولكن لديه تقارب خطي فقط
بلوك Block	طريقة بلوك تحل بعض المعادلات المزدوجة بالكامل بينما البعض الآخر منفصل.	الطريقة عملية عندما يتم تضمين تسخين الشبكة أو معادلات توازن الطاقة.
نيوتن Newton	طريقة نيوتن تحل النظام الكلي للمجهول معًا	- عملية عندما يكون نظام المعادلات شديد الاقتران وله تقارب تربيعي. - مستحسن لغالبية الحالات - طريقة نيوتن تستخدم بشكل إلزامي لمحاكاة انتشار الانجراف متساوي الحرارة. شروط التيار محدودة ، العناصر خارجية ، وتحليل التيار التناوب و التأين الصدمي .

II-10 تحديد الحل :

نطلب من ATLAS حل المعادلات المختلفة بدلالة الشروط الفيزيائية والكهربائية المحددة. يمكن عرض النتائج وحفظها

باستخدام أربعة تعليمات: log , Solve , Output , Save .

التعليمة log تقوم بإنشاء ملف نسخ احتياطي يتم حفظ جميع نتائج المحاكاة فيه.

العبرة المستخدمة في البرنامج الذي أشتغل عليه هي:

log outf=Ga2O3.log

التعليمة Solve تقوم بحساب بيانات نقطة او مجموعة نقط إستقطاب، و التعليمة solve init تحسب حل أولي مبسط (حل معادلة بواسون فقط) للوصول الى تقريب أولي للحل النهائي.

يتم تحديد مجال الاستقطاب وفقا للتعليمات التالية:

solve init

solve vanode=0 vstep=0.01 vfinal=2 name=anode

التعليمة Save و output تستعملان لحفظ النتائج في ملف بنية (.str) مثلا :

Save outf = Ga2O3.str

II - 11 التحليل :

في التحليل نستخدم التعليمتين extract ، tonyplot. التعليمة extract تسمح بإستخراج وعرض النافذة

« run-time output ». قيمة نتيجة معينة لنقطة محددة. عند الكتابة نستخدم السياق الاتي :

extract name="IV" curve(v."anode", i."cathode" *-1*1e8)

التعليمة tonyplot تمكننا من مشاهدة النتائج عبارة عن أشكال. مثلا

tonyplot PtGa2O3.dat

عند الانتهاء من كتابة البرنامج نكتب التعليمة Quit.

الفصل الثالث :

نتائج المحاكاة ومناقشتها

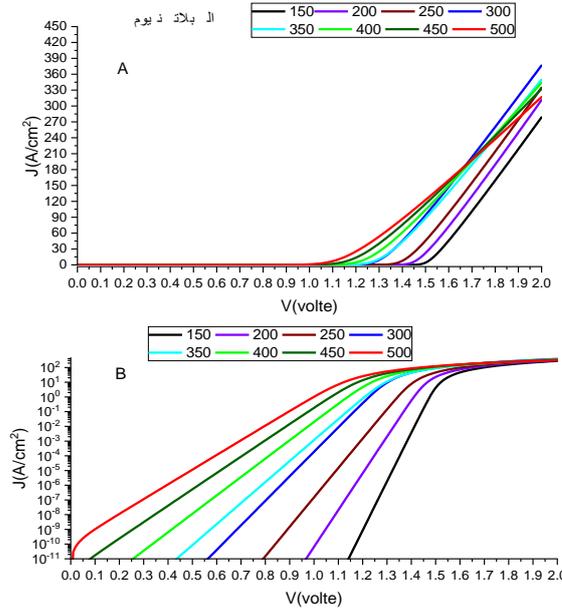
III-1 مقدمة:

في هذا الفصل نقوم بعرض النتائج التي تم الحصول عليها من محاكاة المركب (metal/ β -Ga₂O₃) والمتعلقة بالخاصية جهد تيار J-V ، حيث تم محاكاة المركب عند درجات حرارة مختلفة ، و مع معادن النيكل، الذهب والبلاتينيوم. نستخرج الخواص(الاعدادات) المتعلقة بكل معدن عند كل درجة حرارة. وتتمثل هذه الخواص في معامل المثالية η ، المقاومة على التسلسل R_s وارتفاع حاجز شوتكي ϕ_b .

III-2 الخاصية جهد - تيار لديود شوتكي

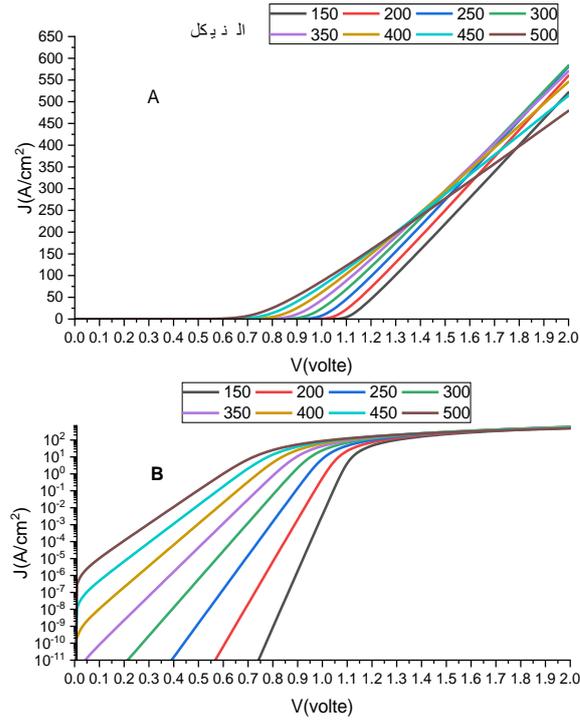
III-2-1 تأثير تغير درجة الحرارة

- نتائج المحاكاة للخاصية جهد - تيار لديود شوتكي (الاتصال metal/ β -Ga₂O₃) ، في حالة استقطاب أمامي وفي درجات حرارة مختلفة لمعدن البلاتينيوم Pt في الشكل (III-1).



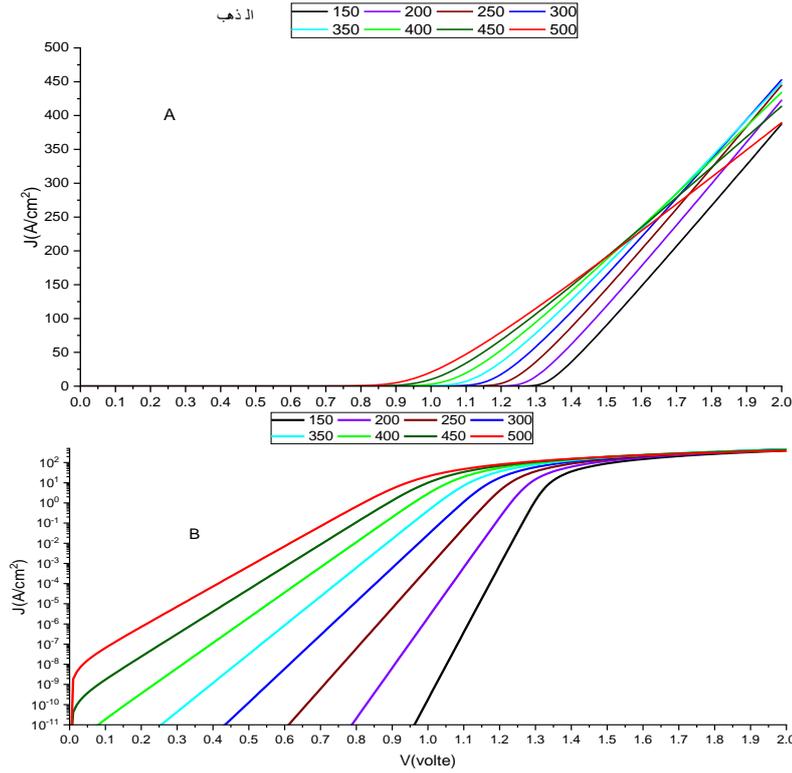
شكل III-1: الخاصية جهد-تيار ل metal/ β -Ga₂O₃ لمعدن البلاتينيوم بدلالة تغير درجة الحرارة. A: السلم الخطي، B: السلم الشبه اللوغارتمي

- نتائج المحاكاة للخاصية جهد - تيار لديود شوتكي (الاتصال metal/ β -Ga₂O₃) ، في حالة استقطاب أمامي وفي درجات حرارة مختلفة لمعدن النيكل Ni موضحة في الشكل (III-2).



شكل III-2: الخاصية جهد-تيار ل β -Ga₂O₃/ métal لمعدن النيكل بدلالة تغير درجة الحرارة. A: السلم الخطي، B: السلم الشبه اللوغارتمي

- نتائج المحاكاة للخاصية جهد - تيار ل ديود شوتكي (الاتصال β -Ga₂O₃/ metal) ، في حالة استقطاب أمامي وفي درجات حرارة مختلفة لمعدن الذهب Au موضحة في الشكل (III-3).



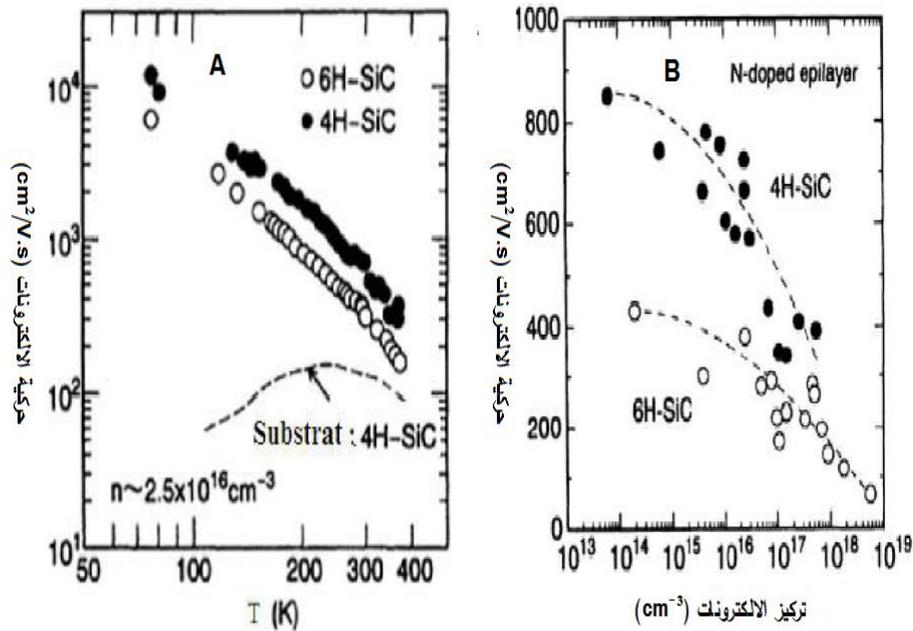
شكل III-3: الخاصية جهد-تيار ل $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ /معدن الذهب بدلالة تغير درجة الحرارة. A: السلم الخطي، B:السلم الشبه اللوغارتمي

نلاحظ من الأشكال (A، 1-III)، (B، 2-III)، (B، 3-III) أن الخاصية J-V تأخذ شكل خطي في جهد منخفض وعند نقطة جهد معينة يحدث انحناء ناتج عن المقاومة على التسلسل و كلما ارتفعت درجة الحرارة كلما قل الجهد الذي يحدث عنده الانحناء الناتج عن المقاومة على التسلسل.

من الأشكال (A، 1-III)، (A، 2-III)، (A، 3-III) من أجل درجة حرارة أقل من 300 K كلما ارتفعت درجة الحرارة ازدادت كثافة التيار ، ومن أجل درجة حرارة فوق 300 K يمكن تميز منطقتين حيث من أجل جهد منخفض ومتوسط (1.42 V للننكل، 1.52 V للذهب، 1.67 V للبلاتنيوم) كلما إرتفعت درجة الحرارة كلما زادت كثافة التيار، تتقاطع منحنيات الخاصية J-V عند نقاط الجهد (1.42V للننكل، 1.52V للذهب، 1.67V للبلاتنيوم) ، حيث عندها يتغير سلوك الخاصية وتتنخفض كثافة التيار كلما ارتفعت درجة الحرارة. تأخذ كثافة التيار القيم العظمى التالية عند الجهد 2 V و عند درجة الحرارة 300 K القيم 583.28 A/cm² ، 452.92 A/cm² و 376.48 A/cm² للننكل والذهب والبلاتنيوم على الترتيب. والقيم عند درجة الحرارة 450 K هي 514 A/cm² ، 413.67 A/cm² و 327.82 A/cm² للننكل و الذهب والبلاتنيوم على الترتيب.

أما عند الدرجة 150 K نجد القيم التالية 521.46 A/cm^2 ، 387.47 A/cm^2 و 278.58 A/cm^2 . كما نلاحظ انه كلما ارتفعت درجة الحرارة قل جهد العتبة حيث تتراوح قيمته من 1.09 V تقريبا عند $T=150 \text{ K}$ و 0.6 V عند درجة الحرارة $T=500 \text{ K}$ عندما يكون المعدن هو النيكل .

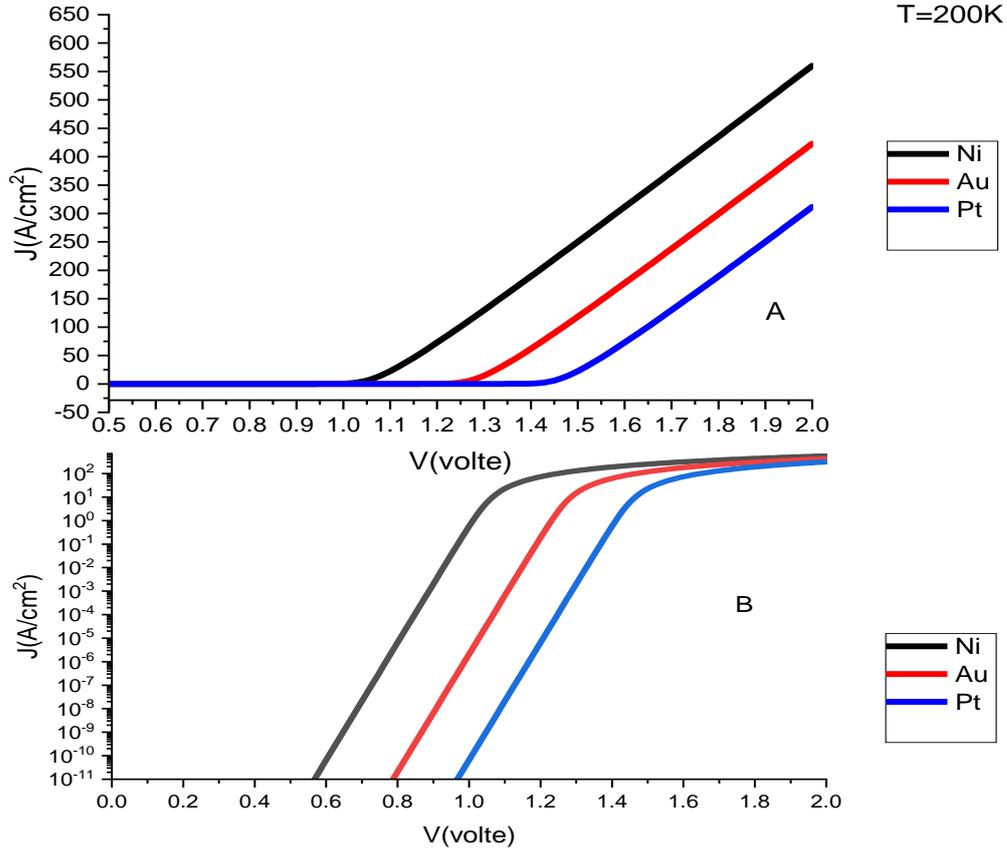
قد يرجع سبب هذه التغيرات الى زيادة التآين وتركيز حاملات الشحنات مع إرتفاع درجة الحرارة. تتعلق وتتغير الخصائص الجوهرية بفعل درجة الحرارة ، هذا التغير يؤدي الى تغير في آليات انتقال الشحنات. وكذلك قد يعود السبب الى إنخفاض في حركية الالكترونات وزيادة تركيزها مع إرتفاع درجة الحرارة [15] ، حيث في كربيد السيلكون (SIC) (الشبيه لأوكسيد الغاليوم Ga_2O_3) تنخفض حركية الالكترونات مع ارتفاع درجة الحرارة وكذا مع زيادة تركيز الالكترونات كما يوضح الشكل الشكل (III-4) [12].



شكل III-4: A: حركية الالكترونات بدلالة درجة الحرارة ، B: حركية الالكترونات بدلالة تركيز الالكترونات [12].

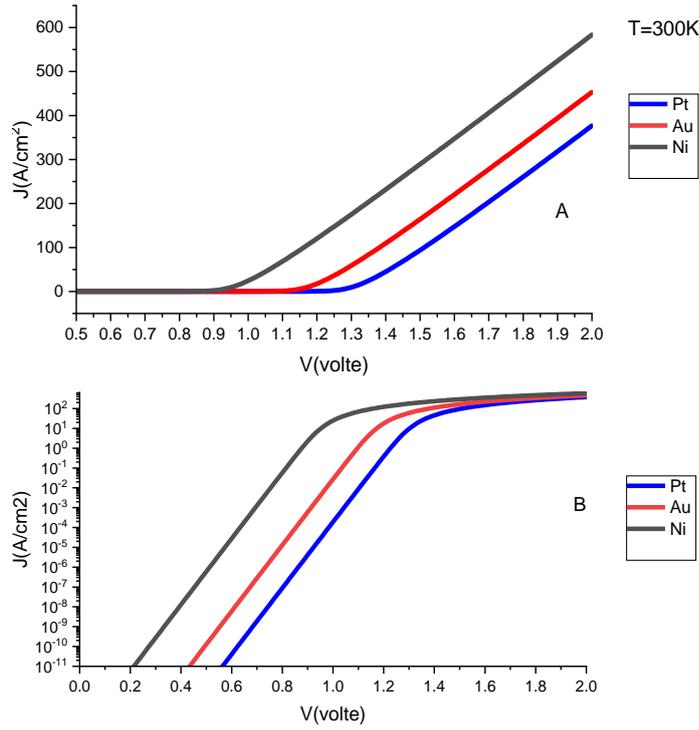
III-2-2 تأثير تغير المعدن

يوضح الشكل (III-5) نتائج المحاكاة للمركب $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ / metal للمعادن النيكل Ni ، البلاتينيوم Pt ، والذهب Au عند درجة حرارة 200 K.

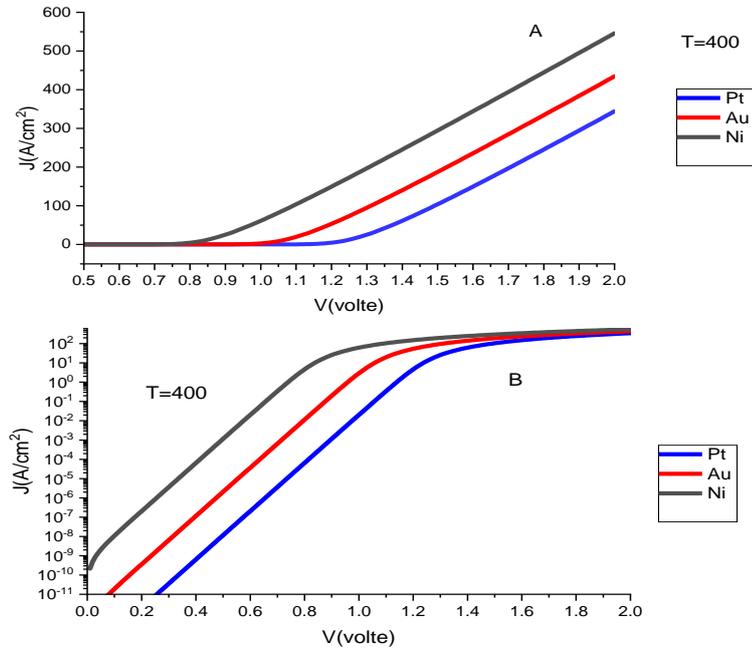


شكل III-5: الخاصية جهد تيارل $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ / metal بدلالة تغير المعدن A: السلم الخطي، B: السلم الشبه اللوغارتمي عند درجة حرارة 200 K.

يوضح الشكلين (III-6) و (III-7) نتائج المحاكاة للمركب $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ / metal للمعادن النيكل Ni ، البلاتينيوم Pt والذهب Au عند درجة حرارة 300 K و 400 K على الترتيب.



شكل III-6: الخاصية جهد تيارل β -Ga2O3 / metal بدلالة تغير المعدن A:السلم الخطي،B:السلم الشبه اللوغارتمي عند درجة حرارة 300 K.



شكل III-7: الخاصية جهد تيارل β -Ga2O3 / metal بدلالة تغير المعدن A:السلم الخطي،B:السلم الشبه اللوغارتمي عند درجة حرارة 400 K.

نلاحظ من الأشكال (A، 5-III)، (A، 6-III)، (A، 7-III) من اجل كل الحالات (دالة الشغل من 5.25 eV الى 5.65 eV) الاتصال عبارة عن اتصال شوتكي. و كذلك كلما كان للمعدن دالة شغل أكبر كلما كان للبيود جهد عتبة أكبر (في حدود 1.25 V في حالة البلاتينيوم و 0.9 V في حالة النيكل عند درجة الحرارة 300 K) و كثافة تيار أقل (القيمة العظمى حوالي 376 A/cm² مع البلاتينيوم و 583 A/cm² مع النيكل عند درجة الحرارة 300 K) و يعود ذلك الى تغير سمك منطقة شحنة الفضاء مع تغير دالة الشغل للمعدن.

نلاحظ من الأشكال (B، 5-III)، (B، 6-III)، (B، 7-III) انه كلما كانت دالة الشغل أكبر كلما تأخر الجهد الذي يحدث عنده الانحناء الناتج عن المقاومة على التسلسل.

3-III استخراج الخصائص باستخدام طريقة نورد Nord methode

1-3-III حساب معمل المثالية

الظاهرة المهيمنة في سلوك المركب هي ظاهرة الانبعاث الايوني الحراري وعليه نتبع المعادلة التالية :

$$1 - III \quad I = I_s \left(\exp\left(\frac{q(V-R_s I)}{\eta KT}\right) - 1 \right)$$

حيث V : الجهد المطبق. T: درجة الحرارة. K: ثابت بولتزمان. I:معامل المثالية. I_s: تيار التشبع. حيث:

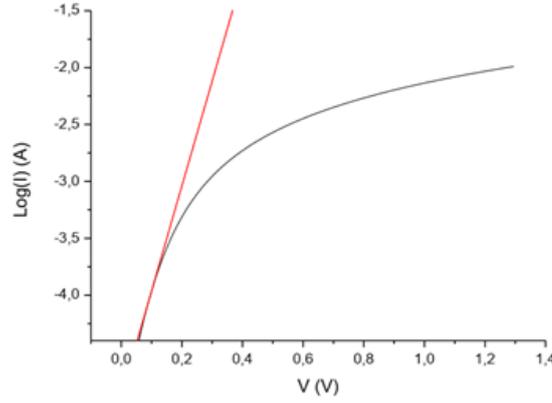
$$2 - III \quad I_s = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{KT}\right)$$

A* : ثابت ريشاردسون

قبل الوصول الى تيار التشبع I_s تكون المقاومة على التسلسل مهمة و تصبح معادلة كثافة التيار بالشكل التالي :

$$3 - III \quad I = I_s \exp\left(\frac{q(V-R_s I)}{\eta KT}\right)$$

من أجل قيم تيار ضعيفة R_sI مهمة أمام V ، ومنه قيم I_s ومعامل المثالية η يمكننا الحصول عليها من ميل منحنى الدالة log(I) = f(V) كما هو موضح في الشكل (8-III).



شكل III-8: ميل منحنى الدالة $\log(I) = f(V)$

من أجل كل درجة حرارة يعطى معامل المثالية بالعلاقة التالية:

$$4 - III \quad \eta = \frac{q}{KT} \frac{dV}{d(\ln I)}$$

III-3-2 طريقة نورد Nord methode

حسب نورد يمكن التغاضي عن المقاومة على التسلسل في عديد الحالات وذلك بإستخدام منحنى الدالة:

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

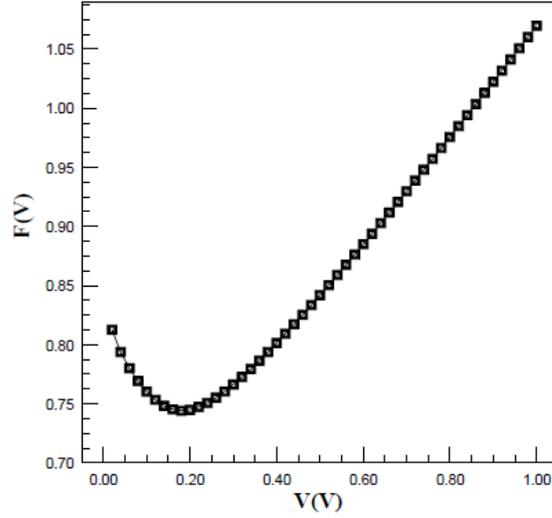
المعادلة (5-III) والمعادلة (3-III) تعطينا العلاقة التالية:

$$6 - III \quad F(V) = \emptyset_b + IR_s - \frac{V}{2}$$

مخطط دالة الجهد $F(V)$ شكل (III-9) سيكون في البداية عبارة عن خط مستقيم له ميل سلبي حيث تكون المقاومة على

التسلسل مهمة ثم في مرحلة ثانية عندما تهيمن المقاومة على التسلسل يصبح المنحنى عبارة عن خط مستقيم له ميل

موجب، نهتم بالقيمة الدنيا للدالة F [28].



شكل III-9: مخطط دالة الجهد $F(V)$

بعد اجراء بعض الحسابات ، اشتق نورد ارتفاع حاجز شوتكي ϕ_b ، والمقاومة على التسلسل R_s حيث وجد:

$$7 - III \quad \phi_b = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{2} - \frac{KT}{q}$$

$$8 - III \quad R_s = \frac{KT}{qI_{min}}$$

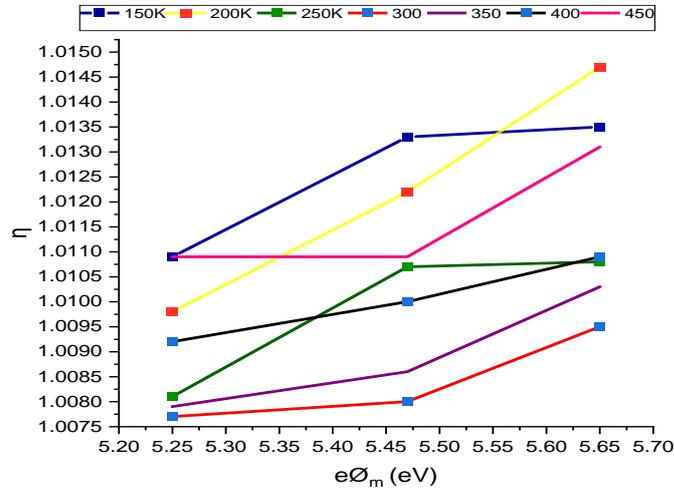
تتعرض طريقة نورد أن عامل المثالية يساوي 1 ولذلك في الثنائيات الغير المثالية أين $\eta > 1$ تأ لمقاومة على التسلسل العبارة

التالية [28]:

$$9 - III \quad R_s = \frac{(2-\eta)KT}{qI_{min}}$$

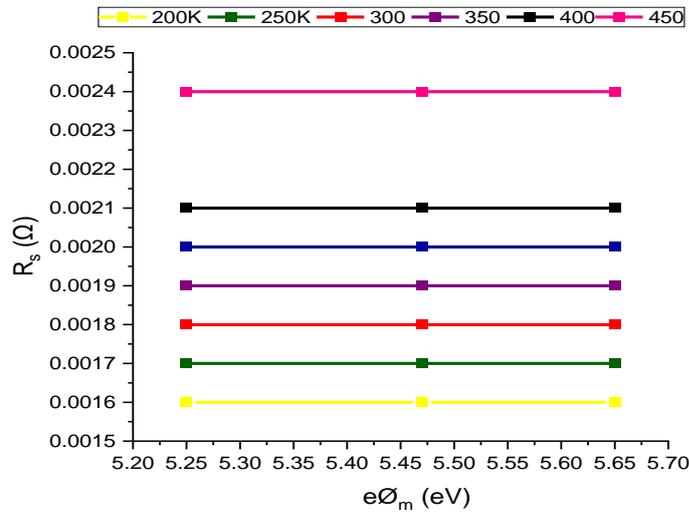
4-III تأثير تغير المعدن على خواص الوصلة

يوضح الشكل (10-III) أثر تغير المعدن (دالة الشغل) على معامل المثالية η عند درجات حرارة مختلفة.



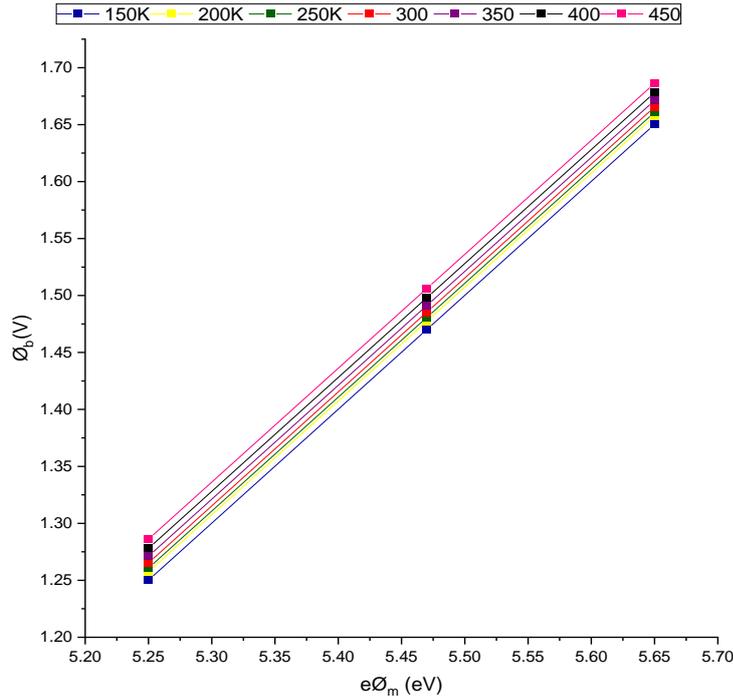
شكل III-10: تغير معامل المثالية بدلالة دالة الشغل للمعدن في درجات حرارة مختلفة.

يوضح الشكل (11-III) أثر تغير المعدن (دالة الشغل) على المقاومة على التسلسل عند درجات حرارة مختلفة.



شكل III-11: تغير المقاومة على التسلسل بدلالة دالة الشغل للمعدن في درجات حرارة مختلفة.

يوضح الشكل (12-III) أثر تغير المعدن (دالة الشغل) على ارتفاع الحاجز عند درجات حرارة مختلفة.

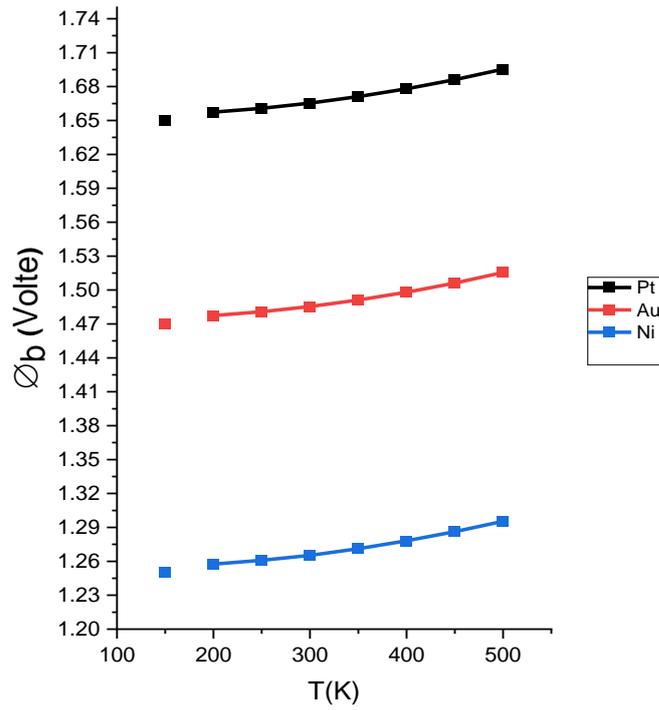


شكل III-12: تغير ارتفاع الحاجز بدلالة دالة الشغل للمعدن في درجات حرارة مختلفة.

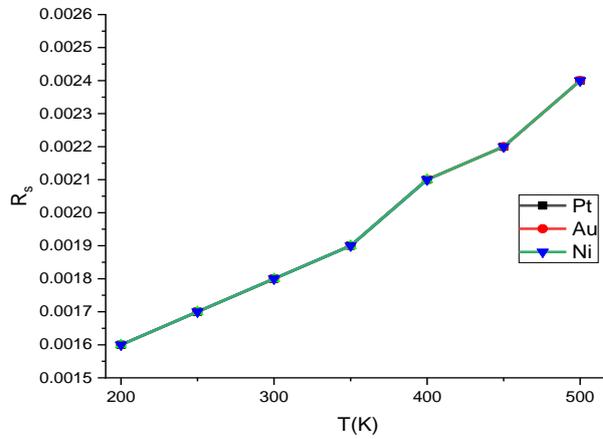
نلاحظ من خلال الشكل (III-11) أن المقاومة على التسلسل ثابتة ولا تتغير مع دالة الشغل. كما نلاحظ من الشكل (III-12) أن ارتفاع الحاجز الكوموني تزداد قيمته كلما كان للمعدن دالة شغل أكبر وهذا التزايد له شكل خطي. وهذا قد يكون بسبب تغير في الخصائص الجوهرية حيث تقل فجوة الطاقة [22]. نلاحظ من الشكل (III-10) ان معامل المثالية يزداد كلما كان للمعدن دالة شغل أكبر.

III-5 تأثير تغير المعدن على خواص الوصلة

يوضح الشكل (III-13) التغير في ارتفاع الحاجز بينما الشكل (III-14) يظهر فية تغير المقاومة على التسلسل مع التغير في درجة الحرارة حيث نلاحظ أنهما يرتبطان بشكل طردي مع درجة الحرارة حيث يرتفع الحاجز الكوموني للمعدن مع ارتفاع درجة الحرارة وكذلك كلما ارتفعت درجة الحرارة كلما زادت المقاومة على التسلسل.

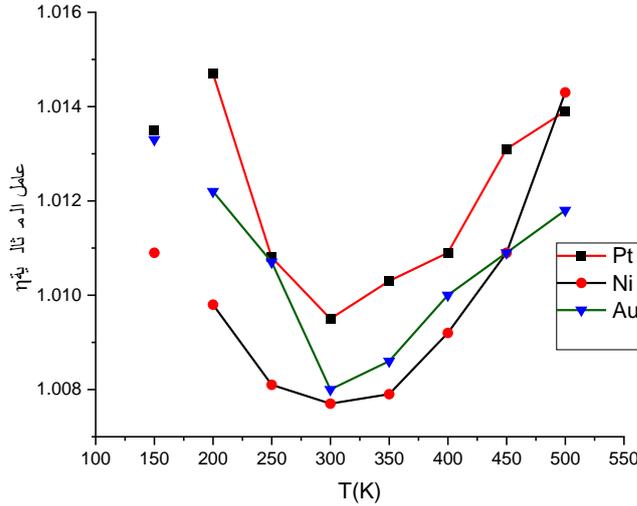


شكل III-13: تغير معامل المثالية بدلالة درجة الحرارة.



شكل III-14: تغير المقاومة على التسلسل بدلالة درجة الحرارة.

يوضح الشكل (III-15) تغير معامل المثالية مع تغير درجة الحرارة ، حيث نلاحظ ان معامل المثالية يقترب من 1 كلما كانت درجة الحرارة قريبة لدرجة حرارة الغرفة وهذا التغير طفيف. حيث يتناسب عكسا مع درجات حرارة أقل من 300 K ، وبعدها يزداد معامل المثالية مع ارتفاع درجة الحرارة. كما نلاحظ ان له قيم قريبة لـ 1 وهذا لأن العيوب قليلة.



شكل III-15: تغير معامل المثالية بدلالة درجة الحرارة.

يتم التعبير عن آلية النقل الإلكترونية في الصمام الثنائي Schottky من خلال عامل المثالية η . إذا كان قريب من 1 (الحالة المثالية) ، فإن تيار الانتشار يسيطر على آلية النقل ، وهذا هو الحال بالنسبة للمركب في درجة حرارة الغرفة [21].

بالنسبة لمركب شوتكي المثالي يكون معامل مثالية $\eta = 1$ ، لكن في الواقع η دائماً أكبر من 1. هذا الانحراف عن الحالة المثالية تتحكم فيه [21]:

- كثافة الحالات في منطقة التلامس.
- تأثير انتقال حاملات الشحنة بتأثير النفق.
- الالتحام في المنطقة المحايدة.

الخاتمة

الدراسة المقدمة في عملنا هذا هي تأثير درجة الحرارة وتغير المعدن لوصلة شوتكي من أوكسيد الغاليوم كنصف ناقل على الخاصية جهد-تيار ($I-V$) والخواص (معامل المثالية η ، المقاومة على التسلسل R_s وارتفاع حاجز شوتكي ϕ_b) المتحصل عليها من منحنيات الخاصية جهد-تيار في حالة إستقطاب مباشر .

تكون خصائص جهد-تيار على مقياس شبه لوغاريتمي خطية عند جهد منخفض ومتوسط وتتحني بعد جهد معين ، ويعود ذلك الى تأثير المقاومة على التسلسل، كما أن الجهد الذي يحدث عنده الانحناء يقل مع ارتفاع درجة الحرارة ويرجع ذلك الى الزيادة في المقاومة على التسلسل مع زيادة درجة الحرارة .

في الخاصية جهد-تيار على مقياس خطي عند جهود منخفضة ومتوسطة لاحظنا زيادة شدة التيار مع ازدياد درجة الحرارة وتتقاطع المنحنيات عند نقطة جهد معينة لتغير بعدها من سلوكها وقد يعود السبب الى تغير في اليات نقل الشحنات. كما لاحظنا ان كثافة التيار عند درجة حرارة 300 K هي الاكبر. وكلما كان للمعدن دالة شغل أكبر كلما أعطى كثافة تيار أقل وجهد عتبة أكبر .

لاحظنا ان ارتفاع حاجز شوتكي يزداد مع ارتفاع درجة الحرارة ومع زيادة دالة الشغل للمعدن كذلك ، كما أن معامل المثالية هو الاخر يزداد مع زيادة دالة الشغل للمعدن و تغير معامل المثالية بدلالة الحرارة يكون على حسب المجال الحراري .

- [1]- Stepanov, S., Nikolaev, V., Bougrov, V., & Romanov, A. (2016). Gallium OXIDE: Properties and applica 498 a review. Rev. Adv. Mater. Sci, 44, 63-86.
- [2]- Higashiwaki, M., Sasaki, K., Kuramata, A., Masui, T., & Yamakoshi, S. (2014). Development of gallium oxide power devices. physica status solidi (a), 211(1), 21-26.
- [3]- Peelaers, H., & Van de Walle, C. G. (2015). Brillouin zone and band structure of β -Ga₂O₃. physica status solidi (b), 252(4), 828-832.
- [4]- Geller, S. (1960). Crystal structure of β -Ga₂O₃. The Journal of Chemical Physics, 33(3), 676-684.
- [5]- Isukapati, S. B. (2018). Gallium oxide thin films for optoelectronic applications (Doctoral dissertation, Youngstown State University).
- [6]- Galazka, Z. (2018). β -Ga₂O₃ for wide-bandgap electronics and optoelectronics. Semiconductor Science and Technology, 33(11), 113001.
- [7]- Rubio, E. J. (2016). Intrinsic and metal-doped gallium oxide based high-temperature oxygen sensors for combustion processes.
- [8]- Mahmoodinezhad, A., Janowitz, C., Naumann, F., Plate, P., Gargouri, H., Henkel, K., ... & Flege, J. I. (2020). Low-temperature growth of gallium oxide thin films by plasma-enhanced atomic layer deposition. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 38(2), 022404.
- [9]- Chabak, K. D. (2016). Three-dimensional field-effect transistors with top-down and bottom-up nanowire-array channels (Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign).
- [10]- Park, Y. (2018). Developing MOS structures in gallium oxide for high-power electronics and energy savings applications (Master's thesis)
- [11]- إسماعيل خلف عباس، دراسة الخواص الكهربائية لثنائي شوتكي لشبه الموصل العضوي، مجلة علوم الرافدين، المجلد 22، العدد 3، جامعة الموصل 2011.
- [12]- Toumi, S. (2018). Etudes des composants électroniques (cellules solaires, diodes schottky) en utilisant les algorithmes génétiques et le langage VHDLAMS (Doctoral dissertation).
- [13]- AYED, H. (2017). Contribution à l'étude des propriétés du silicium microcristallin (Doctoral dissertation, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA).
- [14]- Ouzerouhane, M., & Zellag, S. (2020). Simulation et modélisation de l'effet de la température sur les caractéristiques électriques (IVT) dans la structure métal/semi-conducteur ' β -Ti/n-GaAs' (Doctoral dissertation, université Abderrahmane Mira-Bejaia).

- [15]- BOUZID, F. (2018). Simulation des propriétés électriques d'une jonction à base de nitrure de gallium. Application au détecteur de rayonnement (Doctoral dissertation, UNIVERSITE Mohamed Khider Biskra).
- [16]- Lamia, M. (2018). Simulations d'une diode Schottky à base d'AlGaAs (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [17]- Benouadfel, Y. (2015). *Caractérisation et simulation des diodes à barrière schottky sous environnement SILVACO* (Doctoral dissertation, université Abderahmane Mira).
- [18]- Zellag, S. (2018). Modélisation et simulation des propriétés électriques d'une structure Métal-Isolant-Semi-conducteur MIS (Doctoral dissertation, Université mohamed khider biskra).
- [19]- Bourouba, F. (2018). Modelisation et simulation des contacts metal -semiconducteur à barrière inhomogène (Doctoral dissertation).
- [20]- Bonnaud, O. (2003). Physique des Solides, des Semiconducteurs et Dispositifs. Université de Rennes, 1, 78
- [21]- BAZA, S. (2018). Etude Statique de la Caractéristique Electrique Courant -Tension d'une Structure Schottky (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf -M'sila).
- [22]- Brahim, A., & Massinissa, G. (2018). *Caractérisation électrique de diode schottky à base de l'AlGaAs* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [23]- BRAHIMI Chakib & BENLEMDJALDI Moussa. (2018). Simulations de l'influence des défauts sur une diode Schottky à base AlGaAs (Doctoral dissertation, Université SAAD DAHLAB de BLIDA).
- [24]- Kim, S. Effet de la fraction molaire sur la cellule solaire en InGaN.
- [25]- GHACHAME, S. (2014). Caractéristiques électriques d'une diode à barrière de Schottky (SBD) avec et sans couche isolante SiO₂ à la température ambiante (300K) (Master's thesis).
- [26]- Refka, E. L. O. T. R. E. U. C. H., & Souad, B. O. U. G. H. A. R. (2017). Etude et Optimisation d'une Photodiode dans une Chaîne de Transmission par Fibre Optique.
- [27]- Dilmi, M. (2016). ÉTUDE DES PERFORMANCES DE LA CELLULE InGaP/GaAs/Ge PAR SIMULATION (Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE).
- [28]- Fritah, A. (2017). Extraction des paramètres électrique d'une diode à barrière de Schottky (SBD) à base de phosphure d'indium de type n (n-InP) par IVT et CVT (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).