

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique et Electronique (GEE)

Filière : Electronique



MASTER INSTRUMENTATION

PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté par : BEZZAOUIA SIHAM et GHILAS BOCHRA

Intitulé du Sujet

**Etude et modélisation électrique d'une diode Schottky**

Soutenu en 2021, devant le jury composé de :

M<sup>r</sup> HAMDOUNE Abdelkader

Professeur

Univ. Tlemcen

Président

M<sup>me</sup> KADDOURI Nadera

MCB

Univ. Tlemcen

Encadreur

M<sup>r</sup> MOULAY KHATIR Nassim

MCB

Univ. Tlemcen

Examineur

Année Universitaire 2020-2021

## ***Remerciement :***

*Tout d'abord, nous remercions Allah, notre créateur de nos avoir donné les forces, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.*

*Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Mme Kaddouri Nadira qui a proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseils et ses dirigés du début à la fin de ce travail.*

*Nous souhaitons adresser un remerciement spécial aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur de juger notre travail et d'accepter de participer à notre soutenance.*

*Un grand merci à l'ensemble des enseignants de l'université abou bekr belkaid de tlemcen qui on veillées pendant des années à nous former.*

## *Dédicace*

Je remercie le Dieu de m'avoir donné la force et la volonté pour accomplir ce travail.

Je Dédie ce travail :

A ceux qui me sont chers

A ceux qui ont toujours cru en moi

A ceux qui m'ont toujours encouragé

**A ma très chère mère** qui a sacrifié sa vie pour ma réussite et m'a éclairé le chemin par ses conseils judicieux.

**A mon très cher père**, ce modeste travail est le fruit de tant de sacrifices déployés pour notre éducation.

j'espère qu'un jour,  
je pourrai rendre un peu de ce qu'ils  
ont fait pour moi, que dieu les garde et les protège.

**A mes merveilleux frères** : Billel, Rayen et ma adorable sœur : Houda.

**A ma grande mère** : Yamina

**A ma très cher ami** : Ahlam, et mon binome Bochra.

je dédie aussi ce travail à toutes ma famille, mes amis, mes collègues de M2 instrumentation .

**Siham**

## *Dédicace :*

Je remercie le Dieu de m'avoir donné la force et la volonté pour accomplir ce travail.

Je Dédie ce travail :

A ceux qui me sont chers

A ceux qui ont toujours cru en moi

A ceux qui m'ont toujours encouragé

*A ma très chère mère*, qui a sacrifié sa vie pour ma réussite et m'a éclairé le chemin  
par ses conseils judicieux.

*A mon très cher père*, ce modeste travail est le fruit de tant De sacrifices déployés  
pour notre éducation.

A mes adorables sœurs : Ikram, Khawla, Khadidja et Hiba ; et mon merveilleux  
frère: Sid Ahmed

A mes amis proches (*Ahlam, Sara, Meriem, Hanane*)

*A ma binôme: Siham*

Je dédie aussi ce travail à toutes ma famille, mes amis, mes  
collègues de M2 instrumentation.

Bohra

## **Résumé :**

La jonction d'un matériau semi-conducteur à large gap comme le SiC avec un métal donne naissance à un composant très important dans les applications à haute puissance, la diode Schottky. Un composant connu pour leurs caractéristiques avantageuses comme la tenue en tension élevée, résistivité faible, donc un composant idéal par exemple pour les convertisseurs de puissance. La diode Schottky rencontre une certaine réticence la fiabilité de cette technologie n'arrive pas à convaincre. Malgré les nombreuses recherches réalisées sur ce composant utilisé souvent dans les circuits électroniques de puissance, cette étude porte sur la modélisation d'une diode Schottky en SiC-6H sur une large gamme de températures. La modélisation a permis une meilleure compréhension du fonctionnement de la diode Schottky théoriquement et par modélisation.

## **Mots clés :**

SiC-6H ; Diode ; Schottky ; Semi-conducteurs;

## **Abstract :**

The junction of a wide gap semiconductor material like SiC with a metal gives rise to a very important component in high power applications, the Scotty diode. A component known for these advantageous characteristics such as high voltage withstand, low resistivity, therefore an ideal component for example for power converters. The Schottky diode meets with a certain reluctance the reliability of this technology does not manage to convince. Despite the extensive research carried out on this component often used in power electronic circuits, this study focuses on the characterization and modeling of a Schottky diode in SiC-6H over a wide temperature range. The temperature characterization made it possible to propose models of the direct and inverse characteristic over a wide range of temperatures. The modeling allowed a better understanding of the function of the Schottky diode theoretically and by modeling

## **Key words :**

Diode ; Schottky ; Semiconductors

## **ملخص :**

يؤدي تقاطع مادة شبه ناقلة ذات فجوة واسعة مثل SiC مع معدن إلى ظهور مكون مهم جدًا في تطبيقات الطاقة العالية ، وهو الصمام الثنائي شوتكي . عنصر معروف بهذه الخصائص المفيدة مثل تحمل الجهد العالي ، والمقاومة المنخفضة ، وبالتالي فهو مكون مثالي على سبيل المثال لمحاولات الطاقة على الرغم من البحث المكثف الذي تم إجراؤه على هذا المكون غالبًا ما يستخدم في الدوائر الإلكترونية للطاقة ، إلا أن هذه الدراسة تركز على وصف ونمذجة صمام ثنائي شوتكي في SiC-6H على نطاق واسع من درجات الحرارة. مكن وصف درجة الحرارة من اقتراح نماذج للخاصية المباشرة والعكسية على نطاق واسع من درجات الحرارة. سمحت النمذجة بفهم أفضل لوظيفة صمام ثنائي شوتكي نظريًا وعن طريق النمذجة.

## **كلمات مفتاحية :**

صمام ; شوتكي ; شبه ناقل

## Table de matière

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur les matériaux</b>	
<b>I.1 Introduction</b> .....	2
<b>I.2 Propriétés du carbure de silicium SiC</b> .....	2
I.2.1 Propriétés cristallographiques des SiC.....	2
I.2.2 Propriétés physiques/électriques .....	3
I.2.3 Propriétés mécaniques, chimiques et thermiques.....	4
<b>I.3 Domaines d'application envisageables avec le Carbure de Silicium</b> :.....	5
I.3.1 Applications hautes températures.....	5
I.3.2 Applications radiofréquences.....	5
I.3.3 Applications optoélectroniques.....	6
I.3.4 Applications de puissance.....	6
<b>I.4 Dopage</b> .....	6
I.4.1 Dopage type N .....	7
I.4.2 Dopage type P.....	7
<b>I.5 Les défauts structuraux dans le SiC</b> .....	7
I.5.1 Les micropipes.....	7
I.5.2 Les dislocations.....	8
I.5.3 Fautes d'empilement.....	8
<b>I.6. Procédés d'élaboration du SiC</b> .....	9
I.6.1. Synthèse à mémoire de forme.....	9
I.6.1.1 La synthèse au laboratoire.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.6.1.2 Synthèse industrielle.....	10
I.6.2 SiC massif monocristallin.....	10
I.6.2.1 Méthode de Lély (1995).....	10
I.6.2.2 Méthode de Lély modifiée (1978).....	10
I.6.3 Couches minces de SiC sur substrats Silicium.....	11
I.6.3.1 Épitaxie par dépôt chimique en phase vapeur (CVD).....	11
I.6.3.2 Epitaxie par jet moléculaire (MBE).....	11
<b>I.7 Les polytypes de SiC</b> :.....	12
<b>I.8 Propriétés de quelques métaux</b> .....	13
<b>I.9 Conclusion</b> .....	14
<b>Chapitre II : Jonction métal/semiconducteur effet Schottky</b>	
<b>II.1 Introduction</b> .....	15
<b>II.2 Structure métal/ semi-conducteur</b> .....	15
II.2.1 Barrière de potentiel (barrière Schottky).....	15
II.2.2 Travail de sortie de métal $\phi_M$ .....	16
II.2.3 Le travail de sorties $\phi_{SC}$ du semi-conducteur.....	16

II.2.3 L'affinité électronique $\chi$ .....	16
<b>II.3 cas du contact métal / semi-conducteur dopé N.....</b>	<b>16</b>
II.3.1 Régime des bandes plates.....	16
II.3.2 $\phi_M > \phi_{sc}$ à l'équilibre .....	17
II.3.3 $\phi_M > \phi_{sc}$ sous polarisation.....	18
II.3.4 $\phi_M < \phi_{sc}$ à l'équilibre.....	19
II.3.5 $\phi_M < \phi_{sc}$ sous polarisation.....	20
<b>II.4 Mécanismes de conduction de la diode Schottky .....</b>	<b>21</b>
II.4.1 Théorie d'émission thermoionique.....	21
II.4.2 Théorie de diffusion.....	22
II.4.3 Théorie d'émission-diffusion.....	23
II.4.4 Théorie de l'effet tunnel.....	24
II.4.5 Recombinaison dans la zone de charge d'espace.....	24
II.4.6 Recombinaison dans la région neutre (ohmique) .....	25
II.4.7 Densité de courant total.....	25
II.4.8 Modèle à barrière homogène.....	26
<b>II.5 Caractéristique courant –tension.....</b>	<b>26</b>
<b>II.6 Conclusion.....</b>	<b>27</b>
 <b>Chapitre III : Modélisation d'une diode Schottky</b>	
<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>28</b>
<b>III.2 ATLAS de SILVACO.....</b>	<b>28</b>
III.2.1 Présentation du logiciel Silvaco.....	28
III.2.1.1 ATLAS-SILVACO.....	29
III.2.1.2 Tonyplot.....	29
III.2.2 Étapes d'instruction dans ATLAS.....	29
III.2.3 Spécification de la structure.....	30
III.2.3.1 Spécification de maillage.....	31
III.2.3.2 Spécification des régions.....	33
III.2.3.3 Spécification des électrodes.....	34
III.2.3.4 Spécification de dopage.....	35
III.2.4 Spécification de modèle et matériau.....	36
III.2.4.1 Matériel.....	36
III.2.4.2 Les modèles.....	36
III.2.4.3 Contact.....	37
III.2.4.4 Interface.....	37
III.2.5 Méthodes Numériques.....	38
III.2.5.1 Méthode de Gummel.....	38
III.2.5.2 Méthode de Newton.....	38
III.2.6 spécification de solution.....	39
III.2.6.1 Log.....	39
III.2.6.2 Solve.....	39
III.2.7 Présentation de la structure.....	39
III.2.7.1 Caractéristique I-V de la diode Schottky idéale .....	40
III.2.7.1.1 Effet de la variation d'épaisseur de la couche 6H-SiC sur la caractéristique courant-tension.....	42
III.2.7.1.2 Changement d'épaisseur d'Aluminium.....	43

III.2.7.1.3 l'effet de changement de métal sur la caractéristique I-V.....	46
III.2.7.1.4 L'effet de température sur la caractéristique I-V .....	47
III.2.7.1.5 l'effet de concentration de dopage sur la caractéristique I-V.....	49
III.2.7.1.6 L'effet de changement de semi-conducteur (SiC par Si) .....	50
<b>III.3 Conclusion.....</b>	<b>52</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>53</b>
<b>Bibliographies :.....</b>	<b>54</b>



## Liste des figures :

Figure I.1 La maille élémentaire du carbure de silicium .....	3
Figure I.2: Notation des principaux polytypes du SiC .....	12
Figure I.3: Polytypes du SiC les plus courants .....	13
Figure II.1 : Régime des bandes plates( $\phi_m = \phi_{sc}$ ) .....	17
Figure II.2 : Régime à l'équilibre ( $\phi_m > \phi_{sc}$ ).....	18
Figure II.3 : contact schottky ( $\phi_m > \phi_{sc}$ sous polarisation) .....	19
Figure II.4 : $\phi_m < \phi_{sc}$ à l'équilibre.....	20
figure II.5 : Contact ohmique( $\phi_m < \phi_{sc}$ sous polarisation).....	21
Figure III.1 : le rôle de simulation.....	28
Figure III.2 :Les étapes des instructions .....	30
Figure III.3: Diode Schottky Al/n-SiC .....	31
Figure III.4: Spécification de maillage .....	32
Figure III.5: Spécification des regions .....	34
Figure III.6 : Définition de dopage. ....	35
Figure III.7 : Structure de la diode Schottky à base de 6H-SiC .....	40
Figure III.8.1 : Caractéristique I-V linéaire de la diode Schottky.....	41
Figure III.8.2 : Caractéristique I-V de la diode Schottky à l'échelle logarithmique .....	41
Figure III.9.1: Caractéristique I-V de la diode pour différentes épaisseurs de la couche 6H-SiC à l'échelle logarithmique.....	42
Figure III.9. 2 : Caractéristique I-V de la diode pour différentes épaisseurs de la couche 6H-SiC. ....	43
Figure III.10.1 : L'effet de changement d'épaisseur d'Aluminium sur la caractéristique I-V..	44
Figure III.10.2 : L'effet de changement d'épaisseur d'Aluminium sur la caractéristique I-V à l'échelle semi-logarithmique. ....	45
Figure III.11.1 : l'effet de changement de métal sur la caractéristique I-V .....	46
Figure III.11.2 : l'effet de changement de métal sur la caractéristique I-V à l'échelle semilogarithmique. ....	47
Figure III.12.1 : L'effet de température sur la caractéristique I-V.....	48
Figure III.12.2 : L'effet de température sur la caractéristique I-V à l'échelle logarithmique ..	48
Figure III.13.1 : L'effet de concentration de dopage sur la caractéristique I-V.....	49
Figure III.13.2: L'effet de concentration de dopage sur la caractéristique I-V à l'échelle semilogarithmique. ....	50
Figure III.14.1 : L'effet de changement de semiconducteur (SiC par Si) .....	51
Figure III.14.2 : L'effet de changement de semiconducteur (SiC par Si) à l'échelle logarithmique.....	51

## Liste des abréviations

$\Phi_b$ : barrière de potentiel de la diode Schottky

$\Phi_m$ : travail de sortie du métal

$\chi$ : affinité électronique

$E_c$ : énergie de la bande de conduction

$E_F$ : énergie du niveau de Fermi

$E_v$ : énergie de bande de valence

$E_g$ : Energie de gap

$A^*$ : constante de Richardson de l'émission thermoïonique

$T$ : température

$m^*$ : masse effective de l'électron

$h$ : constante de Planck

$V$ : tension appliquée

$N_c$ : est la densité d'états effectifs des électrons dans la bande de conduction du semi-conducteur.

$\epsilon_s$ : permittivité électrique du semiconducteur

$J$ : densité de courant

$J_s$ : Courant de saturation.

$\Phi_{sc}$ : Travail de sortie de semiconducteur

$K$ : constante de Boltzmann

$A$ : surface de la diode

$R_s$ : résistance série

$n$ : facteur d'idéalité

$w$ : largeur de la zone de déplétion du semi-conducteur.

## Liste des tableaux

Tableau I.1: Propriétés physiques et électriques des semi-conducteurs courants.....	4
Tableau I.2 :Propriétés mécaniques, chimiques et thermiques.....	5
Tableau I.3 : des propriétés de quelques métaux.....	13

## Introduction générale

---

Le carbure de silicium SiC est le matériau clé pour de nombreuses recherches dans l'électronique de puissance d'où la création d'une filière technologique très connue. La commercialisation de composants Schottky SiC est déjà une réalité. Cependant, plusieurs facteurs empêchent cette technologie très prometteuse d'avancer et de prendre une grande part dans les marchés de l'électronique de puissance. A cause de coût très élevé de fabrication, leurs fiabilités et les investissements économiques.

Les composants SiC ont de nombreuses avantages de point de vu tension, densité de puissance et température de fonctionnement. Les domaines d'avionique, le forage pétrolier, ainsi que les capteurs dans l'automobile sont particulièrement exigeants. Pour bien expliquer les propriétés et les limitations des composants SiC, il faut les soumettre à des tests expérimentaux.

L'étude de ce mémoire se base sur la caractéristique de la diode Schottky par le logiciel de simulation Atlas de Silvaco.

Ce document est construit sur trois chapitres

Le premier chapitre donne un aperçu su la technologie en carbure de silicium pour les diodes unipolaires. En conclusion de ce chapitre, des perspectives sont pointées pour faire émerger la technologie en carbure de silicium.

Le deuxième chapitre comporte sur l'étude théorique de la diode Schottky pour les composants de puissance haute tension en carbure de silicium. Nous allons entrer dans les détails de la barrière Schottky

Le troisième chapitre est consacré entièrement à la modélisation de la barrière Schottky.

## **I.1 Introduction :**

Le carbure de silicium (SiC) est le seul composé binaire stable connu de silicium et de carbone. Le SiC est un cristal semi-conducteur à large bande interdite dont les propriétés physiques et électriques sont très intéressantes pour de nombreuses applications. Le besoin de réaliser des composants à base de SiC conduit, très rapidement, de nombreux utilisateurs potentiels à intensifier leurs efforts pour essayer de produire des substrats de qualité satisfaisante [1].

Ce chapitre est un aperçu général des principales propriétés du SiC et de ses applications et nous aborderons aussi ses défauts dans sa structure.

## **I.2 Propriétés du carbure de silicium SiC :**

Le carbure de silicium (SiC) est un semi-conducteur aux propriétés très intéressantes et accordé aux applications suivantes : haute fréquence, haute puissance et haute température. En fait, le carbure de silicium est un semi-conducteur avec une large bande interdite, un champ de claquage électrique élevé, une vitesse de saturation élevée et une conductivité thermique élevée. Toutes ces caractéristiques ont ouvert plusieurs opportunités technologiques modernes pour les composants électroniques à base de SiC. Les propriétés électroniques et optiques du SiC ont permis de réaliser une variété d'applications électroniques et optoélectroniques dans de multiples domaines : microstructures, composants optoélectroniques, applications à haute température [1].

### **I.2.1 Propriétés cristallographiques des SiC**

La structure du carbure de silicium est connue pour la diversité de sa séquence d'empilement de plans atomiques, ce qui conduit à de nombreux polytypes. La structure de ces polytypes est déterminée par la disposition des unités de carbure de silicium. Chaque unité est décrite par sa propre structure cristalline : on cite C : système cubique, H : système cristallin hexagonal, R : système rhomboédrique. Les polytypes les plus importants techniquement sont les structures 3C, 4H et 6H-SiC. Généralement, le 3C-SiC est connu pour

les applications à basse température, tandis que les polytypes 4H-SiC et 6H-SiC sont utilisés pour les applications à haute température. Afin de répondre à l'application des composants à base de SiC, il est essentiel de contrôler le polytype pendant le processus de croissance cristalline. En 1977, les premiers composants électroniques à base de SiC avec différents polytypes (4H-SiC, 6H-SiC et 3C-SiC) ont été fabriqués, tels que les LED (diodes électroluminescentes) [1].

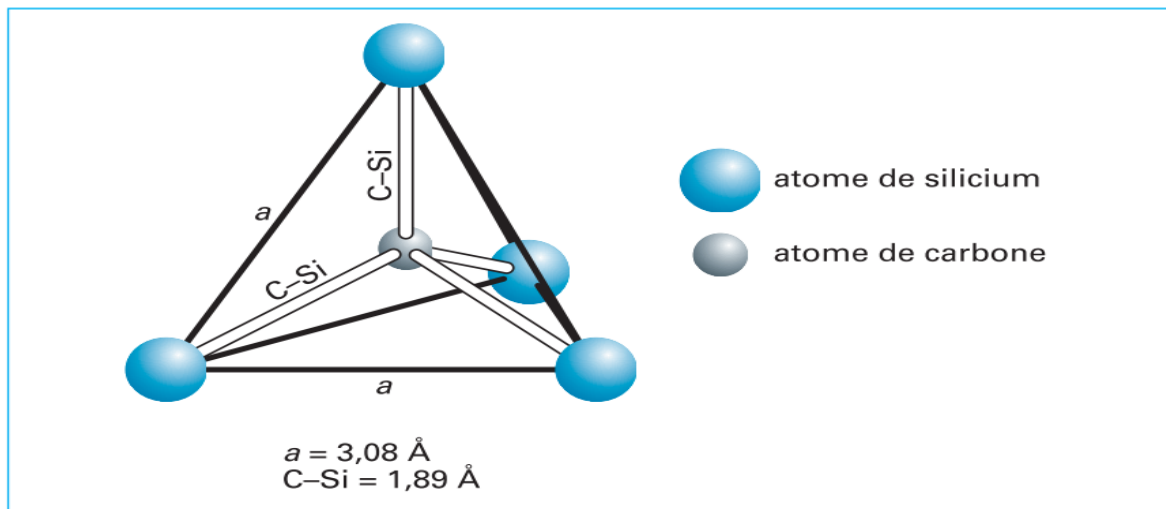


Figure I.1 : La maille élémentaire du carbure de silicium [2].

### I.2.2 Propriétés physiques/électriques :

Outre les excellentes propriétés mécaniques, chimiques et thermiques du carbure de silicium, ses propriétés physiques/électriques présentent également des avantages majeurs par rapport aux autres semi-conducteurs traditionnellement utilisés en électronique de puissance. Le carbure de silicium est un semi-conducteur à large bande interdite. La bande passante du polytype 4H est de 3 eV, soit environ 3 fois la bande passante du silicium. Il en résulte une très faible densité de porteurs intrinsèques. Par conséquent, le courant de fuite est plus faible et il peut fonctionner à des températures plus élevées. Comme le silicium, les trois polytypes de carbure de silicium sont des semi-conducteurs à bande interdite indirecte. Le champ critique est presque dix fois celui du silicium et la conductivité thermique est au

moins le double de celle du silicium. La mobilité est cependant inférieure pour les deux types de porteurs [2].

Propriété	Si	SiC-4H	SiC-6H
$E_G(\text{eV})$	1.12	3.23	3.00
$\mu_n(\text{cm}^{-2}\text{V}^{-1}\text{s}^{-1})$	1450	950	400
$\mu_p(\text{cm}^{-2}\text{V}^{-1}\text{s}^{-1})$	471	120	101
$v_{sat} (10^7 \text{cm s}^{-1})$	1	1.9	1.5
$E_C(10^6 \text{V cm}^{-1})$	0.25	2	2.4
$\lambda(\text{W cm}^{-1}\text{K}^{-1})$	1.56	3.7	4.9
$\epsilon_r$	11.9	9.66	9.66

Tableau.1 : Propriétés physiques et électriques des semi-conducteurs courants [2].

### I.2.3 Propriétés mécaniques, chimiques et thermiques :

La première application de carbure de silicium a profité des propriétés mécaniques et chimiques du matériau. Pendant longtemps, le carbure de silicium a été utilisé exclusivement dans la production de :

- Des poudres abrasives
- Outils de découpe
- Céramiques de revêtement
- Revêtements résistants aux agents chimiques corrosifs.

Le tableau répertorie les trois polytypes les plus couramment utilisés en électronique de puissance et certaines des propriétés mécaniques, chimiques et thermiques du silicium

Propriété à 300K	Si	SiC-3C	SiC-4H	SiC-6H
Dureté (échelle Mohs) [16]	7	9.2-9.3	9.2-9.3	9.2-9.3
Module d'élasticité isostatique $c_{11}$ (GPa) [17,18]	165.6	-	507	501
Microdureté superficielle ( $\text{kgmm}^{-2}$ ) [19,20]	1150	2900-	2900-	2900-
Coefficient de dilatation linéaire ( $\mu^\circ\text{C}^{-1}$ ) [16,20]	2.6	3.8	-	4.3-4.7
Température de fusion (K) [21]	1687	3103 <sup>1</sup>	3103 <sup>1</sup>	3103 <sup>1</sup>
Conductivité thermique ( $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ ) [16]	148	360	370	490
Chaleur spécifique ( $\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$ ) [16,21]	700	690	690	690
Température de Debye (K) [16,21]	645	1200	1300	1200
Densité ( $\text{gcm}^{-3}$ ) [22,23]	2.33	3.2	3.211	3.2
Masse molaire ( $\text{gmo}^{-1}$ ) [24]	27.98	40.09 <sup>2</sup>	40.09 <sup>2</sup>	40.09 <sup>2</sup>

Tableau I.2 : Propriétés mécaniques, chimiques et thermiques [2].

### I.3 Domaines d'application envisageables avec le carbure de Silicium :

#### I.3.1 Applications hautes températures :

Ce champ d'application couvre non seulement le cas des composants utilisés dans un environnement hautes températures, mais aussi les composants de puissance ou ceux dont le refroidissement pose problème. Le gap et la très faible densité de porteurs intrinsèques font que le SiC conserve des propriétés semiconductrices «normales» à très haute température, jusque vers 700K environ. En effet, la densité de porteurs intrinsèques variant exponentiellement avec le ratio gap/température, le dopage intentionnel du matériau reste prépondérant devant la génération thermique de porteurs jusqu'à des températures élevées [3].

#### I.3.2 Applications radiofréquences :

Les avantages en termes de comportement technique et de champ de claquage sont intéressants dans ce domaine aussi. La vitesse limite des porteurs est un intérêt supplémentaire par rapport au silicium dans le cas du SiC, et beaucoup de démonstrations ont été réalisés.



Cependant la mobilité un peu faible est pénalisante, d'autant plus qu'elle s'accompagne d'un auto-échauffement des dispositifs [3].

### **I.3.3 Applications optoélectroniques :**

Le SiC permet de réaliser des composants optoélectroniques dans le vert profond, le bleu et l'ultraviolet, à la limite du spectre visible. Cette gamme de longueurs d'ondes a longtemps fait défaut à l'industrie de l'électronique et des affichages, interdisant la création d'écrans couleur plats.

Cependant, à cause du gap indirect du SiC, les LEDs présentent des faibles rendements lumineux, et une brillance assez faible. Le SiC est aujourd'hui plutôt utilisé comme substrat pour les dépôts de couches beaucoup plus efficaces (InGaN pour le vert et le bleu, ses performances techniques et son relatif accord de maille cristallographique avec GaN étant alors des atouts notoires. Ces propriétés sont mises à profit dans la réalisation de diodes laser bleus en GaN sur SiC [3].

### **I.3.4 Applications de puissance :**

Le champ de claquage du SiC est 10 fois supérieur à celui du Silicium. Cela signifie que dans un composant de puissance réalisé en SiC, les zones destinées à tenir la tension peuvent être 10 fois plus minces et 10 fois plus dopées. À conduction majoritaire (MOSFET, diodes Schottky par ex.) peut être très largement étendu au domaine des fortes tensions et des forts courants. En Silicium, ce type de composant est limité par le compromis surface/tendue en tension/état passant, qui le réserve aux basses tensions. En SiC, des composants de plusieurs kV ont été réalisés et ont démontré la faisabilité de telles structures [4].

L'impact de ce fort champ de claquage se répercute aussi sur les performances en commutation de leur même composant majoritaire. Le SiC qui permet de réduire les surfaces de semiconducteur mises en œuvre permet aussi de limiter les pertes en commutation [3].

## **I.4 Dopage :**

Pour améliorer la conductivité électrique des semi-conducteurs on utilise la technique du dopage. On distingue deux types de dopage : le dopage de type N et le dopage de type P.

**I.4.1 Dopage type N :**

Le dopant de type n principal est l'azote. Il se place en substitution des atomes de carbone dans le réseau. Puisqu'il occupe trois sites non équivalents dans le réseau SiC, on doit avoir trois énergies d'ionisation différentes, et donc trois niveaux donneurs peuvent être positionnés dans la bande interdite. Il en est de même pour les accepteurs. En réalité, on ne distingue que deux niveaux, ce qui signifie que le niveau énergétique des dopants est essentiellement lié au site cubique ou hexagonal de l'impureté [5].

Un autre dopant de type n, a été utilisé comme élément implanté: le phosphore. Troffer et al obtiennent une conduction de type n par implantation de phosphore après un recuit à au moins 1400 °C [5].

**I.4.2 Dopage type P :**

Pour obtenir du SiC dopé type p, il existe deux solutions couramment employées, à savoir le dopage in-situ, et l'implantation d'atome accepteur (typiquement de l'Aluminium ou du Bore) dans des substrats non dopés (souvent de type n). On emploie de préférence l'implantation à la diffusion car dans le SiC, les impuretés possèdent un faible coefficient de diffusion. Mais cette méthode est loin d'être idéal car elle nécessite des recuits à haute température (1750 °C), afin d'activer électriquement les dopants et réduire les dommages causés à la structure cristalline au cours de l'implantation. Celle-ci peut conduire à la dégradation du système élaboré, s'il s'agit, par exemple, d'hétéro structure. [4].

**I.5 Les défauts structuraux dans le SiC :**

Les progrès réalisés par les techniques de sublimation ont permis l'élaboration de grands lingots de SiC de bonne qualité et ont rendu possible la commercialisation de substrats jusqu'à 75 mm de diamètre. La principale limitation la commercialisation des composants SiC porte sur la qualité du matériau dont la densité de défauts, tels que dislocations et micropipes, reste encore élevée [6].

**I.5.1 Les micropipes:**

Les défauts macroscopiques appelés "micropipes" sont des défauts hexagonaux correspondant aux microtubes vides traversant le lingot de SiC, qui émergent à la surface au centre d'une spirale [6].

Le rayon de ces tubes varie de quelques dizaines de nanomètres à plusieurs dizaines de micromètres. Ces défauts sont générés pendant la croissance du cristal et le traversent entraînant une détérioration de ses qualités électroniques.

Ces micropores se développent pendant la croissance du matériau essentiellement à partir de deux sources : les micropores qui existent déjà dans l'utilisation dans le germe cristallin utilisé lors d'une croissance par le procédé Lély modifié et les inclusions incorporées pendant la croissance. La déformation locale provoquée par l'incorporation d'impuretés pendant sa croissance aboutissent à la formation de dislocations-vis ou de micro-pores [6].

### **I.5.2 Les dislocations :**

La commercialisation des dispositifs SiC reste limitée par la présence des défauts structuraux autres que les micropipes. Dans le SiC comme dans les autres types de cristaux, il existe deux grandes familles de dislocations : les dislocations « vis » et les dislocations « coin ». La formation des dislocations dans les cristaux SiC a été étudiée par plusieurs auteurs. D'après Dudley et al., la nucléation des dislocations vis peut se produire à partir des inclusions telles que les particules de graphite ou les gouttes de silicium qui s'incorporent dans le matériau SiC pendant la croissance [6].

Dans tous les cas, une dislocation est une voie privilégiée de migration des impuretés, métalliques par exemple, vers l'intérieur du cristal et la couche active du composant. Ce mécanisme de migration peut affecter la durée de vie des composants [6].

### **I.5.3 Fautes d'empilement :**

Les fautes d'empilement résultent d'un changement dans la séquence d'empilement des couches atomiques du cristal. La formation de ces défauts peut être due à la déformation plastique du matériau, qui se traduit par un glissement d'une dislocation-coin parfaite parallèle au plan de base qui prend alors un caractère vis [6].

Ces fautes d'empilements constituent des centres de recombinaison responsables de la chute dramatique de la durée de vie des porteurs minoritaires et donc de l'augmentation de la chute de tension en régime direct pour les diodes bipolaires. La Création spontanée et Migration de défauts d'empilement dans l'état de polarisation directe des composants bipolaires est accusée d'être à l'origine de la dégradation observée des performances de ces types de composant [6].

## I.6. Procédés d'élaboration du SiC:

Des protocoles (techniques) expérimentaux suggérés pour obtenir du SiC sont variés mais plus ou moins maîtrisés. Un descriptif concis des principaux procédés d'élaboration employés est à présent proposé. Nous focalisons sur les synthèses à mémoire de forme, les méthodes d'élaboration du matériau massif et les méthodes d'élaboration des couches minces de SiC [7].

### I.6.1. Synthèse à mémoire de forme :

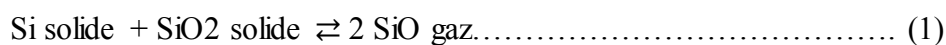
C'est une réaction de type gaz-solide, du monoxyde de silicium SiO qui va attaquer un noyau carboné pour le transformer en SiC. Le noyau carboné garde sa forme macroscopique après synthèse d'où le nom de « synthèse à mémoire de forme ».

Cette méthode a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre aussi bien à l'échelle du laboratoire qu'à l'échelle du pilote industriel. De plus, lors de ce procédé, il n'y a pas de sous produits nocifs ou corrosifs qui se forment à l'exception du monoxyde de carbone facilement oxydable [8].

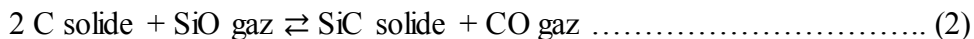
#### I.6.1.1 La synthèse au laboratoire :

Dans la partie du haut est placé un solide carboné préformé qui préfigure la forme finale du SiC après synthèse [6].

A haute température, 1200 – 1300 °C, la silice va réagir avec le silicium et ainsi générer de la vapeur de SiO :



Cette vapeur va ensuite attaquer le carbone pour former du carbure de silicium (SiC) sous sa forme  $\beta$  et du CO. Le CO est continuellement pompé tout au long de la synthèse et permet de déplacer l'équilibre de réaction vers la formation du SiC.



Il est bien évident que la présence d'oxygène à cette température de synthèse est à proscrire, c'est pourquoi cette synthèse est réalisée sous vide dynamique. Ce dernier contribue par la même occasion à déplacer l'équilibre vers la formation du SiC en pompant en dehors de la zone de synthèse le monoxyde de carbone généré au cours de la réaction (2) [6].

### I.6.1.2 Synthèse industrielle :

La méthode de synthèse originelle développée au laboratoire a ensuite été modifiée en collaboration avec les chercheurs de Pechiney afin d'obtenir un procédé adapté aux contraintes économiques, industrielles et de produire du carbure de silicium de différentes morphologies telles que des grains ou des mousses,... [6].

Les différentes formes de SiC correspondent à un besoin spécifique en fonction des applications visées, i.e. lit fixe pour les applications en chimie ou pétrochimie ou comme catalyseur dans les réactions de dépollution catalytique des gaz d'échappement d'automobile [6].

## I.6.2 SiC massif monocristallin :

### I.6.2.1 Méthode de Lely (1995) :

Cette méthode demeure à l'heure actuelle la voie de synthèse moyenne pour élaborer des monocristaux massifs de carbure de silicium par sublimation de SiC poly cristallin [7].

La chambre de croissance de la procession de lely en 1955 est constituée d'un tube en graphite poreux entouré de la poudre de SiC poly cristallin. Cette dernière est chauffée à 2500°C sous atmosphère d'argon. Elle se sublime et donne un mélange de vapeurs de Si, de C, de Si<sub>2</sub>C et SiC<sub>2</sub>. Ces vapeurs se condensent spontanément sur les parois de réacteur ou elles cristallisent sous forme de cristaux de SiC [7].

### I.6.2.2 Méthode de Lely modifiée (1978) :

En 1978, Yu.M. Tairov et V.F. Tsvetkov ont introduit un germe monocristallin de polytype désir et de la poudre de SiC, qui sert de source, aux deux extrémités d'une enceinte

le long de laquelle est créé un gradient de température sous faible pression d'argon et à une température d'environ 2200°C, la poudre de SiC se sublime en produisant des vapeurs qui ne se condensent plus de manière aléatoire sur la paroi en graphite mais sur le germe plus froid. C'est le gradient de température entre la poudre et le germe qui est à l'origine du transport des espèces [6].

Cette technique est industriellement utilisée pour la production des lingots de 20 mm d'épaisseur et 100 mm de diamètre pour les polytypes 4H-SiC et 6H-SiC à des vitesses de croissance voisines de 4 mm/h [7].

Cependant il est difficile de maîtriser la croissance du polytype 3C par cette technique, car ce polytype est le moins stable de toutes les variétés allotropiques [7].

### **I.6.3 Couches minces de SiC sur le Silicium :**

#### **I.6.3.1 Épitaxie par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) :**

La technique de dépôt par CVD est largement utilisée. On trouve couramment dans le commerce des bâtis industriels qui travaillent tous en phase vapeur, soit à la pression atmosphère soit sous pression réduite. En fonction du but recherché, les températures de dépôt peuvent varier de 1300 et 1800 °C. En principe, à 1350°C, c'est le polytype 3C SiC qui se dépose sur le silicium (hétéro-épitaxie). Par contre, à plus haute température, à partir de 1500 °C, ceux sont les polytypes 4H-SiC et 6H-SiC qui se déposent sur des substrats 4H-SiC. Dans ces deux derniers cas, on parlera d'homoépitaxie [6].

Les étapes de découpe dans les lingots synthétisés de SiC de plaquettes fines monocristallines et leur polissage sont très difficiles. L'unique parade à ces difficultés consiste travailler sur des couches minces plutôt que sur SiC massif [7].

Parmi les techniques employées on cite : la technique de dépôt par CVD, déjà mentionnée, l'épitaxie par jet moléculaire (Molecular Beam Epitaxy , MBE) ,...[7].

#### **I.6.3.2 Epitaxie par jet moléculaire (MBE) :**

Cette réaction a lieu sous ultra vide. Les précurseurs solides sont placés dans des creusets eux même placés dans des réceptacles munis d'une faible ouverture. Aussi, lorsque l'on chauffe les différents creusets, il en émane des vapeurs sous forme de jets moléculaires, dirigés vers le substrat cible [6].

La MBE présente l'avantage de pouvoir modifier facilement et précisément les débits gazeux. Aussi, on peut constater in-situ les modifications apportées grâce à l'ultra vide, aussi bien au

niveau de la composition des couches que sur les vitesses de croissance. Ces dernières, particulièrement basses (quelques centaines de nm/h), permettent de contrôler la croissance quasiment à l'échelle de la couche atomique. De plus, la mise en œuvre d'un tel procédé reste lourde, principalement à cause de l'ultravide et si l'on ajoute les faibles vitesses de dépôt, il apparaît évident qu'une telle technique n'est pas adaptée au monde industriel [6].

### I.7 Les polytypes de SiC :

Le carbure de silicium (SiC) fait l'objet d'une attention particulière de la part de la communauté scientifique. Une des particularités majeures du SiC sont polytypisme c-à-d la possibilité pour ce matériau de cristalliser sous différentes formes comme le montre la figure I.2 [8].

Notation de Ramsdell		Séquence d'empilement	Notation de Jagodzinski	Nombre de sites de Si (ou C) non équivalents
3C (blende)	$\beta$	ABC...	k	1
2H (wurzite)	$\alpha$	AB...	h	1
4H		ABAC...	hk	2
6H		ABCACB...	hkk	3
15R		ABCBACABACBCACB...	hkkhk	5

Figure I.2: Notation des principaux polytypes du SiC [9].

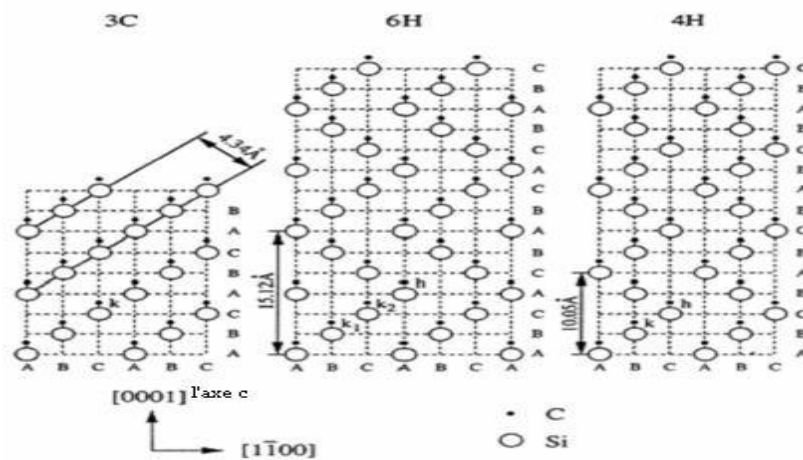


Figure I.3: Polytypes du SiC les plus courants [9].

### I.8 Propriétés de quelques métaux :

L'Aluminium est un bon conducteur de la chaleur et de l'électricité et il possède une faible masse volumique [10].

C'est un métal argenté et malléable, de numéro atomique  $Z=13$   $M=26.974$  ; il est remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité qui est de 2,7. Il a une température de fusion relativement basse, de l'ordre de  $660^{\circ}\text{C}$  [6].

Propriétés des métaux	Aluminium (Al)	Silver (Ag)	Cuivre(Cu)
$e.\phi_m$ (eV)	4.1	4.3	4.4
Masse volumique	$2.7(\text{ kg/dm}^3)$	$10.5 \times 10^3(\text{ kg/m}^3)$	$8.92(\text{kg/m}^3)$
Température de fusion ( $^{\circ}\text{C}$ )	660	961.9	1084

Tableau I.3 : Propriétés de quelques métaux [10].

### I.9 Conclusion :

Aujourd'hui, le SiC est employé dans les composants électroniques devant fonctionner à température élevée, ou sous des tensions élevées.

Dans ce chapitre, les différentes propriétés des matériaux, les applications, les polytypes et les défauts du SiC sont discutées.



## II.1 Introduction :

Au cours de ce chapitre et dans une première partie nous allons expliquer ce qui se passe, si on réalise une jonction entre un métal et un semi-conducteur. Dans la deuxième partie nous allons étudier quelques métaux et matériaux semi-conducteurs utiles pour notre recherche sur la diode Schottky.

## II.2 Structure métal/ semi-conducteur :

La combinaison métal/semi-conducteur M-S peut créer un contact redresseur (Schottky) ou bien à un contact ohmique, cela dépend du type des matériaux utilisés. Cette structure crée des composants unipolaires (signifie qu'un seul type de porteur (électron ou trou) participe à la conduction électrique [11].

Le contact métal/semi-conducteur nécessite la compréhension des différents mécanismes comme par exemple le transfert de charge entre deux matériaux, l'un est un métal, l'autre est un semi-conducteur aussi connaître les paramètres suivants :

- La barrière de potentiel
- Le travail de sortie de métal ( $\phi_M$ )
- L'affinité électronique des semi-conducteurs ( $\chi$ )
- La hauteur de la barrière de potentiel (SBH) [12].

### II.2.1 Barrière de potentiel (barrière Schottky)

La jonction métal/semi-conducteur, crée un équilibre thermodynamique où les niveaux de Fermi du métal seront alignés avec celle du semi-conducteur. Contrairement au niveau du vide, au moment où la bande de valence et la bande de conduction dans le SC gardent leurs positions respectives par rapport au niveau de Fermi du fait de la différence des travaux de sortie de chacun des matériaux. Nous allons observer l'apparition d'une courbure de bande du côté semi-conducteur près de la zone de contact. Cette courbure (vers le haut ou vers le bas) forme une barrière de potentiel qui s'oppose au déplacement des porteurs [12].

$$q\phi_b = q\phi_M - q\phi_{sc} \quad (\text{II.1})$$

### II.2.2 Travail de sortie de métal $\phi_M$ :

Le travail de sortie du métal  $e\phi_M$  est défini comme l'énergie minimale requise et fournie aux électrons au niveau de Fermi pour les arracher du métal et les amener dans le vide. Par conséquent, le travail de sortie du métal est : [13]

$$e\phi_M = N_V - e\mu_m \quad (\text{II.2})$$

### II.2.3 Le travail de sorties $\phi_{MS}$ du semi-conducteur :

Défini comme l'énergie qui doit être fournie pour extraire des électrons du niveau de Fermi  $E_{FS}$  au niveau du vide [13].

$$e\phi_{SC} = N_V - E_{SC} \quad (\text{II.3})$$

### II.2.3 L'affinité électronique $\chi$ :

L'affinité électronique d'un semi-conducteur représente l'énergie fournie à un des électrons de la bande de conduction pour sauter vers le niveau du vide [11].

## II.3 Cas du contact métal / semi-conducteur dopé N :

Lorsque le métal et le semi-conducteur sont en contact, la structure de la bande à l'interface est déterminée par la différence entre le travail de sortie du métal  $\phi_{em}$  et le travail de sortie du semi-conducteur  $\phi_{esc}$  [14].

### II.3.1 Régime des bandes plates :

Dans ce cas, les niveaux du vide est le même, lorsque les deux matériaux sont séparés ; il en est de même pour les niveaux de Fermi. Une barrière énergétique est établie à l'interface métal/semiconducteur et il n'y a pas d'échange électronique entre les matériaux, car le niveau de Fermi n'est pas modifié ( $\phi_M = \phi_{sc}$ ) [11].

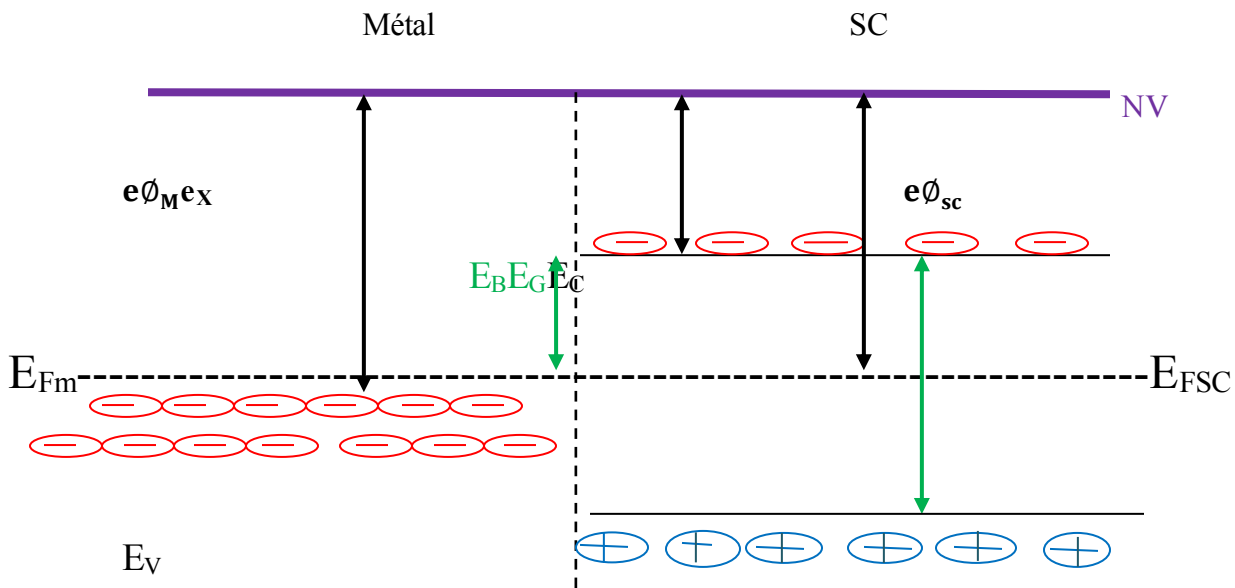


Figure II.1 régime des bandes plates ( $\phi_M = \phi_{sc}$ ) [11]

### II.3.2 $\phi_M > \phi_{sc}$ à l'équilibre :

Le travail de sortie de métal est supérieur à celui de semi-conducteur. Pour aligner les niveaux de Fermi au moment du contact, il faut diminuer le niveau de Fermi du semi-conducteur par rapport à celui du métal. Pour que les électrons quittent le semi-conducteur vers le métal. Si le semi-conducteur est dopé N.

Dans le métal, il y se produit une accumulation d'électrons à l'interface. La densité dans le métal est de  $10^{22} \text{cm}^{-3}$  et la densité des donneurs est l'ordre de  $10^{16} \text{cm}^{-3}$  à  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  dans les semi-conducteurs, par conséquent la zone de charge d'espace prend plus de largeur dans les semi-conducteurs, et ils sont bien concentrés dans le métal. Avec ces deux zones chargées, nous pouvons corrélérer une tension de diffusion  $V_0$  ; cela équilibrera les forces de diffusion et aboutira à un état d'équilibre [13].

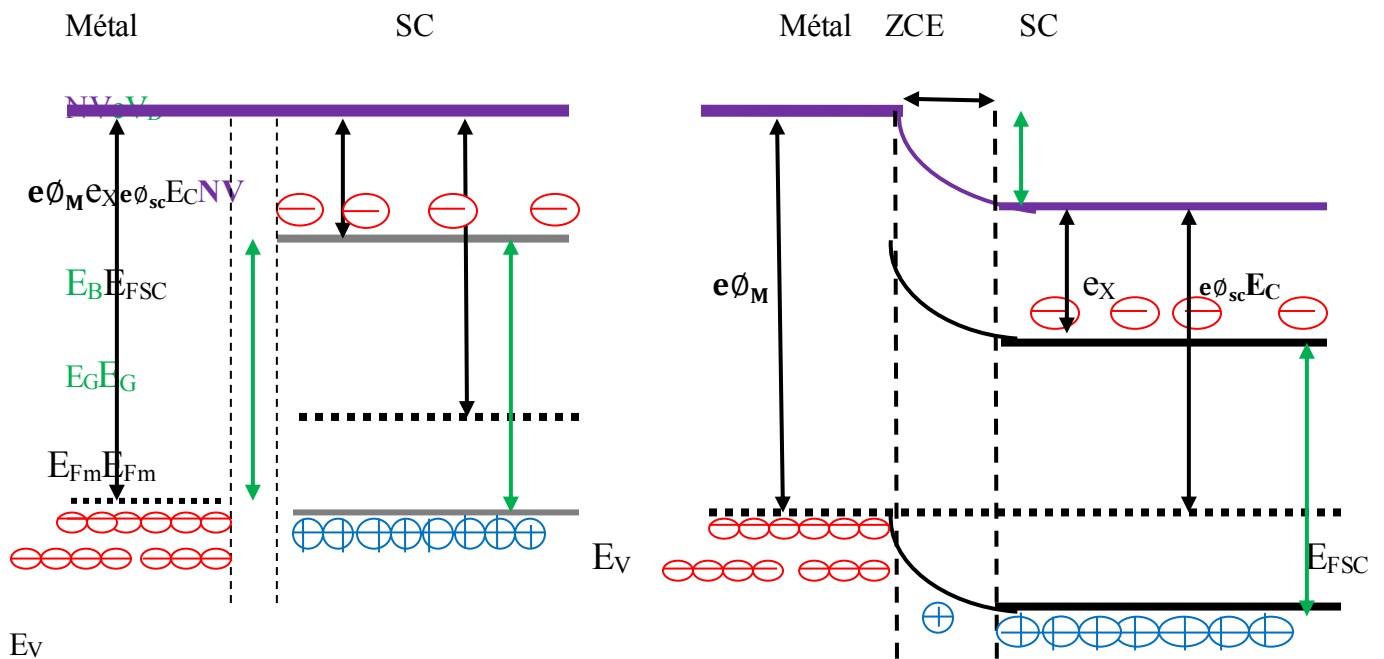


Figure II.2: régime à l'équilibre ( $\phi_M > \phi_{sc}$ ) [11]

### II.3.3 $\phi_M > \phi_{sc}$ sous polarisation:

Si on polarise positivement le métal par rapport au semi-conducteur par une tension  $V$ , on va décaler le niveau des bandes d'énergie du semi-conducteur vers le haut. La courbure dans le semi-conducteur (à la jonction) va s'atténuer.

La barrière énergétique entre le semi-conducteur et le métal diminue, alors qu'elle reste inchangée en sens inverse. Des électrons du semi-conducteur vont diffuser plus facilement vers le métal. Un courant positif apparaît orienté du métal vers le semi-conducteur. C'est une configuration de diode polarisée en direct. Quand la tension  $V$  sera égale à  $V_0$ , on se retrouve dans le régime de bandes plates.

Si on polarise positivement le semi-conducteur par rapport au métal, on va décaler le niveau des bandes d'énergie du semi-conducteur vers le bas.

On augmente la barrière qui s'oppose à la diffusion des électrons vers le métal. C'est une configuration de diode polarisée en inverse [11].

$\Phi_m > \Phi_s$  et pour un semi-conducteur de type N, la structure a le comportement d'une diode appelée diode Schottky.

Contact redresseur : diode schottky

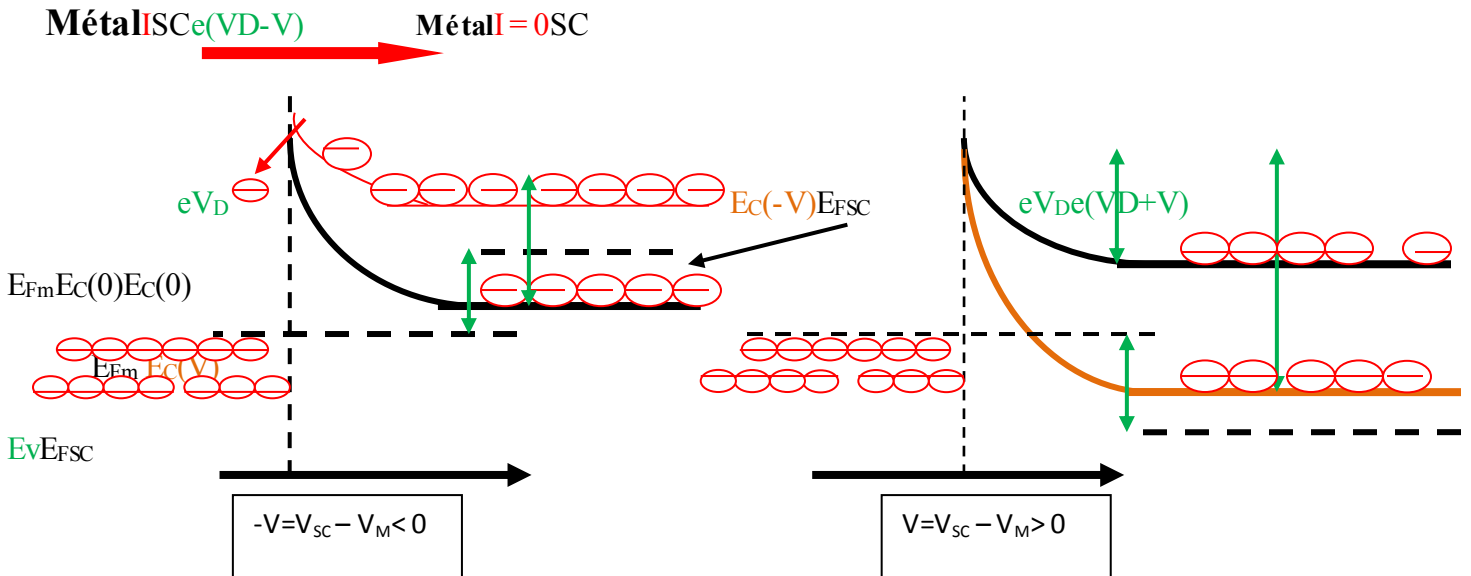


Figure II.3: contact schottky ( $\phi_M > \phi_{sc}$  sous polarisation) [11]

**II.3.4  $\phi_M < \phi_{sc}$  à l'équilibre :**

Si les niveaux de Fermi sont alignés et l'affinité électronique est fixe, on constate que le niveau énergétique pour les électrons est plus faible du côté du semi-conducteur (au voisinage de la jonction), alors les électrons vont donc diffuser du métal vers le semi-conducteur et par conséquent il apparaît un déficit d'électrons du côté du métal (Figure II.6). On a donc une zone de charge d'espace positive dans le métal et négative dans le semi-conducteur. La différence avec le cas précédent, c'est que la zone de charges d'espace dans le semi-conducteur correspond à un régime d'accumulation et non de déplétion [13].

**ZD : régime de déplétion ( absence de charges libres, présence d'ions  $<0$  à l'interface dans le SC)**

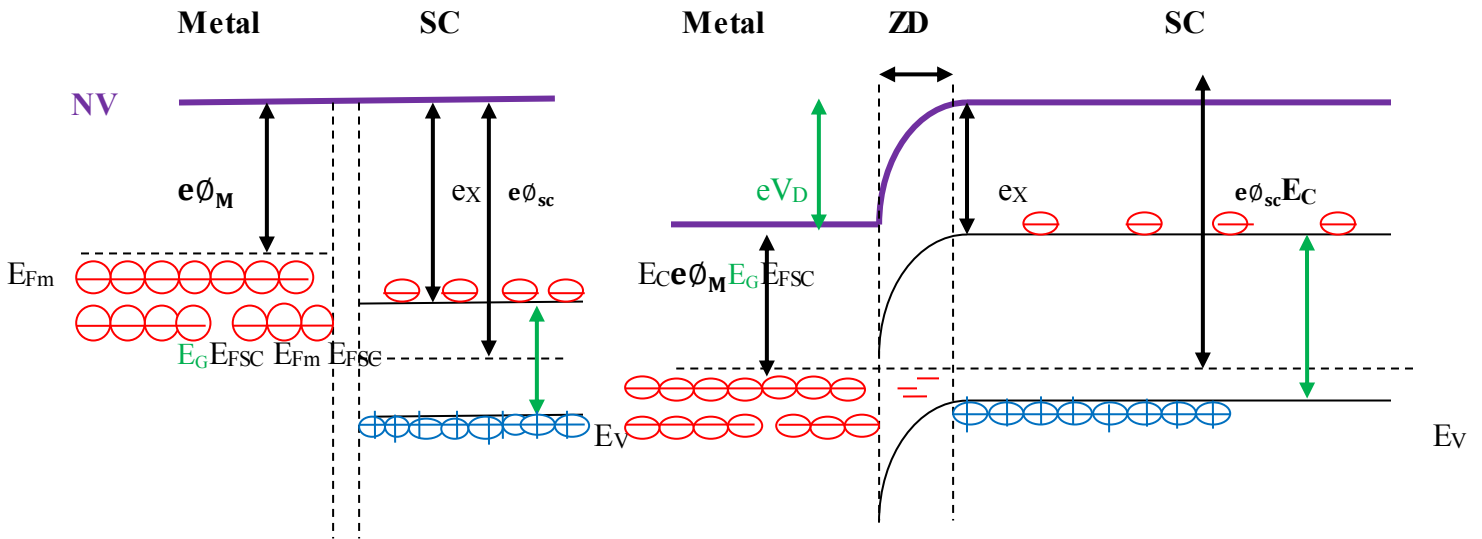


Figure II.4 :  $\phi_M < \phi_{sc}$  à l'équilibre[11]

### II.3.5 $\phi_M < \phi_{sc}$ sous polarisation:

La polarisation de la structure dans ce cas va se distribuer dans tout le semi-conducteur. Ce dernier est beaucoup plus résistif que le métal. Le comportement du semi-conducteur est résistif. La jonction a un comportement ohmique.

Un électron qui arrive à l'interface passe librement du métal au semi-conducteur ou inversement. En effet, il n'y a plus de zone isolante à l'interface et la tension appliquée n'est plus localisée dans une zone de déplétion, mais répartie dans toute la zone semi-conductrice.

On aura donc dans cette zone un champ électrique, orienté du métal vers le semi-conducteur si la tension  $V$  est négative et du semi-conducteur vers le métal si la tension  $V$  est positive [15].

**Contact ohmique**

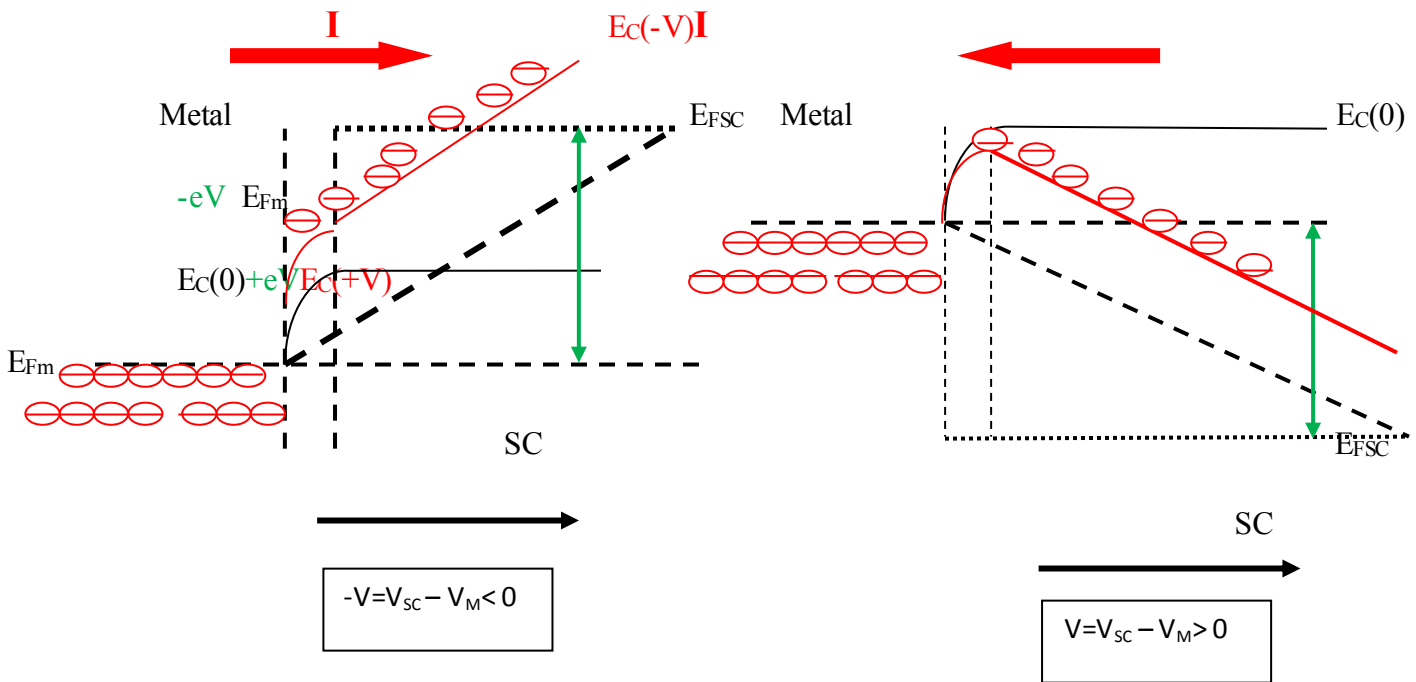


Figure II.5:contact ohmique( $\phi_M < \phi_{sc}$  sous polarisation) [12]

**II.4 Mécanismes de conduction de la diode Schottky :**

**II.4.1 Théorie d'émission thermoïonique:[14]**

En 1928 Owen Richardson reçoit le prix Nobel pour son travail sur le phénomène thermoïonique et plus spécialement pour la découverte de la loi portant maintenant son nom. Dans la théorie de l'émission thermoïonique, le gradient du quasi-niveau de Fermi est négligé. Ceci implique que le quasi-niveau de Fermi dans le semi-conducteur est plat. La concentration des électrons du côté semi-conducteur de l'interface M/S est augmentée par un facteur  $(qV/kT)$  quand une tension de polarisation est appliquée.

$$n = N_c \exp\left[-\frac{q(\phi_B - V)}{kT}\right] \tag{II.4}$$

$N_c$  est la densité d'états effective des électrons dans la bande de conduction du semi-conducteur.

$\phi_B$  la hauteur de la barrière Schottky (en eV).

$V$  : la tension appliquée.

$J$  : La densité du courant dû à l'émission thermoionique des électrons au-dessus de la barrière est donnée par l'expression :

$$J = J_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{II.5})$$

Où  $J_0$ , selon la loi de Richardson, est :

$$J_0 = A^* T^2 e^{-q\phi_B/kT} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$A^* = 4\pi m^* q K^2 / h^3 \quad (\text{II.7})$$

$m^*$  : La masse effective des électrons dans le semi-conducteur.

$h$  : la constante de Planck. [16]

#### II.4.2 Théorie de diffusion:[14]

La théorie de diffusion suppose que les électrons migrent du semi-conducteur vers le métal par-dessus de la barrière de potentiel, en traversant la zone appauvrie du semi-conducteur, ce qui restreint le courant direct. En effet ce dernier est limité par la diffusion des porteurs à travers le champ électrique dans la zone de charge d'espace. La concentration des électrons dans le côté semi-conducteur de l'interface de M/S est donnée par :

$$n = N_c \exp \left[ - \frac{q (E_c - E_F)}{kT} \right] \quad (\text{II.8})$$

La densité du courant dans la région de déplétion dépend du champ local et du gradient de concentration comme le montre l'équation suivante:

$$J = qn\mu E + qD \frac{dn}{dx} \quad (\text{II.9})$$



Où  $E$  est le champ électrique de la barrière,  $D_n$  le coefficient de diffusion et  $\mu$  la mobilité d'électron. L'équation finale de la caractéristique de densité du courant-tension est la suivante :

$$J = J_0(e^{qV/kT} - 1) \quad (\text{II.10})$$

Où la densité du courant de saturation  $J_0$  est:

$$J_0 = \mu \cdot (e^{-q\phi_B/kT}) \quad (\text{II.11})$$

Le champ électrique maximum dans la jonction est donné par :

$$E_{\max} = qND \frac{W}{\epsilon_s} \quad (\text{II.12})$$

$W$  est largeur de la zone de déplétion du semi-conducteur [4].

### II.4.3 Théorie d'émission-diffusion : [14]

Dans cette théorie on définit une vitesse de recombinaison  $v_r$  au maximum potentiel. La densité de courant au sommet de la barrière est :

$$J = (nm - n_0) \quad (\text{II.13})$$

Où  $nm$  est la densité des électrons à  $x_m$  (position du potentiel maximum) quand une tension de polarisation est appliquée

$$nm = Nc \exp\left[-q\left(\phi_B - \frac{\phi(x_m)}{kT}\right)\right] \quad (\text{II.14})$$

$n_0$  : est la densité des électrons à  $x_m$  sous la condition de quasi-équilibre : Où  $(x_m)$  est le quasi-niveau de Fermi (en eV) à  $x_m$  sous une tension de polarisation  $V$ .

$$n_0 = Nc \exp(-q\phi_B / kT) \quad (\text{II.15})$$

L'expression finale du courant est la même que précédemment (théorie de diffusion et de l'émission thermoionique), la différence réside au niveau du courant de saturation comme le montre la relation suivante :

$$j = A_n \cdot T^2 \exp(-q\phi_{bm}/kt) \cdot (e^{qv/kt} - 1) \quad (\text{II.16})$$

La vitesse de recombinaison est donnée par :

$$v_r = \frac{A \cdot T^2}{qNc} [17] \quad (\text{II.17})$$

### II.4.4 Théorie de l'effet tunnel : [14]

Pour les SC les plus dopés ou bien pour un fonctionnement à basse température, le courant tunnel devient significatif. Ce courant est important dans le contact métal / semi-conducteur. Le courant tunnel est proportionnel au coefficient de transmission (probabilité Tunnel) et à la probabilité d'occupation dans le semi-conducteur et de non occupation dans le métal.

$$J = \frac{A^* T^2}{kT} \int_{E_{Fm}}^{qEb} F_S T(E) (1 - F_m) dE \quad (\text{II.18})$$

$F_S$  et  $F_m$  les fonctions de distributions de Fermi Dirac pour le semi-conducteur et le métal,  $A^{**}$  constante de Richardson [16].

#### II.4.5 Recombinaison dans la zone de charge d'espace : [14]

Le processus de recombinaison dans la région de déplétion dans une diode Schottky est lié à l'existence des centres localisés dans la bande interdite. Selon le modèle de Shockley, Read et Hall (SRH) en 1952, le taux de recombinaison  $U$  dans la ZCE est donné par l'expression suivante:

$$U = \frac{n.p - n_i^2}{\tau_n(n+n_i) + \tau_p(p+n_i)} \quad (\text{II.19})$$

Où  $\tau_n$  et  $\tau_p$  sont la durée de vie des électrons et des trous respectivement dans le semi-conducteur. La densité du courant de recombinaison est donnée par :

$$J = q \int_0^w U(x) dx \quad (\text{II.20})$$

Avec les simplifications suivantes  $n \gg p \gg n_i$ , et  $\tau_n = \tau_p = \tau$ , l'expression de la densité du courant pour des basses tensions positives est donné par :

$$J = J_0 \left( \frac{qV}{2kT} \right) \cdot [1 - \exp(-\frac{qV}{kT})] \quad (\text{II.21})$$

$$\text{Où } J_0 = \frac{q n_i}{W 2\tau}$$

$n_i$  : est la concentration intrinsèque des électrons.

$W$  : la largeur de la ZCE. [15]

#### II.4.6 Recombinaison dans la région neutre (ohmique) :

On a supposé que la tension  $V$ , appliquée à la jonction apparaît en totalité dans la zone de charge d'espace. Mais en réalité, il existe des chutes de tension aux niveaux des régions

neutres. Ces chutes de tension affaiblissent considérablement l'injection des charges et par conséquent le courant, surtout pour les tensions positives assez grandes. Ils sont modélisés par une résistance série ( $R_s$ ). La tension appliquée à la jonction sera donc :

$$V = V_a - R_s. \quad [14]$$

#### II.4.7 Densité de courant total :

L'expression de la densité du courant total  $J_T$  à travers un contact M-S est :

$$J_T = J_{e-m} + J_R + J_{tu}$$

$J_{e-m}$  : densité du courant l'émission-diffusion

$J_R$  : densité du courant de recombinaison

$J_{tu}$  : densité du courant tunnel

Les caractéristiques courant-tension d'une diode Schottky sont généralement décrites par :

$$J = J_s \left( \exp\left(\frac{q(V - J R_s)}{n k T}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.22})$$

$$\text{Où : } J_s = A^* A T^2 \exp(-1^3 \phi B) \quad (\text{II.23})$$

$q$  : Charge élémentaire (c)

$V$  : Tension aux bornes de la jonction (V)

$K$  : Constante de Boltzmann

$T$  : Température (k)

$J_s$  : Densité du courant de saturation de diode (A)

$n$ : Facteur d'idéalité de la diode

#### II.4.8 Modèle à barrière homogène :

En tenant compte de toutes ces considérations : de la résistance série et parallèle, des pertes ohmiques, de la densité du courant de fuite et de la densité du courant de recombinaison on peut modéliser la caractéristique J-V, d'une diode Schottky à barrière homogène par la relation suivante:

$$J = \left[ \exp\left(\frac{q(V - J R_s)}{\eta k T}\right) \right] - 1 \quad (\text{II.24})$$

## II.5 Caractéristique courant –tension :

Le courant est dû aux porteurs majoritaires. A l'interface entre le métal et le semiconducteur, il y a émission thermoélectronique par-dessus de la barrière de potentiel.

Nous allons considérer une structure métal-semi-conducteur de type n, avec  $\phi_M > \phi_{sc}$ .

La densité de courant dans une jonction métal-semi-conducteur peut s'écrire :

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{Bn}}{KT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1\right] \quad (\text{II.25})$$

Où  $A^*$  est la constante de Richardson donnée par :

$$A^* = \frac{4\pi e m_e k^2}{h^3} \quad (\text{II.26})$$

$\pi$ : 3,14

$q$  : charge de l'électron =  $1.6 \cdot 10^{-19}$  C

$m_e$  : masse effective du porteur considéré

$k$ : Constante de Boltzmann

$h$ : Constante de Dirac

On peut écrire :

$$J = J_s \left[ \exp\left(\frac{q(V)}{nkbT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$$J_s = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{Bn}}{KT}\right) \quad (\text{II.28})$$

$\phi_{Bn}$  : la hauteur de la barrière de potentiel électrique.

$V$  : la tension aux bornes de la diode Schottky

$n$  : facteur d'idéalité

$T$  : la température [16].

## II.6 Conclusion :

Nous avons montré dans ce chapitre les mécanismes de conduction de la diode Schottky, ainsi la différence entre le contact redresseur et le contact ohmique.

### III.1 Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre les notions de base du logiciel de simulation SILVACO TCAD (Technology computer Aided Design) et son principe de fonctionnement. Ensuite nous présentons nos résultats de l'étude réalisée sur la diode Schottky pour différents facteurs (géométriques et physiques).

### III.2 ATLAS de SILVACO :

La simulation fait le lien entre le monde expérimental et le monde théorique, comme le montre la figure III.1. Elle complète la théorie et l'expérimentation et construit la réalité physique [17].



Figure III.1 : Le rôle de simulation [17].

#### III.2.1 Présentation du logiciel Silvaco :

SILVACO (Silicon Valley Company) est un logiciel qui nous permet de modéliser et simuler les performances de dispositifs à semi-conducteurs avant de fabriquer des prototypes de test. Il permet d'optimiser le temps de test, réduisant ainsi le coût de conception et de fabrication des appareils électroniques. TCAD-SILVACO intègre des modèles physiques, ces modèles utilisent des méthodes et algorithmes numériques efficaces (maillage, solutions d'optimisation linéaire, etc.) tout en permettant d'obtenir des résultats de simulation très proches de l'expérimentale. Aussi TCAD-SILVACO pe

met de simuler les processus de fabrication (via ATHENA, SSupreme3, SSupreme4, etc.). Dans nos recherches, la simulation est réalisée par le simulateur ATLAS de SILVACO [9].

### III.2.1.1 ATLAS-SILVACO :

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants semi-conducteurs. Il peut prévoir des caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en mode continu, transitoire ou fréquentiel. En plus des caractéristiques électriques, telles que  $I(V)$ , il fournit également des informations sur la distribution interne des variables électriques (telles que le courant ou la tension). Avec ATLAS, il est possible de simuler les propriétés électriques des composants semi-conducteurs (tels que les diodes ou les cellules solaires...) qui sont créés et modélisés par ATLAS. Les composants étudiés sont représentés sous la forme d'une structure en réseau, où chaque nœud a des attributs qui lui sont associés, tels que le type de matériau, le type de dopage et la concentration de dopants. Ainsi, pour chaque nœud, la concentration en porteurs, le champ électrique... peuvent être calculés. L'électrode est représenté par la surface à laquelle les conditions aux limites (telles que la tension appliquée) [19].

### III.2.1.2 Tonyplot :

C'est un outil de visualisation qui trace les résultats obtenus à partir de la simulation. Il fournit des capacités de visualisation scientifique, y compris des graphiques XY avec des axes linéaires et logarithmiques, des graphiques polaires, des graphiques de surface et de contour [16].

### III.2.2 Étapes d'instruction dans ATLAS :

Les étapes d'instruction sur le simulateur ATLAS-SILVACO sont illustrées sur la figure III.2 :

<i>Group</i>		<i>Statements</i>
1. Structure Specification	————	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material Models Specification	————	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical Method Selection	————	METHOD
4. Solution Specification	————	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results Analysis	————	EXTRACT TONYPLOT

Figure III. 2 : Les étapes des instructions [17].

### III.2.3 Spécification de la structure :

L'étude de la spécification de la structure comprend : le maillage, les régions, les électrodes et le dopage. Notre structure est donnée par la figure III.3

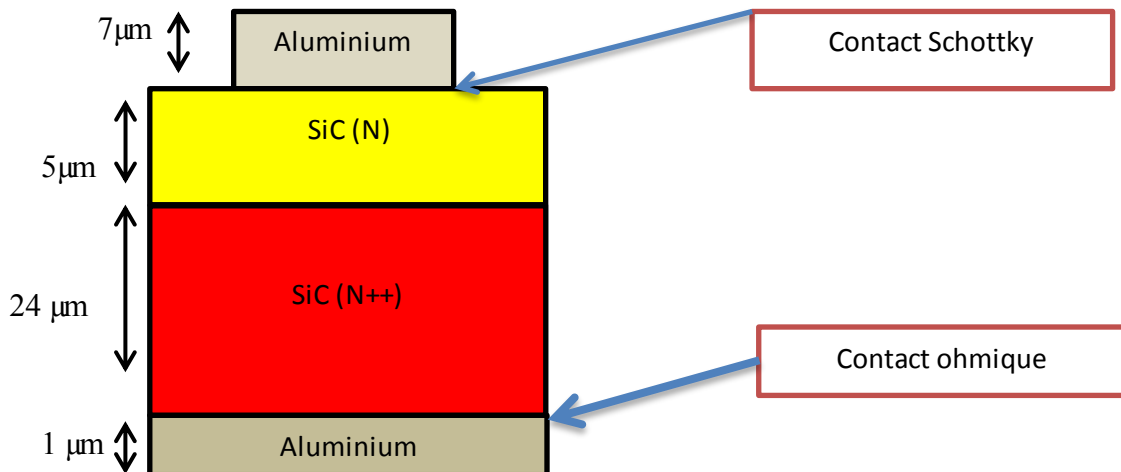


Figure III.3: Diode Schottky Al/n-SiC.

### III.2.3.1 Spécification de maillage :

Le maillage joue un rôle important dans l'obtention d'une bonne simulation. Cela doit être fait de notre mieux pour assurer la fiabilité des résultats [18].

```

go atlas

#mesh space.mult=1.0

mesh auto

x.mesh loc=0.00 spac=0.05

x.mesh loc=1.00 spac=0.02

x.mesh loc=9.00 spac=0.02

```

Figure III.4: Spécification de maillage

mesh space.mult = <valeur> habituellement, la commande mesh est utilisée pour spécifier le maillage (car ATLAS utilise la méthode des éléments finis pour résoudre l'équation). space.mult est le facteur de multiplication entre deux lignes de maillage qui est déterminé par commandes d'espacement dans une direction donnée pour augmenter ou diminuer la quantité de quadrillage. x.mesh = spacing <valeur> = <valeur> c'est la commande qui définit le maillage lui-même. x.mesh définit le maillage dans la direction x [9].

x.mesh loc = 0,00 spac = 0,05

x.mesh loc = 1,00 spac = 0.02

Loc : définit l'intervalle de maillage (dans notre exemple, entre  $x = 0\mu\text{m}$  et  $x = 1\mu\text{m}$ ).

Spac : définit la résolution du maillage, qui doit être en réalité plus petite que la longueur du maillage. Dans notre cas, le maillage a une résolution de  $0,05\ \mu\text{m}$  à partir de

$x = 0$  et une résolution de  $0,02\ \text{m}$  à  $x = 1$ . Position y.mesh = espacement <valeur> = <valeur> y.mesh définit le maillage dans la direction Y.

### III.2.3.2 Spécification des régions :



Après avoir déterminé le maillage, nous devons maintenant définir les régions. Le format de région définie est le suivant: région number = <integer><material type><position parameter> il peut y avoir 200 canaux différents dans ATLAS [1]. Notre exemple est illustré dans la figure III.5.

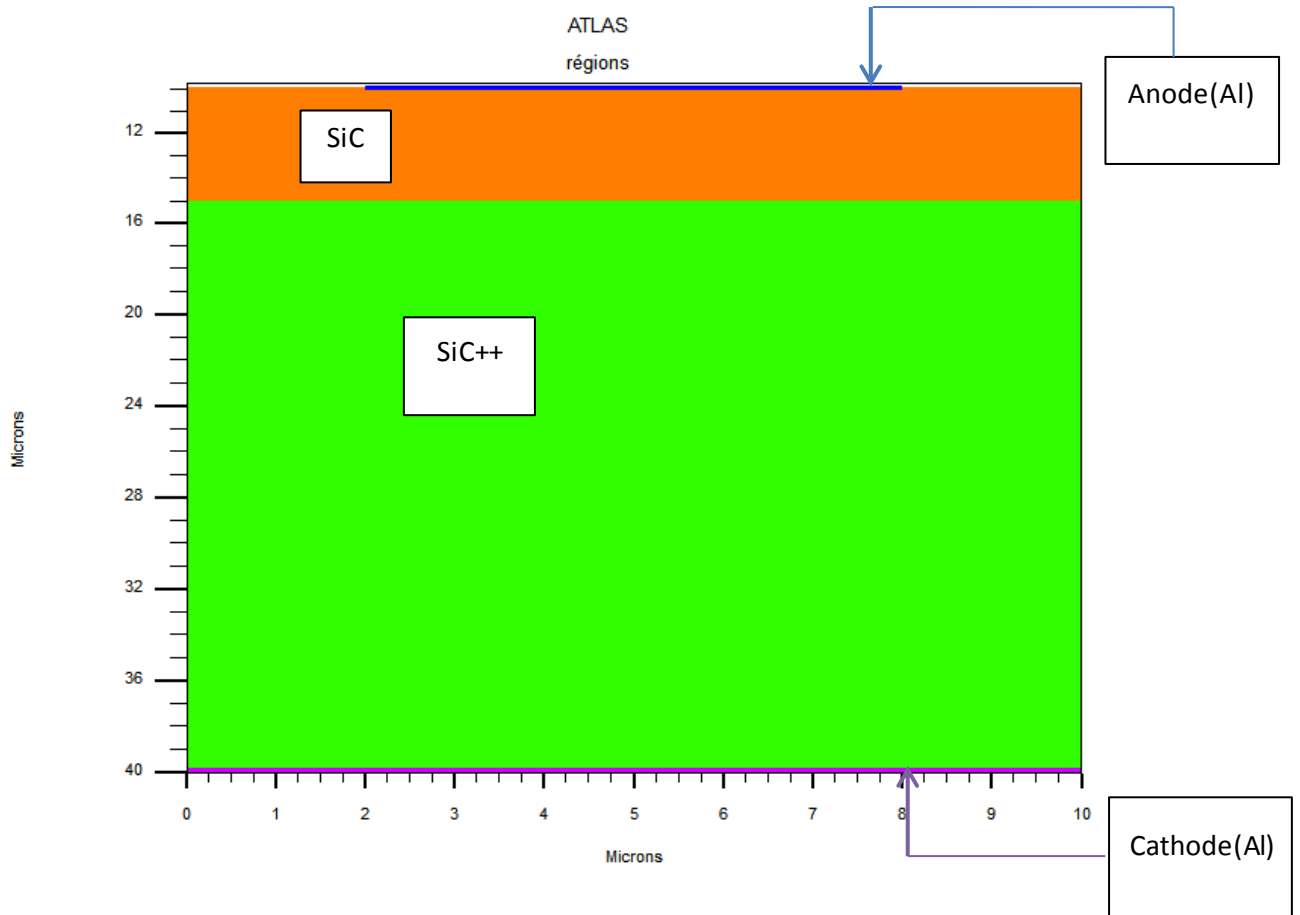


Figure III.5 : Spécification des régions.

Notre exemple est :

```
region number=1 x.min=0.00 x.max=10.00 y.min=10.00 y.max=15.00 material=a-SiC
```

```
region number=2 x.min=0.00 x.max=10.00 y.min=15.00 y.max=39.90 material=a-SiC
```

### III.2.3.3 Spécification des électrodes :

Le format des électrodes est le suivant: nom de l'électrode = <nom de l'électrode><emplacement du paramètre>. La figure montre la position de l'anode et de la cathode à travers les valeurs de x et y. [11]

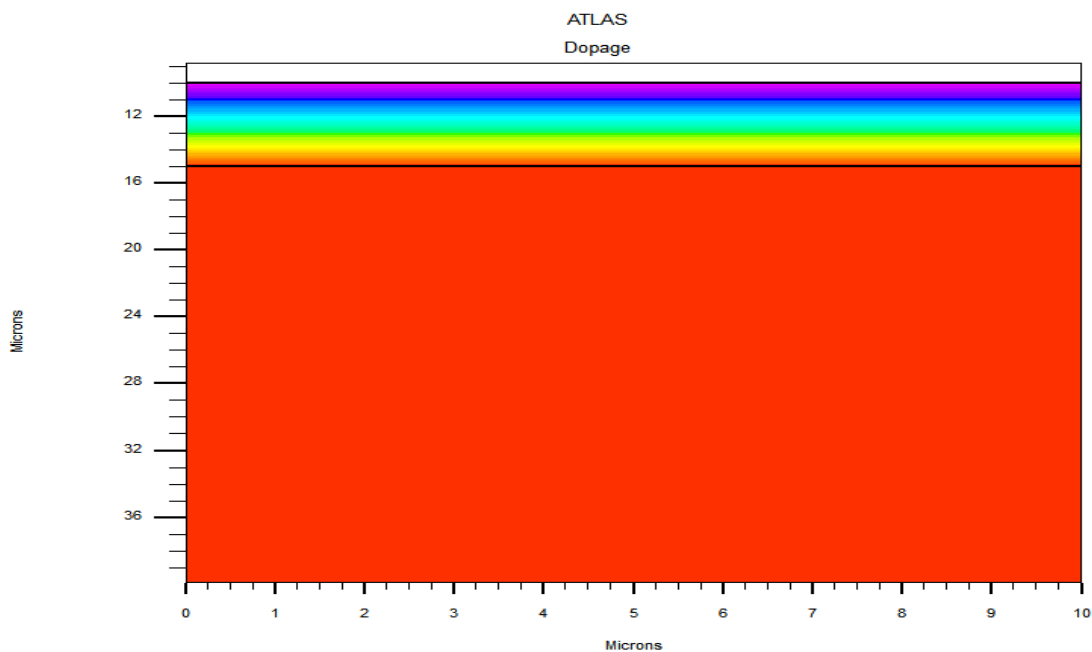
Notre exemple est :

```
electrode name=anode number=1 top x.min=2.00 x.max=8.00 y.min=0.00 y.max=10.00
material=Conductor
```

```
electrode name=cathode number=2 x.min=0.00 x.max=10.00 y.min=39.90 y.max=40.00
material=Aluminum
```

### III.2.3.4 Spécification de dopage :

Le dernier aspect de la spécification structurelle à définir est le dopage. Le format de la déclaration de dopage dans Atlas est le suivant: dopage <type de distribution><type de dopant> / <emplacement du paramètre>. Sur la figure (III.6), le type de dopage et le niveau de dopage sont définis. Le dopage peut être de type N ou de type P. Le type de distribution peut être uniforme ou gaussien [11].



```
doping uniform conc=1e+17 n.type x.min=0.00 x.max=10.00 y.min=10.00 y.max=15.00
doping uniform conc=1e+22 n.type x.min=0.00 x.max=10.00 y.min=15.00 y.max=39.90
```

Figure III.6 : Définition de dopage.

### III.2.4 Spécification de modèle et matériau :

#### III.2.4.1 Matériel :

Tous les matériaux sont classés en fonction de leurs propriétés physiques telles que

- Conductivité (conducteurs, semi-conducteurs, isolants)
- Affinité électronique
- L'énergie de l'écart
- Mobilité
- Densité de porteuse.

Par exemple: L'énergie de gap du carbure de silicium (SiC) à 300 K est 3 eV, mobilité porteurs dans un champ électrique faible, durée de vie de recombinaison SRH de les électrons et les trous peuvent être écrits dans ATLAS avec l'instruction suivante:

```
materiel permittivity=9.66 eg300=3.00 egbeta=0 egalpha=3.3e-4 \ augn=2.8e-31
augp=9.9e-32 vsat=2.0e7 \ tmun=2.25 tmup=2.25 lt.taun=2.3 lt.taup=2.3 [16] .
```

#### III.2.4.2 Les modèles:

Les modèles physiques mis en œuvre dans Atlas peuvent être divisés en cinq catégories :

1. mobilité
2. Recombinaison
3. Statistique des transporteurs
4. Effets d'ionisation
5. Effet tunnel

La syntaxe de la déclaration du modèle dans le simulateur"ATLAS" est la suivante:

Modèle<Paramètres généraux><Paramètres du modèle>. Les instructions utilisées dans notre programme en contiennent quelques-unes Modèle, sous la forme :

```
model fldmob srh auger bgn print temperature=300
impact selb an1=1.66e6 an2=1.66e6 bn1=1.273e7 bn2=1.273e7 \ap1=5.18e6 ap2=5.18e6
bp1=1.4e7 bp2=1.4e7. [18]
```

### III.2.4.3 Contact :

La commande "contact" est utilisée pour indiquer à ATLAS comment manipuler l'électrode. Une sorte de l'électrode de contact est par défaut en ohms. L'effet Schottky entre métal et semiconducteur est défini par le travail de sortie selon la commande suivante :

Nom du contact = <électrode>fonction de travail = <valeur>

Le travail de sortie définit soit un contact redresseur ou un contact Ohmique.

A la barrière Schottky des électrons sont injectés du métal dans la bande de conduction de semi-conducteur donc le travail de sortie définit la nature du contact [16].

### III.2.4.4 Interface :

La spécification de la densité d'états à l'interface entre deux régions peut être effectuée par les instructions suivantes:

Interface qf = <valeur><emplacement du paramètre> [16].

### III.2.5 Méthodes Numériques :

Après la spécification structurelle complète (géométrique et physique), ATLAS commence à résoudre une série d'équations (équation continue, équation de Poisson, Diffusion) pour calculer la densité des porteurs, le potentiel électrique et le courant.

Parmi les différentes méthodes numériques de résolution d'équations :

- Méthode de Gummel
- Méthode de Newton
- Méthode des blocs. [18]

#### III.2.5.1 Méthode de Gummel :

La méthode de Gummel résout le système d'équations différentiel. Pour calculer le potentiel de surface on utilise l'équation suivante :

$$a_n(i-1)\phi_n(i-1) - [a_n(i+\frac{1}{2}) + a_n(i-\frac{1}{2})]\phi_n(i) + a_n(i+\frac{1}{2})\phi_n(i+1) = \Delta^2 x U(i) \dots \text{III.1}$$

$$a_p(i-1)\phi_p(i-1) - [a_p(i+\frac{1}{2}) + a_p(i-\frac{1}{2})]\phi_p(i) + a_p(i+\frac{1}{2})\phi_p(i+1) = \Delta^2 x U(i) \dots \text{III.2}$$

[14]

### III.2.5.2 Méthode de Newton :

C'est une procédure qui résout les équations en ensemble, on écrit les équations précédentes sous la forme résiduelle :

$$W_v(v, n, p) = 0 \dots \text{III.3}$$

$$W_n(v, n, p) = 0 \dots \text{III.4}$$

$$W_p(v, n, p) = 0 \dots \text{III.5}$$

Au début et en partant avec des valeurs initiales  $v_0, n_0, p_0$ , les corrections  $\Delta v, \Delta n, \Delta p$  sont calculées par le système Jacobien suivant:

$$\begin{bmatrix} \frac{\delta W_v}{\delta v} & \frac{\delta W_v}{\delta n} & \frac{\delta W_v}{\delta p} \\ \frac{\delta W_n}{\delta v} & \frac{\delta W_n}{\delta n} & \frac{\delta W_n}{\delta p} \\ \frac{\delta W_p}{\delta v} & \frac{\delta W_p}{\delta n} & \frac{\delta W_p}{\delta p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta n \\ \Delta p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} W_v \\ W_n \\ W_p \end{bmatrix} \dots \text{III.6}$$

Les solutions sont alors obtenues par:

$$V(k+1) = V(k) + \Delta v(k) \quad n(k+1) = n(k) + \Delta n(k) \quad p(k+1) = p(k) + \Delta p(k) \dots \text{III.7}$$

Où k indique le nombre d'itérations, et le système d'équation à trois équations pour chaque point du maillage.

En général la méthode de Gummel nécessite une polarisation faible, à cause de sa rapidité de convergence avec moins d'itérations dans le calcul. A forte polarisation la méthode la plus utilisée est la méthode de Newton. Nous avons utilisé la méthode de Newton sous la forme :

$$\text{Method newton dv max}=1e8 \quad \text{climit}=1.e-5 \quad [18]$$

### III.2.6 Spécification de solution :

La spécification de la solution utilise deux instructions : log et solve.

#### III.2.6.1 Log :

log enregistre toutes les caractéristiques dans un fichier de données. L'exemple suivant montre un exemple d'utilisation de l'instruction log. Log outf = diode\_0.log .

Notre exemple montre les enregistrements de données dans le fichier "diode\_0.log

#### III.2.6.2 Solve:

L'instruction solve suit l'instruction log. Il effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Voici un exemple de notre instruction solve. solve vanode = -4  
vstep = 0.2

name = anode vfinal = 4.0

### III.2.7 Présentation de la structure :

Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel ATLAS-SILVACO. Les paramètres des matériaux ont été ajustés pour correspondre à notre structure (diode Schottky). Cette étude a été créée sur un substrat de carbure de silicium (SiC) type n. Nous avons trois couches dans notre structure : la première couche représente l'Aluminium, son épaisseur égale  $7\mu\text{m}$ , la deuxième couche représente le semiconducteur (SiC) de concentration à  $10^{17}\text{cm}^{-3}$ , son épaisseur égale  $5\mu\text{m}$ , la troisième couche c'est le SiC fortement dopé ( $10^{22}\text{cm}^{-3}$ ), son épaisseur :  $24\mu\text{m}$ .

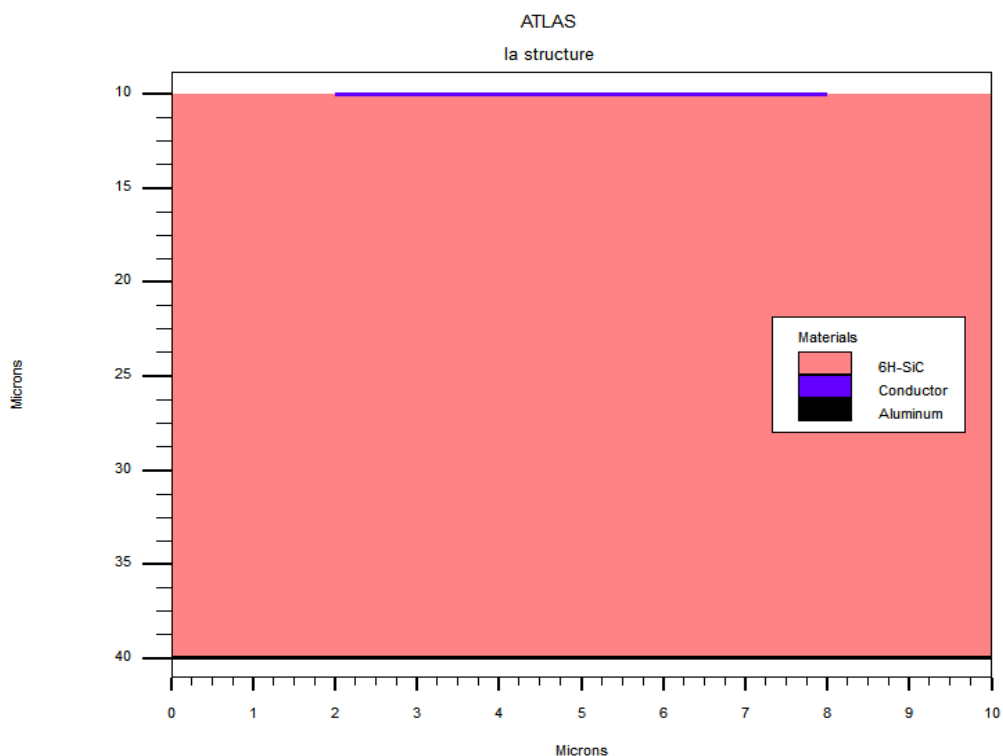


Figure III.7 : Structure de la diode Schottky à base de 6H-SiC.

### III.2.7.1 Caractéristique I-Vde la diode Schottky idéale :

A partir de la diode Schottky structure de référence décrite, nous avons tout d'abord étudié l'influence de la géométrie de la structure de la diode Schottky afin de bien spécifier le choix de la structure, ensuite nous pouvons passer à l'étude de la caractéristique courant-tension en faisant varier le dopage, l'épaisseur de métal et de semiconducteur, la température, changement de semiconducteur et le changement de métal.

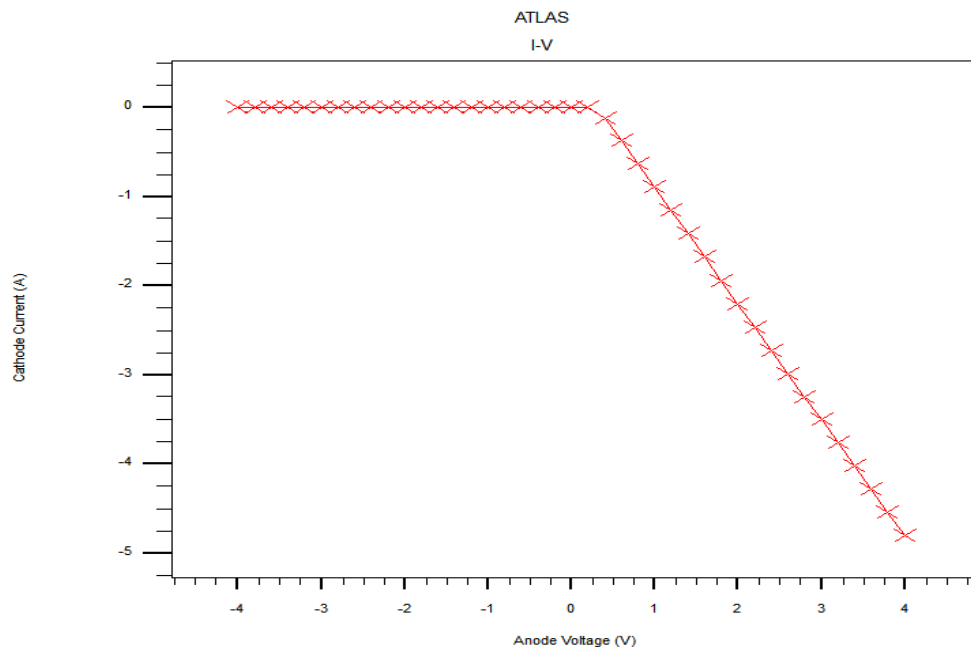


Figure III.8.1 : Caractéristique I-V linéaire de la diode Schottky

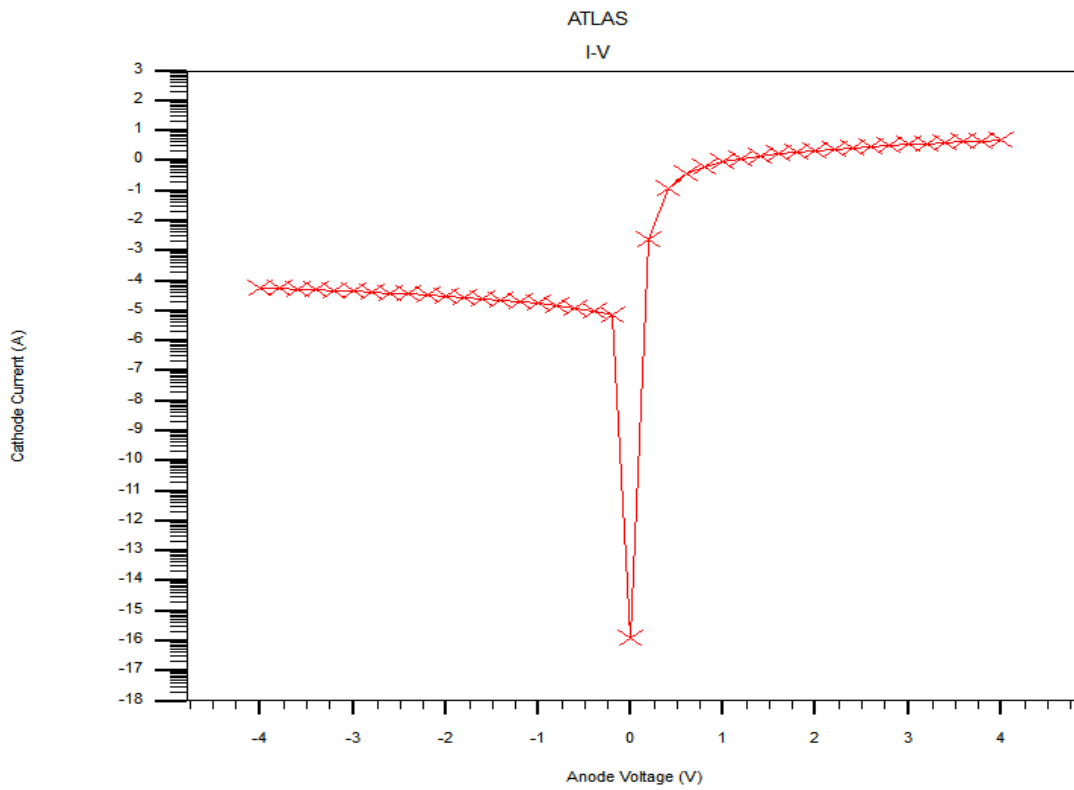


Figure III.8.2 : Caractéristique I-V de la diode Schottky à l'échelle logarithmique



### III.2.7.1.1 Effet de la variation d'épaisseur de la couche 6H-SiC de type (N) sur la caractéristique courant-tension :

Les figures III.9 montrent l'effet de changement d'épaisseur de la couche 6H-SiC pour la polarisation direct et inverse.

Nous allons procéder en modifiant l'épaisseur de notre couche de 6H-SiC dopée dans l'intervalle de  $5\mu\text{m}$  à  $30\mu\text{m}$ .

D'après les deux courbes, nous avons remarqué que pour des tensions inférieures à  $0,5\text{ V}$ , le courant de la diode  $I_D$  est quasiment nul, tandis que pour des tensions supérieures à  $0,5\text{ V}$  la densité de courant est du proportionnellement à l'épaisseur de la couche 6H-SiC.

Le courant de diode augmente avec l'augmentation d'épaisseur de la couche 6H-SiC car il y a plus d'électrons libres sont disponibles, ce qui améliore les performances du dispositif.

Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque l'épaisseur de la couche de 6H-SiC est de  $5\mu\text{m}$ .

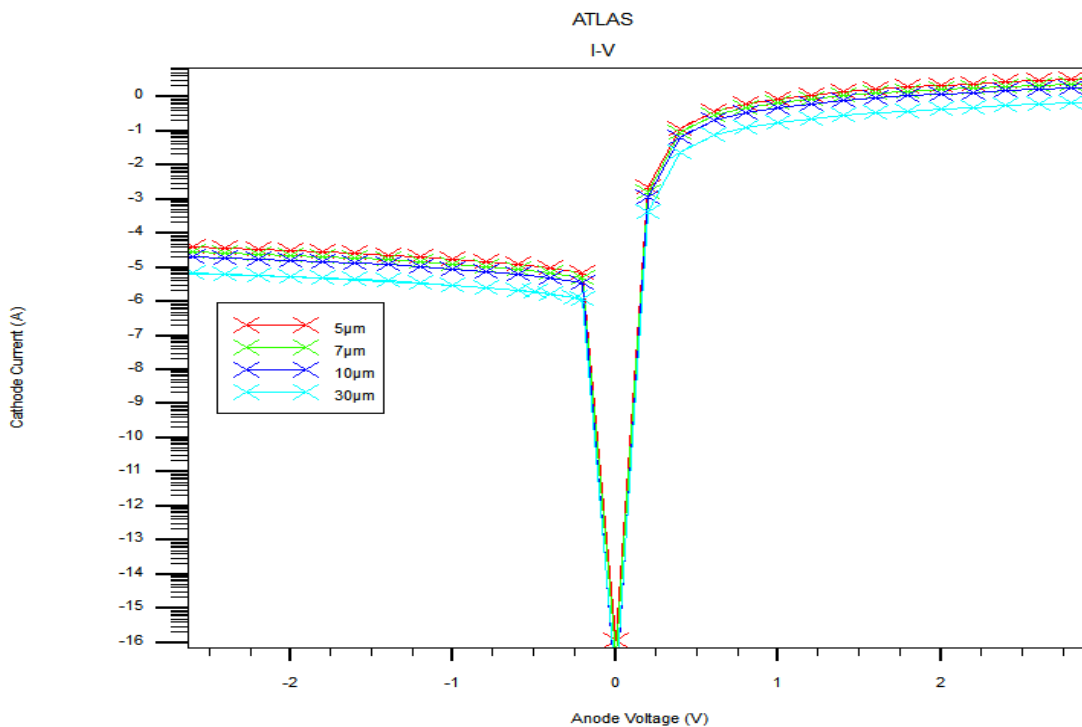


Figure III.9.1: Caractéristique I-V de la diode pour différentes épaisseurs de la couche 6H-SiC à l'échelle logarithmique

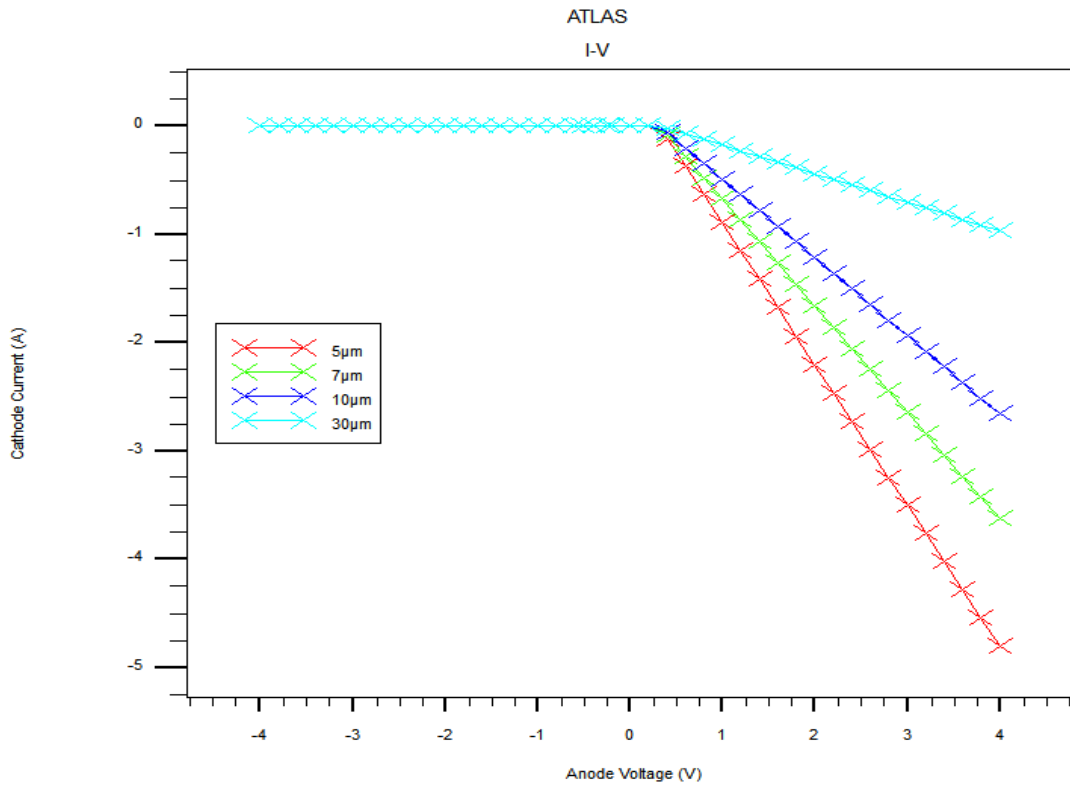


Figure III.9. 2 : Caractéristique I-V de la diode pour différentes épaisseurs de la couche 6H-SiC.

### III.2.7.1.2 Changement d'épaisseur d'Aluminium :

Les figures III.10 montrent l'influence de changement d'épaisseur de métal (Aluminium) sur la caractéristique courant-tension.

D'après ces courbes, nous remarquons l'augmentation de courant avec l'évolution d'épaisseur de métal. Cette augmentation est due aux électrons libres qui sont disponibles, ce qui donne une bonne performance pour cette diode Schottky.

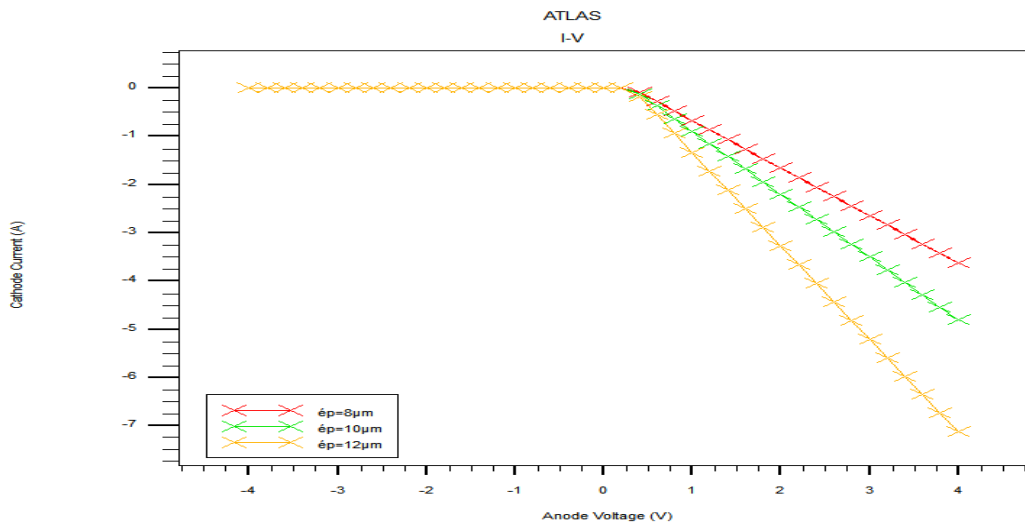


Figure III.10.1 : L'effet de changement d'épaisseur d'Aluminium sur la caractéristique I-V.

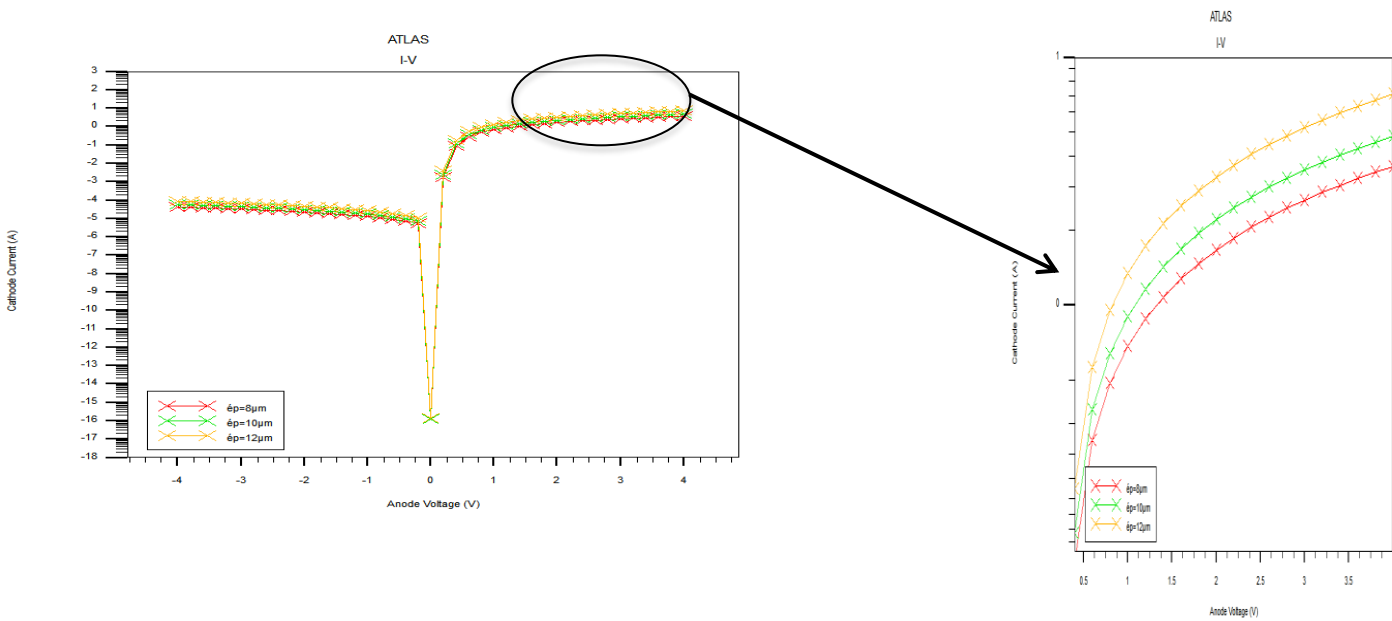


Figure III.10.2 : L'effet de changement d'épaisseur d'Aluminium sur la caractéristique I-V à l'échelle semi-logarithmique.

### III.2.7.1.3 l'effet de changement de métal sur la caractéristique I-V :

Les figures III.11 montrent l'effet de changement de métal sur la caractéristique courant - tension

$\phi_m$  (Silver)=4.3 eV.

$\phi_m$  (Aluminium)=4.1 eV.

Nous remarquons que le courant de Silver (Ag) est supérieur au courant d'Aluminium. Le courant croit exponentiellement avec le travail de sortie du métal (on a le travail de sortie de Silver est supérieur que d'Aluminium). Donc le travail de sortie de métal influe sur le courant

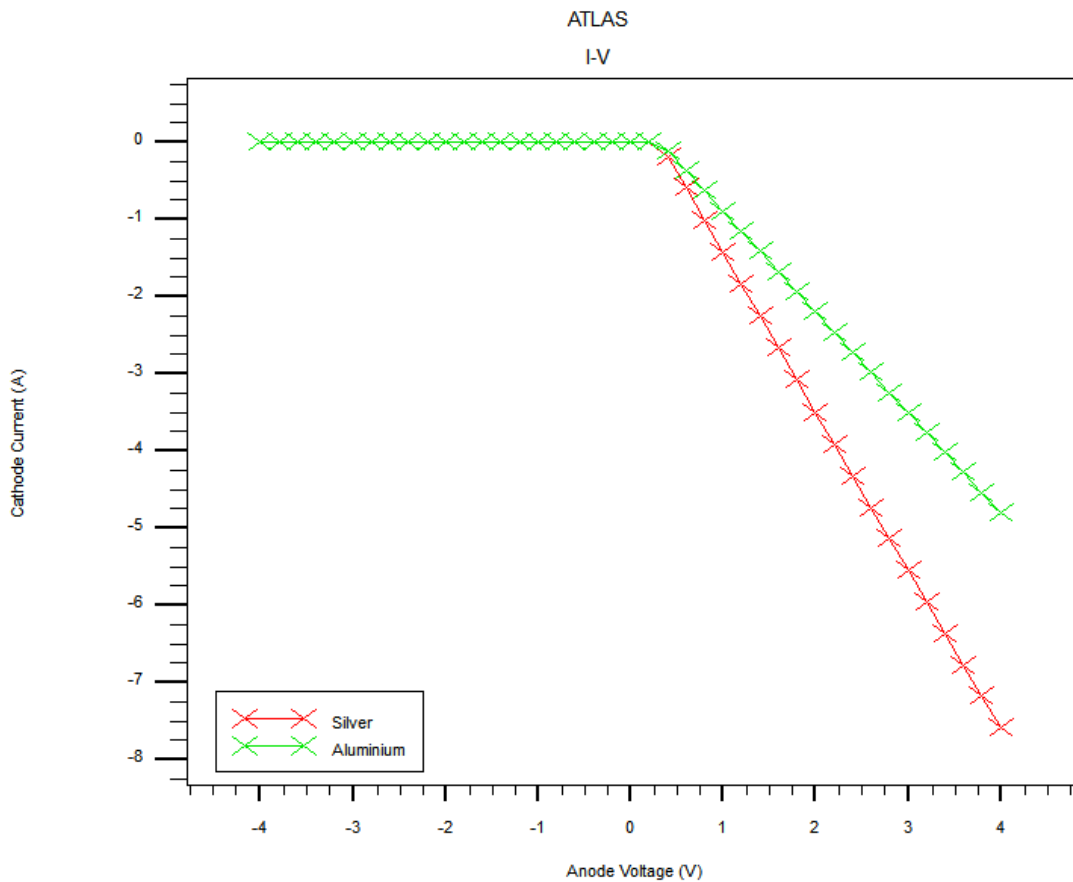


Figure III.11.1 : l'effet de changement de métal sur la caractéristique I-V

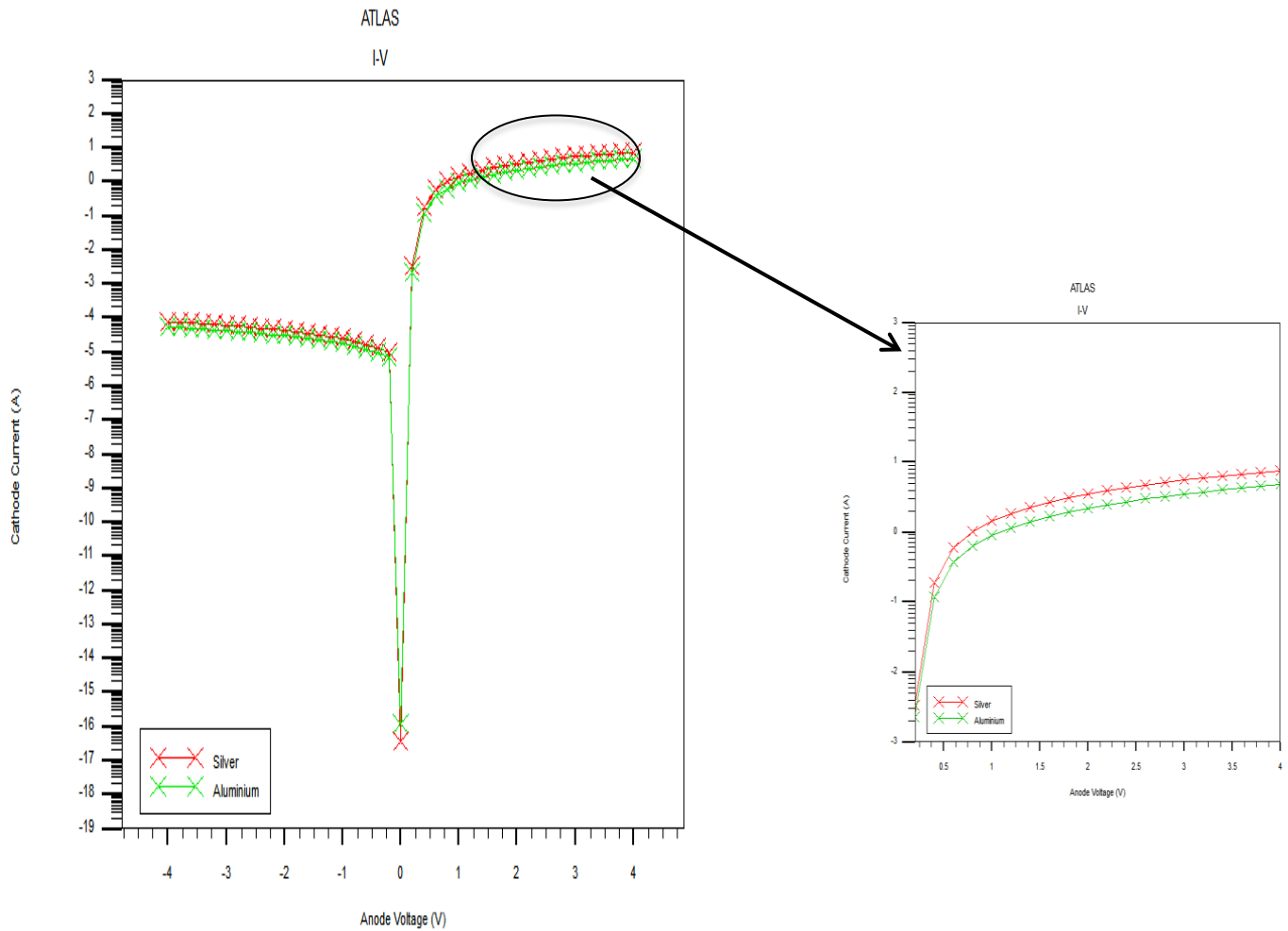


Figure III.11.2 : l'effet de changement de métal sur la caractéristique I-V à l'échelle semilogarithmique.

#### III.2.7.1.4 L'effet de la température sur la caractéristique I-V:

Les figures III.12 montrent l'effet de température sur la caractéristique I-V:

Le courant de la diode Schottky est très sensible à la température. le courant de saturation dû aux porteurs majoritaires par l'agitation thermique.

Nous remarquons quand la température augmente le courant va diminuer, ce mécanisme est dû à l'augmentation des électrons-électrons et électrons-phonons avec l'augmentation de la température et donc la mobilité va diminuer et le courant diminue aussi.

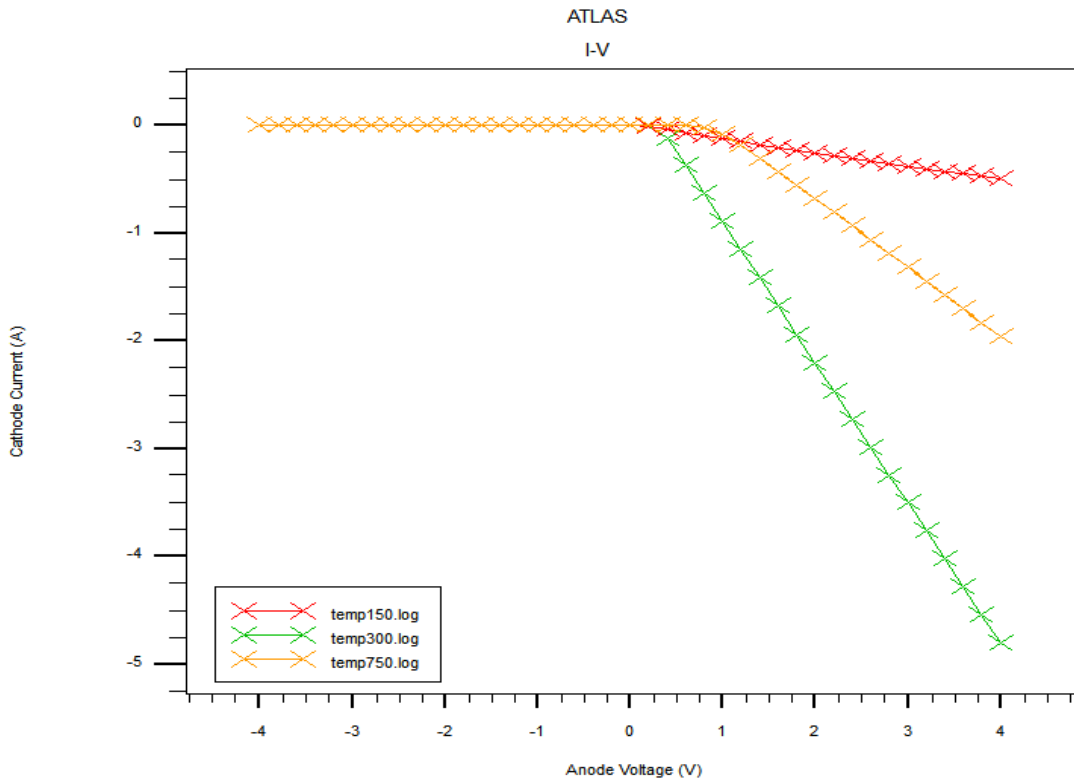


Figure III.12.1 : L'effèt de température sur la caractéristique I-V.

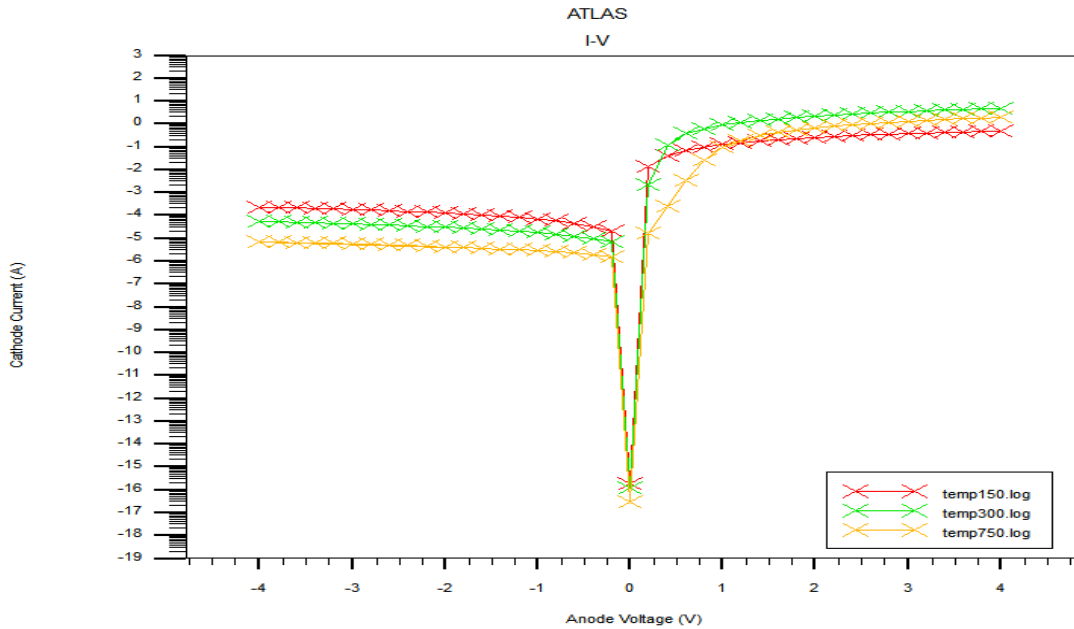


Figure III.12.2 :L'effèt de température sur la caractéristique I-V à l'échelle logarithmique

III.2.7.1.5 l'effet de concentration de dopage de SiC type (N) sur la caractéristique I-V :

Les figures III.13 montrent la caractéristique courant-tension pour différentes concentrations de dopage pour l'intervalle de  $10^{15}$  à  $10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$ .

D'après ces figures, on remarque que la caractéristique courant-tension dépend de changement de dopage : le courant de la diode Schottky augmente avec l'augmentation des concentrations des dopants. Cela affirme que l'augmentation de courant de la diode Schottky est due à l'augmentation des porteurs majoritaires introduits par le dopage.

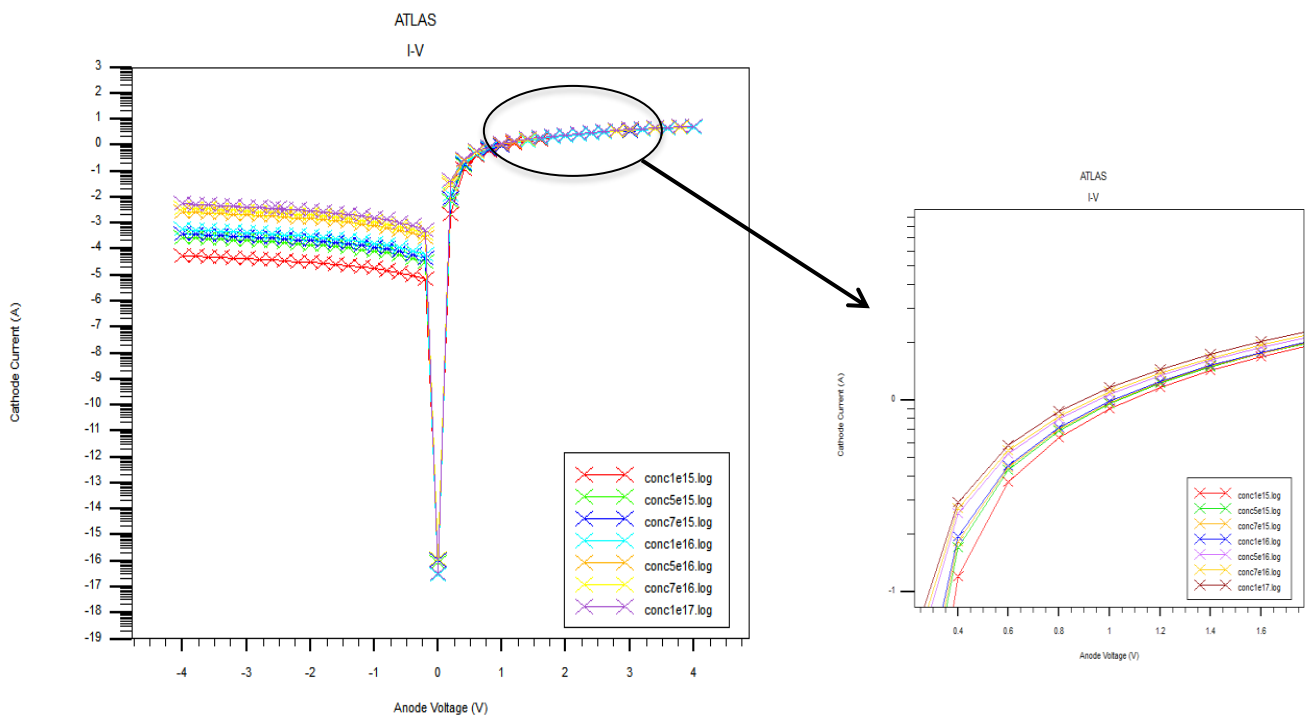


Figure III.13.1: L'effet de concentration de dopage sur la caractéristique I-V

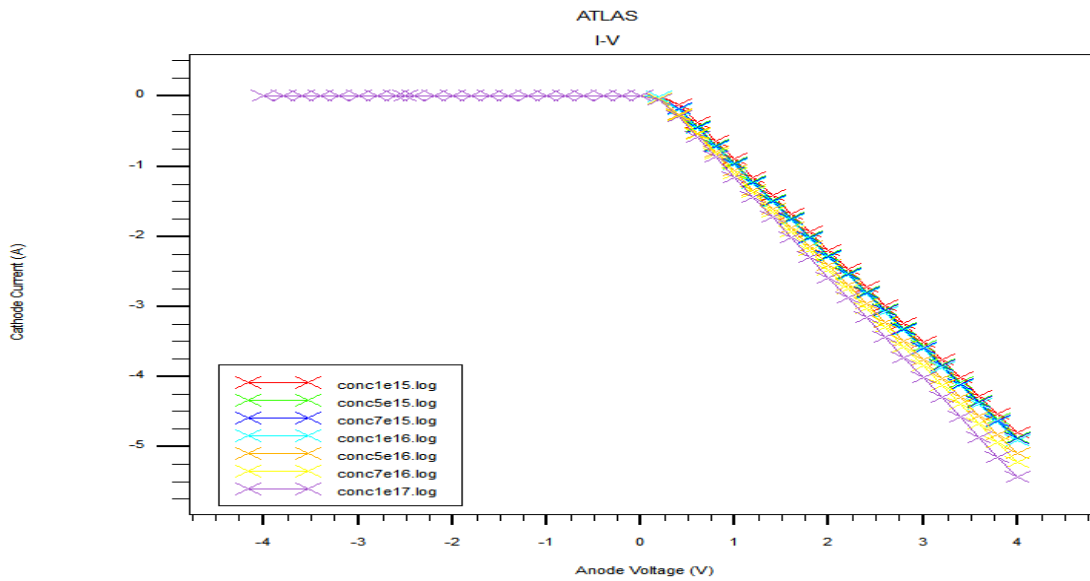


Figure III.13.2: L'effet de concentration de dopage sur la caractéristique I-V à l'échelle semilogarithmique.

### III.2.7.1.6 L'effet de changement de semi-conducteur (SiC par Si) :

Les figures III.14 montrent l'effet de changement de semi-conducteur sur la caractéristique I -V

$$\chi_{\text{SiC}} = 4.2 \text{ eV}$$

$$\chi_{\text{Si}} = 4.01 \text{ eV}$$

Nous observons la diminution de courant avec l'augmentation de l'affinité électronique. Ce phénomène est dû à la polarisation de la structure : dans la polarisation directe (positive), la hauteur de barrière énergétique est diminuée qu'il laisse les électrons diffusés plus facilement (contact Schottky ou redresseur). En polarisation inverse, la barrière énergétique augmente qui s'oppose à la diffusion des électrons (contact ohmique).



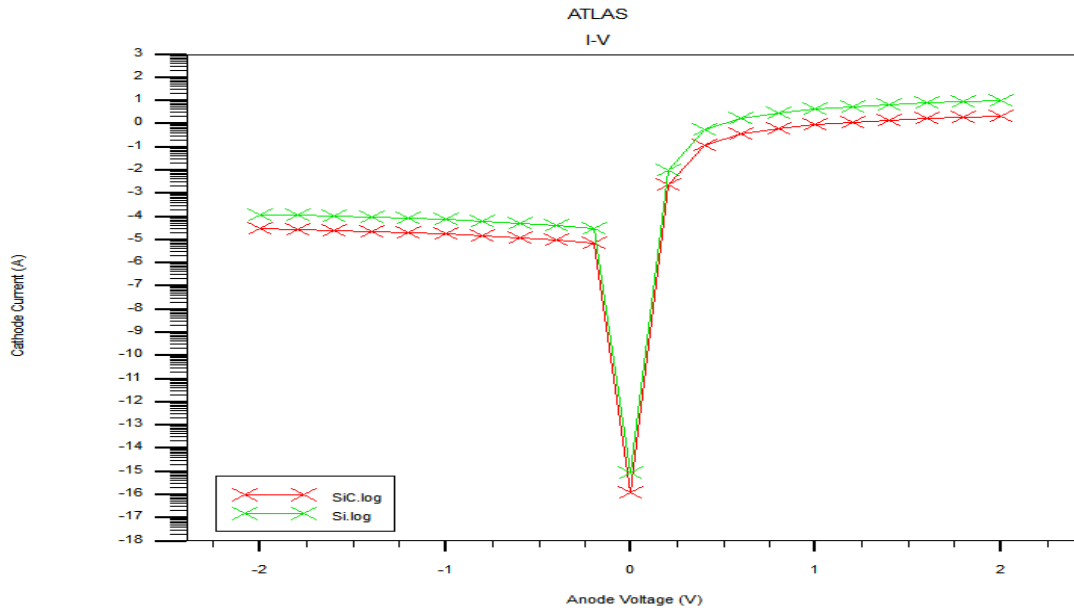


Figure III.14.1: L'effet de changement de semiconducteur (SiC par Si)

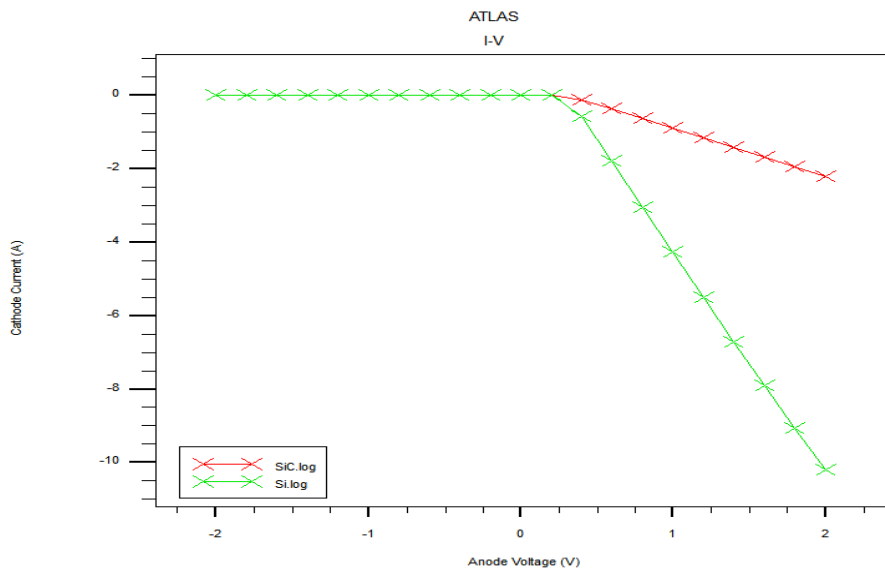


Figure III.14.2 : L'effet de changement de semiconducteur (SiC par Si) à l'échelle logarithmique

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous présentons les différents facteurs qui influent sur la caractéristique courant-tension d'une diode Schottky. L'optimisation géométrique et physique est très nécessaire pour améliorer la performance de la diode Schottky.

## Conclusion générale

---

Aujourd'hui, nous vivons l'ère de la rapidité des applications technologiques dans différents domaines. Cette rapidité de développement est liée à l'efficacité et à la performance des composants élaborés. La diode Schottky formée par le contact métal/semi-conducteur est la plus adaptée aux applications des hautes fréquences.

Le travail consiste dans le cadre d'un projet de fin d'étude Master. Il consiste à la conception d'une structure métal / semi-conducteur de type n avec une concentration de  $1.10^{17}$  à base SiC ainsi que l'étude de ses caractéristiques pour différents paramètres : température, concentration et l'épaisseur de métal et de semi-conducteur.

Nous avons présenté dans ce manuscrit une étude par simulation, en utilisant Atlas-SILVACO, des caractéristiques électriques I-V d'une diode Schottky (Al/SiC).

Dans le premier chapitre nous avons mentionné certaines caractéristiques de carbure de silicium, ses applications, ses défauts structuraux et ses procédés d'élaboration.

Dans le deuxième chapitre nous avons discuté les différents phénomènes et mécanismes de transport dans le cas des contacts métal/semi-conducteur (diode Schottky) et traduisant les mécanismes de passage de courant à travers ces jonctions. Aussi nous avons simulé les caractéristiques courant-tension (I-V) pour étudier les paramètres géométriques et physiques de la diode.

## Bibliographie :

- [1] TOUMI SIHEM, « études des composants électroniques (cellules solaires, diodes schottky) en utilisant les algorithmes génétiques et le langage vhdl ams », doctorat en sciences, université ferhat abbas-setif, 04 /07 / 2012.
- [2] Besar ASLLANI, « Caractérisation et modélisation de diodes Schottky et JBS SiC-4H pour des applications haute tension, doctorat en génie électrique, l'université de Lyon opérée au sein de l'INSA de Lyon, 2016.
- [3] : Martin COYAUD, « caractérisation fonctionnelle de composants en carbure de silicium, doctorat en génie électrique, université de Joseph Fourier, Le 27 juin 2002.
- [4] : Berramdan Safia, « simulation d'une diode Schottky en carbure de silicium utilisé comme capteur de température, master en Télécommunications, université Mohamed Khider de Biskra, 30 septembre 2020
- [5] : Jocelyne GIMBERT, « dopage du carbure de silicium par implantation ionique », docteur de l'institut national polytechnique de GRENOBLE, soutenue le 4 mars 1999
- [6] : SAIDA MEHRAZ, « élaboration et caractérisation du carbure de silicium à partir des éléments silicium et carbone », magister en génie mécanique, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011
- [7] : Kefif Kheira, « Elaboration et caractérisation optique des semi-conducteurs amorphes et nanocristallins de silicium et de carbure de silicium », doctorat en physique, université Oran, 18 mars 2015
- [8] : L. Pesant, « Elaboration d'un nouveau système catalytique à base de carbure de silicium ( $\beta$ -SiC) pour la combustion des suies issues des automobiles à moteur Diesel ». Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 2005.
- [9] : BOUROUBA FARID, « modélisation et simulation des contacts métal-semiconducteur à barrière inhomogène », mémoire de magister, université ferhat abbas-setif, 2010
- [10] : <https://almet-metal.com> consulté le 24/06/2021 à 13 :00
- [11] : GHACHAME SEMAH, « Caractéristiques électriques d'une diode à barrière de Schottky (SBD) avec et sans couche isolante SiO<sub>2</sub> à la température ambiante (300K) », mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra Biskra, 2014
- [12] : OUZEROUHANE MARYAMA, « Simulation et modélisation de l'effet de la température sur les caractéristiques électriques (I-V-T) dans la structure

métal/semiconducteur $\beta$ -Ti/n-GaAs», mémoire de master en physique des matériaux université a.mira-bejaia ,2020

[13] :ALIOUANE Brahim et GHARNOMassinissa, « caractérisation électrique de diode schottky à base de L'AlGaAs », mémoire de master en microélectronique, Université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou 2018

[14] : Lamia MEDJOU DJ, « Simulations d'une diode Schottky à base d'AlGaAs », mémoire de master en électronique, université mouloud Mammeri titi – ouzo, 2018

[15] : BAZA Safa et MAROUF kanza, « Etude Statique de la Caractéristique Electrique Courant-Tension d'une Structure Schottky », mémoire de master en instrumentation, université Mohamed Boudiaf - m'sila, 2018

[16]:BRAHIMI Chakib et BENLEMDJALDI Moussa, « Simulations de l'influence des défauts sur une diode Schottky à base AlGaAs », mémoire de master en microélectronique, université saad dahlab de blida, 2018

[17]: KAABACHE CHOKRI, « simulation et étude des caractéristiques électriques d'un contact métal/semi-conducteur à base de GaAs », master en physique des matériaux, Bejaia, 2016

[18]: KAMAL ZEGHDAR, « Simulation des caractéristiques courant-tension à base d'une diode Schottky en Phosphure d'indium InP », magister électronique, université Mohamed khidar biskra, 2014.

[19] : [http://bibfac.univlemcen.dz/bibfs/opac\\_css/doc\\_num.php?explnum\\_id=2419](http://bibfac.univlemcen.dz/bibfs/opac_css/doc_num.php?explnum_id=2419) consulté le 26/05/2021 à 23:36.

### **Résumé :**

La jonction d'un matériau semi-conducteur à large gap comme le SiC avec un métal donne naissance à un composant très important dans les applications à haute puissance, la diode Schottky. Un composant connu pour leurs caractéristiques avantageuses comme la tenue en tension élevée, résistivité faible, donc un composant idéal par exemple pour les convertisseurs de puissance. La diode Schottky rencontre une certaine réticence la fiabilité de cette technologie n'arrive pas à convaincre. Malgré les nombreuses recherches réalisées sur ce composant utilisé souvent dans les circuits électroniques de puissance, cette étude porte sur la caractéristique et la modélisation d'une diode Schottky en SiC-6H sur une large gamme de températures. La caractéristique en température a permis de proposer des modèles de la caractéristique directe et inverse sur une gamme étendue de températures. La modélisation a permis une meilleure compréhension du fonctionnement de la diode Schottky théoriquement et par modélisation.

### **Mots clés :**

SiC-6H ; Diode ; Schottky ; Semi-conducteurs

### **Abstract :**

The junction of a wide gap semiconductor material like SiC with a metal gives rise to a very important component in high power applications, the Schottky diode. A component known for these advantageous characteristics such as high voltage withstand, low resistivity, therefore an ideal component for example for power converters. The Schottky diode meets with a certain reluctance the reliability of this technology does not manage to convince. Despite the extensive research carried out on this component often used in power electronic circuits, this study focuses on the characterization and modeling of a Schottky diode in SiC-6H over a wide temperature range. The temperature characterization made it possible to propose models of the direct and inverse characteristic over a wide range of temperatures. The modeling allowed a better understanding of the function of the Schottky diode theoretically and by modeling

### **Key words :**

Diode ; Schottky ; Semiconductors

### **ملخص :**

يؤدي تقاطع مادة شبه ناقلة ذات فجوة واسعة مثل SiC مع معدن إلى ظهور مكون مهم جدًا في تطبيقات الطاقة العالية ، وهو الصمام الثنائي شوتكي . عنصر معروف بهذه الخصائص المفيدة مثل تحمل الجهد العالي، والمقاومة المنخفضة، وبالتالي فهو مكون مثالي على سبيل المثال لمحولات الطاقة. على الرغم من البحث المكثف الذي تم إجراؤه على هذا المكون غالبًا ما يستخدم في الدوائر الإلكترونية للطاقة ، إلا أن هذه الدراسة تركز على وصف ونمذجة صمام ثنائي شوتكي في SiC-6H على نطاق واسع من درجات الحرارة. مكن وصف درجة الحرارة من اقتراح نماذج للخاصية المباشرة والعكسية على نطاق واسع من درجات الحرارة. سمحت النمذجة بفهم أفضل لوظيفة صمام ثنائي شوتكي نظريًا وعن طريق النمذجة.

### **كلمات مفتاحية :**

شبه ناقل ; شوتكي ; صمام

