



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
ELECTRONIQUE
Systemes Embarqués

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
TOUAHRI YAZID

Le : lundi 27 juin 2022

Effet des paramètres géométrique et dopage sur la sensibilité d'un détecteur de température

Jury :

Mme. Ouarhlent saloua	MAA	Université de Biskra	Président
Dr. Terguini Warda	MCA	Université de Biskra	Examineur
Dr. MEGHERBI M.LARBI	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Année Universitaire:2021/2022



Année universitaire : Choisissez une année

Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
ELECTRONIQUE
SYSTEMES EMBARQUES

Réf. : Entrez la référence du document

Effet des paramètres géométrique et dopage sur la sensibilité d'un détecteur de température

Le : lundi 27 juin 2022

Présenté par :
TOUAHRI YAZID

avis favorable de l'encadreur

Dr.Megherbi.M. larbi

Signature Avis favorable du Président du Jury

Mme. Ouahlent saloua

Cachet et signature

Année Universitaire:2021/2022

Remerciement:

En premier lieu, je tiens à remercier dieu de m'avoir donnée le courage, la volonté, la santé et la force pour réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon encadreur Mr Megherbi M.Larbi Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé. J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches. Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mes frères, pour leurs encouragements .À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Résumé

Ce travail a pour but d'étudier un capteur de température à base d'une diode Schottky, dans ce travail nous avons étudié particulièrement les effets de la variation de l'épaisseur de la région intrinsèque et de la variation de concentration du dopage sur la sensibilité et la linéarité du détecteur afin de trouver le meilleur capteur avec une bonne sensibilité et linéarité.

La simulation nous a permis de trouver la sensibilité appropriée qui prend une valeur de 2.79mV/K correspondant à un courant de 10 μ A, de plus une linéarité a été obtenue pour une épaisseur de 17.5 μ m et une concentration de 5*10¹⁵cm⁻³ du dispositif.

Abstract

This work has a goal of studying a temperature sensor based on a Schottky diode. In this work we studied particularly the effects of variation of the thickness of the intrinsic region and the variation of concentration of the doping on the sensitivity and the linearity of the detector in order to find the better sensor with good sensitivity and linearity.

The simulation allowed us by finding the appropriate sensitivity which takes a value of 2.79mV/K corresponding to a current of 10 μ A, moreover a linearity was obtained for a thickness of 17.5 μ m and a concentration of 5*10¹⁵cm⁻³ of the device.

المخلص

يهدف هذا العمل إلى دراسة مستشعر درجة الحرارة على أساس الصمام الثنائي شوتكي ، في هذا العمل درسنا بشكل خاص تأثيرات التباين في سمك المنطقة الجوهرية وتباين تركيز المنشطات على حساسية وخطية الكاشف. من أجل العثور على جهاز استشعار أفضل بحساسية وخطية جيدة .

سمحت لنا المحاكاة بإيجاد الحساسية المناسبة التي تأخذ قيمة 2.79 mV / K تقابل تيار 10 μ A ، علاوة على ذلك تم الحصول على خطية لسمك 17.5 ميكرومتر وتركيز 5 * 10¹⁵ سم⁻³ من الجهاز.

index terms: Schottky diodes,4H-SiC temperature sensor ,semi conductor

TABLE DE MATIERE

TABLE DE MATIERE

CHAPITRE01

1-Introduction Générale	1
1.1 Introduction	3
1.2 .Les Propriétés de SiC	3
1.2.1. Propriétés physiques.....	3
1.2.1.1. Structure cristalline.....	3
1.2.1.2. Poly-types.....	4
1.2.2 Propriétés thermiques.....	6
1.2.3. Propriétés mécaniques.....	6
1.2.4. Propriétés optiques	7
1.2.5. Propriétés électriques du SiC	7
1.2.6 Propriétés des matériaux	8
1.3 . Dopage	8
1.3.1. Type N.....	8
1.3.2. Type P	9
1.4. Les applications	9
1.4.1. Applications hautes températures	9
1.4.2 Applications de puissance	9
1.5 Conclusion.....	10

CHAPITRE02

2.1. Introduction	12
2.2. Théorie du contact métal-semi-conducteur	12
2.3. Diode Schottky.....	14
2.3.1. Composants d'une diode Schottky	14
2.4. Schottky Barrière Hauteur.....	15
2.4.1 Travail de sortie des métaux.....	15
2.4.3. Affinité électronique.....	16
2.5. Zone de charge d'espace	17
2.5.1. Champ et potentiel électrique.....	18
2.6.Mécanismes de conduction dans une diode Schottky	20
2.6.1 Théories de transport des charges.....	21

TABLE DE MATIERE

2.6.1.1 Théorie de diffusion	21
2.6.1.2 Théorie d'émission thermoïnique.....	22
2.6.1.3 Théorie de l'émission-diffusion	23
2.6.2 Conduction par effet tunnel	24
2.6.3. Recombinaison dans la zone de charge d'espace	24
2.6.4 Recombinaison dans la région neutre (ohmiques).....	25
2.6.5. Densité de courant total.....	25
2.6.6. Modèle à barrière homogène	26
2.7. Exemples d'applications de diodes SiC Schottky	26
2.7.1 . Applications dans l'électronique de puissance.....	26
2.7.3. Détecteurs UV	27
2.8. Conclusion.....	28

CHAPITRE 03

3.1 Introduction	30
3.2. Processus de simulation	31
3.2.1. Présentation de SILVACO.....	31
3.2.2. DECKBUILD.....	32
3.2.3. Spécification de la structure et des propriétés électriques du dispositif (ATLAS).....	33
3.2.4. L'ordre des commandes dans ATLAS	33
3.3. Utilisation du logiciel « Silvaco-Atlas »	34
3.3.1. Les modèles physiques	35
3.3.2. Les méthodes numériques	35
3.4 Utilisation du langage de commande pour définir une structure	35
3.4.1. Maillage.....	35
3.4.2. Préciser les régions et le matériel	36
3.4.3. Spécifier du contact	37
3.4.5. Spécifier le dopage	39
3.5. Les solutions.....	39
3.6. Organigramme de Simulation.....	40
3.7. Conclusion.....	41

CHAPITRE 04

4.1. Introduction	43
4.2. Les modèles	43

TABLE DE MATIERE

4.2.1. CONSRH	43
4.2.2. AUGER	44
4.2.3. BGN :	44
4.2.4. Incomplète ionisation (manuelle silvaco).....	44
4.2.5. Mobilité :	45
4.3. Structure du détecteur	46
4.3.1. Maillage.....	46
4.3.3. Les électrodes.....	48
4.3.4. Dopage	48
4.4. Caractéristiques I-V-T	49
4.4.1. Effets des paramètres géométriques (Epilayer)	51
4.4.2. Performances des capteurs SBD.....	53
4.4.3. Effets des dopage à la performance de diode Schottky:	54
4.4.4. les courbes de tension en fonction de température:	55
4.4.5. Discussion des résultats	57
5.1. Conclusion générale.....	60
5.2. Le travail à future	Error! Bookmark not defined.
BIBLIOGRAPHIE	62

Liste des figures

1.1– La maille élémentaire du carbure de silicium.....	3
1.2 – Arrangements des plans cristallins pour les poly-types courants.....	4
1.3 – Empilage de séquences de bilayers SiC dans des poly-types communs.....	5
1.4 – La cellule unitaire des poly-types hexagonaux.....	6
2.1 . Courbe caractéristique de la densité de courant J en fonction de la tension V (a) pour un contact Schottky et (b) pour un contact ohmique.....	12
2.2 – Formation d’une barrière Schottky entre le métal et le semi-conducteur de type n : (a) neutre et isolé électriquement, (b) raccordé électriquement, (c) séparé par un espace étroit, (d) en contact parfait.....	13
2.3 :Symbole de diode Schottky.....	14
2.4 – Travail de Sortie d’un métal.....	16
2.5: Affinité électronique.....	17
2.6: Intégration successive de la densité de charge dans une diode Schottky type N à l’équilibre thermodynamique. a) diagramme énergétique b) charge d’espace dans le semi- conducteur c) potentiel électrique d) champ électrique.....	19
3.1: Interdisciplinarité de la simulation.....	30
3.2: l’interface DECKBUILD.....	32
3.3: Entrées / sorties d’ATLAS.....	33
3.4: Ordre des commandes sous ATLAS.....	34
3.5 – définition de maillage avec Atlas.....	36
3.6 – définition des régions.....	37
3.7 – définitions des électrodes.....	38
3.8 – définition de dopage.....	39
3.9 – La caractéristique courant-tension sous Tonyplot.....	40
3.10 . Organigramme de simulation.....	40
4.1 –Section transversale du détecteur.....	46
4.2 – Définition du maillage avec ATLAS.....	47
4.3 – Définition des régions.....	47
4.4 – Définition des électrodes.....	48
4.6 – Caractéristiques I-V pour différentes températures.....	49
4.7 – voltage en fonction de température.....	50
4.8.a – Caractéristiques I-V-T pour différents valeurs des épaisseurs.....	51
4.8.b – Caractéristiques I-V-T pour différents valeurs des épaisseurs.....	52

Liste des figures

4.8.c – Caractéristiques I-V-T pour différents valeurs des épaisseurs.....	52
4.9.a– Caractéristique V-T pour différent densité de courant.....	53.
4.9.b– Caractéristique V-T pour différent densité de courant.....	53
4.9.c– Caractéristique V-T pour différent densité de courant.....	54
4.10.a – caractéristiques I-V pour différentes températures.....	54
4.10.b – caractéristiques I-V pour différentes températures.....	55
4.10.c – caractéristiques I-V pour différentes températures.....	55
4.11.a – caractéristique V-T pour $ND=1.5*10^{15}$ cm-3.....	56
4.11.b – caractéristique V-T pour $ND=7*10^{15}$ cm-3.....	56
4.11.c – caractéristique V-T pour $ND=9*10^{15}$ cm-3.....	57

Liste des tableaux

1.1 – Propriétés thermiques des poly-types courants de SiC.....	6
1.2 – Propriétés mécaniques des poly-types courants de SiC.....	7
1.3 – Propriétés optiques des polytypes courants de SiC.....	7
1.4 – Propriétés électriques du SiC.....	8
2.1. Travaux de sortie de quelques métaux.....	15
2.2:Affinité électronique.....	17
3.1 – fonction de travail de divers métaux.....	38
4.1:variation de la sensibilité avec les paramètres géométrique et dopage.....	58

1-Introduction Générale

Le développement de l'électronique SiC a fait l'objet d'efforts de recherche internationaux considérables au cours des dix dernières années. Avec des applications prometteuses dans l'électronique de puissance, l'électronique d'environnement hostile et les capteurs, il y a un intérêt industriel considérable dans le SiC comme matériau pour l'électronique.

Dans ce travail, la technologie de capteur de température sur base semi-conductrice SiC Schottky (SD) est présentée. Ceci utilise un programme de simulation SILVACO, ce dernier est un logiciel qui permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs ζ semi-conducteur. C'est un outil de conception des dispositifs ζ semi-conducteur avant leurs fabrications. Il est très utile dans le développement de beaucoup de projets de recherches. Le TCAD Silvaco inclut de nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, l'optimisation solution linéaire, etc., toutes en permettant d'obtenir des résultats de simulation très proches de celles de la pratique.

Ce travail comporte quatre chapitres. telle que :

- Dans le premier chapitre, nous allons parler des propriétés les plus importantes du carbure de silicium et de certaines de ses applications.
- Et au deuxième chapitre, nous étudierons Théorie du contact métal-semiconducteur, et nous représenterons une description générale sur la diode Schottky.
- Quant au troisième chapitre, nous vous expliquerons le logiciel de simulation TCAD Atlas-Silvaco,
- Enfin, Dans le chapitre quatre les résultats de la simulation ont été discutés et analysés.

Chapitre 01

Les Matériaux 4H.SIC

1.1. Introduction

Le carbure de silicium (SiC) est le seul composé binaire stable connu de silicium et de carbone. Le SiC est un semi-conducteur attrayant en raison de ses propriétés électriques, thermiques, chimiques et mécaniques supérieures. Ses propriétés telles qu'une large bande interdite, une conductivité thermique élevée, un champ de claquage élevé, une vitesse de dérive d'électrons à saturation élevée, une stabilité chimique élevée et une résistance mécanique élevée en font un matériau prometteur pour les appareils électroniques de nouvelle génération pour les applications hautes puissance, haute température et haute fréquence.

1.2 .Les Propriétés de SiC

1.2.1. Propriétés physiques

1.2.1.1. Structure cristalline

Les propriétés physiques, chimiques, mécaniques et thermiques du carbure de silicium découlent de la configuration de la maille cristalline élémentaire. Celle-ci est de forme tétraédrique et comporte autant de carbone que de silicium, comme illustré par la figure(1.1)

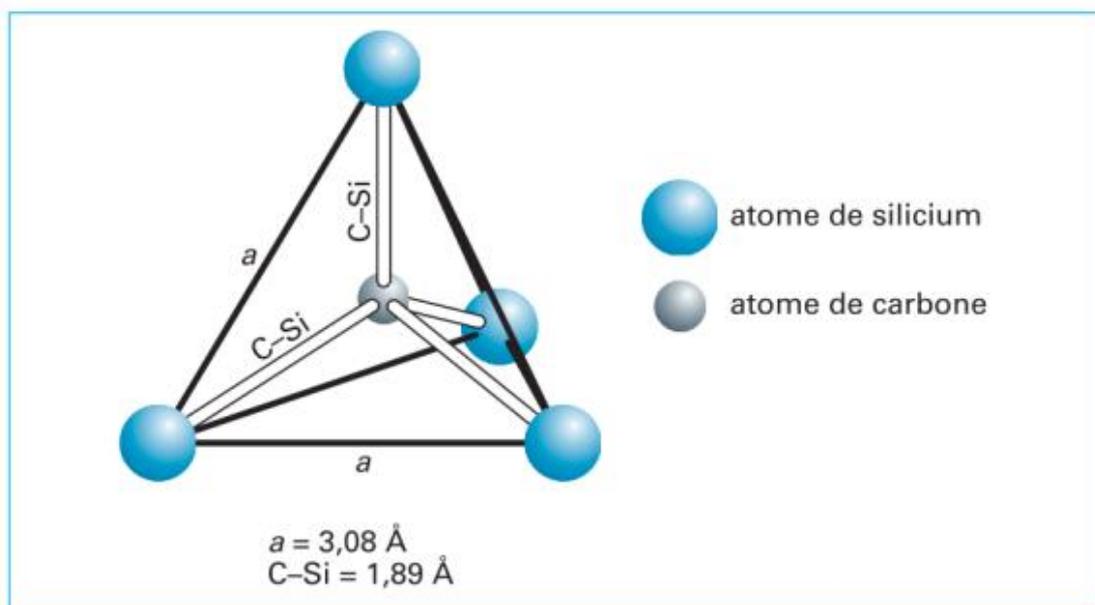


Fig 1.1 – La maille élémentaire du carbure de silicium[1]

Étant donné qu'il y a un transfert de charge du silicium vers le carbone d'environ 0.89 électrons sur le SiC-3C, les liaisons chimiques entre carbone et silicium ne sont pas 100% covalentes.

Pour les poly-types hexagonaux le transfert de charge est réduit de 0.01 – 0.04 électrons[1]
 Néanmoins, elles sont considérées comme des liaisons covalentes fortes dans la littérature
 L'énergie moyenne liante pour C-Si est de 360 kJ/mol (≈ 3.7 eV par liaison) [1]. Celle-ci rend
 le cristal très stable, chimiquement neutre et confère des propriétés mécaniques et thermiques
 exceptionnelles[1]

1.2.1.2. Poly-types

Les cristaux de carbure de silicium d'Acheson avaient en fait plusieurs structures cristallographiques appelées poly-types, Les poly-types les plus couramment utilisés aujourd'hui sont : le 2H, le 3C, le 4H et le 6H. L'arrangement des plans atomiques pour ces 4 cristaux est illustré dans la figure (1.2) [1] . Aujourd'hui, fait unique en cristallographie, plus de 170 poly-types ont été recensés pour SiC même si peu d'entre eux peuvent être synthétisés.

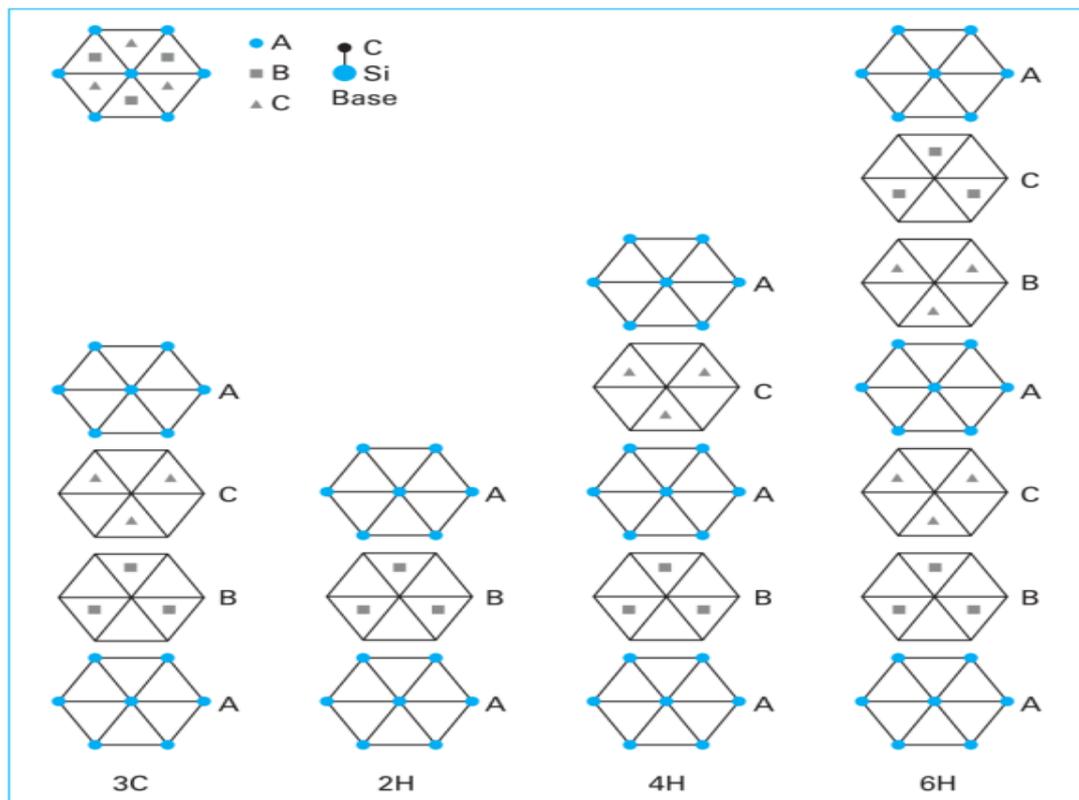


Figure 1.2 – Arrangements des plans cristallins pour les poly-types courants.[1].

Le carbure de silicium est le seul composé stable dans le système silicium-carbone, mais peut cristalliser sous une multitudes de formes dites variétés allotropiques ou poly-types. Ainsi il en existe plus de 170 pour le carbure de silicium : cubique, hexagonales, rhomboédriques . Le seul poly-types cubique connu (3C) est appelé - SiC, tandis que les poly-types hexagonaux et rhomboédriques sont collectivement appelés SiC. Selon la périodicité de la séquence d'empilement, les poly-types sont appelés 3C,4H, 6H, 15R, etc. Ainsi, le 4H-SiC a une structure cristalline hexagonale avec une périodicité de 4 bicouches, tandis que le 15R-SiC a une structure cristalline rhomboédrique avec une périodicité de 15 bicouches .Les séquences d'empilement des poly-types courants de SiC sont représentées sur la figure (1.3)

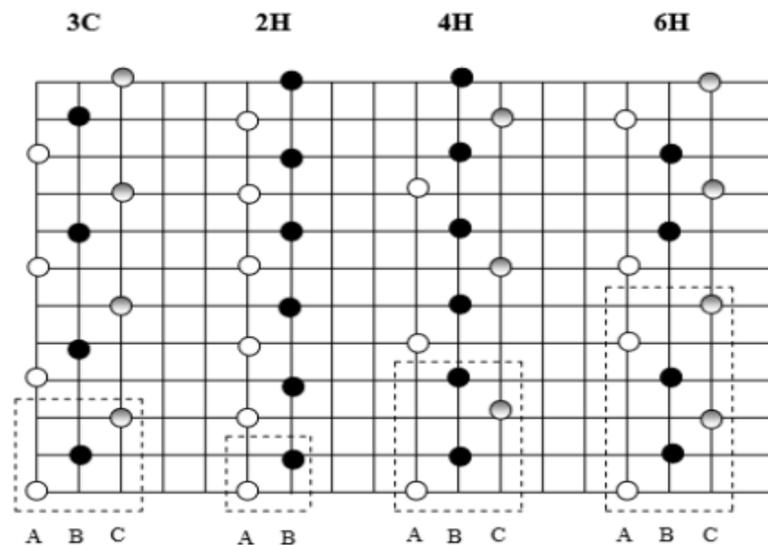


Figure 1.3 – Empilage de séquences de bilayers SiC dans des poly-types communs.

La cellule unitaire des poly-types hexagonaux de SiC est représentée sur la figure (1.3). Le plan formé par la feuille bicouche d'atomes de Si et C est connu comme le plan basal [3]. Le plan basal a 3 axes à un angle de 120° entre eux. L'axe perpendiculaire au plan basal est l'axe c, qui est également la direction d'empilement des bicouches. Les plans des cristaux de SiC ont donc besoin de quatre indices Miller pour référence. Ainsi, la direction d'empilement ou la direction [0001] est l'axe c cristallographique qui est défini normal au plan basal

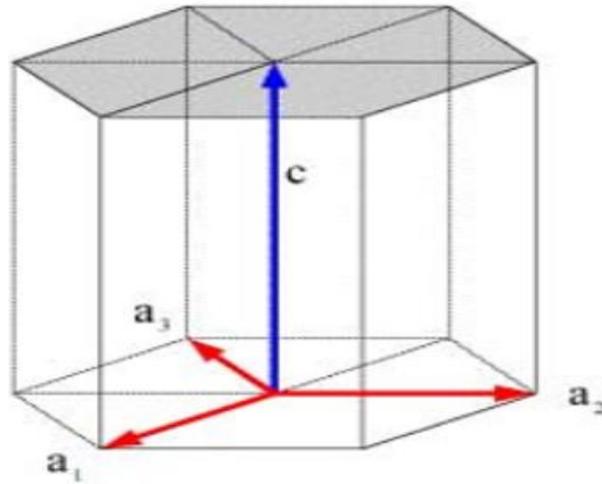


Figure 1.4 – La cellule unitaire des poly-types hexagonaux de [2].

1.2.2 Propriétés thermiques

Les excellentes propriétés à haute température rendent le SiC très adapté aux applications électroniques à haute température. Le module élastique élevé du SiC et les poids atomiques relativement faibles du Si et du C favorisent les vibrations du réseau harmonique, conférant au SiC une conductivité thermique élevée. Du point de vue de l'application du dispositif, la conductivité thermique du SiC dépasse celle du cuivre, du BeO, de l'Al₂O₃ et de l'AlN [3]. Le thermique, les propriétés des 3C, 4H et 6H-SiC sont énumérées dans le tableau 1.1

Propriétés à 300K	Si	SiC-3C	SiC-4H	SiC-6H
<i>Température de fusion(K)</i>	1687	3103 ¹	3103 ¹	3103 ¹
<i>Conductivité thermique (W.m⁻¹.°C⁻¹)</i>	148	360	370	490
<i>Chaleur spécifique (J kg⁻¹.°C⁻¹)</i>	700	690	690	690

Tab 1.1 – Propriétés thermiques des poly-types courants de SiC [1]

1.2.3. Propriétés mécaniques

SiC est l'un des matériaux les plus difficiles connus et est largement utilisé comme un outil de coupe ou un abrasif. Vous trouverez ci-dessous le tableau 1.2 quelques-unes des excellentes propriétés mécaniques :

¹ Sublimation à 35 bar

CHAPITRE01: Les Matériaux 4H-SiC

Propriétés	Si	SiC-3C	SiC-4H	SiC-6H
<i>Module d'élasticité isostatique c_{11}(GPa)</i>	165.6	-	507	501
<i>Dureté (échelle Mohs)</i>	7	9.2-9.3	9.2-9.3	9.2-9.3
<i>Vélocité acoustique</i>		12600	13730	13100-13260

Tab 1.2 – Propriétés mécaniques des poly-types courants de SiC

1.2.4. Propriétés optiques

Le carbure de silicium est un matériau électroluminescent et est donc largement utilisé pour la fabrication de LED bleues et de détecteurs ultraviolets. Le tableau 1.3 répertorie certaines des propriétés de sic.

Propriétés	Si	SiC-3C	SiC-4H	SiC-6H
La bande optique (eV)	2.1	2.4-2.6	2.7	2.86
Energie d'excitation (eV)	2.31	2.39	3.27	3.02
indice de réfraction infrarouge	2.55	2.55	2.55	2.55

Tab 1.3 – Propriétés optiques des polytypes courants de SiC.

1.2.5. Propriétés électriques du SiC

Comme le montre le tableau 1.4 le champ électrique durable élevé, la conductivité thermique élevée, la vitesse saturée des porteurs élevés et la bande interdite élevée, font du carbure de silicium un matériau approprié pour les applications hautes puissance, haute température et haute fréquence, Les propriétés électriques sont fortement liées au polytype et spécialement à la structure de bande. Tous les poly-types de SiC sont des matériaux à bande interdite indirecte, c'est-à-dire que les transitions des électrons de la bande de valence à la bande de conduction sont accompagnées d'un changement de vecteur d'onde et donc de pertes énergétiques par phonons, ce qui n'en fait pas un candidat intéressant pour les applications optroniques. Par contre, c'est un candidat largement utilisé comme support pour la croissance de GaN pour diodes électroluminescentes (diodes bleues). La permittivité diélectrique du SiC est plus faible que celle du silicium. À haute fréquence, on trouve les valeurs relatives de 6.52 et 6.74 et à basses fréquences. La permittivité diélectrique est fortement liée aux écarts entre les différentes bandes permises.

Property	Si	GaAs	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC
Energy Bandgap [eV]	1.12	1.42	2.3	3.0	3.2
Critical Field at $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [MV/cm]	0.6	0.6	1.8	\parallel 3.2 \perp >1	\parallel 3.0 \perp 2.5
Thermal Conductivity [W/cmK]	1.5	0.5	3-5	3-5	3-5
Saturated Electron Drift Velocity [10^7 cm/s]	1.0	1.2	2.5	2.0	2.0
Electron Mobility at $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ [cm^2/Vs]	1200	6500	750	\parallel 60 \perp 400	\parallel 800 \perp 800
Hole Mobility at $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ [cm^2/Vs]	420	320	40	90	115
Relative Dielectric Constant	11.9	13.1	9.7	9.7	9.7

Tab 1.4 – Propriétés électriques du SiC [4].

1.2.6 Propriétés des matériaux

Le SiC est un semi-conducteur prometteur pour les applications de détection d'environnement difficile en raison de ses excellentes propriétés électriques et physiques [4] -[3]. L'énergie à large bande interdite et la faible concentration intrinsèque des porteurs permettent aux dispositifs semi-conducteurs à base de SiC de fonctionner à des températures beaucoup plus élevées. De plus, un champ de claquage élevé, une vitesse d'électrons saturée élevée et une conductivité thermique élevée permettent aux dispositifs SiC de fonctionner dans des conditions extrêmes. Les propriétés de base des matériaux de trois polytypes de SiC sont résumées dans le tableau 1-2 [3]. Le champ critique et la mobilité du SiC sont anisotropes et dépendent fortement des directions cristallographiques du champ électrique appliqué et du flux de courant. À titre de comparaison, les propriétés du Si et de l'arséniure de gallium (GaAs) sont également incluses dans le tableau 1-2. Le 4H-SiC est utilisé dans ce travail grâce à la bande interdite d'énergie la plus large.

1.3 . Dopage

1.3.1. 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. 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.

1.3.2. 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'hétérostructure.[5]

1.4. Les applications

1.4.1. 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 semi conductrices «normales » à très haute température, jusque vers 1000K 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. Cependant, il faut tenir compte de certains phénomènes qui pénalisent le composant à haute température, en particulier la mobilité des porteurs et la conductivité thermique diminuent avec la température, pénalisant ainsi les performances électriques et thermiques du composant. On pourra arriver dans certaines conditions à la destruction du composant par emballement thermique.

1.4.2 Applications de puissance

En plus du fonctionnement à haute température envisageable avec le SiC, une très bonne conductivité thermique (de l'ordre de celle du cuivre à 300K) permet d'évacuer efficacement l'énergie dissipée lors du fonctionnement du composant, par simple conduction dans le matériau. Cet atout est particulièrement intéressant dans le cas des composants de puissance. D'autre part, 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, c'est-à-dire 100 fois moins

résistantes à l'état passant [6]. Le champ d'application des composants. À conduction majoritaire (MOSFET, diodes Schottky par ex.) peut ainsi 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/tenue en tension/état passant, qui le réserve aux basses tensions (« <200V pour les diodes Schottky). En SiC, des composants de plusieurs kV ont été réalisés et ont démontré la faisabilité de telles structures.

1.5 Conclusion

Le carbure de silicium a également des applications électroniques qui remontent au début du 20e siècle avec les premières radios, puis des diodes électroluminescentes (LED) aujourd'hui, ce matériau est employé dans les composants électroniques devant fonctionner à température élevée, ou sous des tensions élevées. Dans ce chapitre, les différentes propriétés des matériaux, la structure cristalline, la poly-types et les applications du SiC sont discutées.

Chapitre 2
Les bases des diodes
Schottky

2.1. Introduction

Comme les autres diodes, la diode Schottky est utilisée pour contrôler la direction du flux de courant dans un circuit, lui permettant de ne passer que de l'anode à la cathode. Les diodes Schottky, cependant, offrent certains avantages par rapport aux autres diodes - et les diodes SIC Schottky offrent des performances encore meilleures. Les diodes Schottky sont utilisées pour leur basse tension d'activation, leur temps de récupération rapide et leur faible perte d'énergie à des fréquences plus élevées. Ces caractéristiques rendent les diodes Schottky capables de rectifier un courant en facilitant une transition rapide de l'état conducteur à l'état de blocage.

2.2. Théorie du contact métal-semi-conducteur

Lorsqu'un contact mis en contact avec un semi-conducteur, il peut être redresseur (Schottky) ou ohmique. la figure 2.1 illustre la caractéristique de la densité de courant en fonction de la tension pour un contact redresseur et un contact ohmique . Le contact redresseur bloque le passage du courant en inverse et possède une faible tension de seuil en direct comme le montre la figure 2.1.a. Le contact ohmique laisse passer le courant quelle que soit la polarisation comme est illustré dans la figure 2.1.b.[6]

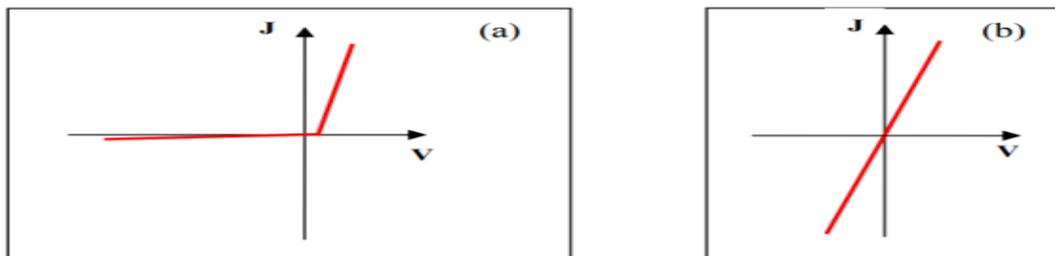


Fig 2.1 . Courbe caractéristique de la densité de courant J en fonction de la tension V (a) pour un contact Schottky et (b) pour un contact ohmique..

Pour voir comment une barrière Schottky est formé, supposons que le métal et les semi-conducteurs sont électriquement neutres et isolés l'un de l'autre. Le diagramme de la bande d'énergie à la fig. 2.2(a) est destiné à un semi-conducteur de type n dont la fonction de travail (s) est inférieure à celle du métal (m). C'est le cas le plus fréquent observé lors de la formation de contacts Schottky. Si le métal et le semi-conducteur sont reliés électriquement par un fil, les électrons passeront du semi-conducteur dans le métal et les deux niveaux de

CHAPITRE02: les bases de la diode Schottky

Fermi sont forcés d'aligner comme le montre la Fig. 2.2(b). Il y a un champ électrique dans l'espace et il y a une charge négative sur la surface du métal, qui est équilibrée par une charge positive dans le semi-conducteur. Si le métal et le semi-conducteur s'approchent l'un de l'autre comme le montre la fig. 2.2(c), la différence de potentiel entre les potentiels électrostatiques entre les surfaces du métal et le semi-conducteur tend à zéro, puisque le champ électrique est fini. Quand ils touchent finalement, la barrière due à l'écart disparaît complètement et nous obtenons un contact métal semi-conducteur idéal.

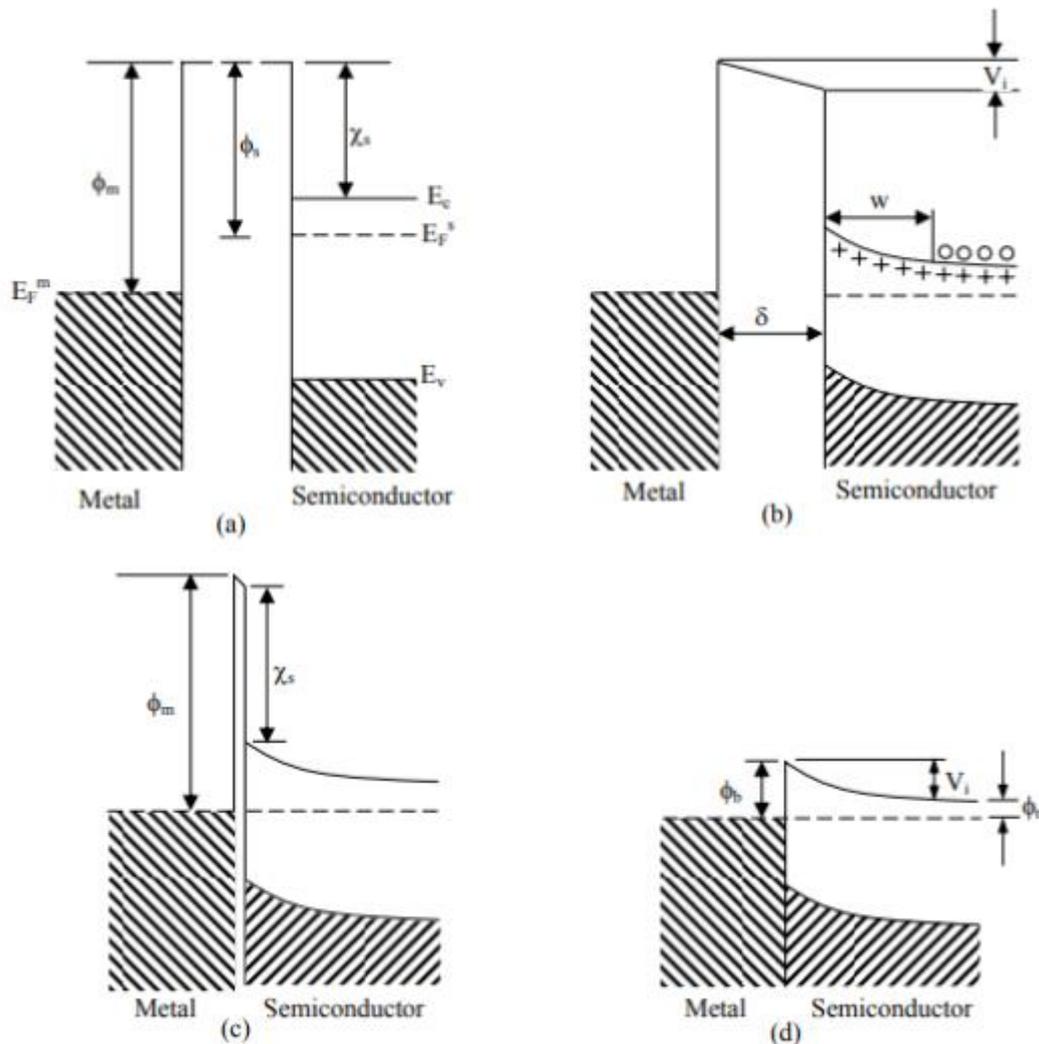


Fig 2.2 – Formation d'une barrière Schottky entre le métal et le semi-conducteur de type n : (a) neutre et isolé électriquement, (b) raccordé électriquement, (c) séparé par un espace étroit, (d) en contact parfait. [7].

Dans la plupart des cas pratiques, la situation idéale indiquée à la Fig. 2.2(d) n'est jamais atteinte parce qu'il y a généralement une mince couche isolante d'oxyde d'environ 10-20Å d'épaisseur sur la surface du semi-conducteur. Une telle couche isolante est appelée couche interfaciale. Un contact pratique est donc Plus comme cela montre à Fig. 2.2(c). Cependant, la

barrière présente aux électrons par la couche inter-faciale est généralement sa flèche que les électrons peuvent percer assez facilement.[7]

2.3. Diode Schottky

Une diode Schottky doit son nom à Walter H. Schottky (1886-1976) " ; est une diode qui a un seuil de tension directe très bas (0.3V) et un temps de commutation très rapide. Ceci permet la détection des signaux HF (haut fréquence). Les diodes de redressement et Schottky sont des composants très courants dans le secteur de l'électronique. Elles sont utilisées dans des dispositifs de toutes tailles, allant des unités à basse puissance aux équipements industriels de grandes dimensions. Ce sont des composants électroniques qui régulent le flux électrique, autorisant son passage dans une seule direction et l'interdisant dans l'autre. Dans un monde idéal, ces dispositifs devraient autoriser une quantité illimitée de courant dans une direction et bloquer une quantité illimitée de courant dans l'autre direction. Mais telle n'est pas la réalité. Les diodes sont spécifiées pour fonctionner à différents niveaux de courant et de tension. Une diode de redressement ou redresseur sert à transformer le courant alternatif en courant continu. Comme une diode n'autorise le passage du courant que dans une seule direction, le courant alternatif ne peut pas circuler dans l'autre direction. Ce processus d'élimination du courant circulant dans une direction est appelé redressement.

2.3.1. Composants d'une diode Schottky

Une diode Schottky a les mêmes composants de base qu'une autre diode, mais ses matériaux principaux diffèrent de ceux des diodes P-N, qui sont les plus courantes



Figure 2.3 :Symbole de diode Schottky[8]

Ces composants de base incluent les fils qui la relient au circuit et les matériaux semi-conducteurs qui assurent son fonctionnement. Les diodes standard sont basées sur la jonction de deux semi-conducteurs : l'un dopé « P » l'autre dopé « N ». L'anode est le fil positif et la cathode est le fil négatif de la diode. Au lieu d'un matériau semi-conducteur de type P et d'un

matériau semi-conducteur de type N, le cœur d'une diode Schottky réunit un matériau semi-conducteur de type N et un métal. Les métaux utilisés incluent le chrome (Cr) et le tungstène(W), mais aussi des métaux précieux comme le platine (Pt) et le palladium (Pd).

2.4. Barrière de potentiel

Le contact métal-semi-conducteur est ohmique ou redresseur suivant la différence des travaux de sortie et le type de semi-conducteur.[9]

2.4.1 Travail de sortie des métaux

Appelé aussi travail d'extraction, il représente l'énergie minimale requise pour retirer complètement un électron d'une surface métallique. Cette énergie dépend de la nature du métal, et est définie comme la différence entre le niveau de vide N_V et le niveau de Fermi dans le métal E_{Fm} [9]. Dans le métal, l'électron de conduction est soumis à un ensemble de forces d'interaction dont la résultante est nulle. Il en résulte que cet électron est libre de se déplacer, sous l'action d'un champ appliqué par exemple. Quand l'électron atteint la surface du métal, la compensation des forces d'interaction entre elles n'est plus totale, l'électron est retenu à l'intérieur du métal. Pour extraire cet électron, il faut lui fournir de l'énergie. Au zéro degré absolu, tous les électrons libres sont situés dans la bande de conduction au-dessous du niveau de Fermi. Il en résulte que l'énergie minimum qu'il faut fournir pour extraire un électron du métal, est l'énergie nécessaire à l'extraction d'un électron du niveau de Fermi pour l'amener au niveau du vide N_V . Cette quantité est appelée travail de sortie du métal et est notée $[U+F066]m$. Le tableau (2.1) donne le travail de sortie de certains métaux utilisés en microélectronique ou optoélectronique.

Elément	Travail de Sortie (eV)
Pt	5.65
Ni	5.15
Au	5.10
Ti	4.33

Tab 2.1. Travaux de sortie de quelques métaux .

Le travail de sortie d'un métal (figure 2.4) est donc donné par l'expression suivante :

$$q\Phi_m = N_V - E_F \dots\dots\dots(2.1)$$

Où N_V représente l'énergie d'un électron extrait du corps et sans vitesse initiale. C'est l'énergie potentielle de l'électron dans le vide au voisinage du corps étudié.

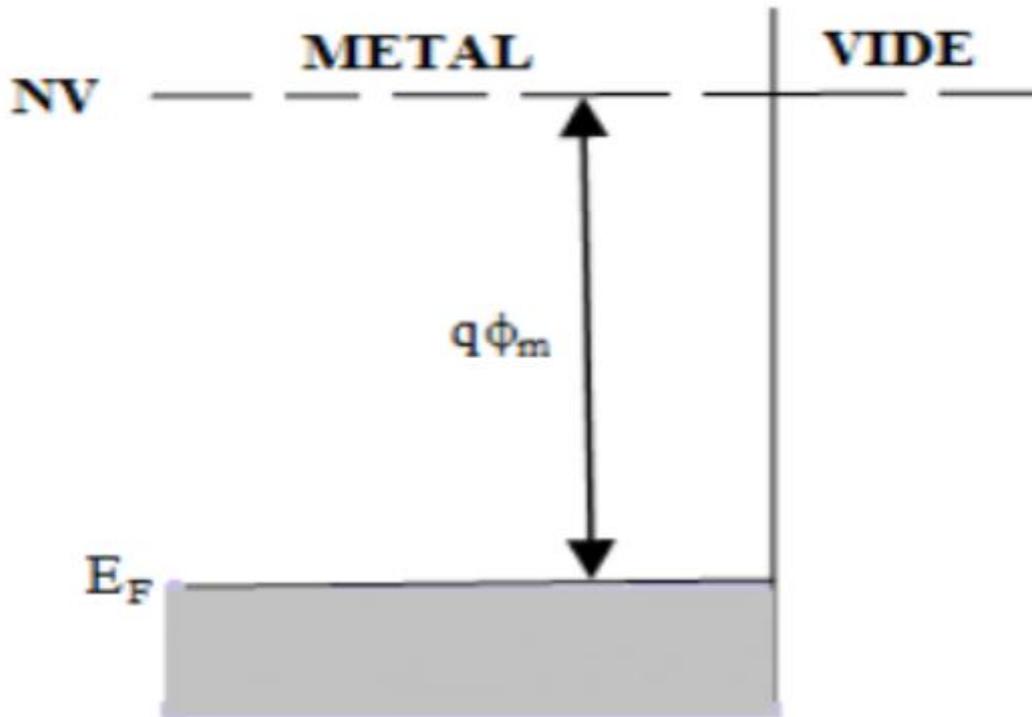


Fig 2.4 – Travail de Sortie d'un métal.

Il est à noter que pour un semi-conducteur le travail de sortie est en fonction du matériau et du dopage (puisque le niveau de Fermi est fonction du dopage)[9]

2.4.3. Affinité électronique

L'affinité électronique est une constante du matériau semi-conducteur, elle représente le changement d'énergie d'un atome neutre lorsqu'un électron lui est ajouté. Elle est définie comme la différence d'énergie entre le niveau de vide N_V et la bande de conduction, son unité est le KJ / mole

Dans les semi-conducteurs et les isolants, le travail de sortie SC $q\phi$ est défini de la même manière. Cependant, pour les semi-conducteurs, la position du niveau de Fermi dépend du dopage et SC $q\phi$ n'est pas une constante physique du matériau. Sauf pour les semi-conducteurs dégénérés, il n'y a pas d'électron au niveau de Fermi. On définit alors l'affinité SC $q\chi$ électronique comme l'énergie qu'il faut fournir à un électron situé au bas de la bande de conduction pour l'amener au niveau du vide. Cette grandeur est une constante physique du semi-conducteur : et est donnée par l'expression.

$$q\chi_{sc} = NV - E_C \dots\dots\dots(2.2)$$

la figure suivante montre la fonction :

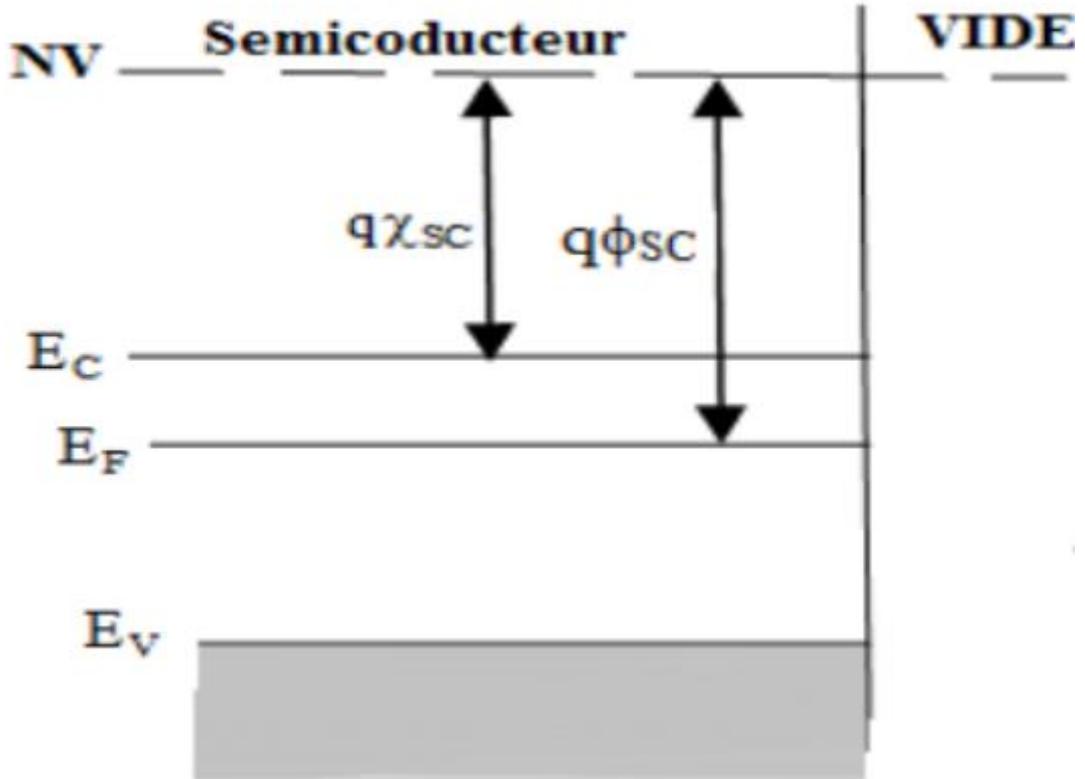


Fig 2.5: Affinité électronique

Le tableau suivant donne quelques valeurs d'affinité électronique de quelques semi-conducteurs:

Elément	Affinité électronique (eV)
Ge	4.13
GaAs	4.07
Si	4.01
AlAs	3.5

Tab 2.2:Affinité électronique

2.5. Zone de charge d'espace

La zone de charge d'espace (ZCE) correspond à la région qui apparaît dans une jonction (PN ou M-S), à l'interface du contact. Elle est appelée « zone de déplétion » ou « zone désertée » parce qu'elle est dépourvue de porteurs libres, et « zone de charge d'espace » parce

qu'elle est constituée de deux zones chargées électriquement (contrairement au reste de la structure)

2.5.1. Champ et potentiel électrique

Considérons la structure métal-semi-conducteur de type N, avec $\Phi_m > \Phi_{sc}$. On obtient la distribution du potentiel dans la zone de charge d'espace en intégrant l'équation de Poisson. Nous supposons que le semi-conducteur est homogène. Avec une densité de donneurs N_D . Nous admettrons que tous les donneurs sont ionisés à la température ambiante. Nous ferons l'hypothèse de la zone de charge d'espace vide de porteurs, W est la largeur de cette zone. Ainsi la densité de charge dans le semi-conducteur (figure 2.6) s'écrit²:

$$0 < x < W \quad \rho(x) = e.N_D \dots\dots\dots(2.3)$$

$$x > W \quad \rho(x) = 0 \dots\dots\dots(2.4)$$

L'équation de Poisson s'écrit :

$$V(x) = \frac{-eN_D}{\epsilon_{sc}} \left(\frac{x^2}{2} - Wx \right) \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\frac{dV(x)}{dx} = -E(x) = -\frac{eN_D}{\epsilon_{sc}} (x - W) \dots\dots\dots(2.6)$$

Le champ électrique est négatif et varie linéairement dans la zone de charge d'espace (figure 2.6) sa valeur à l'interface est :

$$E_s = -\frac{eN_D}{\epsilon_{sc}} W \dots\dots\dots(2.7)$$

En intégrant une deuxième fois en prenant l'origine des potentiels à l'interface, on obtient :

$$V(x) = \frac{-eN_D}{\epsilon_{sc}} \left(\frac{x^2}{2} - Wx \right) \dots\dots\dots(2.8)$$

La tension de diffusion résulte de la différence des travaux de sortie du métal et du semiconducteur $V_d = \Phi_m - \Phi_{sc}$. Cette tension correspond à la différence de potentiel entre la surface du semiconducteur et son volume, c'est-à-dire aux bornes de la zone de charge

² Lamia MEDJOUDJ " Simulations d'une diode Schottky à base d'AlGaAs " mémoire 2018 (P20-24) Université TIZI-OUZOU

CHAPITRE02: les bases de la diode Schottky

d'espace

$$V_d = V(x=W) - V(x=0) = -\frac{eN_D}{\epsilon_{SC}} \left(\frac{x^2}{2} - W^2 \right) = \frac{eN_D}{2\epsilon_{SC}} W^2 \dots\dots\dots(2.9)$$

D'où l'expression de la largeur de la zone de charge d'espace à l'équilibre

$$W^2 = \frac{2\epsilon_{SC}}{eN_D} V_d = \frac{2\epsilon_{SC}}{eN_D} (\Phi_m - \Phi_{SC}) \dots\dots\dots(2.10)$$

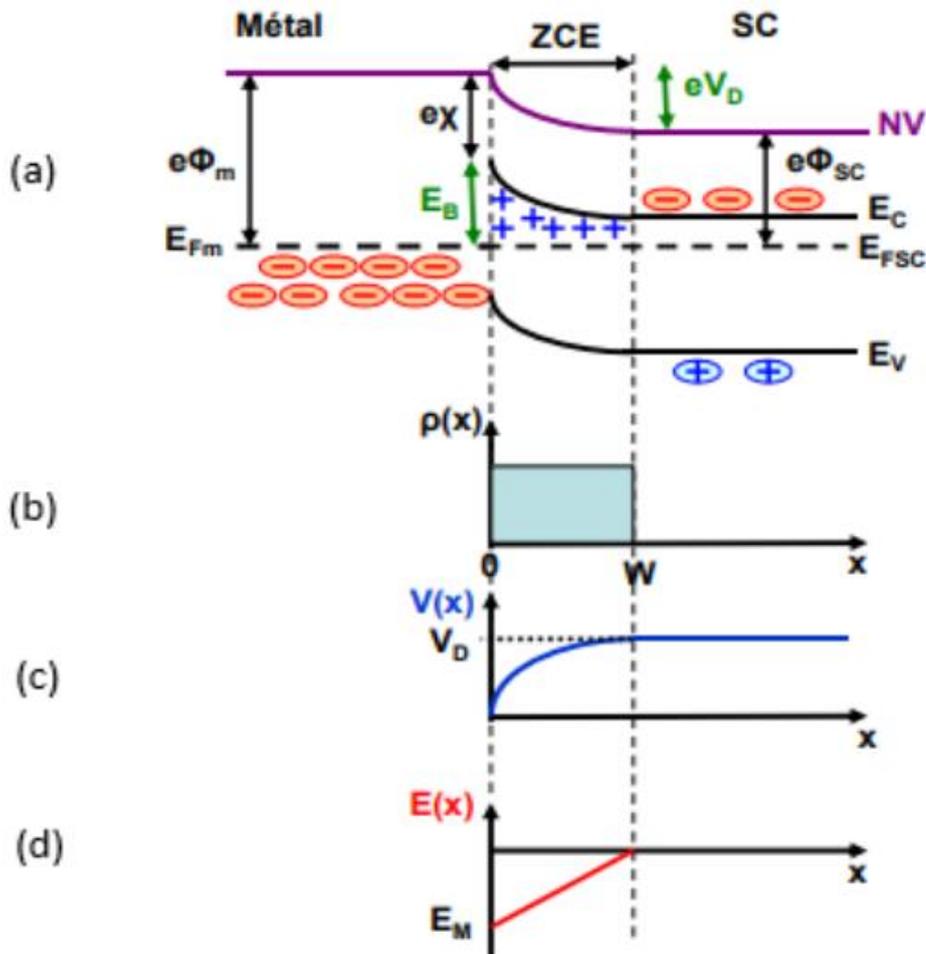


Fig 2.6: Intégration successive de la densité de charge dans une diode Schottky type N à l'équilibre thermodynamique. a) diagramme énergétique b) charge d'espace dans le semi-conducteur c) potentiel électrique d) champ électrique³[12]

³ C. ALGANI, « Composant électronique », Conservatoire National des Art des des Métiers, Cours. [En ligne] http://easytp.cnam.fr/algani/images/ELE101_CNAM_1_2008.pdf (consulté le 03 avril 2018)

Remarque

Si on prend en considération la contribution des porteurs libres, la densité de charge s'écrit : $\rho(x) = [N_d - n(x)]$ dans l'équation de poisson et la largeur devient :

$$W^2 = \frac{2\epsilon_{sc}}{qN_d} \left(V_d - \frac{kT}{q} \right) \text{ et } q=e \dots\dots\dots(2.11)$$

2.6.Mécanismes de conduction dans une diode Schottky

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

$$J = J_0 \left(e^{\frac{qV}{\eta kT}} - 1 \right) \dots\dots\dots(2.12)$$

Avec : **V** : la tension appliquée, **η**: le facteur d'idéalité, **J₀** : la densité de courant de saturation, **K** : la constante de Boltzmann, **T** : la température en (K).

L'équation de la densité de courant de saturation **J₀** est donnée sous la forme suivante :

$$J_0 = A^* T^2 e^{-\frac{q\Phi_B}{kT}} \dots\dots\dots(2.13)$$

A* : constante de Richardson

D'où on peut extraire la hauteur de la barrière de Schottky Pour une diode Schottky idéale, le facteur d'idéalité, n est égale à l'unité, et la hauteur de la barrière (en eV) est indépendante de la température et de la tension de polarisation. La densité de courant de saturation J₀ , et le facteur d'idéalité n peuvent être obtenus à partir de l'interception et de la pente des courbes ln(J) = f(V), respectivement, sous la forme :

$$\ln J = \ln J_0 + qV/\eta kT \dots\dots\dots(2.13)$$

Si A* est connu, la hauteur de la barrière Schottky peut être calculée après que J₀ soit déterminé à partir de l'équation (2.13):

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A^* T^2}{J_0}\right) \dots\dots\dots(2.14)$$

CHAPITRE02: les bases de la diode Schottky

Dans la pratique, A^* est inconnue et les mesures courant – tension dépendants de la température sont utilisés pour déterminer la hauteur de la barrière et la constante de Richardson. Celles-ci peuvent être extraites par la méthode de Richardson :

$$\ln\left(\frac{J_0}{T^2}\right) = \ln A^* - \frac{q}{kT} \phi_B \dots\dots\dots(2.15)$$

Pour la plupart des diodes Schottky, cependant, on a observé une déviation de l'émission thermoionique idéale. On observe aussi que le facteur η d'idéalité augmente considérablement quand la température est abaissée (et est beaucoup plus grand que l'unité à des températures basses). D'ailleurs, les courbes conventionnelles de Richardson $\ln(J_0/T^2) = f(1/T)$ ne sont pas linéaires. Au lieu de cela, les courbes modifiés $\ln(J_0/T^2) = f(1/\eta T)$, qui sont linéaires, sont employés pour extraire la hauteur de la barrière Schottky. Pour les semi-conducteurs non dopés ou faiblement dopés, on constate que cette déviation ne peut pas être expliqué par l'effet Schottky, les effets tunnel, ou le courant de recombinaison dans la région de déplétion. Pour expliquer ces anomalies de la barrière Schottky, beaucoup de modèles ont été établi comme les états d'interface et la couche interfaciale. Dans la section suivante, une théorie générale des mécanismes de conduction est brièvement décrite.

2.6.1 Théories de transport des charges

Dans une barrière Schottky, différents mécanismes de transport de charges peuvent exister simultanément ou séparément et être responsables du passage du courant.

- Emission d'électrons du semi-conducteur vers le métal au-dessus de la barrière.
- Courant dû au passage des électrons à travers la barrière par effet tunnel.
- Recombinaison dans la zone de charge d'espace.
- Recombinaison dans la région neutre.

2.6.1.1 Théorie de diffusion

Proposée par Schottky et Spenke en 1939 [16], cette théorie suppose que les électrons migrent du semi-conducteur au métal par-dessus la barrière 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 pour un semi-conducteur de type N, dans le côté semi-conducteur de l'interface du M-S est donnée par :

$$n = N_c \exp\left[-\frac{q(E_C - E_{FSC})}{kT}\right] \dots\dots\dots(2.16)$$

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

$$J = qn\mu E + qD_n \frac{dn}{dx} \dots\dots\dots(2.17)$$

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

$$J = J_0 (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \dots\dots\dots(2.18)$$

Où la densité du courant de saturation J_0 est :

$$J_0 = qN_c \mu E_{\max} (e^{-q\phi_B/kT}) \dots\dots\dots(2.19)$$

Le champ électrique maximum dans la jonction est donné par

$$E_{\max} = qN_D \frac{W}{\epsilon_{SC}} \dots\dots\dots(2.20)$$

W est largeur de la zone de déplétion du semi-conducteur.

2.6.1.2 Théorie d'émission thermoïonique

En 1928 Owen Richardson reçut le prix Nobel sur 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 type N de l'interface M-S est augmentée par un facteur $\exp(qV/kT)$ quand une tension de polarisation est appliquée [17].

$$n = N_c \exp\left[-\frac{q(\phi_B - V)}{kT}\right] \dots\dots\dots(2.21)$$

Où N_c est la densité d'états effectifs des électrons dans la bande de conduction du semi-conducteur, ϕ_B la hauteur de la barrière Schottky (en eV) et V la tension appliquée. La densité

du courant dû à l'émission thermoïonique des électrons au-dessus de la barrière est donnée par l'expression :

$$J = J_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \dots\dots\dots(2.22)$$

Où J_0 , selon la loi de Richardson, est :

$$J_0 = A^*T^2 e^{-\frac{q\Phi_B}{kT}} \dots\dots\dots(2.23)$$

avec $A^* = 4\pi m^* qk^2 / h^3 \dots\dots\dots(2.24)$

m^* la masse effective des électrons dans le semi-conducteur, h la constante de Planck.

2.6.1.3 Théorie de l'émission-diffusion

La théorie combinée de l'émission thermoïonique-diffusion était présentée par Crowell et Sze en 1966 [16]. Dans cette théorie on définit une vitesse de recombinaison v_r au maximum potentiel. La densité de courant au sommet de la barrière pour un semi-conducteur de type N est :

$$J = q(n_m - n_0)v_r \dots\dots\dots(2.25)$$

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

$$n_m = N_C \exp[-q(\phi_B - \frac{\phi(x_m)}{kT})] \dots\dots\dots(2.26)$$

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

$$n_0 = N_C \exp(-q\phi_B / kT) \dots\dots\dots(2.27)$$

L'expression finale du courant est la même que précédemment (théorie de diffusion et de l'émission thermoïonique), la différence réside au niveau du courant de saturation comme le montre la relation suivante [17]

$$J = A_n^{**}T^2 e^{(-q\phi_{Bn}/kT)} (e^{qV/kT} - 1) \dots\dots\dots(2.28)$$

$$\text{Où } A_n^{**} = \frac{\theta_n A_n^*}{1 + \theta_n \frac{v_{Rn}}{v_{Dn}}} \dots\dots\dots(2.29)$$

θ : coefficient de transmission tunnel des porteurs majoritaires (électrons)

v_{Rn} : vitesse de recombinaison effective des électrons au sommet de la barrière.

v_{Dn} : vitesse de diffusion effective.

Si $v_{Dn} \ll v_{Rn}$, le processus de diffusion est dominé.

Si $v_{Dn} \gg v_{Rn}$, celui de l'émission thermoïonique est dominé.

2.6.2 Conduction par effet tunnel

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

$$J = \frac{A^{**} T^2}{kT} \int_{E_{Fm}}^{qE_p} F_{SC} T(E) (1 - F_m) dE \dots\dots\dots(2.30)$$

F_{sc} et F_m les fonctions de distributions de Fermi Dirac pour le semi-conducteur et le métal.

A^{**} constante de Richardson effective

L'expression du courant prend la forme générale suivante

$$J = J_0 (e^{\frac{qV}{\eta kT}} - 1) \dots\dots\dots(2.31)$$

Où η est le facteur d'idéalité.

2.6.3. Recombinaison dans la zone de charge d'espace

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 Schockley, Read et Hall (SRH) en 1952 [16], le taux de recombinaison U dans la ZCE est donné par l'expression suivante :

$$U = \frac{n \cdot p - n_i^2}{\tau_n (n + n_i) + \tau_p (p + n_i)} \dots\dots\dots(2.32)$$

Où τ_n et τ_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 :

$$J = q \int_0^w U(x) dx \dots\dots\dots(2.33)$$

Avec les simplifications suivantes $n \gg n_i$, et $\tau_n = \tau_p = \tau$, l'expression de la densité du courant pour des basses tensions positives est donné par [17]

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \cdot [1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)] \dots\dots\dots(2.34)$$

où $J_0 = \frac{qn_i W}{2\tau} \dots\dots\dots(2.35)$

n_i : est la concentration intrinsèque des électrons.

W : la largeur de la ZCE

2.6.4 Recombinaison dans la région neutre (ohmiques)

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 [9]:

$$V = V_a - R_s I \quad J = \frac{A^{**} T^2}{kT} \int_{E_{fm}}^{qE_b} F_{SC} T(E) (1 - F_m) dE \dots\dots\dots(2.36)$$

2.6.5. Densité de courant total

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

$$J_T = J_{e-m} + J_R + J_{tu} \dots\dots\dots(2.37)$$

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

J_R : densité du courant recombinaison

J_{tu} : densité du courant tunnel

Les caractéristiques courant-tension d'une diode Schottky sont généralement décrites par [9]:

$$J = J_s (e^{(q(V - J R_s)/\eta kT)} - 1) \dots\dots\dots(2.38)$$

$$J_s = A^* AT^2 \exp(-1/\phi_B) \dots\dots\dots(2.39)$$

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)

η : Facteur d'idéalité de la diode

2.6.6. 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 modeler la caractéristique J-V, d'une diode Schottky à barrière homogène par la relation suivante :

$$J = J_s (e^{(q(V-JR_s)/\eta kT)} - 1) \dots\dots\dots(2.40)$$

2.7. Exemples d'applications de diodes SiC Schottky

2.7.1 . Applications dans l'électronique de puissance

La diode est largement utilisée comme un compagnon du transistor dans presque tous les systèmes de conversion et le marché adressé est énorme. les applications les plus courantes sur le marché actuel (p. ex., dans les secteurs de l'électronique grand public, des énergies renouvelables, de l'industrie et de l'automobile, etc.) nécessitent des dispositifs capables de soutenir la tension d'état dans la plage 650 V — 1.7 kV . Pour toutes ces applications, la solution possible basée sur les redresseurs au silicium est la diode bipolaire qui se caractérise par des pertes de commutation très élevées. Indépendamment de la technologie bipolaire Si, l'unipolaire 4H-SiC SBD a la perte minimale de récupération en raison de son absence de porteurs minoritaires. Ce sont les caractéristiques fondamentales du SiC, son champ électrique critique élevé. Qui permet à une diode unipolaire SiC d'être évaluée à la même tension que le dispositif bipolaire Si, sans subir de grandes pertes de conduction.

2.7.2. Capteurs de température

Les diodes barrières 4H-SiC Schottky peuvent également être utilisées comme capteur haut température, adapté aux environnements difficiles - chocs élevés ou vibrations intenses, rayonnement élevé, conditions érosives et corrosives. En particulier, les sondes de température basées sur 4H-SiC SBD, capables de fonctionner dans ces conditions extrêmes, peuvent avoir des applications significatives dans plusieurs domaines, tels que les moteurs automobiles et d'avions, les systèmes géothermiques, les fours industriels, la détection du pétrole et du gaz, etc.

2.7.3. Détecteurs UV

Un important champ d'application des diodes SiC Schottky est la détection de rayonnement ultra-violet (UV). Le principe de fonctionnement de cet appareil est la détection du photocourant généré en la région d'épuisement d'un SBD biaisé inverse sous l'exposition à la lumière UV. Traditionnellement, les photomultiplicateurs de silicium ont été utilisés pour la détection de la lumière UV. Toutefois, le principal problème de l'utilisation de Si pour la détection des rayonnements UV réside dans son écart de bande étroite (1,12 eV), ce qui conduit à la nécessité de filtres supplémentaires pour éliminer les composants visibles et infrarouges de la lumière, qui n'ont pas besoin d'être détectés. En outre, leur faible efficacité quantique dans la gamme UV, la grande taille, le coût élevé, et la tension de fonctionnement élevée limitent leur utilisation pratique dans plusieurs cas. 4H-SiC en raison de son grand écart de bande (3,2 eV) signifie que ce matériau ne répondra au rayonnement qu'avec une longueur d'onde inférieure à environ 400 nm. Les longueurs d'onde plus longues du spectre visible et infra-rouge ne peuvent pas être absorbées et, par conséquent, les détecteurs basés sur SiC sont insensibles à cette partie du spectre. Cette caractéristique est extrêmement avantageuse car elle permet d'utiliser des détecteurs SiC même en présence de fond visible et infrarouge, comme cela se produit dans de nombreuses applications. En outre, en raison de la faible concentration intrinsèque du matériau, les diodes 4H-SiC Schottky ont un courant de fuite extrêmement faible, augmentant ainsi la sensibilité des dispositifs.[18]

2.8. Conclusion

Ce chapitre présente la Théorie du contact métal-semi-conducteur , généralités sur la diode SCHOTTKY ,les propriétés et les caractéristique . Il est bien connu que la qualité des contacts métal-semi-conducteurs joue un rôle important dans la performance de divers dispositifs à semi-conducteurs et circuits intégrés

Chapitre 3

Outil de simulation

SILVACO

3.1 Introduction

La simulation est une technique pour étudier les systèmes dynamiques du monde réel en imitant leur comportement avec l'utilisation d'un modèle mathématique du système implémenté sur un ordinateur numérique.

La simulation peut également être considérée comme une technique numérique pour résoudre des modèles de probabilités complexes, équation différentielle ordinaire et équation différentielle partielle, analogiquement à la façon dont nous pouvons utiliser un ordinateur pour évaluer numériquement l'intégrale d'une fonction compliquée. C'est pourquoi la science de la simulation est considérée comme un domaine interdisciplinaire [14] ainsi illustré à la figure (3.1).

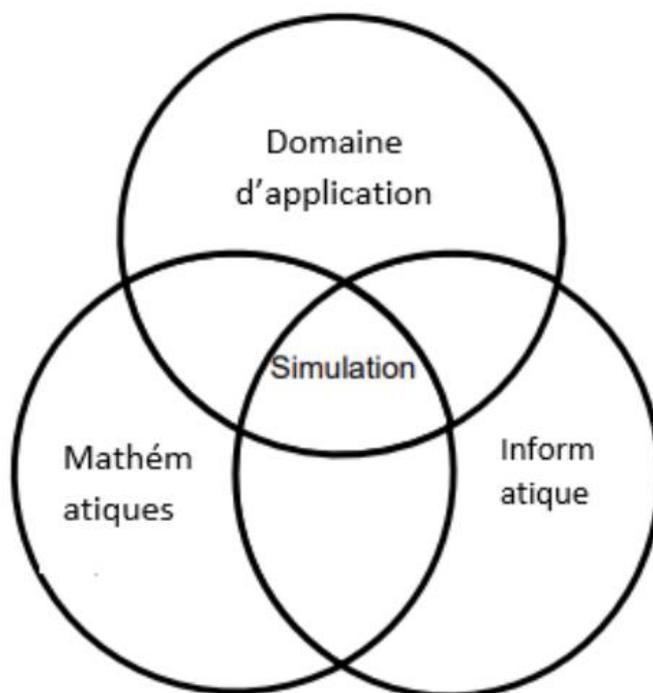


Fig 3.1: Interdisciplinarité de la simulation [14].

Le domaine de l'électronique, est parfaitement compatible avec la simulation, celle-ci joue un rôle majeur dans l'évolution que connaît ce domaine en matière de miniaturisation continue de la technologie des semi-conducteurs.

Dans ce chapitre nous allons proposer une introduction au logiciel SILVACO et à ses différents outils de simulation interactifs, qui permettent la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semi-conducteurs

3.2. Processus de simulation

3.2.1. Présentation de SILVACO

Depuis sa création en 1984 par le Dr. Ivan Petic, SILVACO est devenu le plus important simulateur de semi-conducteurs. SILVACO TCAD est l'abréviation de « Silicon Valley Corporation ». Il s'agit d'un logiciel de simulation de processus semi-conducteurs composé de plusieurs simulateurs physiques (ATHENA, ATLAS, MERCURY... etc.) regroupés sous un environnement appelé DECKBUILD. Chacun d'eux simule différents processus. En raison du grand nombre de modules de SILVACO et de leur complexité, seuls les modules utilisés dans ce travail seront présentés [13].

- *DECKBUILD* : est un environnement d'exécution graphique interactif pour développer des ponts d'entrée de simulation de processus et de dispositifs. Il est considéré comme la fenêtre principale de SILVACO où tous les simulateurs peuvent être contrôlés.
- *ATLAS* : est un module de simulateur de dispositif à base physique qui prédit les caractéristiques électriques associées à des structures physiques et des conditions de polarisation spécifiées. Ceci est obtenu en approximant le fonctionnement d'un dispositif sur une grille (discrétisation). Le transport de porteurs à travers ce dispositif peut être simulé en appliquant un ensemble d'équations différentielles, dérivées des lois de Maxwell sur cette grille. Cela signifie qu'ATLAS fournit une plate-forme pour analyser les réponses AC, DC et temporelles pour toutes les technologies basées sur les semi-conducteurs en deux et trois dimensions.
- *TONYPLOT* : 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.

3.2.2. DECKBUILD

DECKBUILD est l'interface graphique entre l'utilisateur et les simulateurs (voir figure3.2). Il se compose de deux fenêtres ; la fenêtre de saisie (input window) dans laquelle les simulateurs peuvent être appelés et contrôlés à l'aide des commandes

DECKBUILD. La deuxième fenêtre (Run-Time output) affiche les sorties et les résultats des simulateurs, notamment les erreurs de programmation et les avertissements après la compilation

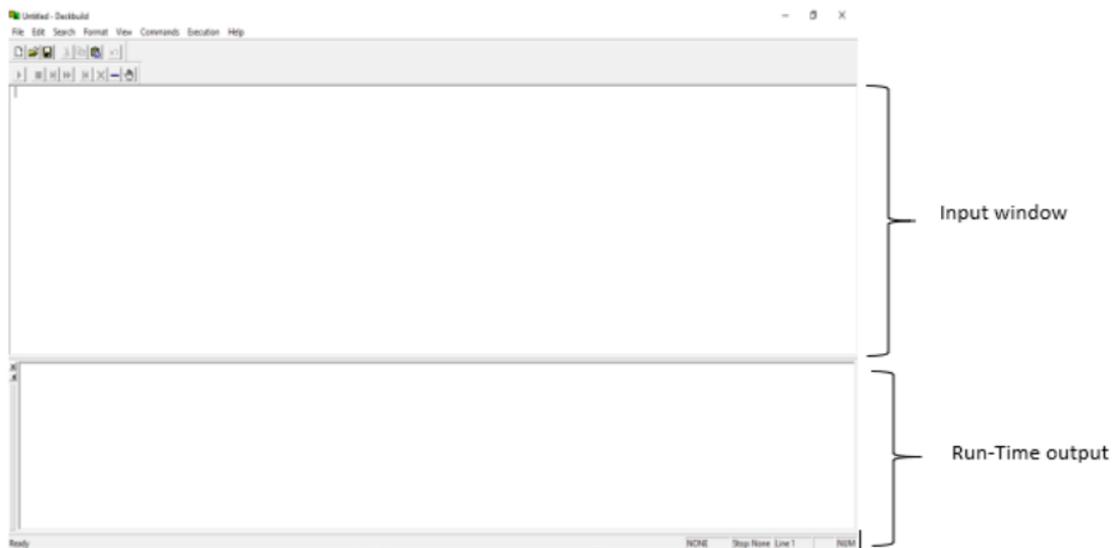


Figure 3.2: l'interface DECKBUILD.

DECKBUILD fournit différentes commandes pouvant être effectuées sur la simulation en cours, en voici quelques-unes

- **Appel d'un simulateur** : Ceci peut être fait en utilisant l'instruction "Go" qui indique à DECKBUILD de fermer le simulateur actuel et/ou de démarrer le simulateur spécifié (par exemple Go ATLAS). Ensuite, n'importe quelle instruction du simulateur appelé peut être exécutée.
- **Déclaration de variable** : L'instruction "Set" est utilisée pour attribuer des noms (caractères) aux valeurs des variables (par exemple Set T = 300). La valeur de la variable peut être utilisée plus tard en faisant précéder son nom d'un signe dollar "\$" (par exemple Set a = \$ T, dans ce cas "a" prendra la valeur de "T", donc a = 300).

- **Mettre fin à une ligne commande** : A la fin du paquet, les simulateurs ouverts doivent être fermés à l'aide de l'instruction "Quit".

Des commentaires peuvent être introduit à l'intérieur d'un programme, pour ce faire, ceux-ci doivent être précédés du caractère "#" (tout instruction précédée d'un "#" ne sera pas exécutée car considérée comme commentaire).

3.2.3. Spécification de la structure et des propriétés électriques du dispositif (ATLAS)

ATLAS est un simulateur de dispositif dans lequel on peut spécifier la structure physique, ainsi que caractéristiques électriques qui lui sont associées. Il est possible de suivre deux méthodologies dans la définition des paramètres physiques et électriques d'un dispositif comme le montre la figure 3-4. La première méthode consiste à générer la structure physique dans l'un des modules prévus à cet effet (ATHENA ou DevEdit) et ensuite calculer les propriétés électriques dans ATLAS. La deuxième prévoit, quant à elle, la définition tous les paramètres, physiques et électriques, dans ATLAS. C'est cette seconde méthode qui sera utilisé dans ce qui suit.

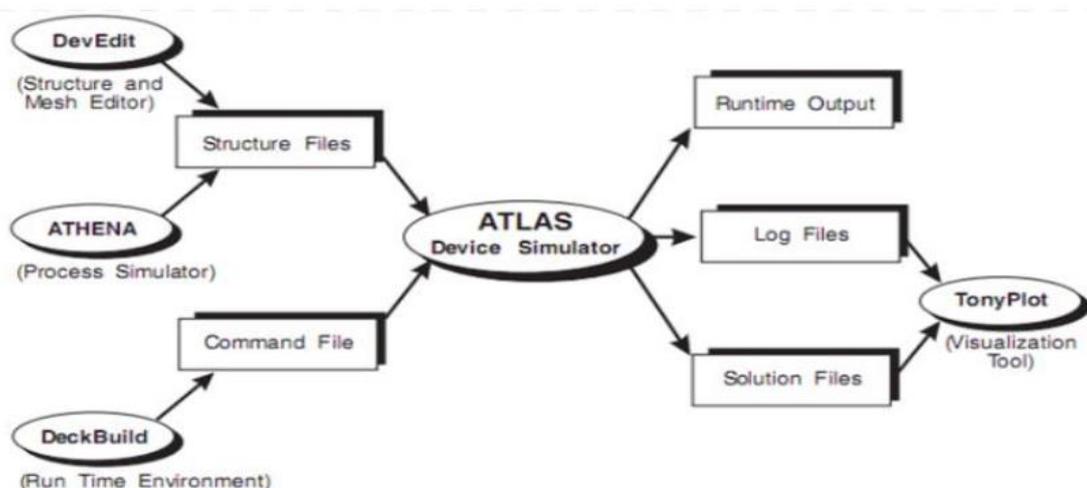


Fig 3.3: Entrées / sorties d'ATLAS [5].

3.2.4. L'ordre des commandes dans ATLAS

L'ordre des commandes dans ATLAS, comprend cinq groupes d'instructions qui doivent apparaître dans un ordre précis comme c'est défini dans la figure 3.4.

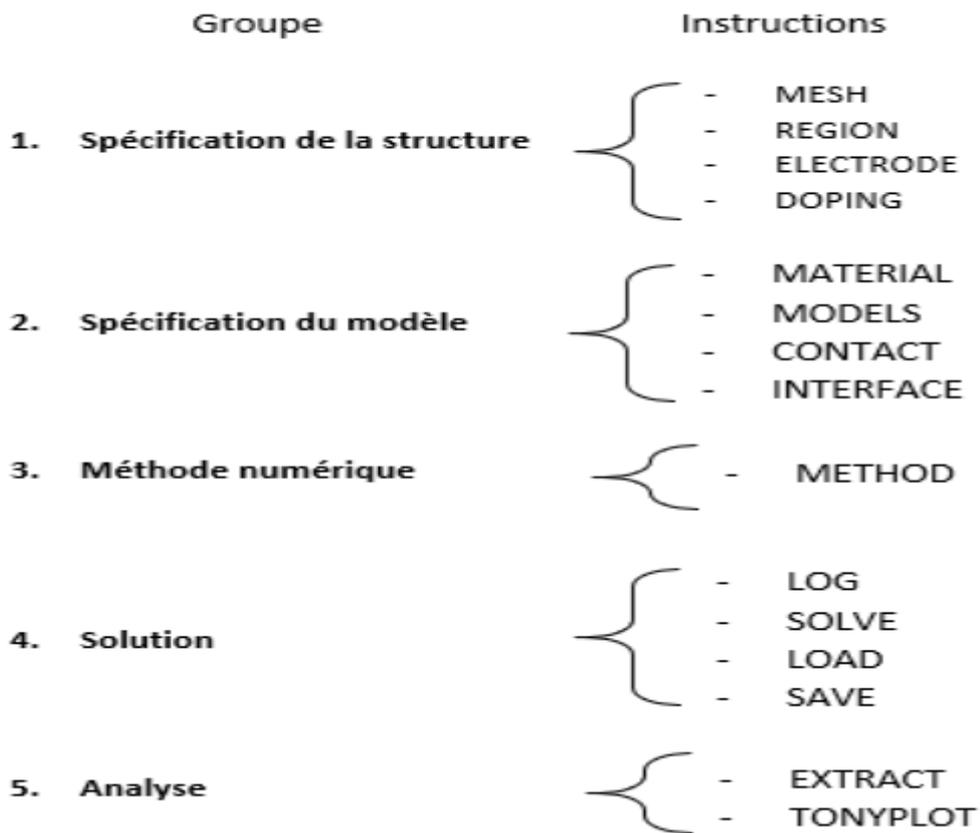


Fig 3.4: Ordre des commandes sous ATLAS.

3.3. Utilisation du logiciel « Silvaco-Atlas »

L'outil de simulation utilisé, le logiciel ATLAS, appartient à la famille de logiciels de la société Silvaco. Le module mis en œuvre est basé sur la résolution des équations de dérive-diffusion dans les composants.[15].

- * DC .AC petit signal .et le temps - dépendance complète.
- * Modèles de transport de dérive-diffusion.
- * Bilan énergétique et les modèles de transport hydrodynamiques.
- * Chauffage et dissipateurs Lattice .
- * Classés et hétérojonctions brusques.
- * Interactions optoélectroniques avec traçage générale de rayons
- * Les matériaux amorphes et polycristallins.
- * Environnements de circuit général.
- * L'émission stimulée et rayonnement Statistique de Fermi-Dirac et de Boltzmann.
- * Modèles de mobilité avancée.
- * Effets de dopage lourds.

* Accepteur complet et donateurs dynamique de piéger Ohmique.

* Schottky. et des contacts isolant.

3.3.1. Les modèles physiques

Les modèles physiques peuvent être regroupés en cinq catégories : la mobilité, la recombinaison, statistiques porteurs, ionisation par impact et tunnels. Tous les modèles physiques sont spécifiés par les deux instructions MODELS et IMPACT

3.3.2. Les méthodes numériques

Après la spécification complète de la structure (géométrie et physique) ATLAS commence à résoudre un système d'Equations (Equations de continuité, Equation de Poisson) pour calculer les courants, les capacités et les potentiels. Plusieurs méthodes numériques peuvent être utilisées pour le calcul des solutions aux problèmes de dispositifs à semiconducteurs, comme : méthode de Gummel, méthode de Newton et méthode de blocs.[14]

3.4 Utilisation du langage de commande pour définir une structure

Pour définir un périphérique à travers le langage de commande ATLAS, vous devez d'abord définir un maillage. Ce maillage ou cette grille couvre le domaine de simulation physique. Le maillage est défini par une série de lignes horizontales et verticales et l'espacement entre elles. Ensuite, les régions à l'intérieur de ce maillage sont affectées aux différents matériaux nécessaires à la construction de l'appareil. Une fois les régions définies, l'emplacement des électrodes est spécifié. L'étape finale est de spécifier le dopage dans chaque région.

3.4.1. Maillage : Le maillage est une série de lignes horizontales et verticales. Dans notre étude, le maillage utilisé est à deux dimensions, par conséquent, seuls les paramètres x et y sont définis. Le premier énoncé doit être :

MESH SPACE.MULT=<VALUE>

CHAPITRE03:OUTIL DE SIMULATION SILVACO

Il est suivi d'une série d'énoncés de X.MESH et Y.MESH .

X.MESH LOCATION= <VALUE> SPACING= <VALUE>

Y.MESH LOCATION0=<VALUE> SPACING=<VALUE>

La valeur du paramètre SPACE.MULT est utilisée comme facteur de mise à l'échelle pour le maillage créé par les énoncés X.MESH et Y.MESH. La valeur par défaut est 1. Les valeurs supérieures à 1 créeront un maillage global plus grossier pour une simulation rapide. Des valeurs inférieures à 1 créeront un maillage global plus fin pour une plus grande précision. Les énoncés X.MES et Y.MESH sont utilisés pour spécifier les emplacements en microns de lignes verticales et horizontales, respectivement, ainsi que l'espacement vertical ou horizontal associé à cette ligne. Au moins deux lignes de maillage doivent être spécifiées pour chaque direction. ATLAS insère automatiquement toutes les nouvelles lignes nécessaires pour permettre des transitions progressives dans les valeurs d'espacement entre les lignes adjacentes. Les énoncés X.MESH et Y.MESH doivent être listés dans l'ordre croissant x et y. Négatifs et positifs.

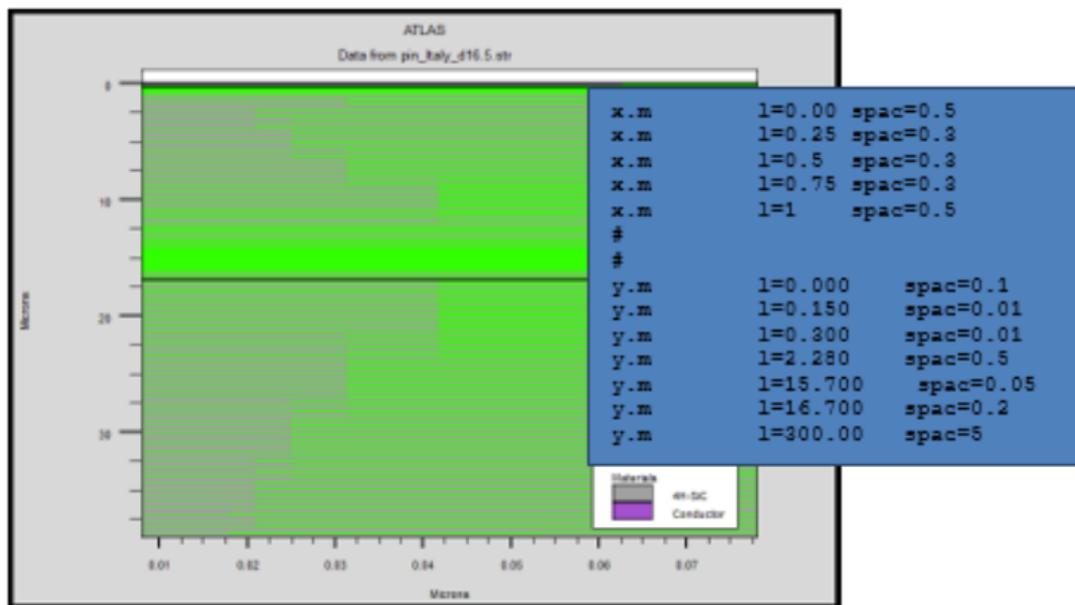


Fig 3.5 – définition de maillage avec Atlas.

3.4.2. Préciser les régions et le matériel : Une fois que le maillage est spécifié, chaque partie de celui-ci doit être assignée à un type de matériel. Ceci est fait avec des énoncés « REGION. »

REGION - number =< Integer >< material - type >< position - parameters > :

Les numéros de région doivent commencer à 1 et sont augmentés pour chaque énoncé

de région subséquent. Vous pouvez avoir jusqu'à 200 régions différentes dans ATLAS. Un grand nombre de matériaux sont disponibles. Si un type de matériau de composition est défini, les fractions de composition x et y peuvent également être spécifiées dans l'énoncé REGION.

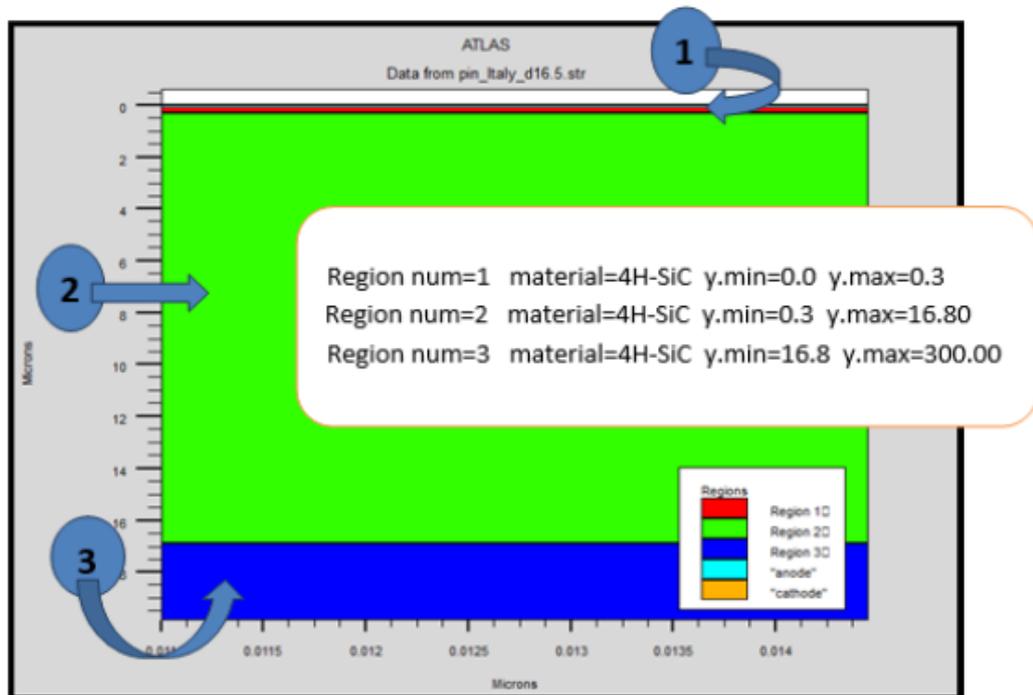


Figure 3.6 – définition des régions

3.4.3. Spécifier du contact : Définie comme étant la différence entre le niveau de Fermi et le niveau du vide [4], et aussi par l'énergie nécessaire pour arracher un Electron du métal depuis le niveau de Fermi E_{Fm} au niveau du vide. Si une électrode est en contact avec un semi-conducteur, par défaut, ATLAS le reconnaît comme un contact ohmique. Si l'instruction Workfunction, spécifiant le travail de sortie en eV, est ajoutée, le contact est considéré comme un contact Schottky, parfois on introduit le nom du métal comme tungsten (W), pour tungsten l'instruction est donnée par :

contact name=anode workf=4.97

<i>Métal</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Al</i>	<i>Ag</i>	<i>Au</i>	<i>Cu</i>	<i>Pt</i>
$e\phi_m$ (eV)	4.6	4.4	4.4	4.3	4.3	4.8	4.4	5.3

Tab 3.1 – fonction de travail de divers métaux

Le travail de sortie des métaux peut varier de 2 eV z 6 eV. De même la fonction du travail du semi-conducteur ϕ_{sc} est définie comme étant l'énergie qu'il faut fournir pour extraire un électron depuis le niveau de Fermi E_{fsc} au niveau du vide N_v ,

3.4.4.Spécifier les électrodes : Une fois que vous avez spécifié les régions et les matériaux, définissez au moins une électrode qui entre en contact avec un matériau semi-conducteur. Cela se fait avec la déclaration ELECTRODE. Par exemple : *ELECTRODE - NAME =< electrode - name >< position - parameters >*
 Vous pouvez spécifier jusqu'à 50 électrodes. Les paramètres de position sont spécifiés en microns en utilisant les paramètres X.MIN, X.MAX, Y.MIN, et Y.MAX.

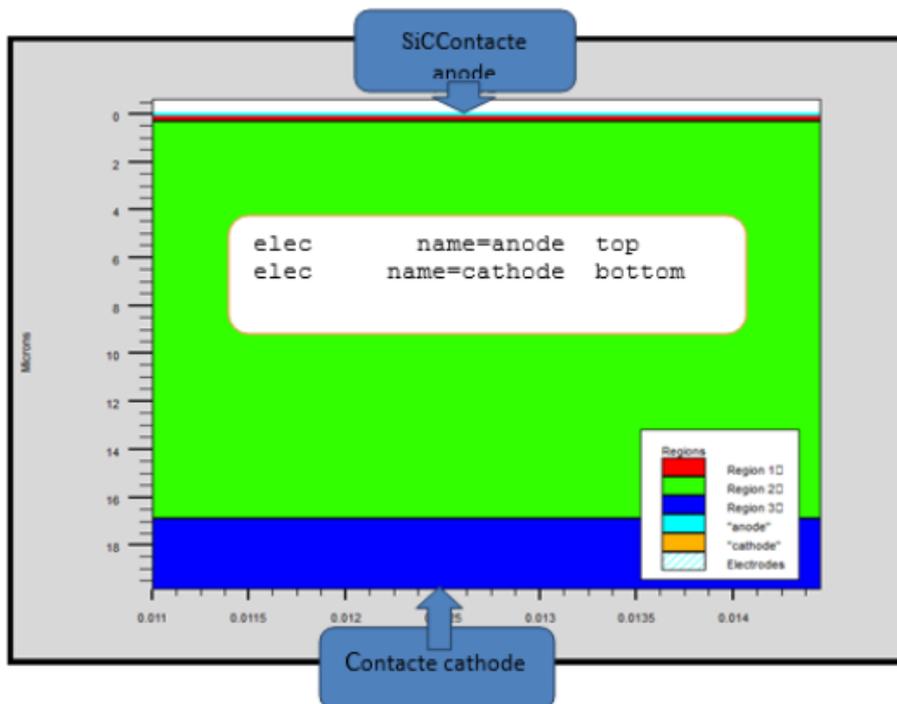


Fig 3.7 – définitions des électrodes.

3.4.5. Spécifier le dopage : Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage. Le format de la déclaration de dopage dans « Atlas » se présente comme suit :

DOPAGE < type - de - distribution > < type - de - dopant > < position - des - paramtres >

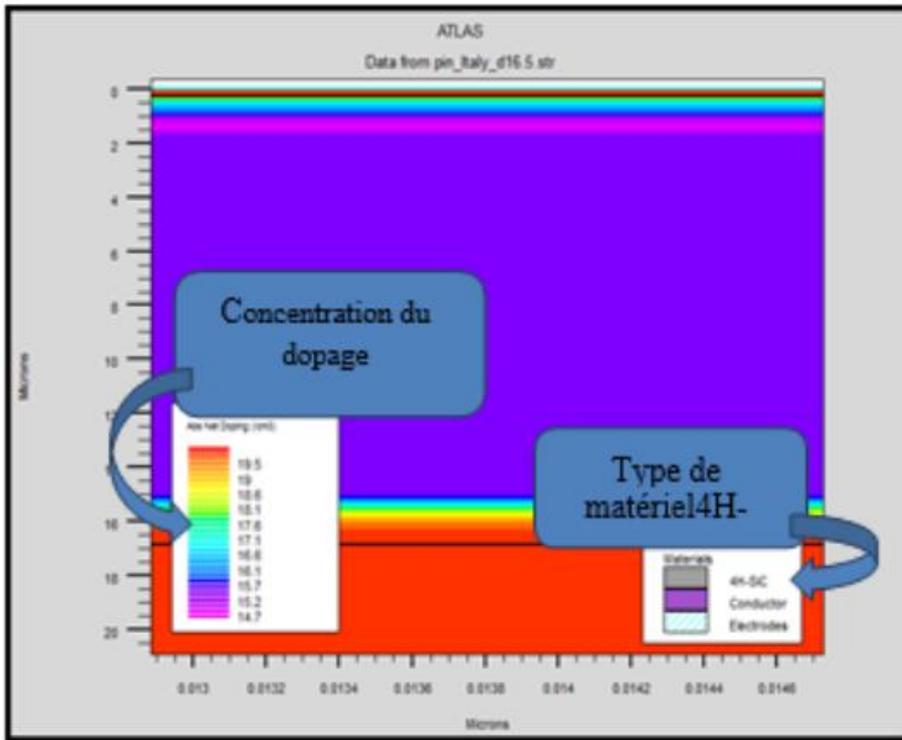


Fig 3.7 – définition de dopage.

3.5. Les solutions

L'instruction qui permet de trouver les solutions (courant, potentiel, porteurs, etc..)

est donnée par : `solve name=anode vanode=0.01 vstep=0.01 vstop=1.0`

`solve vstep=0.1 vfinal=3 name=anode`

La fin du programme est marqué par l'instruction `Quit`, les résultats obtenus seront affichés immédiatement sous Tonyplot.

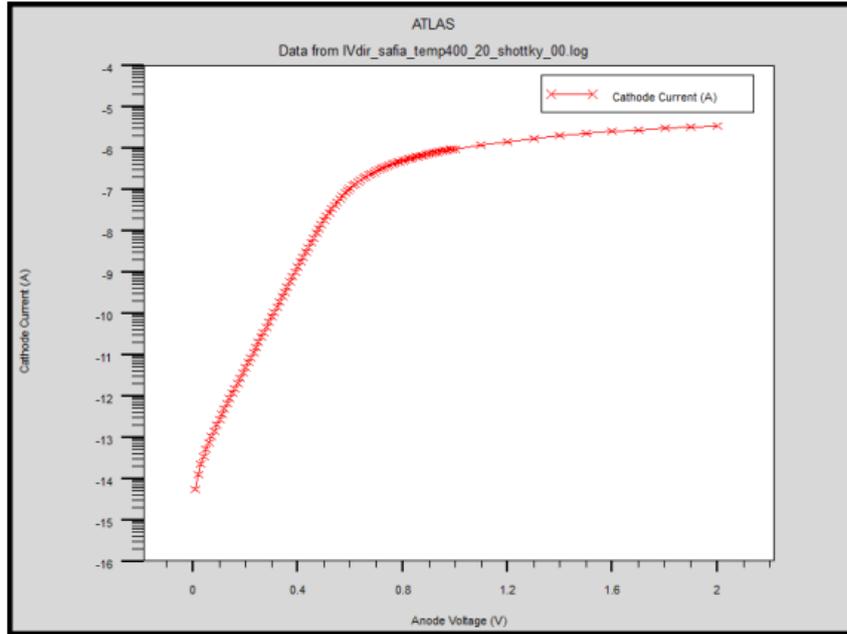


Fig 3.9 – La caractéristique courant-tension sous Tonyplot.

3.6. Organigramme de Simulation

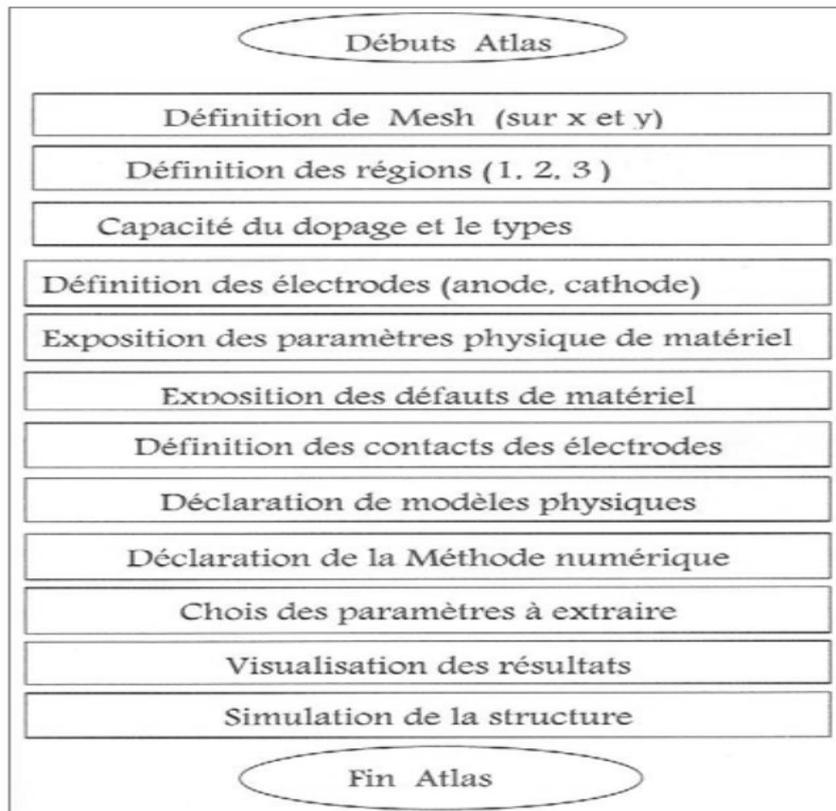


Fig 3.9 . Organigramme de simulation[13]

3.7. Conclusion

TCAD développé par le groupe SILVACO est un simulateur de modélisation des composants capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel. Permet de simuler les structures de semi-conducteurs et utile à tous les détecteurs/capteurs.

Chapitre 4
Résultats et discussion

4.1.Introduction

Nous présenterons dans ce chapitre notre travail de simulation basé en particulier sur l'étude des propriétés électriques courant-tension (I-V) de la structure 4H-SiC et étude des effets de des paramètres de la structure (dopage et géométrie) la sensibilité du détecteur de température

4.2. Les modèles

Les modèles physiques sont classés en cinq catégories:

- Mobilités des porteurs de charges
- Mécanismes de génération-recombinaison.
- Les statistiques de transport
- Incomplète ionisation

La syntaxe de la déclaration du modèle dans le simulateur « ATLAS » est la suivante:
 model<paramètres générales>/<paramètres du modèle>

Le choix du modèle dépend des matériaux et composants choisis pour la simulation. Dans notre cas par exemple des modèles utilisés dans notre travail :

4.2.1. CONSRH

C'est le modèle Shockley-Read-Hall avec la dépendance de la concentration des porteurs, dont la formule est la suivante :

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\left(\tau_n \left[n + n_{ie} \exp\left(\frac{ETRAP}{kT_L}\right) \right] + \tau_p \left[p + n_{ie} \exp\left(\frac{-ETRAP}{kT_L}\right) \right] \right)} \dots\dots\dots (4.1)$$

Dont :

$$\tau_n = \frac{TAUNO}{AN + BN \left(\frac{N_{total}}{NSRHN} \right) + CN \left(\frac{N_{total}}{NSRHN} \right)^{EN}} \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\tau_p = \frac{TAUNO}{AP + BP \left(\frac{N_{total}}{NSRHP} \right) + CP \left(\frac{N_{total}}{NSRHP} \right)^{EP}} \dots\dots\dots (4.3)$$

Ou **AN, AP, BN, BP, NSRHP, EP, EN et ETRAP** sont des paramètres de fitting dans le simulateur *SILVACO*. C'est à dire des paramètres relatifs dépend des matériaux.

4.2.2. AUGER

Recombinaison Auger se fait par une transition de trois particules par lequel un transporteur mobile est capturé ou émis.. Ce modèle est présenté par :

$$R_{Auger} = AUGN \left(pn^2 - nn_{ie}^2 \right) + AUGP \left(np^2 - pn_{ie}^2 \right) \dots\dots\dots (4.4)$$

Ou **AUGN**, **AUGP** sont des paramètres de fitting qui expriment le modèle AUGER.

4.2.3. BGN :

Band Gap Narrowing (effets de rétrécissement) de la bande interdite, dans ATLAS ces derniers sont activés en spécifiant le paramètre BGN de la déclaration modèle. Ces effets peuvent être décrits par une expression analytique concernant la variation de la bande interdite, ΔE_g , à la concentration de dopage N.L'expression utilisée dans ATLAS est

$$\Delta E_g = BGN.E \left\{ \ln \frac{N}{BGN.N} + \left[\left(\ln \frac{N}{BGN.N} \right)^2 + BGN.C \right]^{1/2} \right\} \dots\dots\dots (4.5)$$

Dans notre cas nous avons exploité un sous-programme prédéfinie dans le simulateur, l'appelle de cet sous-programme à partie de la bibliothèque (Library) est par l'instruction suivante: *F.BGN="BGN_Lindefelt.lib"*.

4.2.4. Incomplète ionisation (manuelle silvaco)

L'incomplète ionisation est modélisée par la formule suivante :

$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + GCB \exp \left(\frac{\epsilon_{F_n} - (E_C - EDB)}{kT_L} \right)} \dots\dots\dots (4.6)$$

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + GVB \exp \left(\frac{E_V + EAB - \epsilon_{F_n}}{kT_L} \right)} \dots\dots\dots (4.7)$$

Ou **EDB**, **EAB** sont l'énergie d'activation des dopants (donneurs, accepteurs) respectivement et **GCB**, **GVB** sont les coefficients des générations de bande conduction et bande de valence respectivement.

• **Énergie de la bande interdite**

La dépendance de la température avec l'énergie de la bande interdite est modélisée par équation :

$$E_g(T_L) = E_G(0) - \frac{EGALPHA(T_L^2)}{T_L - EGBETA} = EG300 + EGALPHA \left[\frac{300^2}{300 + EGBETA} - \frac{T_L^2}{T_L + EGBETA} \right] \dots(4.8)$$

Les paramètres **EG300**, **EGALPHA** et **EGBETA** considérées comme des constantes dépendent du matériau à utiliser.

4.2.5. Mobilité :

Les électrons et les trous sont accélérés par des champs électriques, mais ils perdent l'élan à la suite de divers processus de diffusion, tels que vibrations du réseau (phonons), des ions d'impuretés, défauts cristallins ou autres imperfections de la matière. La vitesse de dérive v_d est proportionnelle au champ électrique E , à condition qu'il ne soit pas trop élevé. La mobilité est défini comme le coefficient de proportionnalité entre v_d et E en tant que:

$$v_d = \mu \cdot E \dots\dots\dots (4.9)$$

Comme les effets de tous ces phénomènes microscopiques sont regroupés dans la mobilité macroscopique introduite par les équations de transport, la mobilité dépend du champ électrique local, de la température de réseau, de la concentration de dopage, et la technique de croissance. Si la concentration de dopage augmente,

la mobilité diminue en raison de la diffusion. Pour une faible concentration de dopage, la mobilité diminue avec la température due à une diminution de l'énergie vibratoire de la maille atomique. La dépendance de la mobilité avec la concentration de dopage et de la température est donnée par le modèle Caughey (4.10)

$$u_{n_0} = MU1N.CAUG \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{ALPHAN.CAUG} + \frac{MU2N.CAUG \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{BETAN.CAUG} - MU1N.CAUG \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{ALPHAN.CAUG}}{1 + \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{GAMMAN.CAUG} \left(\frac{N}{NCRITN.CAUG} \right)^{DELTAN.CAUG}} \dots\dots\dots(4.10)$$

$$u_{p_0} = MU1P.CAUG \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{ALPHAP.CAUG} + \frac{MU2P.CAUG \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{BETAP.CAUG} - MU1P.CAUG \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{ALPHAP.CAUG}}{1 + \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{GAMMAP.CAUG} \left(\frac{N}{NCRITP.CAUG} \right)^{DELTAP.CAUG}} \dots\dots\dots(4.11)$$

Ce model est utilisé pour simuler la dépendance entre le dopage et la mobilité en (SiC). Il peut être appliqué à la fois aux électrons et aux trous. Respectivement, Il prend en compte la dispersion des transporteurs par des ions d'impuretés chargées qui conduit à une dégradation de la mobilité des porteurs. Ce modèle est aussi fonction de la température. Dans notre cas, la concentration totale ($N_D + N_A$) des impuretés ionisées est donnée par N.

Dont : *MUIN,CAUG*, *MU2N.CAUG*, *NCRITN.CAUG*, *NCRITP.CAUG*,*ALPHAN.CAUG* et *BETAN.CAUG* sont des paramètres relatifs au matériau utilisé.

4.3. Structure du détecteur

Une vue transversale schématique de la diode 4H-SiC Schottky considérées dans ce travail est représentée par la figure (4.1) :

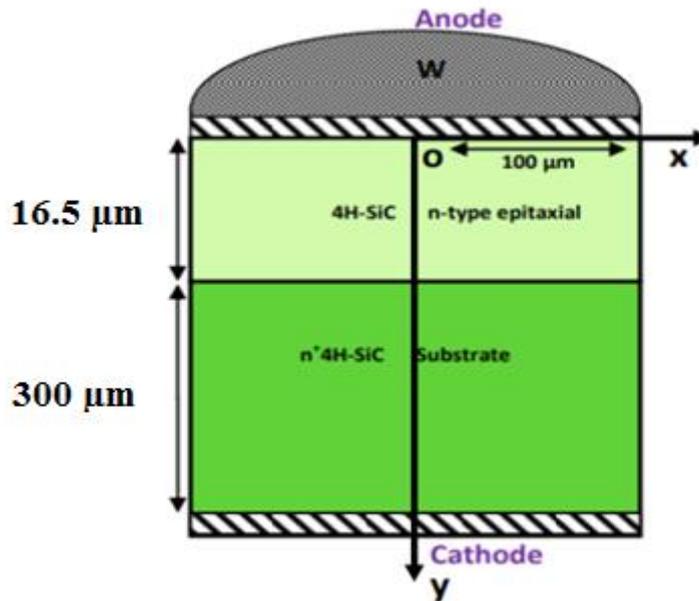


Figure 4.1 –Section transversale du détecteur

4.3.1.Maillage

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bon résultat. Ce maillage doit être fait avec précision pour garantir la fiabilité des résultats. La méthode numérique utilisée pour résoudre les équations physiques est la méthode des éléments finis. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et précision des résultats. Un maillage Epais produit une rapide simulation, mais les résultats sont moins précis. Tandis qu'un maillage fin produit un ralentissement de la simulation, mais des résultats plus précis.

CHAPITRE03:OUTIL DE SIMULATION SILVACO

Donc le maillage fin est plus intéressant de point de vue résultat de la simulation.
L'instruction dans notre cas pour créer un maillage

:

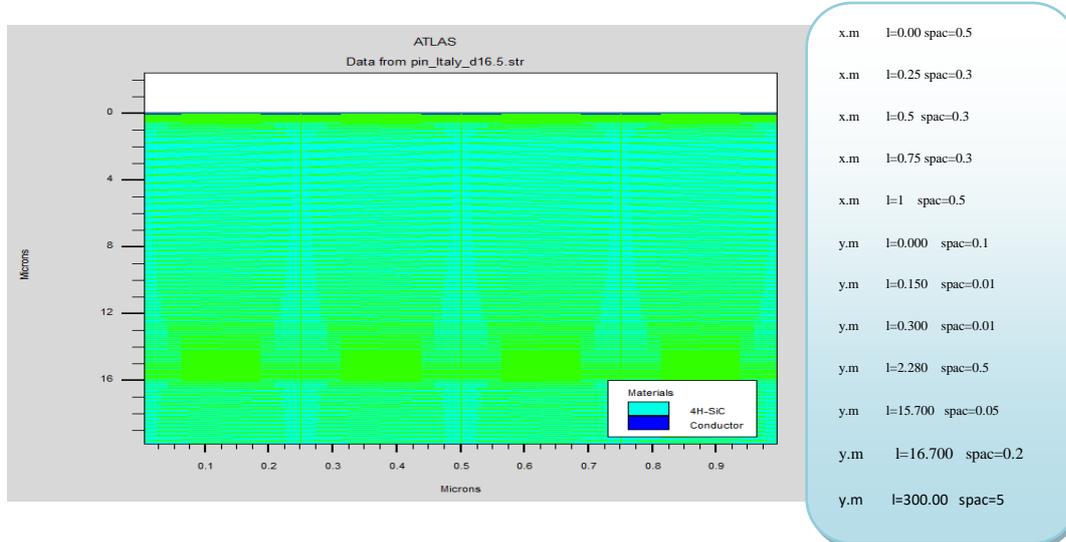


Figure 4.2 – Définition du maillage avec ATLAS

4.3.2. Les régions : Une fois le maillage est spécifié, chaque partie de ce dernier doit être attribuée à un type de matériau; c'est ce qu'on appelle région. Dans notre travail trois régions à savoir (figure 4.3)

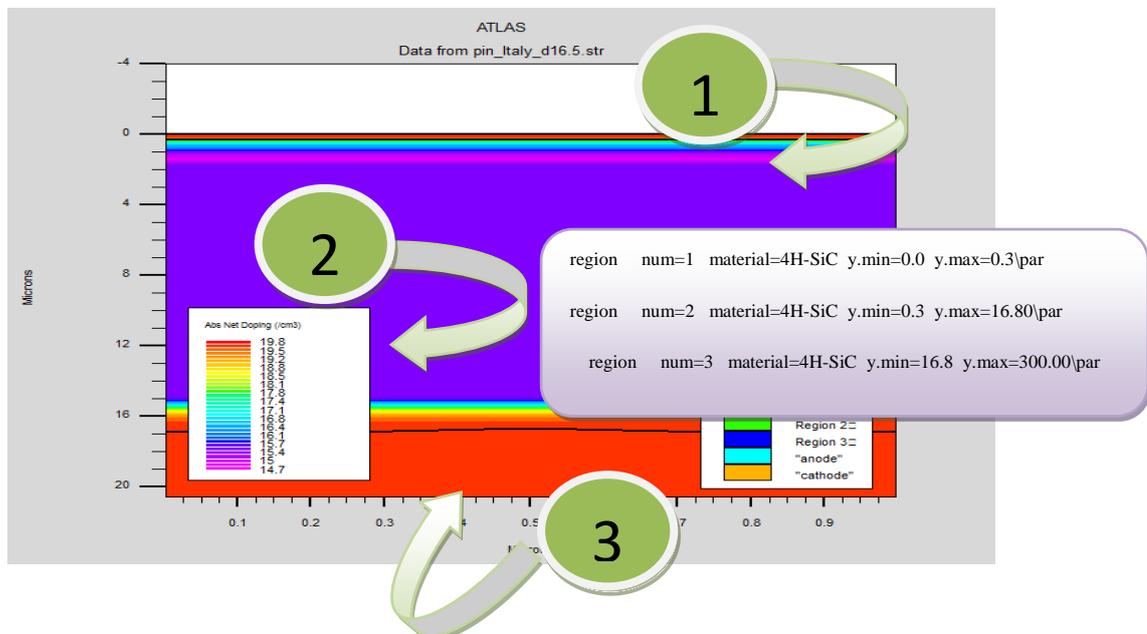


Figure 4.3 – Définition des régions

4.3.3. Les électrodes

Les électrodes sont définies par l'instruction suivante :

ELECTRODE NAME=<electrode name> <position parameters>

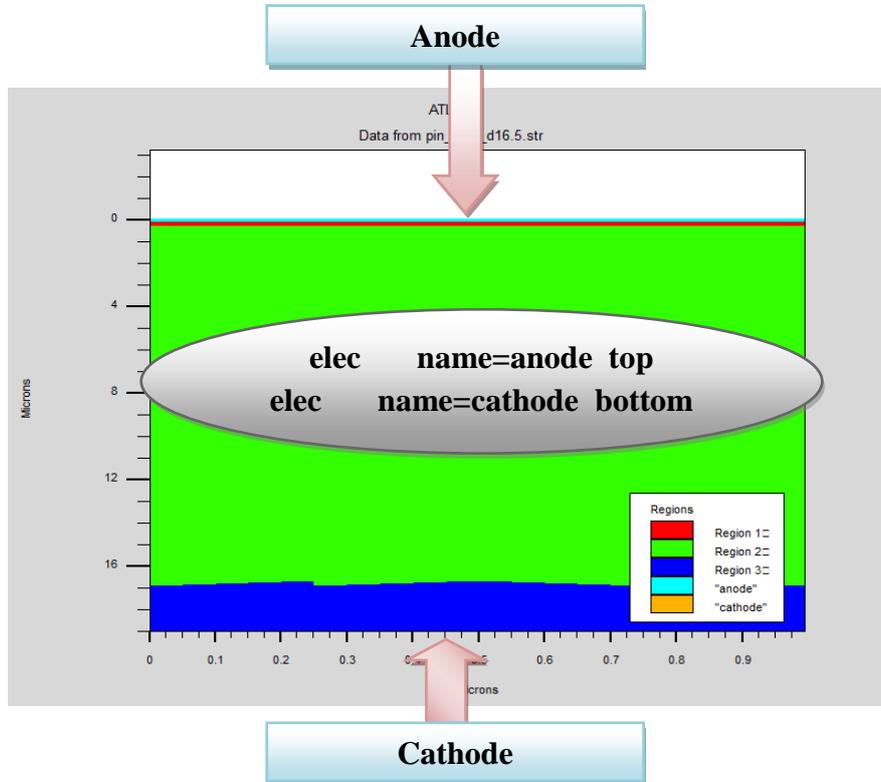


Figure 4.4 – Définition des électrodes

4.3.4. Dopage

Dans notre travail un dopage avec une distribution uniforme de type n et d'une valeur $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ est donné par.

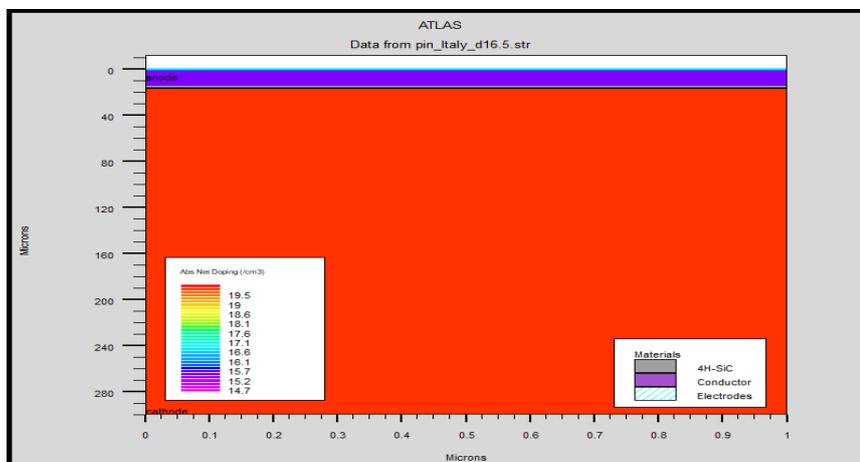


Figure 4.5 – Définition de dopage

4.4. Caractéristiques I-V-T

Les courbes I-V-T des SBD W/4H-SiC considérés pour différentes températures de 293 K à 513 K pour différentes températures représentant simulation et expérimental sont indiquées dans la figure (4.6).

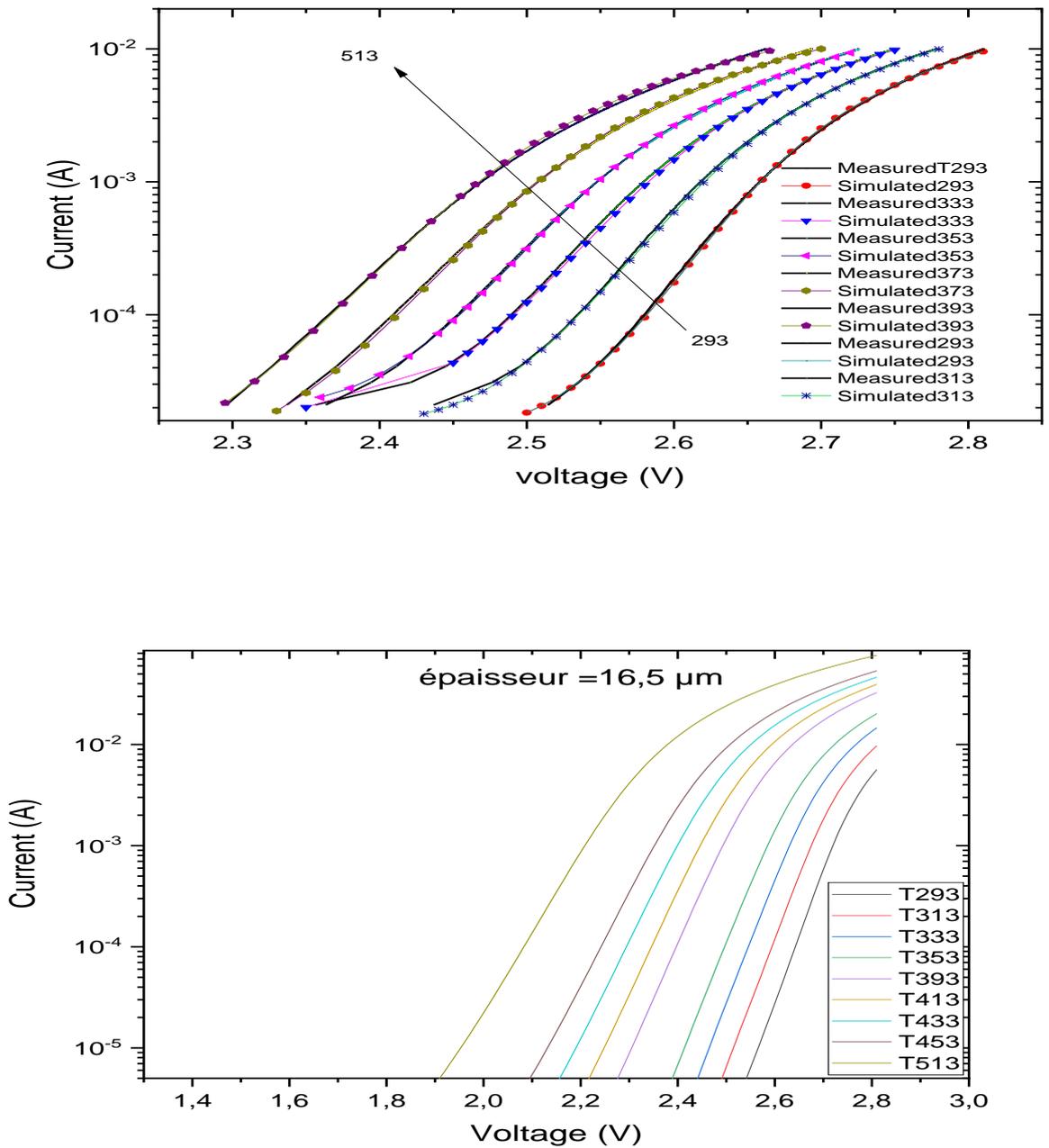


Figure 4.6 – Caractéristiques I-V pour différentes températures pour épaisseur 16.5μm

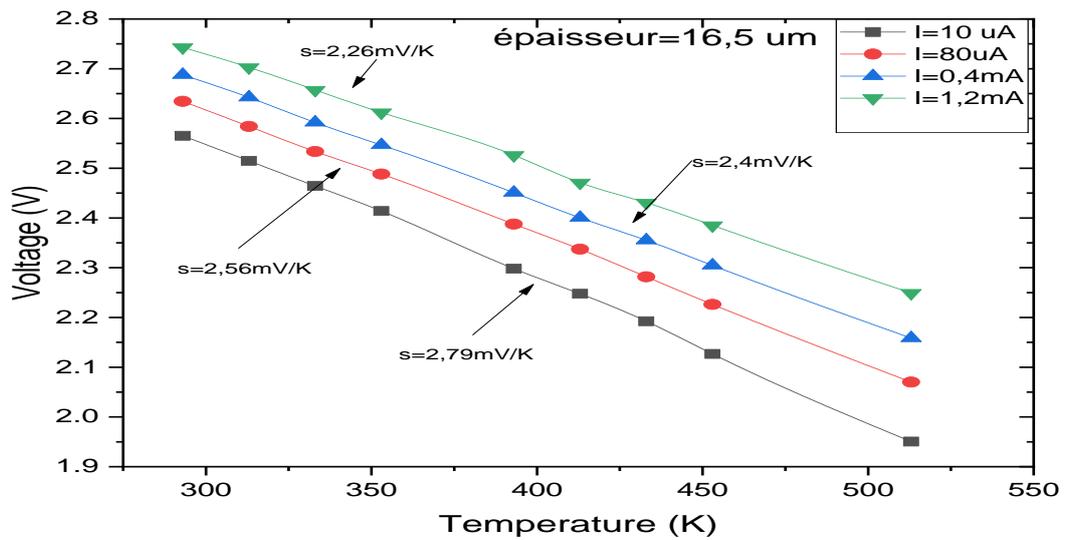


Figure 4.7 – voltage en fonction de température

Les résultats expérimentaux sont obtenus par un laboratoire Italien. Les courbes sont rapportées dans la plage de température de 293 K à 513 K. Ces courbes I-V-T peuvent être décrites par émission thermoïnique par le contact Schottky en utilisant l'équation suivante :

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{q(v_D - R_S \cdot I_D)}{\eta k T}} - 1 \right) \dots\dots\dots (4.12)$$

où η est le facteur d'idéalité, I_S est le courant de saturation, R_s : résistance série, q : la charge fondamentale, T : la température et k : constante de Boltzmann. I_S est peut être exprimé comme :

$$I_S = A R^{**} T^2 e^{-\left(\frac{\phi_B}{kT}\right)} \dots\dots\dots (4.13)$$

Où R^{**} est la constante de Richardson et ϕ_B est la hauteur de la barrière Schottky. Il est à noter que l'abaissement de la barrière, dû à la polarisation inverse. Par conséquent, lorsqu'elle est biaisée vers l'avant, la chute de tension de la diode peut être écrite comme suit :

$$V_D = R_S I_D + \eta \phi_B + \frac{kT}{q} \eta \ln \left(\frac{I_D}{A A^{**} T^2} \right) \dots\dots\dots (4.14)$$

Où η est le facteur d'idéalité, R_s est la résistance de série, q est la charge électrique de l'électron et k est la constante de Boltzmann. La figure (4.6) représente caractéristique I-V de diode SCHOTTKY pour température 293 à 513 K. La courbe montre que pour des tensions

inférieures à environ 1,5V le courant augmente avec l'augmentation de la température et pour des tensions supérieures à 1.5V, la densité de courant reste constante.

4.4.1. Effets des paramètres géométriques (Epilayer)

Dans notre travail on a varié l'épaisseur de la région intrinsèque (epilayer) et on a maintenu le dopage dans cette région. Pour chaque valeur de l'épaisseur on a obtenu des courbes selon la variation de la température.

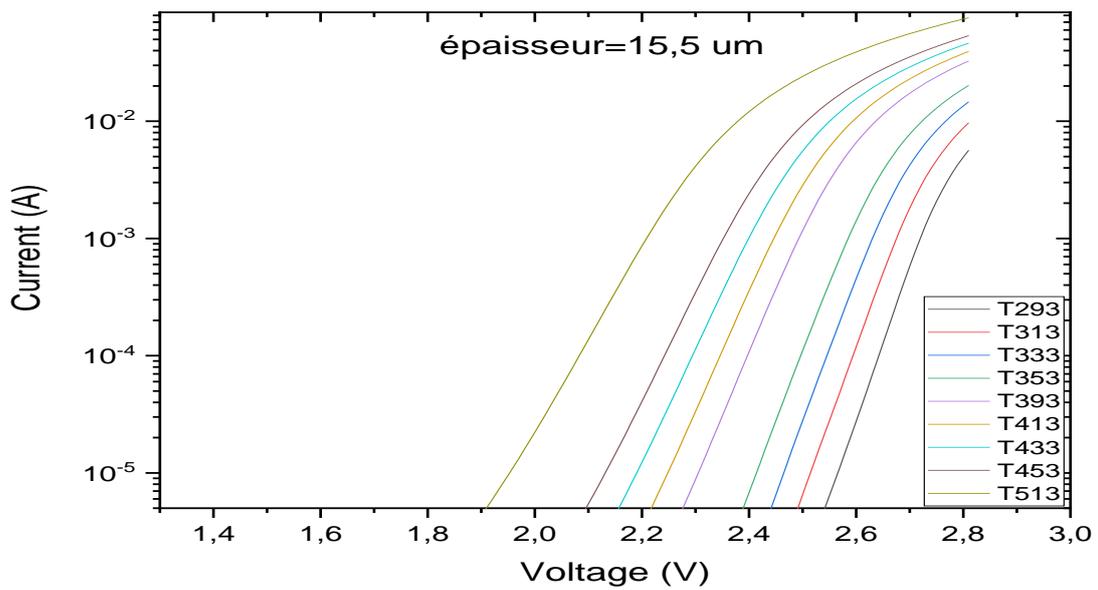


Figure 4.8.a – Caractéristiques I-V-T pour valeur d' épaisseur 15.5 µm

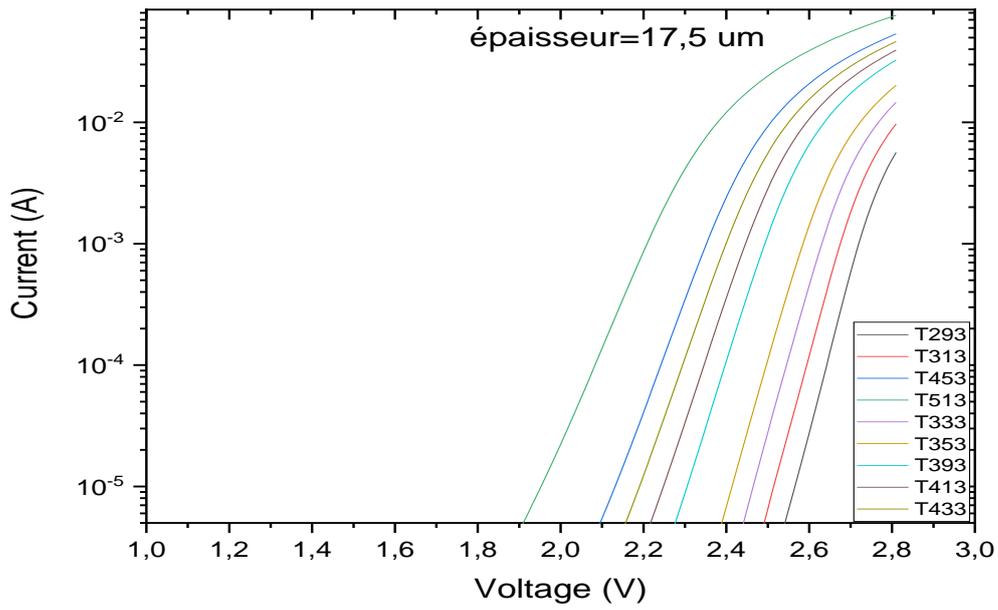


Figure 4.8.b – Caractéristiques I-V-T pour valeur d' épaisseur 17.5 μm

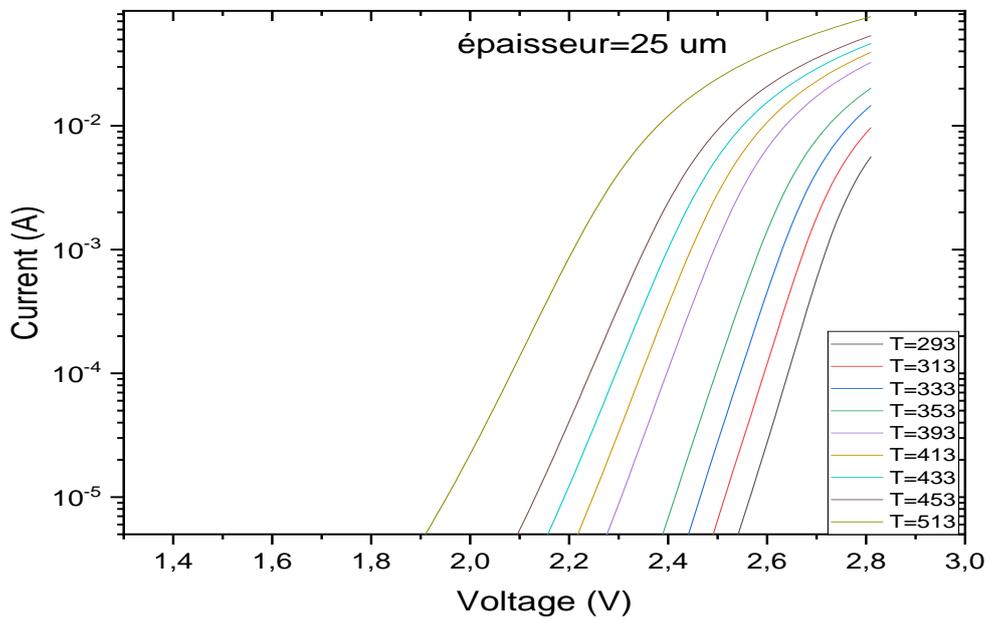


Figure 4.8.c – Caractéristiques I-V-T pour valeur d' épaisseur 25 μm

4.4.2. Performances des capteurs SBD

Des figures 4.8.a,4.8.b et 4.8.c, on tire les figures 4.9.a,4.9.b et 4.9.c pour la tension (V) en fonction de la température pour différent courants pour une plage de température allant de 293 K jusqu'à 513K. En variant l'épaisseur précédemment décrit.

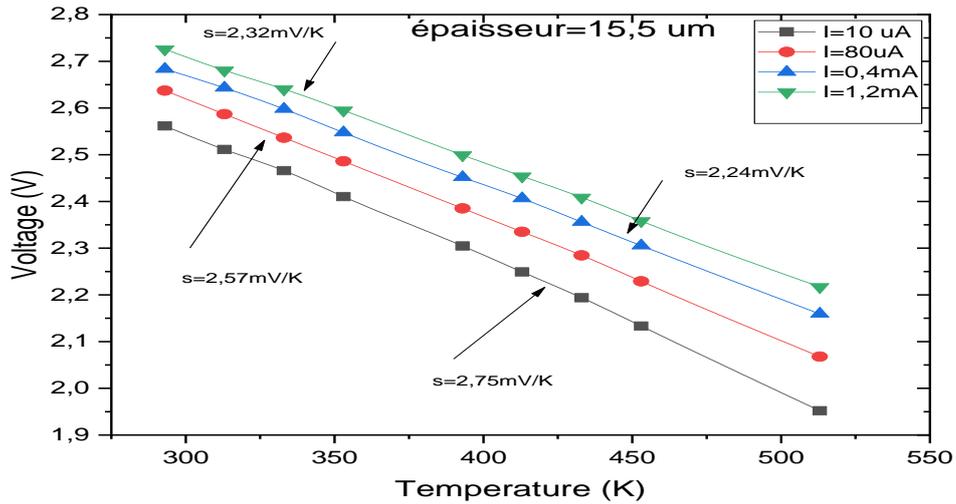


Figure 4.9.a– Caractéristique V-T pour différent densité de courant.

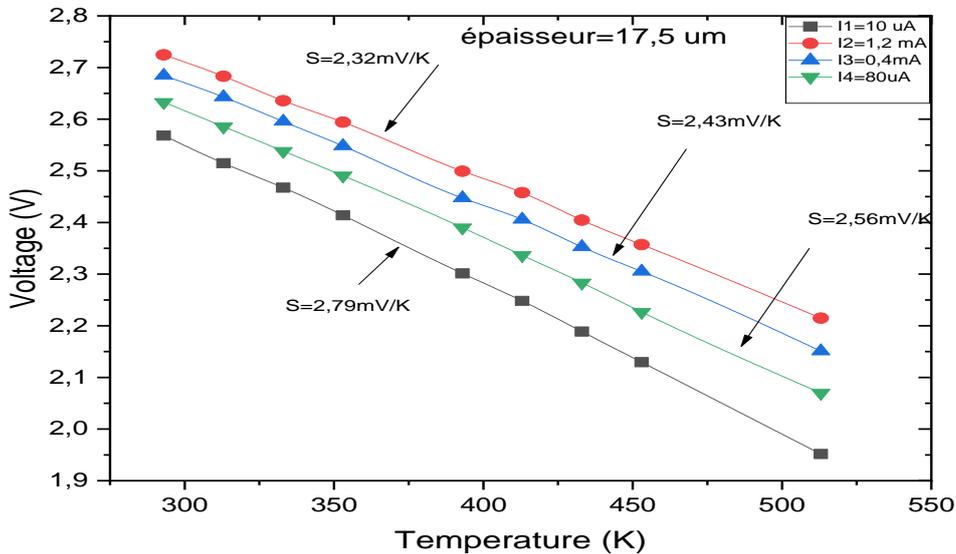


Figure 4.9.b – Caractéristique V-T pour différent densité de courant.

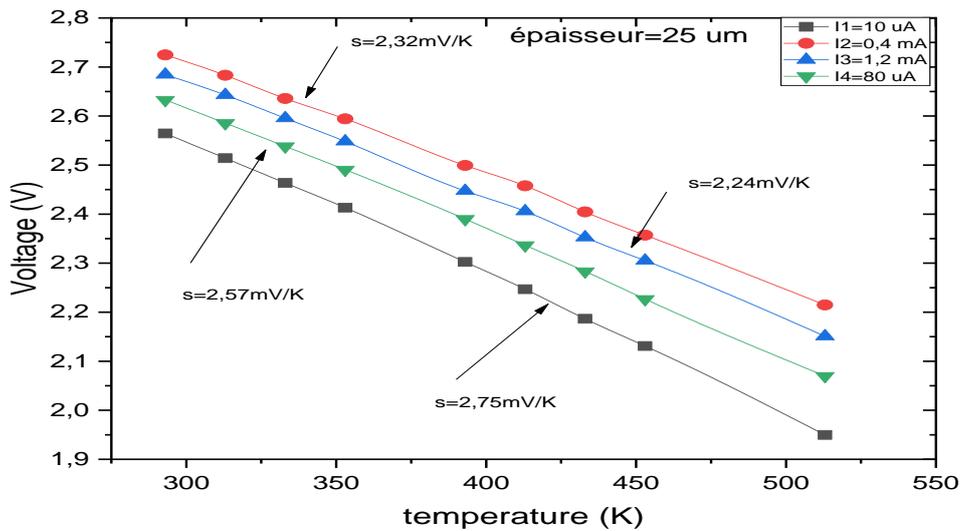


Figure 4.9.c – Caractéristique V-T pour différent densité de courant.

On observe quelque soit la variation de l'épaisseur de la région intrinsèque, une meilleure valeur de la sensibilité est obtenue pour un courant de 10uA, cette sensibilité prend la valeur de $S=2.8\text{mV/K}$.

4.4.3. Effets des dopage à la performance de diode Schottky:

Maintenant on prend une valeur constante de l'épaisseur de la région intrinsèque ($16.5\mu\text{m}$) et on fait varier les valeurs du dopage pour la même région, après simulation on obtient les courbes suivantes:

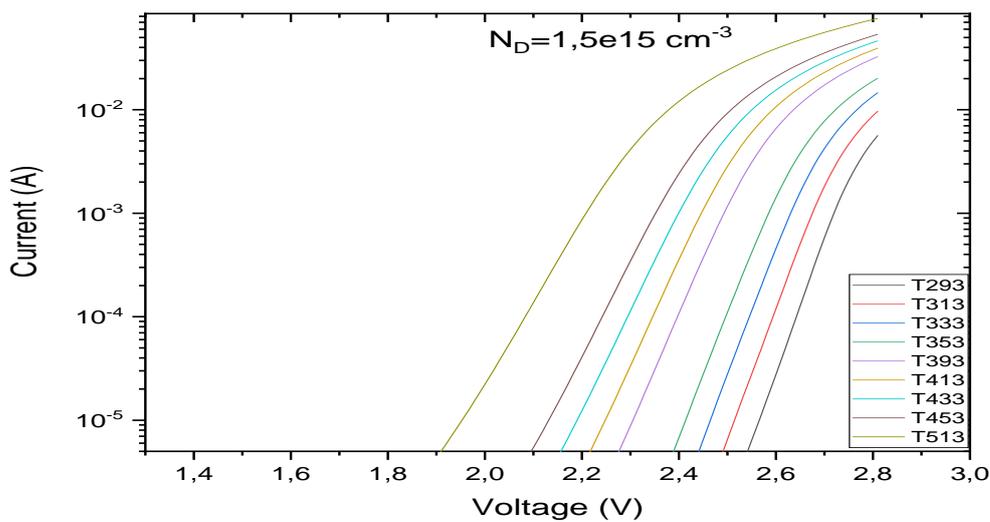


Figure 4.10.a – caractéristiques I-V pour différentes températures pour un dopage $N_D=1.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

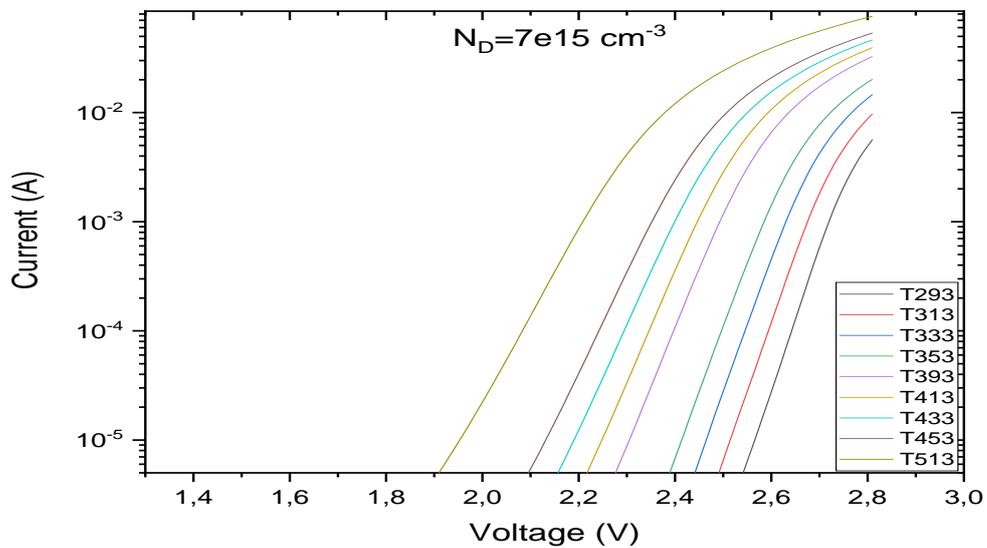


Figure 4.10.b – caractéristiques I-V pour différentes températures pour un dopage $N_D=7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

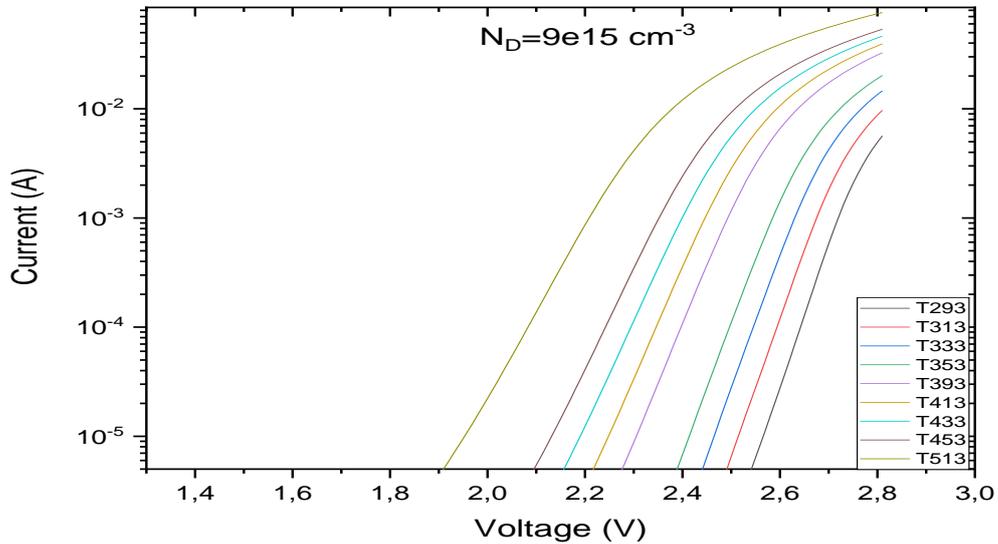


Figure 4.10.c – caractéristiques I-V pour différentes températures pour un dopage $N_D=9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

4.4.4.les courbes de tension en fonction de température:

A partir des simulations, on extrait, les figures 4.11.a,4.11.b et 4.11.c: la tension (V) en fonction de la température pour différent courants pour une plage de température allant de

CHAPITRE03:OUTIL DE SIMULATION SILVACO

293 K jusqu'à 513K, a partir des figures 4.10.a,4.10.b et 4.10.c. Les caractéristiques V_D -T ont été obtenus pour différents courants, lorsqu'on varie les concentration du dopage, comme cité précédemment.

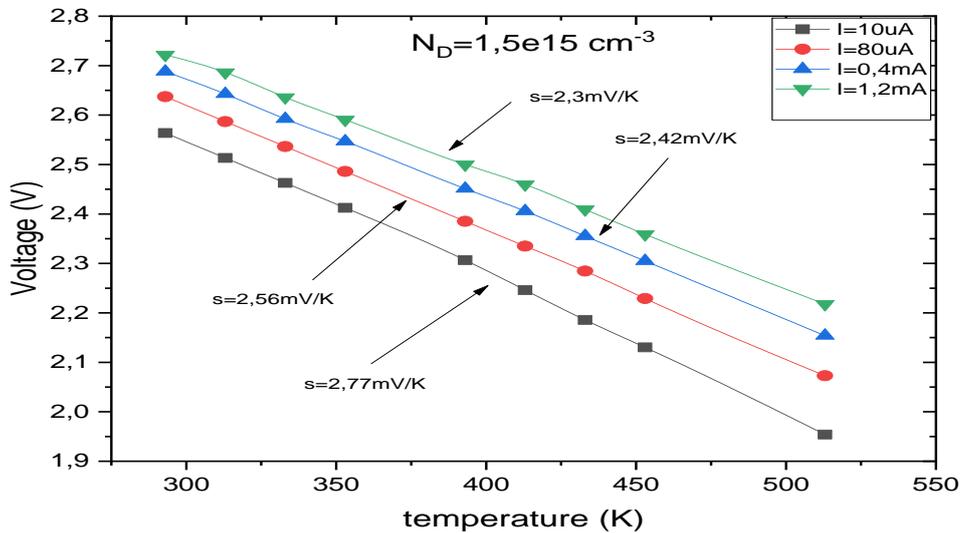


Figure 4.11.a – caractéristique V-T pour $N_D=1.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

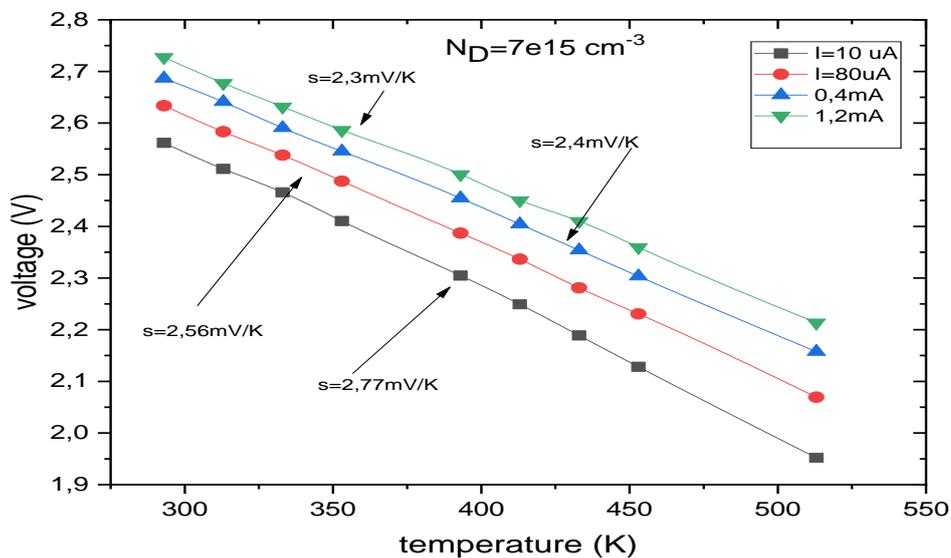


Figure 4.11.b – caractéristique V-T pour $N_D=7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

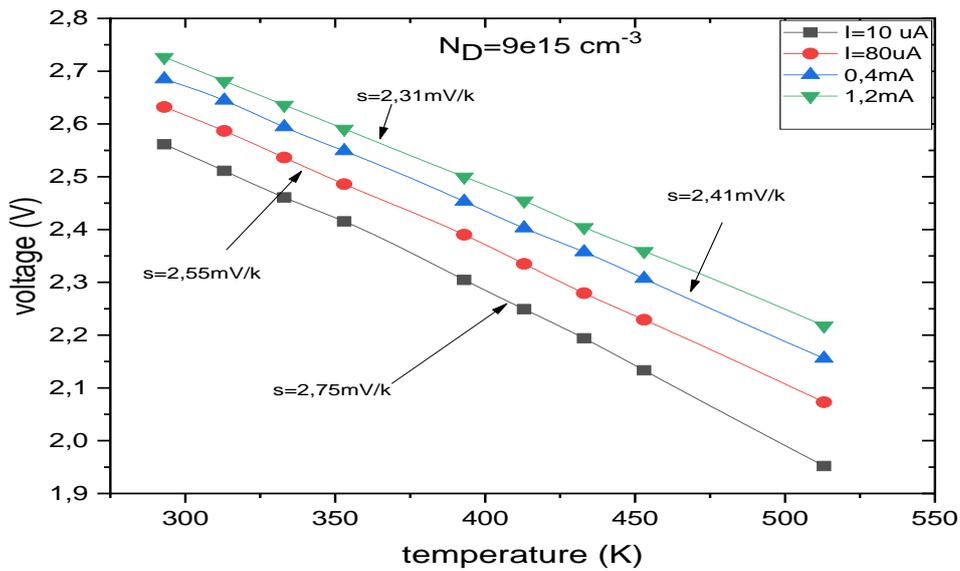


Figure 4.11.c – caractéristique V-T pour $N_D=9*10^{15} \text{ cm}^{-3}$

On observe quelque soit la variation du dopage de la région intrinsèque, une meilleure valeur de la sensibilité est obtenue pour un courant 10uA, cette sensibilité prend la valeur de $S=2.8\text{mV/K}$.

4.4.5. Discussion des résultats

Dans notre analyse, un coefficient de détermination (R^2) a été calculée pour évaluer la linéarité des résultats obtenus . En particulier, R^2 nous a permis de quantifier la qualité de la linéarité du capteur en ajustant les données des simulations avec un modèle linéaire. Les figures (4.9 et 4.11), montrent une bonne degré de linéarité pour les valeurs de I_D considérée, 10 μA à 1,2 mA. La sensibilité du capteur de température S est obtenue en dérivant l'équation $s = \frac{dV}{dT}$ par rapport à la température, il peut être obtenu à partir de la pente des caractéristiques V-T.

Quand I_D est de 10 μA la sensibilité est de 2.8mV /K, alors que pour un courant de $I_D = 1.2\text{mA}$, la sensibilité trouvée est de 2.3mV/K dans la plage de température de 293-513K. À partir des courbes indiquées ci-dessus (4.9 et 4.11) on peut remarquer que la meilleure sensibilité est de 2.8mV/K pour $I_D=10 \mu\text{A}$. Des variations des paramètres géométriques et du dopage sont résumés dans le tableau 4.1. Montrant les différents valeurs de sensibilité et R-square avec les paramètres géométrique et dopage.

CHAPITRE04: RESULTATS ET DISCUSSION

Int(um)	Sensibilité	R-Square	<u>Doppage</u>	Sensibilité	R-Square
10	2.78	0.99812	$9*10^{14}$	2.78	0.9977
14.5	2.78	0.99799	1e15	2.76	0.99854
15.5	2.75	0.99799	1.5e15	2.77	0.99864
16.5	2.79	0.99858	2e15	2.78	0.99842
17.5	2.79	0.99888	5e15	2.78	0.99842
25	2.78	0.99858	7e15	2.77	0.99822
40	2.77	0.99822	9e15	2.75	0.99782
			1.5e16	2.78	0.99838
17.5	2.78	0.99837	$5*10^{15}$	2.78	0.99837

Tab 4.1: variation de la sensibilité avec les paramètres géométrique et dopage.

CHAPITRE04: RESULTATS ET DISCUSSION

A partir du tableau (4.1), on remarque que pour une épaisseur la région intrinsèque (epilayer) de $17.5\mu\text{m}$ donne une linéarité élevée de 0.99888 pour une meilleure sensibilité de 2.79mV/K . On distingue aussi un dopage de $1.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ de la même région donne une linéarité presque équivalente 2.77mV/K . Ce qui nous permet de conclure une structure de la diode avec des valeurs optimaux d'une épaisseur de $17.5\mu\text{m}$ et un dopage de $1.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ permet de réaliser un détecteur de température d'une haute linéarité.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Au cours des deux derniers siècles, les scientifiques ont joué un grand rôle dans l'invention des diodes, en particulier les diodes Schottky, en raison de large application dans diverse domaine tels que nanotechnologie, industriel,...

De point de vue composition, la diode Schottky a la capacité de résister à des fréquences élevées, pour cette raison, elle est utilisée dans le circuit de détection, et aussi dans le circuit de modulation, autre applications comme l'utilisation dans "les éléments numériques" (l'ordinateur numérique) en raison de sa rapidité de commutation, et dans les unités de faible puissance aux gros équipements industriels.

Dans ce mémoire, on est intéressé d'étudier une diode Schottky en utilisant le simulateur numérique dont le but d'analyser le comportement de cette diode à des températures élevées pour des applications de technologie récente, dans ce contexte, la première partie était concentrée sur une description détaillée sur la diode Schottky, et une théorie de la jonction métal-semi-conducteur pour les diverses cas de travail de sortie, en deuxième partie, un détail sur le programme Atlas-Silvaco et les différents blocs ainsi que diverses commandes utilisées pour la modélisation de la diode Schottky ont été présentés, dans la troisième partie, nous avons employé le simulateur Atlas-Silvaco pour l'étude et la simulation de la diode Schottky.

De plus, l'effet de la température sur la diode a été examiné et discuté afin d'étudier le comportement de cette diode à des températures élevées, les résultats obtenus ont montré que l'intensité du courant est significativement augmentée avec la croissance de la température,

Ce travail, consiste aussi à des simulations pour un capteur de température haute linéarité basé sur une diode en utilisant le 4H-SiC comme matériau. Les paramètres géométrique et la concentration du dopage du dispositif ont été discuté en détail. Grâce aux propriétés matérielles supérieures du SiC, le capteur montre un fonctionnement stable dans l'intervalle de la température de 293K jusqu'à 513K sous les conditions de polarisation, la sensibilité à la température du capteur passe de 2,3 mV/K pour un courant direct de 1.2 mA à 2.79 mV/K pour une densité de courant direct 10 μ A. Une sensibilité plus élevée peut être obtenue à un niveau de courant de 10 μ A. Les résultats de simulations indiquent un bon accord avec d'autres travaux [11].

TRAVAIL A FUTURE

Perspective

Il y a plusieurs techniques et des études travaillent pour optimiser la performance de l'appareil. Une analyse plus approfondie des influences des défauts du matériau sur les performances d'un tel capteur de température peut être envisagée pour voir ses effets sur la sensibilité et la linéarité.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Besar Asllani*. "Caractérisation et modélisation de diodes Schottky et JBS SiC-4H pour des applications haute tension" *thèse* Decembre 2018
- [2] *Nikhil Karkhanis*. " fabrication, electrical characterization and annealing of al/, cu/, and au/4h-sic schottky diodes" these,. *Clemson University, 2007*.
- [3] R. S. Okojie P. G. Neudeck and L. Y. Chen. Chigh " High-Temperature Electronics. A Role for Wide Bandgap Semiconductors?", " Article, Vol 90,(P 65-76), juin 2002.
- [4] *S. M. Sze*. "Physics of Semiconductor Devices (second edition)". A *Wiley-Interscience publication, Canada, 1981*.
- [5] *O.BARIR*. " diode pin en sic utilisée comme capteur de haute température".*memoire Master 2017*.
- [6] *A. E. Bazin*. "Conception de diodes Schottky sur 3C-SiC épitaxie sur silicium" . *François Rabelais de Tours, France, 2009*.
- [7] *E. H. Rhoderick and R. H. Williams*. "Metal-Semiconductor Contacts" , 2nd ed. *Oxford, 1998*.
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Diode_Schottky
- [9] *Lamia MEDJOU DJ*. " Simulations d'une diode Schottky à base d'AlGaAs" . *Mémoire Master Université de TIZI-OUZOU, 04 juillet 2018*
- [10] *Mr. KAABACHE CHOKRI*. "simulation et étude des caractéristique électrique d'un contact métal/semi-conducteur a base de GaAs". *mémoire 2016 Université A.MIRA-BEJAIA*.
- [11] *M. L. Megherbi, F. Pezzimenti et al*" 4H-SiC p-i-n diode as Highly Linear Temperature Sensor " *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES,VOL 63,(p14-19), 2016*.
- [12] *C. ALGANI*, " Composant électronique ", Conservatoire National des Art des des Métiers, Cours. [En ligne] http://easytp.cnam.fr/algani/images/ELE101_CNAM_1_2008.pdf (consulté le 03 avril 2018).

BIBLIOGRAPHIE

- [13] R. BOUMARAF, " Simulation de l'effet de la température et les défauts sur les caractéristiques électriques des diodes à base de GaAs", Thèse Doctorat, Université de Biskra « Mohamed Khider », (2015).
- [14] J. Kumar, " System Simulation and Modeling " Article, Vol 90 (p55-64),2015
- [15] ZOUGGAR Khouloud " *Etude par simulation des propriétés électriques des composants HEMTs à base d'hétéro structure ALGaAs/GaAs*". mémoire Master, Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana, 2018
- [16] B. NEDJEDIA, "Etude des propriétés électriques en régime statique d'une structure Schottky ", Mémoire Magistère, Université de Batna, 2010
- [17] N. HERISSI, " Extraction des paramètres des structures Métal-Semi-conducteurs (Ti/Pt/AuGaAs)à partir des caractéristiques courants-tensions (I-V)", Mémoire Magister, Université de Tébessa, 2012
- [18] Berramdan Safia, "Simulation d'une diode SCHOTTKY en carbure de silicium utilisé comme capteur de température" Mémoire Master , Université Biskra, 2020.