



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Faculté des Sciences et Technologies
Filière :Télécommunications
Spécialité :Réseaux et :Télécommunications

Réf. : ...

Présenté et soutenu par :
Berramdan Safia

Le : 30 septembre 2020

Simulation d'une diode SCHOTTKY en carbure de silicium utilisé comme capteur de température

Jury :

Dr	HEMAIZIA ZAHRA	MCA	Université de Biskra	Président
Mr.	GUESBAYA TAHAR	MCA	Université de Biskra	Examineur
Mr.	MEGHERBI M.LARBI	MCB	Université de Biskra	Rapporteur



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

Filière :Télécommunications
Spécialité :Réseaux et :Télécommunications

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

Simulation d'une diode SHOTTKY en carbure de silicium utilisé comme capteur de temperature

Présenté par:

BERRAMDAN SAFIA

Avis favorable de l'encadreur :

MEGHERBI M.LARBI

Signature

Avis favorable du Président du Jury

HEMAIZIA ZAHRA

Cachet et signature

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 la 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 ma sœur et mes frères, pour leurs encouragements.À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Table des matières

Introduction Générale	1
1 Les Matériaux 4H-SiC	2
1.1 Introduction	2
1.2 Les Propriétés de SiC	2
1.2.1 Propriétés physiques	2
1.2.1.1 Structure cristalline	2
1.2.1.2 Polytypes	3
1.2.2 Propriétés thermiques	5
1.2.3 Propriétés mécaniques	5
1.2.4 Propriétés optiques	5
1.2.5 Propriétés électriques du SiC	6
1.2.6 Propriétés des matériaux	6
1.3 Dopage	7
1.3.1 Type N	7
1.3.2 Type P	7
1.4 Les applications	7
1.4.1 Applications hautes températures	7
1.4.2 Applications de puissance	8
1.5 Conclusion	8
2 Les bases des diodes Schottky	9
2.1 Introduction	9
2.2 Théorie du contact métal-semiconducteur	10
2.3 Diode Schottky	11
2.3.1 Composants d'une diode Schottky	12
2.4 Schottky Barrière Hauteur	12
2.4.1 Travail de sortie des métaux	12
2.4.2 Travail de sortie du semi-conducteur	14
2.4.3 Affinité électronique	14
2.5 Zone de charge d'espace (ZCE)	15
2.6 Caractéristique courant-tension	16

2.6.1	Courant d'émission thermoïonique	17
2.6.2	Courant tunnel	18
2.7	Modèles de transport dans les diodes Schottky	18
2.7.1	Émission d'électrons au-dessus de la barrière	18
2.7.2	Tunnel quantique-mécanique à travers la barrière	20
2.7.3	Recombinaison électron-trou dans la région de charge spatiale	20
2.7.4	Injection de trou dans la région neutre du semi-conducteur	21
2.8	Exemples d'applications de diodes SiC Schottky	21
2.8.1	. Applications dans l'électronique de puissance	21
2.8.2	Capteurs de température	21
2.8.3	Détecteurs UV	22
2.9	Conclusion	22
3	Logiciel de simulation SILVACO ATLAS	23
3.1	Introduction	23
3.2	Logiciel de simulation « Silvaco-Atlas »	24
3.3	Présentation du paquet des programmes SILVACO	24
3.4	L'environnement ATLAS	26
3.5	L'ordre des commandes	27
3.6	Utilisation du logiciel « Silvaco-Atlas »	28
3.6.1	Les modèles physiques	28
3.6.2	Les méthodes numériques	29
3.7	Utilisation du langage de commande pour définir une structure	29
3.8	les solutions	33
3.9	Organigramme de Simulation	34
3.10	Conclusion	34
4	Résultats de simulation	35
4.1	Introduction	35
4.2	Structure à Silvaco TCAD	35
4.3	Caractéristiques I-V de diode Schottky	40
4.4	Performances des capteurs SBD	41
4.5	Le courant de saturation	43
4.6	Conclusion	44
	Conclusion générale	45
	Annexe	46

Liste des figures

1.1	Arrangements des plans cristallins pour les polytypes courants.[1].	3
1.2	Empilage de séquences de bilayers SiC dans des polytypes communs.	4
1.3	La cellule unitaire des polytypes hexagonaux de SiC.	4
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..	10
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. [9].	11
2.3	Symbole d'une diode schottky.	12
2.4	Travail de Sortie d'un métal.	13
2.5	Diagrammes de bandes pour un Semi-conducteur de type (n).	14
2.6	L'affinité électronique.	15
2.7	Phénomènes de transport dans un contact M/Sc	17
2.8	Mécanismes de transport actuels dans une barrière Schottky biaisée vers l'avant.	19
2.9	Niveau quasi-frémis des électrons dans une barrière Schottky orientée vers l'avant.	20
3.1	Environnement virtuel de fabrication des plaquettes de Silvaco [15]	24
3.2	L'environnement ATLAS.[16]	26
3.3	l'ordre des commandes ATLAS [17]	28
3.4	définition de maillage avec Atlas.	30
3.5	définition des régions	31
3.6	définitions des électrodes.	32
3.7	définition de dopage.	32
3.8	La caractéristique courant-tension sous Tonyplot.	33
3.9	Organigramme de simulation[20].	34
4.1	W/4H-SiC Schottky barrière diode section transversale schématique	36
4.2	Définition du maillage avec ATLAS	37
4.3	Définition des régions	37
4.4	Définition des electrodes	38

4.5	Définition de dopage	39
4.6	caractéristiques I-V pour différentes températures	40
4.7	caractéristique V-T pour différent densité de courant.	41
4.8	caractéristique V-T pour différent densité de courant avec la sensibilité. . .	42
4.9	Coefficient de détermination et de sensibilité	43
4.10	Le courant de saturation	44

Liste des tableaux

1.1	Propriétés thermiques des polytypes courants de SiC	5
1.2	Propriétés mécaniques des polytypes courants de SiC	5
1.3	Propriétés optiques des polytypes courants de SiC.	6
1.4	Propriétés électriques du SiC [7].	6
2.1	Travaux de sortie de quelques métaux	13
2.2	travail de sortie de quelques semiconducteurs.	14
2.3	L'affinité électronique X SC[11]	15
3.1	fonction de travail de divers métaux.[20].	31

Abréviation :

Si : Silicium

C : Carbone

SIC : Carbure de Silicium

4H : 4Hydrogène

SBD : Schottky Barrier Diodes

ZCE : Zone de Charge d'Espace

Silvaco : Silicon Valler Corporation

TCAD : Technology Computer Aided Design

VWF : Virtual Wafer Fabrication

الملخص

في هذه المذكرة نحن مهتمون بثنائيات حاجز شوتكي W/4H-SiC كجهاز استشعار لدرجة الحرارة و بالتالي فان دراسة خصائصه الكهربائية جد مهمة بهدف فهم مختلف الخواص تيار- جهد الكهربائي .

أداة المحاكاة سيلفاكو-اطلس سمحت لنا بمعاينة خصائص تيار- جهد الكهربائي لمعرفة تأثير درجة الحرارة على منحنيات التطور و تقييم المعايير الأساسية التي تمثل ثنائي شوتكي مثل معامل التحديد و الحساسية و تيار التشبع...الخ..

الكلمات المفتاحية

اشباه الموصلات-ديود شوتكي –سيلفاكو اطلس-مستعشر درجة الحرارة

Résumé :

Dans ce travail on s'intéresse à W/ 4H-SiC diode schottky comme capteurs de température, donc l'étude de leur propriétés électriques est très important dans le but d'avoir les différents effets sur les caractéristiques courant-tension .

Le logiciel SILVACO-ATLAS nous a permis de simuler les caractéristiques courante tension (I-V), de voir l'influence de la température sur l'évolution des courbes, et d'évaluer les principaux paramètres qui caractérisent la diode Schottky tel que la Coefficient de détermination, la sensibilité et le courant de saturation ...etc..

Mots clés :

Semi conducteurs-diode schottky-4H-SiC –silvaco-atlas-capteur de température.

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 \ddagger semi-conducteur. C'est un outil de conception des dispositifs \ddagger 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 nous allons montrer les résultats de la simulation.

Chapitre 1

Les Matériaux 4H-SiC

Sommaire

1.1	Introduction	2
1.2	Les Propriétés de SiC	2
1.3	Dopage	7
1.4	Les applications	7
1.5	Conclusion	8

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 ??, [2].

Les cristaux de carbure de silicium d'Acheson avaient en fait plusieurs structures cristallographiques appelées polytypes. Aujourd'hui, fait unique en cristallographie, plus de 170 polytypes ont été recensés pour SiC même si peu d'entre eux peuvent être synthétisés.

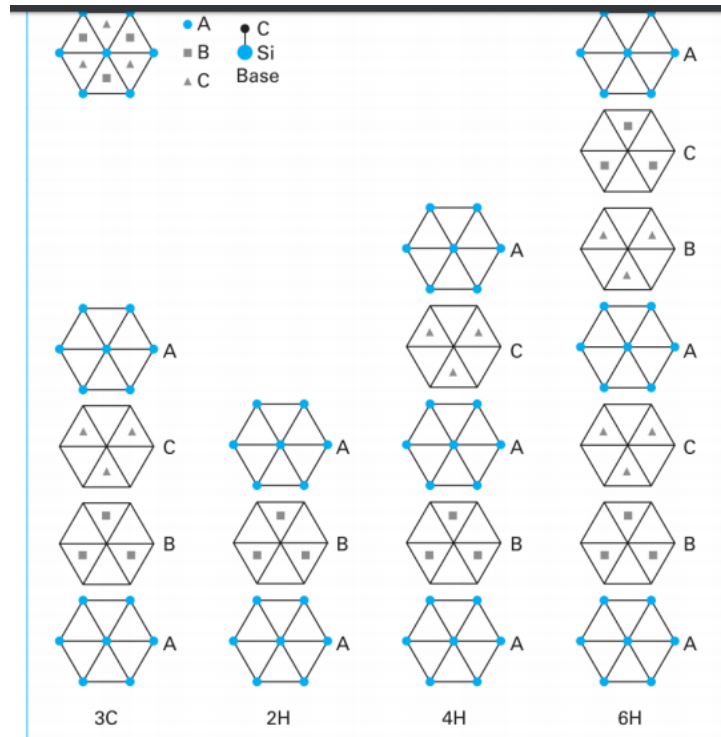


FIGURE 1.1 – Arrangements des plans cristallins pour les polytypes courants.[1].

1.2.1.2 Polytypes

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 polytypes. Ainsi il en existe plus de 170 pour le carbure de silicium : cubique, hexagonales, rhomboédriques .

Le seul polytype cubique connu (3C) est appelé -SiC, tandis que les polytypes hexagonaux et rhomboédriques sont collectivement appelés -SiC. Selon la périodicité de la séquence d'empilement, les polytypes 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 polytypes courants de SiC sont représentées sur la figure 1.2.

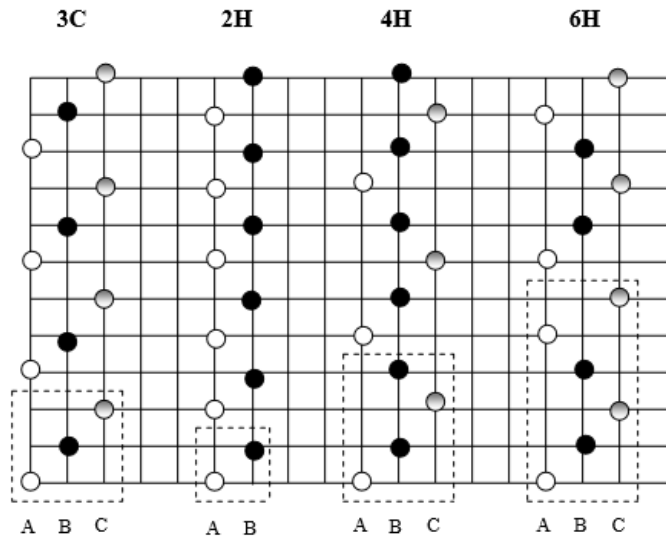


FIGURE 1.2 – Empilage de séquences de bilayers SiC dans des polytypes communs.

La cellule unitaire des polytypes 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.

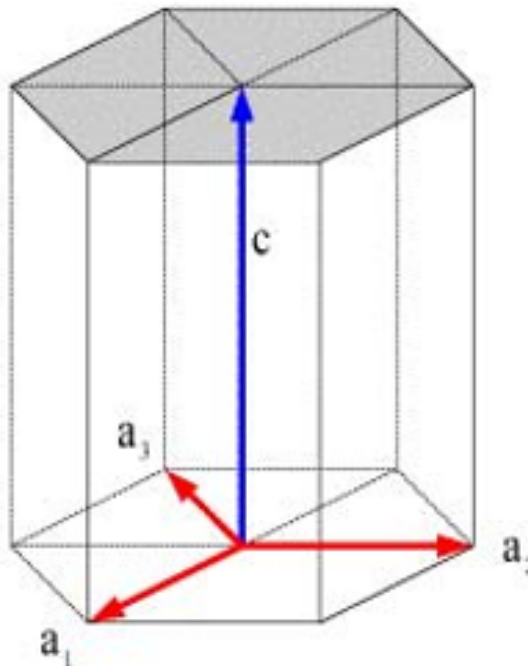


FIGURE 1.3 – La cellule unitaire des polytypes hexagonaux de [12].

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 [4]. 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]. Les propriétés thermiques, les propriétés des 3C, 4H et 6H-SiC sont énumérées dans le tableau 1.1.

Properties	3C	4H	6H
Melting Point (°C)	~3100K	~3100K	~3100K
Specific Heat (J g ⁻¹ °C ⁻¹)	0.69	0.69	0.69
Thermal Conductivity (W cm ⁻¹ °C ⁻¹)	4.9	4.9	4.9
Thermal Diffusivity (cm ² s ⁻¹)	1.6	1.7	2.2
Thermal Expansion (°C ⁻¹)	~3.8 * 10 ⁻⁶		4.3 * 10 ⁻⁶ (⊥c-axis) 4.7 * 10 ⁻⁶ (c-axis)

TABLE 1.1 – Propriétés thermiques des polytypes courants de SiC

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 :

Properties	3C	4H	6H
Bulk Modulus (GPa)	392-448		97
Mohs hardness	~9	~9	~9
Acoustic velocity (ms ⁻¹)	12600	13730	13100 - 13260

TABLE 1.2 – Propriétés mécaniques des polytypes 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.

Properties	3C	4H	6H
Optical Bandgap (eV)	2.4-2.6		2.86
Excitation Energy Gap (eV)	2.39	3.27	3.02
Infrared Refractive Index	2.55	2.55 \perp <i>c</i> -axis 2.59 \parallel <i>c</i> -axis	2.55 \perp <i>c</i> -axis 2.59 \parallel <i>c</i> -axis

TABLE 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 polytypes 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

TABLE 1.4 – Propriétés électriques du SiC [7].

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 polytypes et les applications du SiC sont discutées.

Chapitre 2

Les bases des diodes Schottky

Sommaire

2.1	Introduction	9
2.2	Théorie du contact métal-semiconducteur	10
2.3	Diode Schottky	11
2.4	Schottky Barrière Hauteur	12
2.5	Zone de charge d'espace (ZCE)	15
2.6	Caractéristique courant-tension	16
2.7	Modèles de transport dans les diodes Schottky	18
2.8	Exemples d'applications de diodes SiC Schottky	21
2.9	Conclusion	22

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-semiconducteur

Les contacts métaux semi-conducteurs (MS) peuvent être simplement réalisés en déposant une couche métallique par la technique d'évaporation sous vide ou par la méthode de pulvérisation cathodique à la surface d'un cristal semi-conducteur. Dans la pratique, les contacts (MS) peuvent se comporter soit comme des contacts redresseurs (Schottky) ou des contacts ohmiques. Le contact redresseur bloque le passage du courant en inverse et possède une faible tension de seuil en direct comme le montre la figure (2.1a). Le contact ohmique, quant à lui, laisse passer le courant quelle que soit la polarisation comme le montre la figure (2.1.b) [8]

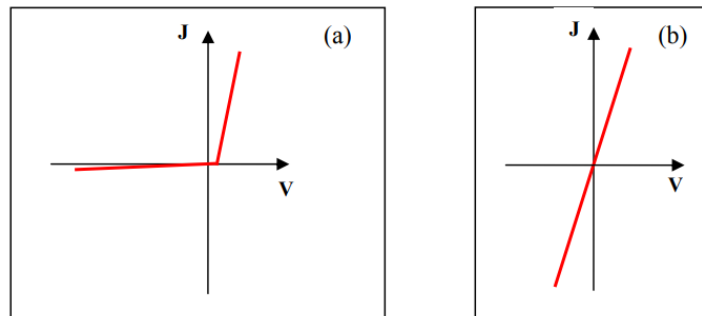


FIGURE 2.1 – Courbe caractéristique de la densité de courant J en fonction de la tension V (a) pour un contact Schottky et (b) pour un contact ohmique..

Pour voir comment une barrière Schottky est formée, 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 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.

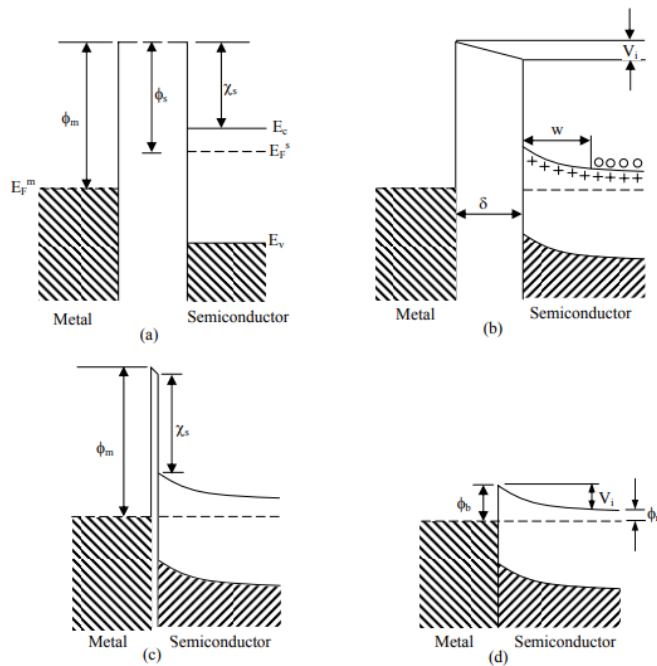


FIGURE 2.2 – Formation d'une barrière Schottky entre le métal et le semi-conducteur de type n : (a) neutre et isolé électriquement, (b) raccordé électriquement, (c) séparé par un espace étroit, (d) en contact parfait. [9].

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 interfaciale est généralement sa flèche que les électrons peuvent percer assez facilement.[9]

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 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.

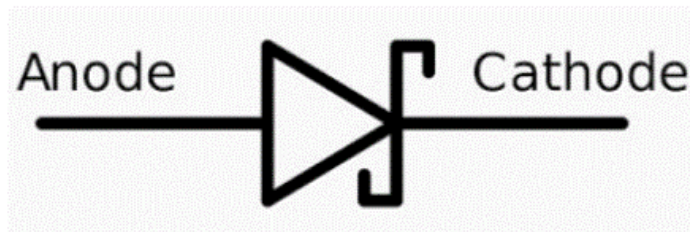


FIGURE 2.3 – Symbole d'une diode schottky.

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 Schottky Barrière Hauteur

Le contact métal-semiconducteur est ohmique ou redresseur suivant la différence des travaux de sortie et le type de semiconducteur.[10]

2.4.1 Travail de sortie des métaux

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 NV. Cette quantité est appelée travail de sortie du métal et est notée ϕ_m . Le tableau (2.1) donne le travail de sortie de certains métaux utilisés en microélectronique ou optoélectronique.

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

TABLE 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 :

$$q\phi_m = NV - E_F \quad (2.1)$$

Où NV 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.

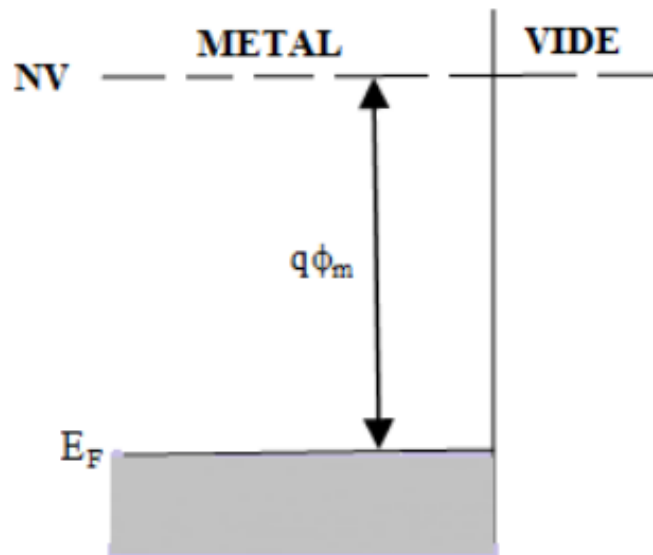


FIGURE 2.4 – Travail de Sortie d'un métal.

2.4.2 Travail de sortie du semi-conducteur

Le travail de sortie $e\phi_{SC}$ dans les semi-conducteurs et les isolants est défini de la même manière. C'est l'énergie minimale qu'il faut fournir à un électron situé au niveau de Fermi pour l'arracher du semi-conducteur et l'amener au niveau du vide N_V (Tableau 2.2). Le travail de sortie du semi-conducteur est donc :

$$e\phi_{SC} = N_V - E_{FSC} \quad (2.2)$$

Cependant la position du niveau de Fermi dépend du dopage. (Voir figure 2.5)

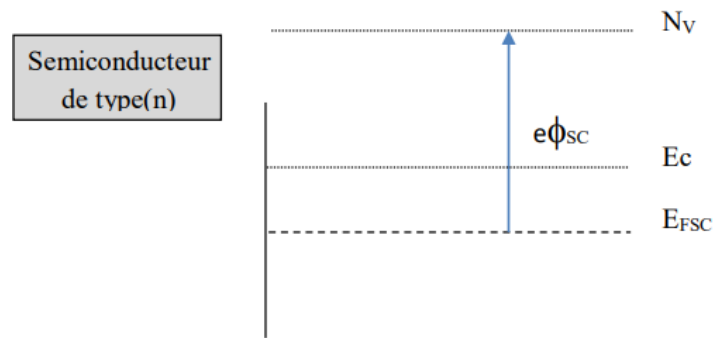


FIGURE 2.5 – Diagrammes de bandes pour un Semi-conducteur de type (n).

Semiconducteur	Si	Ge	GaP	InP	CdTe	GaAs
$e\phi_{SC}$ (eV)	5.13	4.49	6.55	5.65	5.72	5.50

TABLE 2.2 – travail de sortie de quelques semiconducteurs.

2.4.3 Affinité électronique

Dans les semi-conducteurs et les isolants, le travail de sortie SC $q\chi$ est défini de la même manière. Cependant, pour les semi-conducteurs, la position du niveau de Fermi dépend du dopage et $q\chi$ 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.

$$q\chi_{SC} = N_V - E_C \quad (2.3)$$

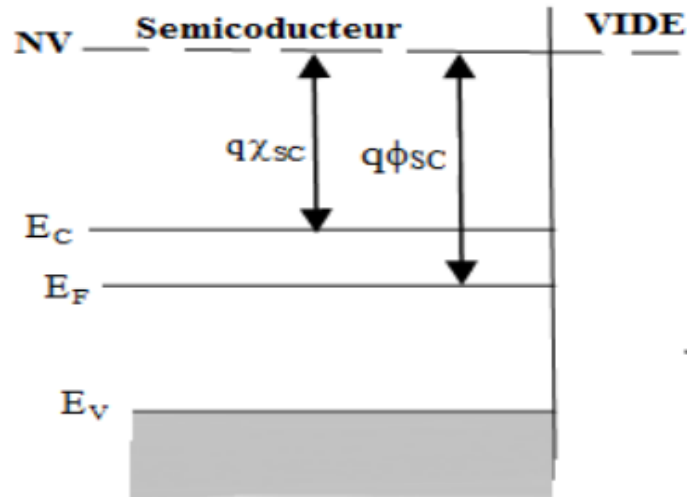


FIGURE 2.6 – L'affinité électronique.

Le tableau (2.3) donne les affinités électroniques de quelques semi-conducteurs utilisés en microélectronique :

Élément	L'affinité électronique (eV)	Element	L'affinité électronique (eV)
Ge	4.13	GaAs	4.07
Si	4.01	AlAs	3.5

TABLE 2.3 – L'affinité électronique X SC[11]

2.5 Zone de charge d'espace (ZCE)

Considérons la structure *métal-Sc(n)* avec $\phi_m > \phi_s$ en intégrant l'équation de Poisson et nous supposons que le Sc est homogène, avec une densité de donneurs excédentaires N_d ionisés à la température ambiante et que la densité d'état d'interface est négligeable. Le champ électrique calculé à une direction x est donné par :[10]

$$E(x) = \frac{qN_d}{\epsilon_s} (x - W) \quad (2.4)$$

W est la largeur de la zone de charge d'espace et ϵ_s est la constante diélectrique du Sc. La valeur du champ à l'interface est :

$$E_s = -\frac{qN_d W}{\epsilon_s} \quad (2.5)$$

Le potentiel scalaire est donné par :

$$V(x) = -\frac{qN_d}{\epsilon_s} \left(\frac{x^2}{2} - Wx \right) \quad (2.6)$$

La tension de diffusion résulte de la différence des travaux de sortie du métal et du Sc :

$$V_d = \phi_m - \phi_s \quad (2.7)$$

Cette tension est correspond à la différence de potentiel entre la surface du Sc et son volume :

$$V_d = V(x=W) - V(x=0) = -\frac{qN_d}{\epsilon_s} \left(\frac{W^2}{2} - W^2 \right) = \frac{qN_d}{2\epsilon_s} W^2 \quad (2.8)$$

D'où l'expression de la largeur de la ZCE à l'équilibre est :

$$W = \left(\frac{2\epsilon_s}{qN_d} V_d \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

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

$$W = \left(\frac{2\epsilon_s}{qN_d} \left(V_d - \frac{kT}{q} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

2.6 Caractéristique courant-tension

Le courant dans la structure est essentiellement dû aux porteurs majoritaires, ce courant est conditionné par des phénomènes physiques différents dans les différentes régions illustrées par la figure 2.3 :[21]

- (1) A l'interface il est conditionné par l'émission thermoïonique au-dessus la barrière de potentiel (le processus dominant dans les diodes Schottky avec un dopage moyen du Sc, ex : le Silicium avec $17 \text{ } 3 \text{ } 10 \text{ N cm d} \leq$ à une température moyenne 300 K).
- (2) Effet tunnel des électrons à travers la barrière (important dans les Sc plus dopé).
- (3) Recombinaison dans la ZCE, identique comme une jonction pn.
- (4) Courant de diffusion dans la ZCE du Sc.

- (5) Les trous injectés du métal et diffuse vers le Sc (équivalent à la recombinaison dans la région neutre).

Dans les Sc avec une grande mobilité le courant le plus probable est l'émission thermoïonique, tandis que dans les Sc avec petite mobilité c'est le phénomène de diffusion, entre cet intervalle on fait la synthèse entre les deux phénomènes.

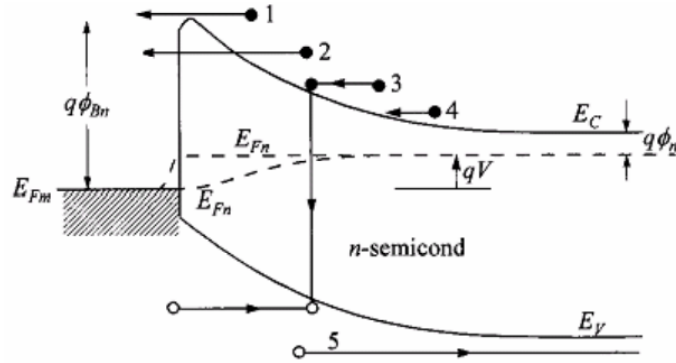


FIGURE 2.7 – Phénomènes de transport dans un contact M/Sc

2.6.1 Courant d'émission thermoïonique

Le processus de transport d'émission thermoïonique est prépondérant aux faibles tensions. L'émission des charges est dépendante de la température, En l'absence de toute polarisation On peut écrire l'équation, de la densité de courant comme suit :

$$j_s = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{k_B T}\right) \quad (2.11)$$

Où A^* est la constante de Richardson donné par

$$A^* = \frac{4\pi q m_e k^2}{h^3} \quad (2.12)$$

$$E_b = q\phi_m - q\chi = q\phi_F \quad (2.13)$$

Est la barrière de potentiel $q\phi = E_c - E_f$. Polarisons la structure par une tension $V_m - V_{sc} = V$ (polarisation directe).

2.6.2 Courant tunnel

Pour les Sc 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 Sc et de non occupation dans le métal.[22].

$$j_{s \rightarrow m} = \frac{A^{**} T^2}{kT} \int_{E_{Fm}}^{qE_b} F_s T(E) (1 - F_m) dE \quad (2.14)$$

F_s et F_m les fonctions de distributions de Fermi Dirac pour le Sc et le métal. A^{**} constant de Richardson effective Une expression similaire pour le courant en sens inverse en interchangeant les fonctions de distribution, le courant résultant sera la somme algébrique de deux courants, qui Donne une équation analytique difficile à résoudre et les résultats sont obtenus à l'aide d'un calcul numérique avec un microordinateur. L'expression du courant tunnel a été développé par Padovani et Stratton. L'expression du courant prend la forme générale suivante :

$$j = j_0 \left[e^{(qV/\eta kT)} - 1 \right] \quad (2.15)$$

2.7 Modèles de transport dans les diodes Schottky

Les modèles de transport actuels qui déterminent la conduction dans le contact Schottky sont discutés dans cette section. Les moyens par lesquels les électrons peuvent être transportés du semi-conducteur à travers la barrière dans le métal sont :

Émission d'électrons au-dessus de la barrière.

- a) Tunnel mécanique quantique à travers la barrière.
- b) Recombinaison électron-trou dans la région de charge spatiale. Recombinaison électron-trou dans la région neutre du semi-conducteur.

2.7.1 Émission d'électrons au-dessus de la barrière

Le flux d'électrons du semi-conducteur au métal est principalement régi par deux processus. Tout d'abord, les électrons traversent la région d'appauvrissement dans le semi-conducteur près du métal sous l'influence des mécanismes de dérive et de diffusion. Lorsqu'ils arrivent à l'interface métal/semi-conducteur, ils sont émis dans le métal au-delà de la limite. Les deux processus sont effectivement en série et le courant est principalement contrôlé par le mécanisme qui offre le plus d'obstruction au flux des électrons. Selon la

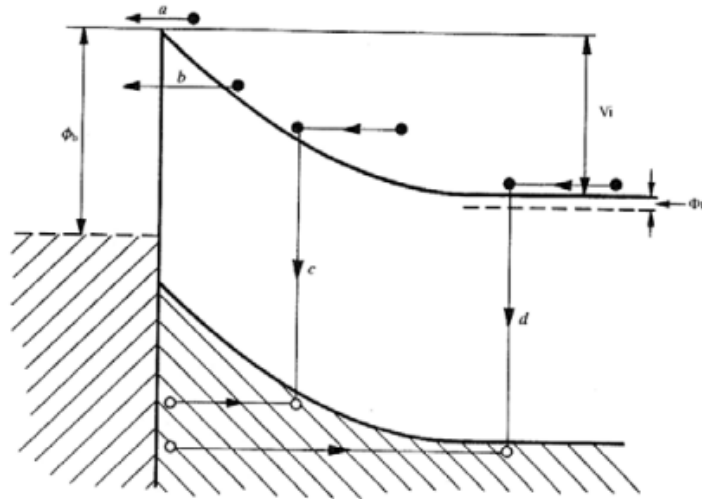


FIGURE 2.8 – Mécanismes de transport actuels dans une barrière Schottky biaisée vers l'avant.

théorie de la diffusion, le premier processus est le facteur limitatif, tandis que la théorie de l'émission thermoïonique prétend que le deuxième processus est le facteur limitatif. La principale différence entre les deux théories est le comportement du niveau quasi-Fermi dans le semi-conducteur.

Selon la théorie de la diffusion, le niveau de quasi-Fermi à l'interface coïncide avec le niveau de Fermi dans le métal. Lorsque les électrons circulant dans le semi-conducteur arrivent à l'interface, ils sont en équilibre thermique avec les électrons de conduction dans le métal. Ainsi, la concentration des électrons du côté des semi-conducteurs n'est pas altérée par l'application du biais, et la transition du niveau de quasi-Fermi du niveau de Fermi en vac des semi-conducteurs, E_F , au niveau de Fermi en métal, E_{Fm} , se produit dans la région d'appauvrissement.

La théorie de l'émission thermique postule que le niveau de quasi-Fermi à l'interface ne coïncide pas avec le niveau de Fermi du métal et reste constant dans toute la région d'appauvrissement des E_F , comme une jonction p-n. Par conséquent, les électrons émis par le semi-conducteur ne sont pas en équilibre thermique avec les électrons de conduction dans le métal, mais ont une énergie qui égale la somme de l'énergie de Fermi du métal et de la hauteur de la barrière. On les appelle les « électrons chauds ». Lorsque ces électrons chauds pénètrent dans le métal, ils perdent de l'énergie par des collisions avec les électrons de conduction et finissent par s'équilibrer avec eux. Cela indique que le niveau quasi-Fermi tombe dans le métal jusqu'à ce qu'il coïncide avec le niveau de Fermi métal.

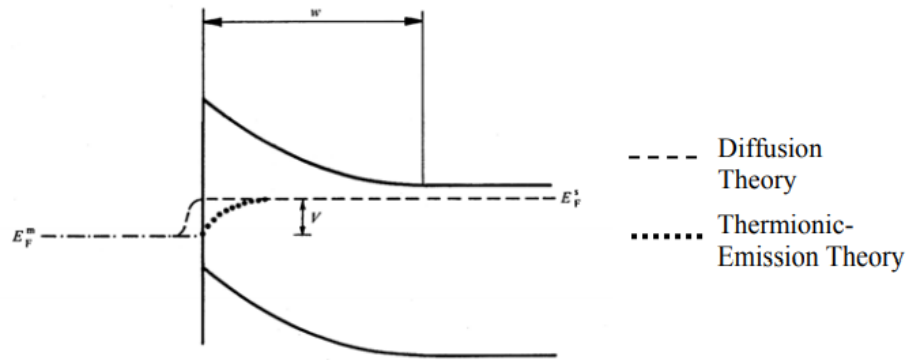


FIGURE 2.9 – Niveau quasi-Fermi des électrons dans une barrière Schottky orientée vers l'avant.

2.7.2 Tunnel quantique-mécanique à travers la barrière

Dans certaines circonstances, il peut être possible pour les électrons avec des énergies en dessous de la barrière de pénétrer la barrière par tunnel quantique-mécanique. Dans le cas de semi-conducteurs dégénérés à basse température, le courant peut provenir du tunnel d'électrons proches du niveau de Fermi. C'est ce qu'on appelle les « émissions sur le terrain ». Les émissions sur le terrain revêtent une importance considérable pour les contacts ohmiques. Les contacts ohmiques consistent généralement en des barrières Schottky sur des matériaux très dopés, ce qui rend la zone de déplétion si mince que l'émission de champ a lieu et le contact a une très faible résistance.

À mesure que la température augmente, les électrons sont excités à des énergies plus élevées et la probabilité de tunneling augmente puisqu'ils font face à une barrière plus mince. Cependant, le nombre d'électrons excités diminue rapidement avec l'énergie croissante. Il y aura une énergie optimale à laquelle la contribution des électrons excités au courant sera maximale. C'est ce qu'on appelle « l'émission du champ thermoïnique ». Si la température est plus élevée, de plus en plus d'électrons seront alimentés pour passer au-dessus de la barrière, jusqu'à ce qu'un point soit atteint lorsque l'effet du tunnel par rapport à l'émission thermique pure.[12]

2.7.3 Recombinaison électron-trou dans la région de charge spatiale

La recombinaison dans la région d'appauvrissement a généralement lieu en raison de la présence d'états localisés dans le semi-conducteur. Les États localisés sont souvent qualifiés de 'pièges' car ils servent de centre de piégeage pour les transporteurs minoritaires. Les états localisés sont formés par des défauts, des états de surface, des liaisons pendantes

et des impuretés. Ces pièges ont un niveau d'énergie qui est généralement situé dans l'écart d'énergie interdit. Les centres pièges les plus efficaces sont ceux avec des énergies situées près du centre de l'espace interdit. La théorie du courant due à de tels centres de recombinaison est similaire à celle des jonctions p-n, et est prédite par le modèle S-H-R (Shockley, Hall et Read).[13]

2.7.4 Injection de trou dans la région neutre du semi-conducteur

Lorsque la hauteur de la barrière Schottky sur un matériau de type n est supérieure à la moitié de l'écart de bande d'énergie, la région du semi-conducteur à la surface et à proximité devient de type p et contient une forte densité de trous. Ces trous se diffusent dans la région neutre du semi-conducteur sous l'influence du biais vers l'avant et donnent ainsi lieu à l'injection des trous. Si la concentration du trou dépasse celle des électrons, la surface est inversée et forme une jonction p-n avec la masse. Cet effet n'est perceptible que sur de grandes hauteurs de barrière avec des semi-conducteurs faiblement dopés . Étant donné que le SiC a un grand intervalle de bande passante et une très faible concentration de vecteur intrinsèque, l'injection dans le trou est négligeable dans les dispositifs SiC. [14]

2.8 Exemples d'applications de diodes SiC Schottky

2.8.1 . 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.

2.8.2 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.

2.8.3 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 photocurrent 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.[14]

2.9 Conclusion

Ce chapitre présente la Théorie du contact métal-semiconducteur , 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

Logiciel de simulation SILVACO ATLAS

Sommaire

3.1	Introduction	23
3.2	Logiciel de simulation « Silvaco-Atlas »	24
3.3	Présentation du paquet des programmes SILVACO	24
3.4	L’environnement ATLAS	26
3.5	L’ordre des commandes	27
3.6	Utilisation du logiciel « Silvaco-Atlas »	28
3.7	Utilisation du langage de commande pour définir une structure	29
3.8	les solutions	33
3.9	Organigramme de Simulation	34
3.10	Conclusion	34

3.1 Introduction

Le logiciel Technology Computer-Aided Design (TCAD) offre une solution efficace pour simuler la structure des dispositifs semi-conducteurs dans des conditions stables et transitoires. L’analyse de paramètres électrothermiques comme le champ électrique, le courant de fuite et la température du réseau peuvent aider à comprendre les causes possibles de la défaillance de l’appareil. Ce chapitre fournira une description détaillée du logiciel SILVACO ATLAS.

3.2 Logiciel de simulation « Silvaco-Atlas »

La figure A montre l'environnement de fabrication virtuel des plaquettes du logiciel « Silvaco ». Il est constitué de '7' modules parmi lesquelles on a utilisé le logiciel « Atlas » qui permet la simulation, en deux et trois dimensions, des dispositifs électroniques à semi-conducteur

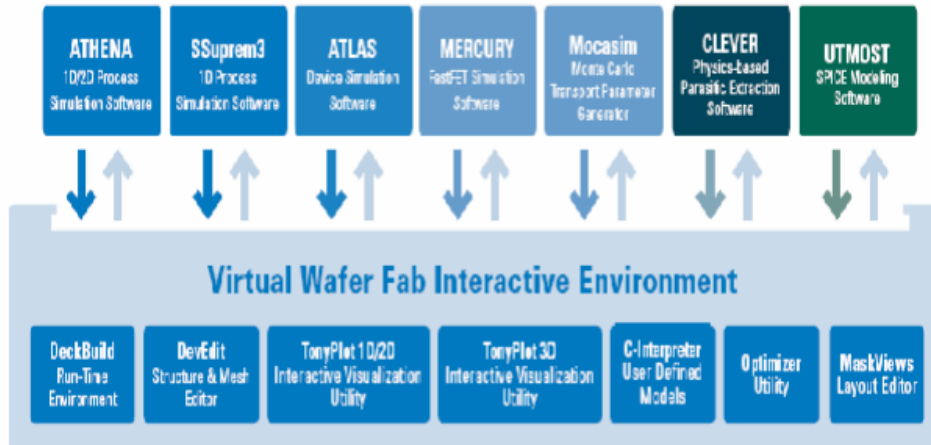


FIGURE 3.1 – Environnement virtuel de fabrication des plaquettes de Silvaco [15]

SILVACO (*Silicon Valley Corporation*) est un environnement de logiciels qui permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à semi-conducteur avant leur fabrication. Le TCAD SILVACO inclut des nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, des nouvelles techniques de maillage, l'optimisation des solutions linéaires, etc. L'avantage majeur de ce type de simulateurs est qu'il donne la possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles et donc observables.

3.3 Présentation du paquet des programmes SILVACO

Sous SILVACO l'ensemble des outils de simulation et des outils interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semi-conducteurs s'appelle VWF (Virtual Wafer Fab) . Les composants de base de VWF sont [16] :

1/ Les outils de simulation (VWF core tools) : Ces outils simulent soit leurs processus de fabrication ou soit leurs comportements électriques. Les outils de simulation sont Athena, Atlas et SSuprem3.

2/ Les outils interactifs (VWF interactive tools) : Ces outils sont désignés pour être utilisés en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée. En étant basé sur une interface utilisateur qui est graphique (Graphical User Interface, GUI), le travail

de construction du fichier d'entrée devient plus efficient. Les outils interactifs peuvent être utilisés soit en relation avec un ensemble de fichiers, ou comme des composants intégrés dans l'environnant « VWF automation tools ».

3/ Les outils d'automatisation (VWF automation tools) : Ces outils permettent à l'utilisateur d'exécuter sur une grande échelle des études expérimentales pour créer des résultats pour l'analyse statistique suivante. Ces outils automatiques se servent de : la technologie de base de données répartie et des méthodes de logiciels de transmissions d'interprocessus.

Ainsi les modules de VWF sont les suivants :

A/ Les outils interactifs VWF :

- **TonyPlot** : outil de visualisation et d'analyse graphique 1D et 2D des résultats des simulations.
- **Manager** : outil de gestion des fichiers utilisés et créés par VWF.
- **MaskViews** : outil de dessin des masques (layouts).
- **DeckBuild** : environnement d'exécution interactif qui permet la simulation des processus et de dispositifs (mais principalement il est l'interface avec les outils de simulation)
- **DevEdit** : outil d'édition de structure, on peut créer des nouvelles structures ou même modifier des structures existantes, on peut définir des maillages ou raffiner les maillages existants.
- **Optimiseur** : outil d'optimisation automatique.
- **SPDB** : (Semiconductor Process Data Base), c'est un produit séparé, ça n'est pas un outil interactif, mais il peut être utilisé avec DeckBuild. Il a été conçu pour stocker un grand nombre de profils de dopage mesurés expérimentalement ainsi que les données qui décrivent les conditions des expériences.

B/ Les outils de simulation :

- **SSuprem3** : simulateur de procédé 1D avec prolongements simples de simulations des dispositifs
- **Athena** : simulateur 2D de procédés technologiques qui permet de simuler les différentes étapes effectuées en Salles Blanches et ainsi d'obtenir la structure du dispositif (couches constitutives, dimensions, géométrie) avec les profils de dopage
- **Atlas** : simulateur 2D ou 3D de dispositifs semi-conducteurs qui permet d'obtenir leurs caractéristiques électriques (statiques ou dynamiques).

3.4 L'environnement ATLAS

ATLAS a été conçu de façon à pouvoir l'utiliser avec d'autres outils qui facilitent ou complètent son utilisation.

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants semi-conducteurs. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel.

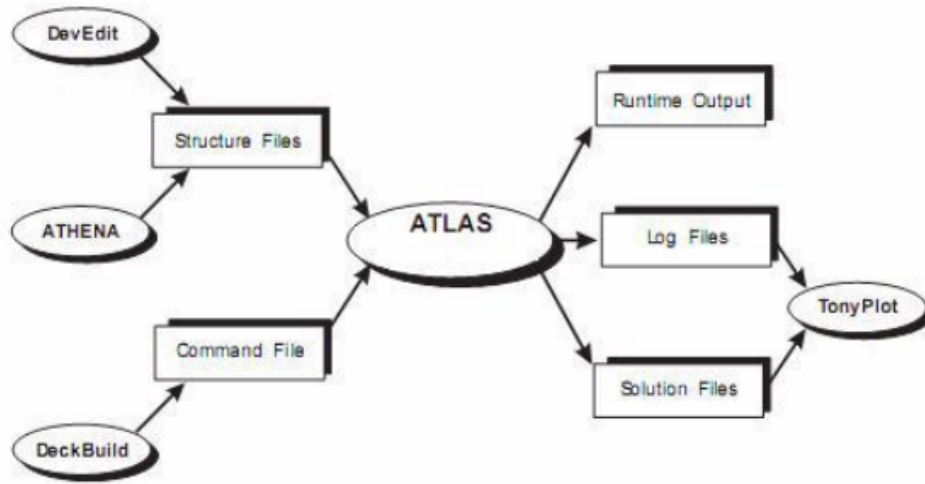


FIGURE 3.2 – L'environnement ATLAS.[16]

- **ATLAS** : est un simulateur électronique capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel.
- **ATHENA** : est un simulateur désigné pour la création des structures avec une bonne résolution des mailles, et fait aussi l'implantation ionique et la diffusion des impuretés et l'oxydation et d'autres processus technologiques de fabrication.
- **DEVEDIT** : est un environnement où sont dessinés la structure (dimension, dopage ..) et son maillage.
- **DECKBUILD** : est un environnement où est défini le programme de simulation.
- **TONYPLOT** : est un environnement où sont visualisés les résultats des simulations (structure du composant, distributions de grandeurs diverses dans celui-ci, caractéristiques électriques...). Run-Time Output : une fenêtre où on voit les erreurs de programmation et les avertissements après la compilation. Les commandes fondamentales sont :
 - **MESH** : cette commande produit un maillage ou lit un maillage qui a été défini auparavant. L'élément de maille utilisé est le triangle.

- **REGION** : indique l'endroit des matériaux dans une maille précédemment définie. Chaque triangle doit être défini comme matériel.
- **ELECTRODE** : indique l'endroit et les noms des électrodes dans une maille précédemment définie.
- **DOPING** : Indique analytiquement des profils de dopage ou prend de tels profils déjà prédéfinis dans les fichiers dédiés.
- **MATERIAL** : associe des paramètres physiques aux matériaux dans la maille. (Il faut faire attention parce que le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semi-conducteurs standard) .
- **MODELS** : indique les carreaux constitutifs du modèle, ils indiquent les inclusions de différents mécanismes physiques, de modèles ou des autres paramètres comme par exemple la température globale pour la simulation.
- **CONTACT** : indique les attributs physiques d'une électrode.
- **INTERFACE** : indique les paramètres d'interface aux frontières de semiconducteur/ isolant. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés la où ils sont déjà indiqués.
- **METHOD** : place les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et les paramètres liés à ces algorithmes.

3.5 L'ordre des commandes

L'ordre est très important dans ATLAS, il y a 05 groupes d'instructions qui doivent apparaître dans un ordre correct comme le montre la figure.

	groupe	instruction
1.	spécification de la structure	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2.	spécification du modèle	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3.	méthode numérique	METHOD
4.	la solution	LOG SOLVE LOAD SAVE
5.	analyse	EXTRACT TONY PLOT

FIGURE 3.3 – l'ordre des commandes ATLAS [17]

3.6 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.[17].

- * 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.

3.6.1 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

3.6.2 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 semi-conducteurs, comme : méthode de Gummel, méthode de Newton et méthode de blocs.[18]

3.7 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.

A- 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>

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.MESH 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.

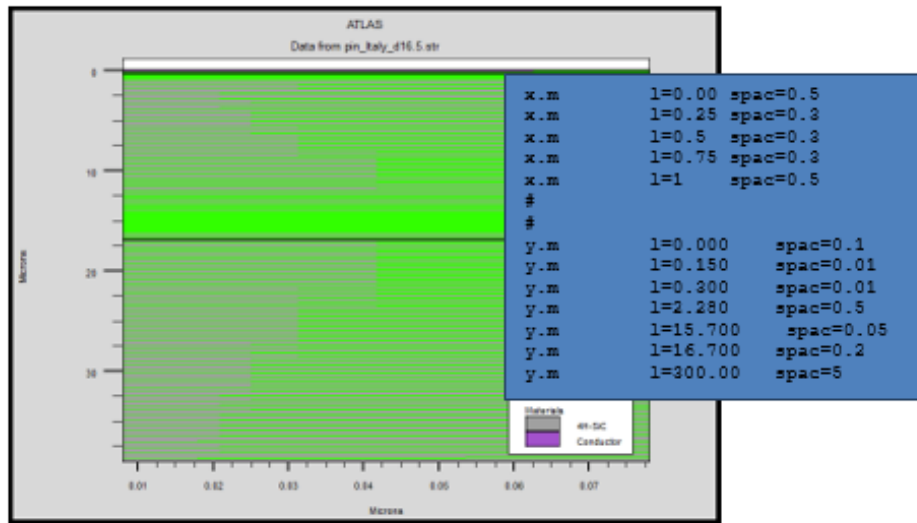


FIGURE 3.4 – définition de maillage avec Atlas.

B-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.

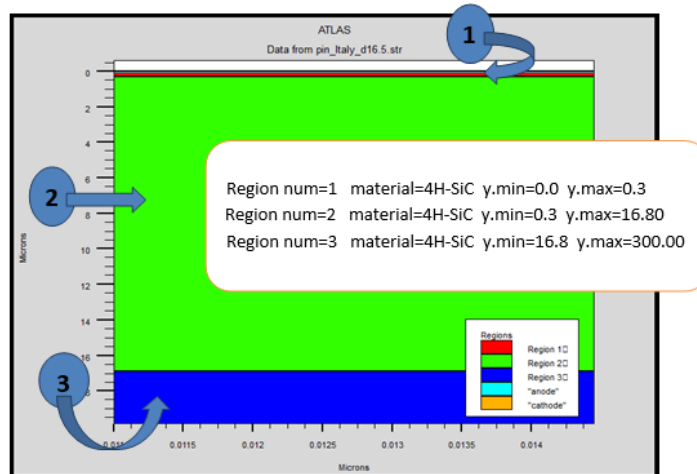


FIGURE 3.5 – définition des régions

C-Spécifier du contact : Définie comme étant la différence entre le niveau de Fermi et le niveau du vide [7], 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.

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

TABLE 3.1 – fonction de travail de divers métaux.[20].

Le travail de sortie des métaux peut varier de 2 eV à 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 ,

D-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.

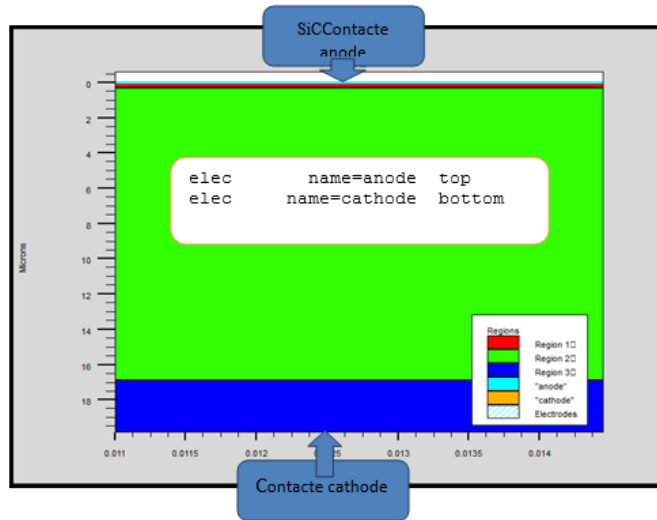


FIGURE 3.6 – définitions des électrodes.

E-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 >

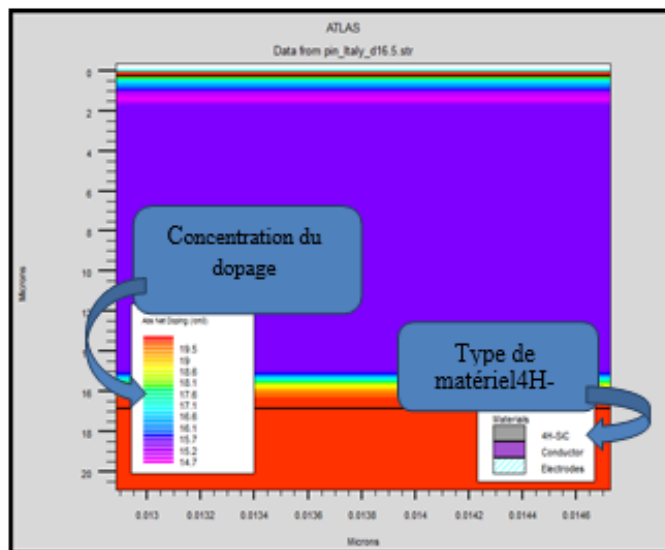


FIGURE 3.7 – définition de dopage.

3.8 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.

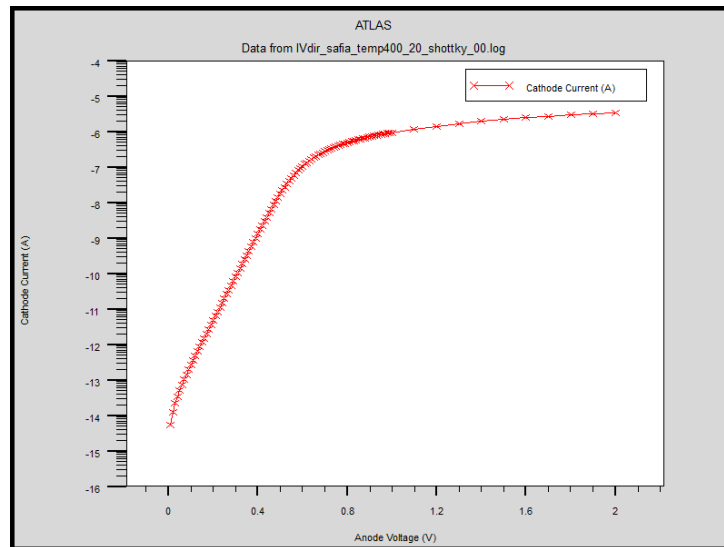


FIGURE 3.8 – La caractéristique courant-tension sous Tonyplot.

3.9 Organigramme de Simulation

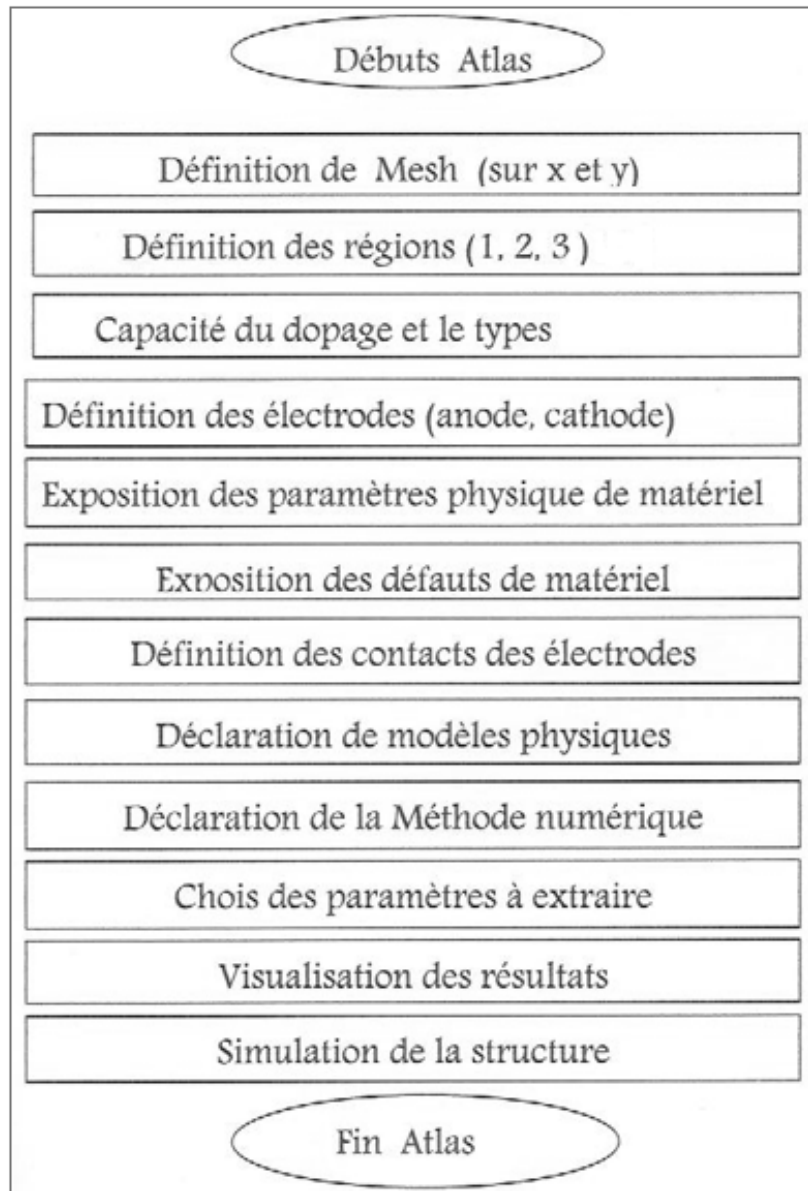


FIGURE 3.9 – Organigramme de simulation[20].

3.10 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 de simulation

Sommaire

4.1	Introduction	35
4.2	Structure à Silvaco TCAD	35
4.3	Caractéristiques I-V de diode Schottky	40
4.4	Performances des capteurs SBD	41
4.5	Le courant de saturation	43
4.6	Conclusion	44

4.1 Introduction

Nous présenterons dans ce chapitre notre travail de simulation basé en particulier sur l'étude des propriétés Electriques courant-tension (I-V) de la structure W/4H-SiC.

4.2 Structure à Silvaco TCAD

Une vue transversale schématique des diodes 4H-SiC Schottky considérées dans ce travail est Indiqué à la figure 4.1 :

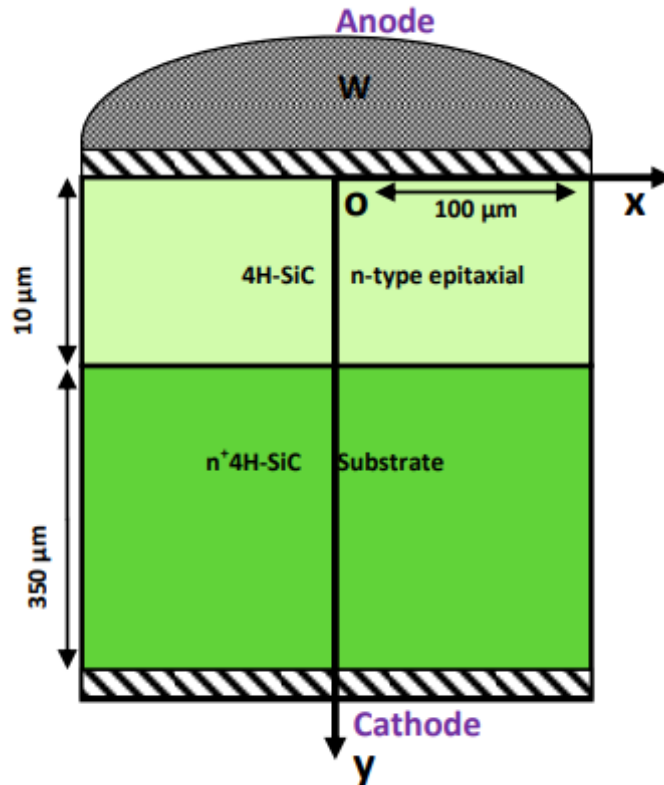


FIGURE 4.1 – W/4H-SiC Schottky barrière diode section transversale schématique

A) le maillage :

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bon résultats. 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. Donc le maillage fin est plus intéressant de point de vue résultat de la simulation.

L'instruction dans notre cas pour créer un maillage :

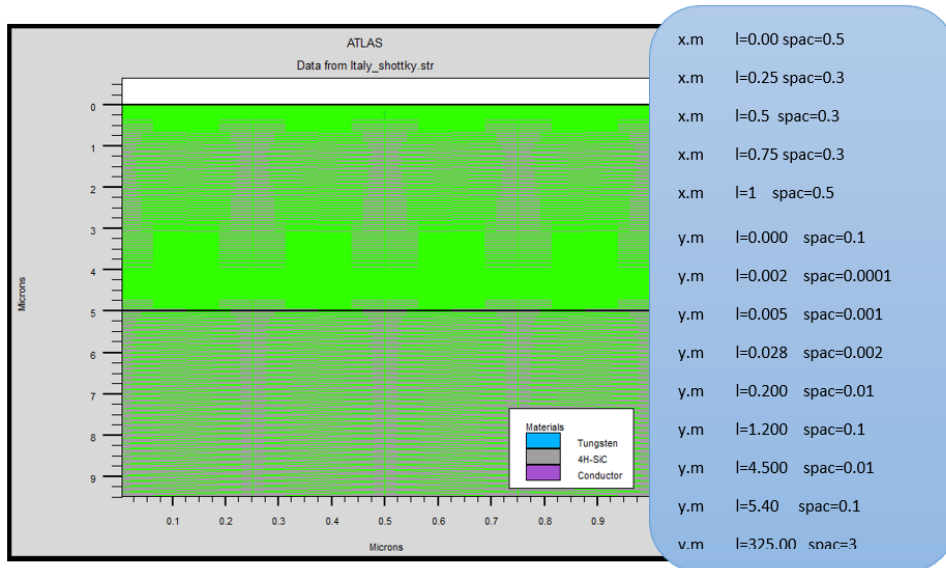


FIGURE 4.2 – Définition du maillage avec ATLAS

B) 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 (voir figure 4.3).

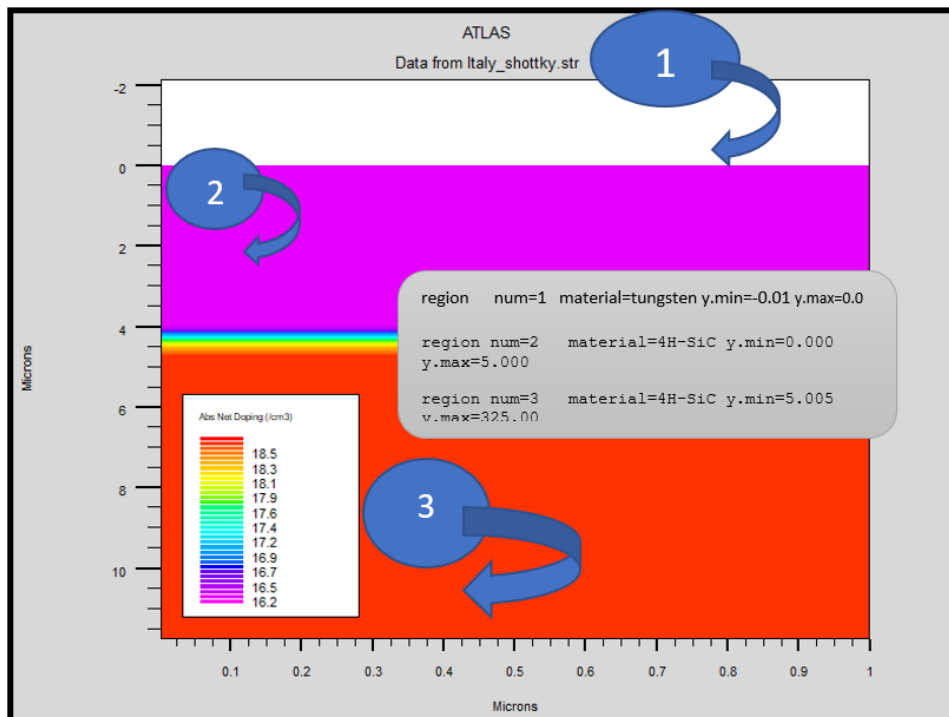


FIGURE 4.3 – Définition des régions

C) Les électrodes : Les électrodes sont définies par l'instruction suivante :

ELECTRODE NAME=<electrode name> <position parameters>

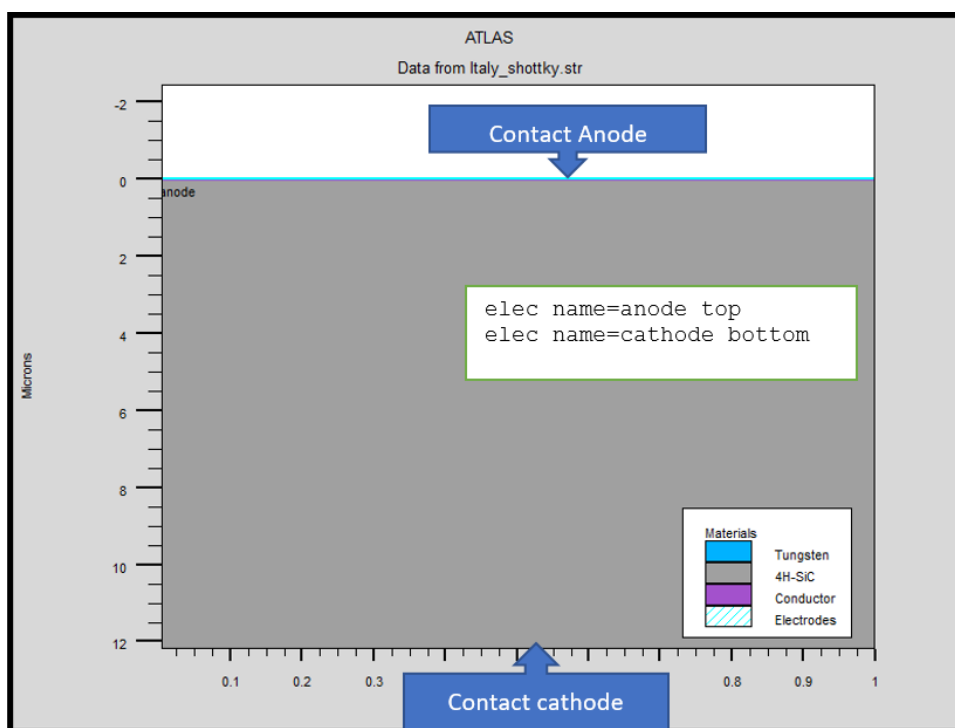


FIGURE 4.4 – Définition des electrodes

D) le dopage : dans notre travail un dopage avec une distribution uniforme de type n et d'une valeur $5 \cdot 10^{16} / \text{cm}^3$ est donné par :

n-base doping region=2 uniform conc= $8.8 \cdot 10^{15}$ n.type.

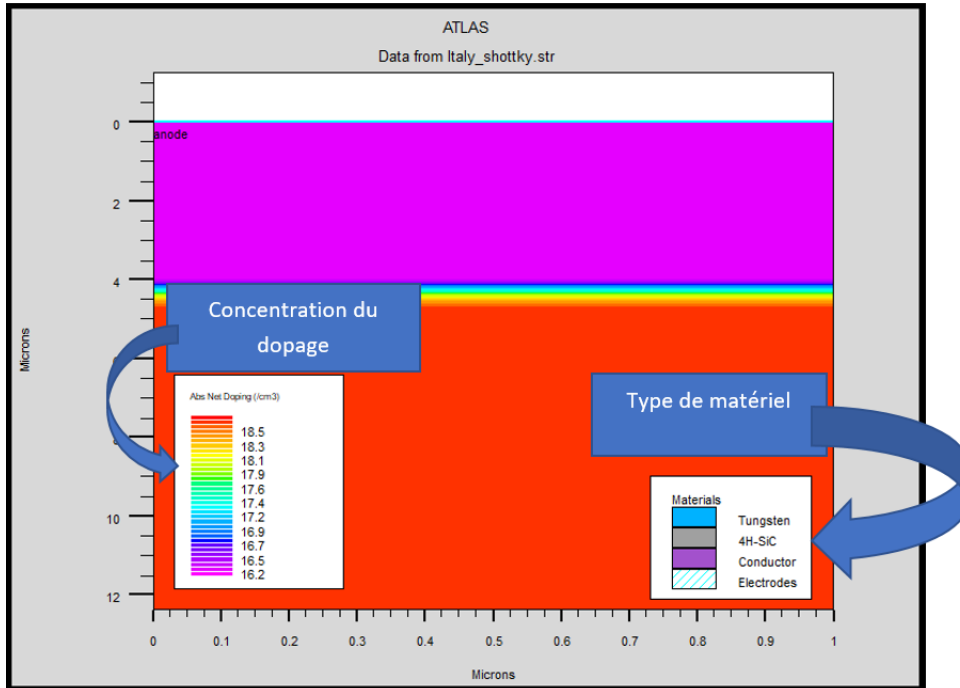


FIGURE 4.5 – Définition de dopage

4.3 Caractéristiques I-V de diode Schottky

Les courbes I-V-T des SBD W/4H-SiC considérés pour différentes températures de 298 K à 450 K sont indiquées dans la figure (4.6); les caractéristiques expérimentales

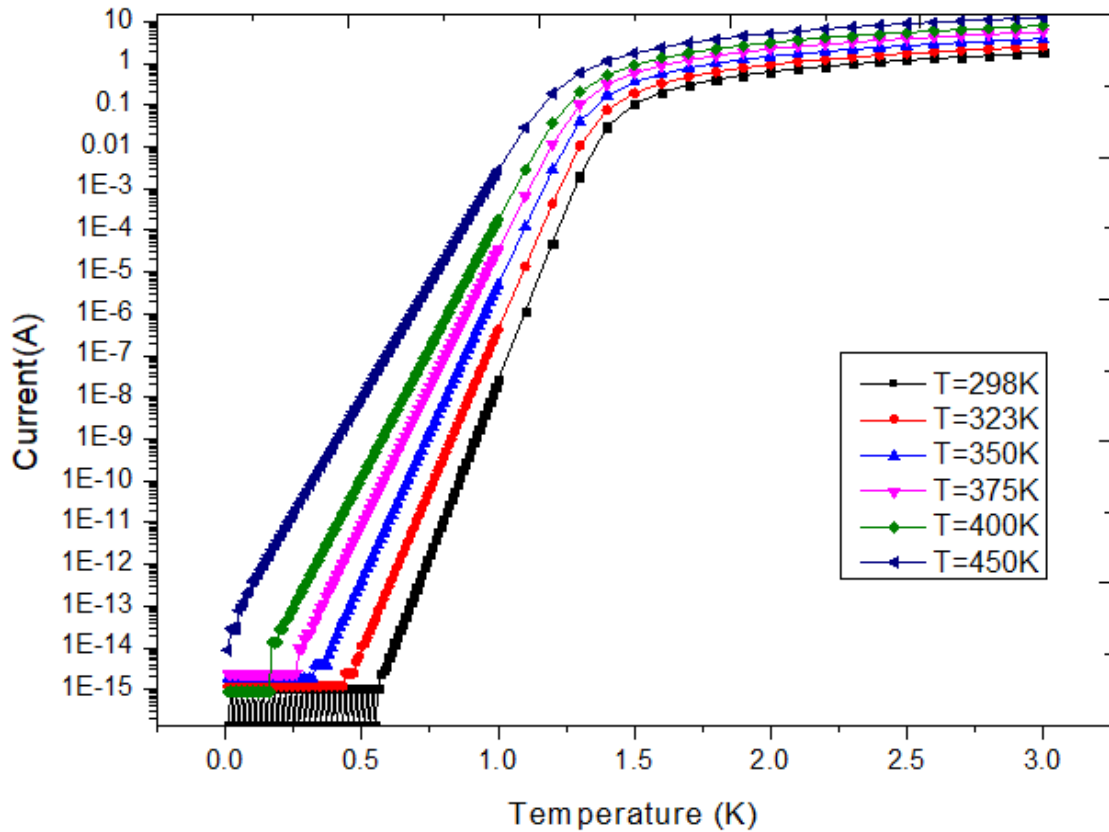


FIGURE 4.6 – caractéristiques I-V pour différentes températures

prospectives sont rapportées dans la plage de température de 298 K à 450 K. Ces courbes IV-T peuvent être décrites par émission thermoïnique par le contact Schottky en utilisant l'équation suivante :

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{q(v_d - R_s I_D)}{\eta k T}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

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

$$I_s = A R^{**} T^2 e^{-\frac{\phi_B}{k T}} \quad (4.2)$$

Où R^{**} est la constante de Richardson et B est la hauteur de la barrière Schottky. Il est à noter que l'abaissement de la barrière, dû à la force d'image et aux effets dipôles statiques, a été négligé car ils affectent principalement les caractéristiques des diodes sous

tensions à polarisation inverse. Par conséquent, lorsqu'elle est biaisée vers l'avant, la chute de tension de la diode peut être écrite comme suit :

$$V_D = R_S I_D + \eta \phi_B + \frac{kT}{q} \eta \ln \left(\frac{I_D}{AA^{**} T^2} \right) \quad (4.3)$$

Où η est le facteur d'idéalité, R_S est la résistance de série parasitaire, q est la charge électrique et k est la constante de Boltzmann. La figure 4.2 représente caractéristique I-V de diode SCHOTTKY pour température 298 à 450 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 Performances des capteurs SBD

La tension (V) en fonction de la température pour les valeurs de courant appliquées pour toute la plage de température de 298 K jusqu'à 450 K sont indiqués en figure (4.7).

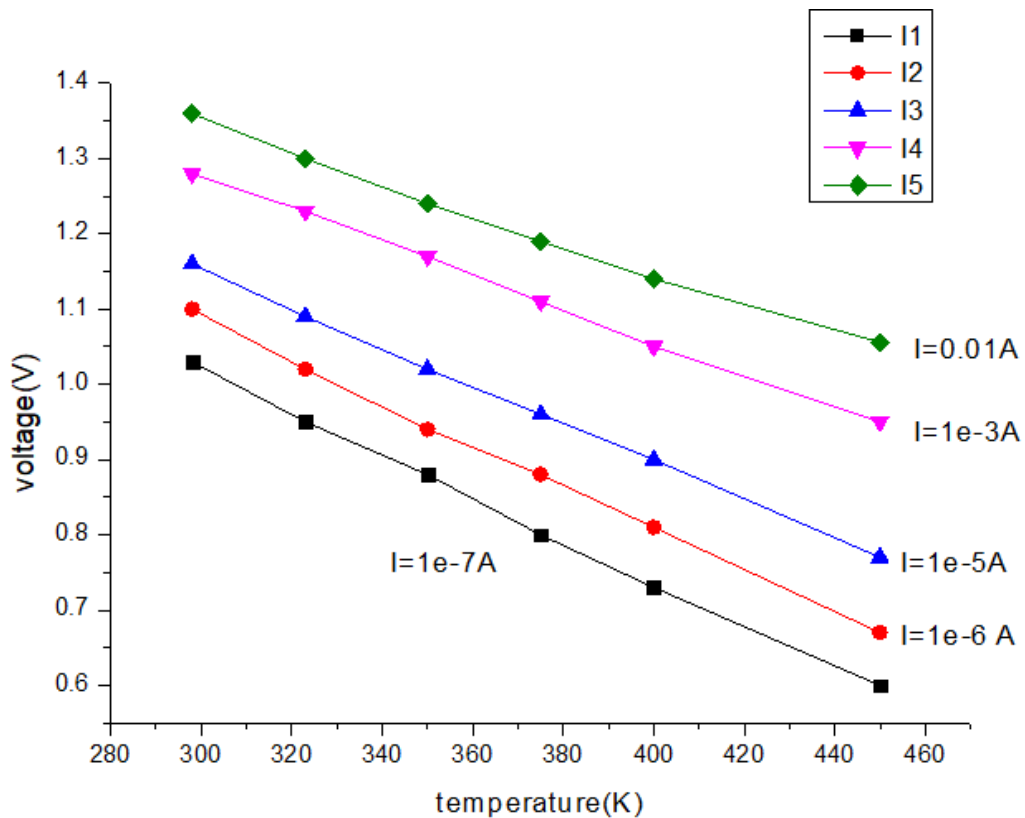


FIGURE 4.7 – caractéristique V-T pour différent densité de courant.

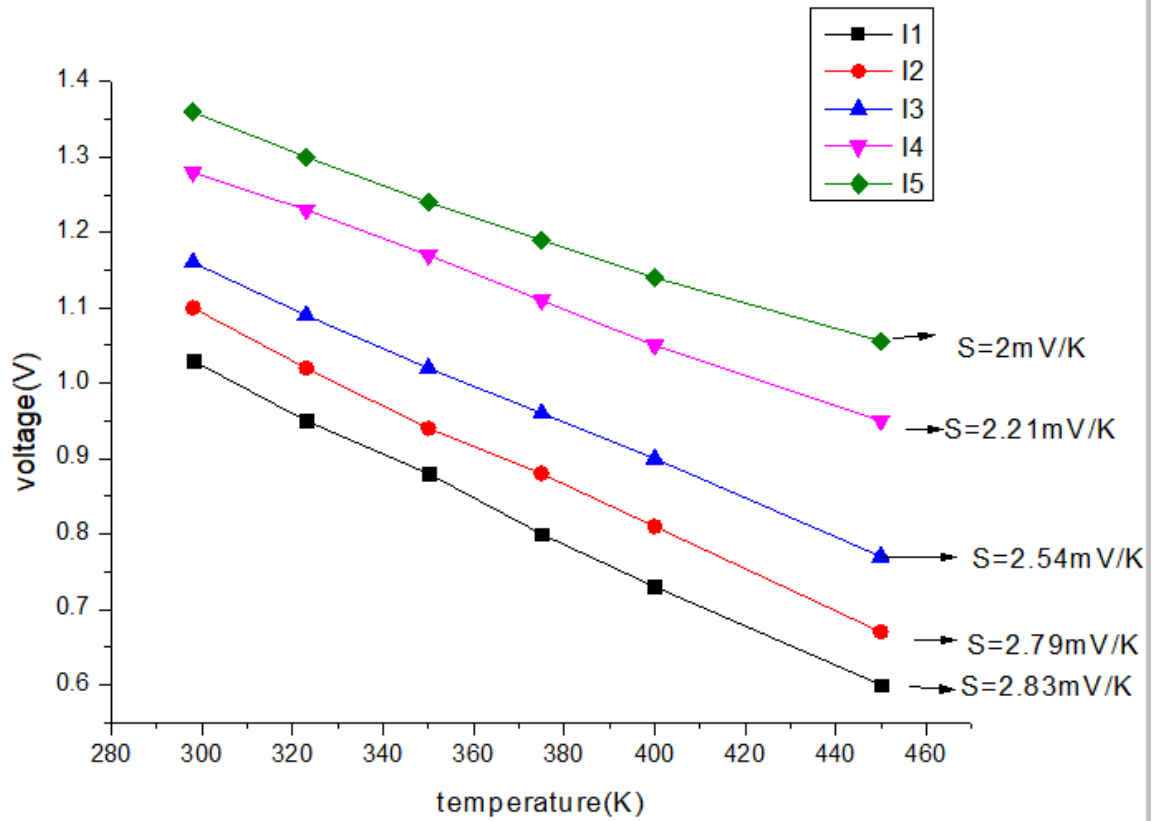


FIGURE 4.8 – caractéristique V-T pour différent densité de courant avec la sensibilité.

La sensibilité du capteur de température S est obtenue en dérivant l'équation (4.3) par rapport à la température. Donc il peut être obtenu à partir de la pente des caractéristiques V-T. Quand I_D est $10e-7$ A la sensibilité est de 2.83 mV /K. La sensibilité calculée varie jusqu'à une valeur de 2 mV/K pour $I_D = 0.01$ A dans la plage de température de 298-450K. À partir de la courbe indiquée ci-dessus (4.8) on peut dire que la meilleure sensibilité donc c'est $S=2$ mV/K, cette étude pour sans défaut, alors dans la valeur de courant $I=1e-7$ A la diode travaille comme source de courant.

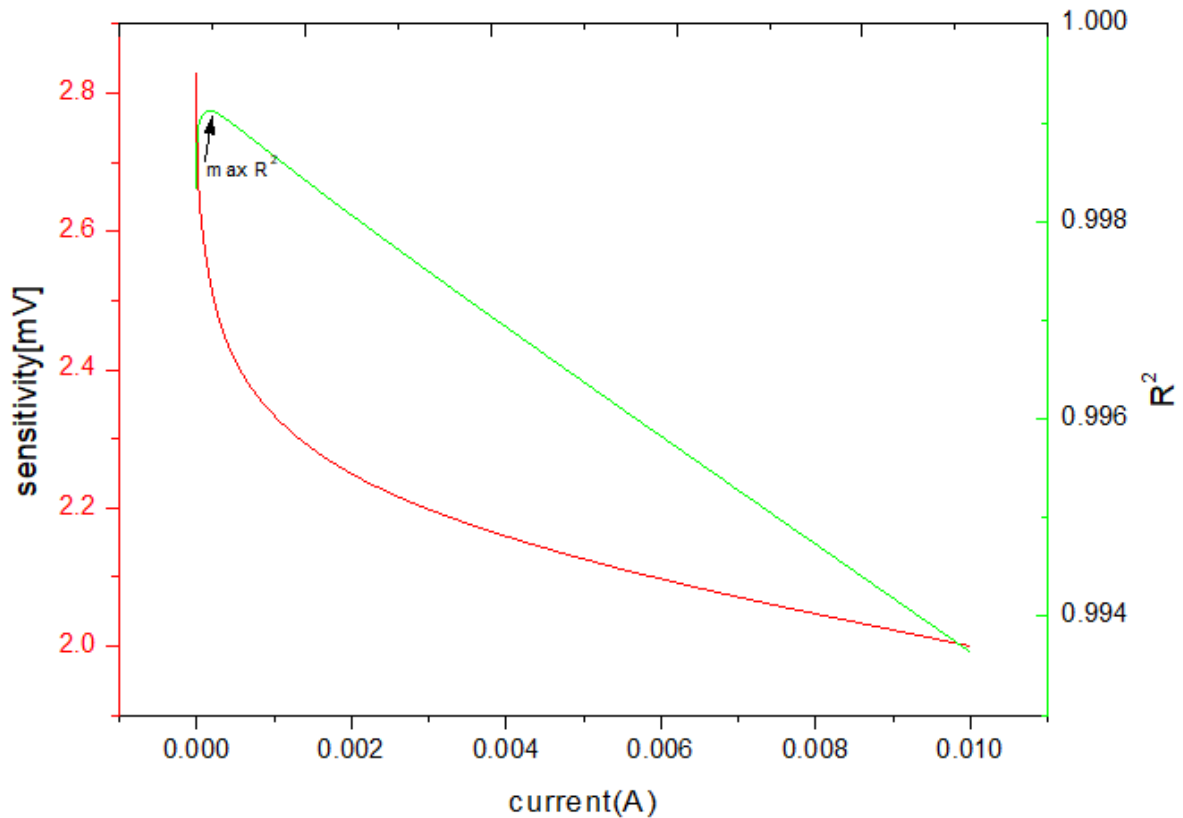


FIGURE 4.9 – Coefficient de détermination et de sensibilité

En figure (4.9) est indiquée la valeur calculée de S et R^2 pour différents courants de biais. Les caractéristiques V-T montrent un bon degré de linéarité. Comme indiqué, quand $I=0.01A$ la sensibilité est de $2mV/K$ et augmente monotonement jusqu'à $2,83 mV / K$ pour $I = 1e-7A$. Le maximum de $R^2=0,99911$ a été calculé pour $I=1.5e-4 A$ correspondant à une sensibilité $S=2,27 mV/K$.

4.5 Le courant de saturation

Le courant de saturation I_S est un paramètre important pour les diodes semi-conducteurs à prendre en compte, en particulier pour leur caractérisation correcte en tant que capteurs de température. En général, les méthodes utilisées pour l'extraction de ce paramètre sont basées sur l'ajustement de courbe exponentielle I_D-V_D . I_S peut être obtenu à partir de l'interception des courbes I-V (voir figure(4.10))

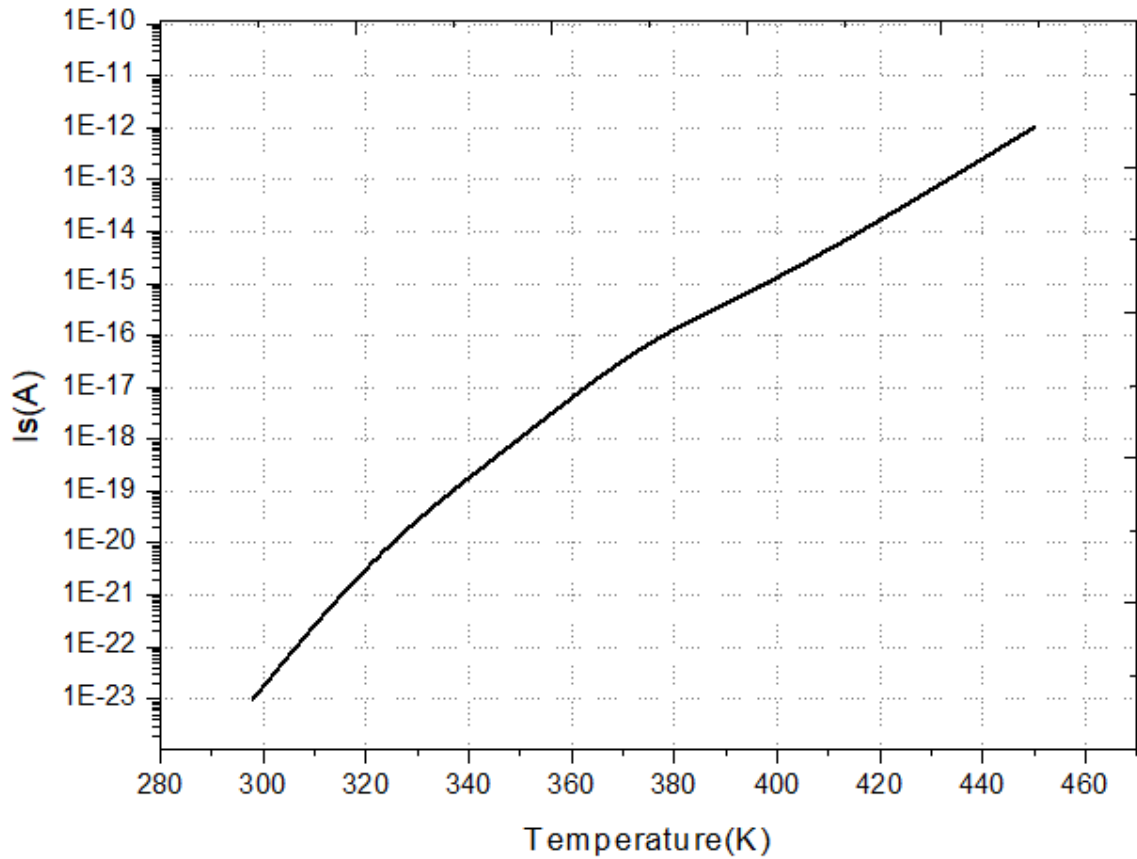


FIGURE 4.10 – Le courant de saturation

La valeur du courant de saturation augmente avec l'augmentation de la température car la valeur de la résistance diminue aux hautes températures ce qui implique une croissance de la conductivité de courant.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre un capteur de température haute performance basé sur une diode 4H-SiC Schottky a été caractérisé. La dépendance linéaire de la chute de tension à travers la diode biaisée vers l'avant sur la température, dans une gamme allant de $T=298$ à 450 K, a été démontrée. Les mesures ont montré à la fois un bon degré de linéarité ($R^2=0,9991$) et une sensibilité élevée ($S=2.27\text{mV/K}$) dans la plage de température considérée.

Conclusion générale

La réduction des coûts et les avantages potentiels au niveau du système sont susceptibles de garantir que bon nombre des premières applications commerciales de la technologie SiC seront dans le domaine des capteurs. La technologie des capteurs SiC peut devenir la technologie dominante des dispositifs, tandis que de plus grands marchés des dispositifs électroniques de puissance SiC sont développés. La prime de coût pour les dispositifs SiC par rapport à ceux fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs traditionnels, tels que Si, limitera le déploiement de ces dispositifs sur les marchés où les propriétés des matériaux offrent un avantage unique. Les perspectives commerciales de l'électronique SiC sont donc à la fois facilitées et également limitées par des problèmes matériels.

Dans le premier chapitre de cette mémoire nous avons mentionné certaines caractéristiques de carbure de silicium et ces applications. En ce qui concerne le chapitre II, nous avons expliqué les bases de diode Schottky et les domaines de son application.

Ensuite, dans le troisième chapitre ; on a donné une esquisse sur SILVACO le logiciel qui permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs grâce au module de simulation ATLAS et nous avons simulé les caractéristiques courant-tension ($I-V$) de la diode de Schottky formée sur 4H-SiC à des températures (298-450K) et de voir l'influence de la température sur l'évolution de la caractéristique

Dans le dernier chapitre, les résultats de la simulation ont été présentés.

Annexe

85 K to 440 K Temperature Sensor Based on a 4H-SiC Schottky Diode

S. Rao, *Member IEEE*, L. Di Benedetto, *Member IEEE*, G. Pangallo, A. Rubino, S. Bellone, *Member, IEEE*, and F. G. Della Corte, *Member, IEEE*

Abstract— The performances of a 4H-SiC Schottky diode for thermal sensing in the wide temperature range from $T=85$ K up to 443 K are presented. The linear dependence on temperature of the forward voltage drop, for different bias currents, is investigated through an analytical study of the temperature-dependent physical Schottky diode parameters. A high sensitivity of 1.18 mV/K was observed for a constant bias current of $I_D=80$ μ A. The device exhibits a good degree of linearity with a calculated root mean square error, with respect to the best-linear fitting model, lower than 2.7 mV. Moreover, the proposed sensor shows a good repeatability maintaining a stable output over more cycles of measurements, from (up to) 85 K up to (from) 443 K, in a long period of time.

Index Terms — 4H-SiC Schottky Diode, Schottky barrier, Semiconductor device modeling, Silicon compound, Temperature Sensor.

I. INTRODUCTION

TEMPERATURE has an essential role in many industrial processes and different applications because several physical characteristics of materials and devices change when exposed to thermal stress. An accurate temperature measurement is also required for thermal variation compensation in many integrated sensors such as humidity, pressure, flow, and gas concentration [1].

To date, many devices based on different physical effects, *e.g.* vapor pressure, resistance, current and voltage changes [2], have been exploited to measure wide temperature ranges including cryogenic temperatures. In this context, if compared to resistive temperature detectors (RTDs), thermocouples and thermistors, diode-sensors are the most common semiconductor devices [3-5] thanks to the high compatibility with the integrated circuit (IC) technology, the high sensitivity and the linear output dependence over a wide temperature range [1,6]. Linearity is in fact a key parameter for sensors since it enables a simplified temperature calibration.

When a diode operates as a temperature sensor, it is forward-biased by a current I_D kept constant over the whole

temperature working range and the voltage drop appearing at the junction allows an accurate indirect temperature measurement. Generally, the sensor is biased at low current values in order to avoid both self-heating effects, which can negatively affect the sensor linearity [6] and excessive power consumption.

Nowadays, the 4H-SiC technology allows the fabrication of Schottky diodes with different kind of metal contacts showing, however, good reproducibility and a long-term stable behavior [7-10].

Although 4H-SiC diode temperature sensors have been widely studied [11-14], their operating range was limited to temperatures always higher than 293 K. It is worth noting, however, that thanks to its physical properties as well as its hardness to ionizing radiations [15], 4H-SiC can be exploited in several terrestrial and aerospace applications where cryogenic operating temperatures are required [16].

In this paper, we present, to our knowledge, the first experimental results about a 4H-SiC Schottky diode temperature sensor operating in an extended temperature range, from $T=85$ K up to 443 K, showing at the same time a good level of linearity and high sensitivity. In fact, although the non-linear behaviour with temperature of the series resistance, R_s , and of the Schottky barrier properties, *i.e.* ideality factor, η , and Schottky barrier height, Φ_B , appear to limit the working temperature range, we demonstrate that a correct current bias allows the sensor to maintain a linear output also at very low temperatures.

II. DEVICE STRUCTURE AND EXPERIMENTAL SET-UP

4H-SiC Schottky diodes were fabricated and provided by the CNR-Institute for Microelectronics and Microsystems (IMM), unit of Bologna (I). They were fabricated on $\langle 0001 \rangle$ $7^\circ 62'$ off-axis, 300 μ m-thick, 4H-SiC n^+ -type homoepitaxial commercial wafers [17] with a resistivity of 0.021 $\Omega \cdot$ cm. The epi-layer is 16.5 μ m-thick and has a net doping density of about 3×10^{15} cm^{-3} . The fabrication processes involve commercial materials and standard technological steps, ensuring therefore reproducibility of results. Photolithography and wet chemical etching are used to pattern the 150×150 μ m, 200 nm-thick, sputtered Ti/Al Schottky square contacts. More details about the fabrication are provided in [18, 19].

In Fig. 1(a) and (b) the schematic cross section of the on-chip integrated sensor and a picture of the fabricated devices taken from an optical microscope are reported. The microchip

S. Rao, G. Pangallo, F.G. Della Corte are with Università degli Studi "Mediterranea", Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, delle Infrastrutture e dell'Energia Sostenibile (DIIES), Via Graziella Feo di Vito, 89122 Reggio Calabria, Italy.

L. di Benedetto, A. Rubino, S. Bellone are with Università di Salerno, Department of Industrial Engineering, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084 Fisciano, Salerno, Italy.

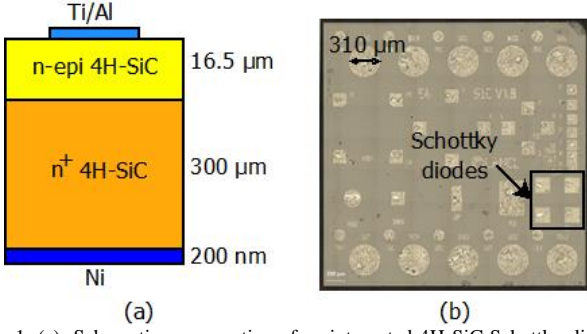


Fig. 1. (a) Schematic cross section of an integrated 4H-SiC Schottky diode. Plot not to scale. (b) Optical micrograph (top-view) of the 2x2 mm microchip.

contains four Schottky diodes with the cathode consisting of the n^+ 4H-SiC substrate where a 200 nm-thick Ni film was deposited to form the back contact, while the Ti/Al area is $2.25 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$. Finally, the anode Schottky contacts were bonded with Al wires, 50 μm in diameter, to allow an electrical connection to the measurement set-up.

The experimental set-up, schematically shown in Fig. 2, consists of a Janis Research Inc. cryo-system [20] in which several temperature ramps are performed from 85 K to 443 K and *vice-versa*. Measurements were conducted in vacuum at a pressure lower than 5×10^{-6} mbar and the 4H-SiC microchip temperature was accurately measured by using a Lake Shore Cryotronics Inc. DT-670B-SD silicon-diode [21]. Such a reference sensor, with an accuracy of ± 0.032 K up to 305 K while, for higher temperatures, of $\pm 0.33\%$ of T (i.e. ± 1.4 K at $T=440$ K), was placed in thermal contact with the microchip under test. The thermal stability of the overall equipment was monitored by using a second sensor, DT-670B-CU-HT, with similar performance of the other one, positioned on the sample stage. A Lake Shore Cryotronics Inc. 335 temperature controller was used to automatically control the temperature set-points. Measurements on our sensors were performed after waiting for the settling of stable and equal temperatures measured on both sensors for several minutes.

The Schottky diode sensor was constant-current biased ($10 \mu\text{A} \leq I_D \leq 10 \text{ mA}$) by using an Agilent HP4155B Semiconductor Parameter Analyzer. The set current resolution is 10 nA, for generated currents in the range $-100 \mu\text{A} < I_D < 100 \mu\text{A}$, and the accuracy is ± 12 nA.

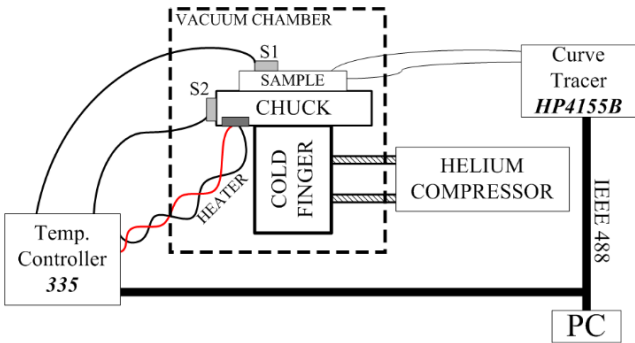


Fig. 2 Block diagram of experimental setup. S1 is the sensor on the device under test (DUT) and S2 is the sensor for temperature stage monitoring.

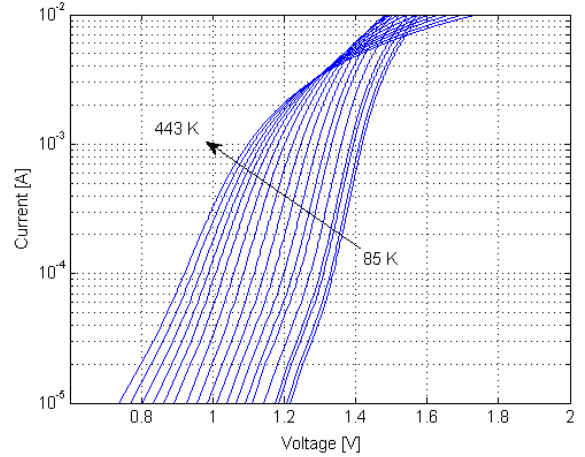


Fig. 3. Experimental forward current-voltage characteristics of a fabricated diode for temperatures ranging from $T=85$ K up to 443 K.

III. DIODE SENSOR CHARACTERISTICS

In Fig. 3, the experimental forward characteristics are reported in the temperature range from 85 K to 443 K. Such I - V - T curves can be described by thermionic emission through the Schottky contact by using the following equation [22]:

$$I_D = I_S \left[e^{\frac{q(V_D - R_S I_D)}{\eta k T}} - 1 \right] \quad (1)$$

where η is the ideality factor, I_S the saturation current, R_S the series resistance, q the fundamental charge, T the temperature and k the Boltzmann constant. I_S can be expressed as [22]:

$$I_S = A R^{**} T^2 e^{-\frac{\phi_B}{k T}} \quad (2)$$

where R^{**} ($R^{**}=146 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ for 4H-SiC [23]) is the Richardson constant and Φ_B is the Schottky barrier height. It is worth noting that the barrier lowering, due to the image force and the static dipole effects, has been neglected because they mainly affect the diode characteristics under reverse-bias voltages.

Hence, when forward-biased, the diode voltage drop can be written as follows:

$$V_D = R_S I_D + \eta \phi_B + \frac{k T}{q} \eta \ln \left(\frac{I_D}{A R^{**} T^2} \right) = f_1 + f_2 + f_3 \quad (3)$$

and, from I - V - T measurements, it is possible to extract the corresponding R_S , η , and Φ_B parameters.

In particular, Φ_B and η are calculated from the intercept with the vertical axis and from the slope of the $\ln(I_D)$ - V_D characteristics, respectively, extracted at very low current values ($I_D < 100 \mu\text{A}$) so that the existence of R_S can be considered negligible in (3),

TABLE I
SCHOTTKY DIODE PHYSICAL PARAMETERS EXTRACTED FROM MEASUREMENTS

T [K]	$\Phi_B \pm \sigma_{\Phi_B}$ [V]	$\eta \pm \sigma_\eta$	$R_S \pm \sigma_{R_S}$ [Ω]
85	0.407 ± 0.004	4.394 ± 0.138	10.379 ± 0.64
100	0.493 ± 0.006	3.598 ± 0.009	10.799 ± 0.494
150	0.737 ± 0.011	2.406 ± 0.033	11.085 ± 0.302
200	0.921 ± 0.008	1.891 ± 0.036	13.056 ± 0.408
250	1.058 ± 0.005	1.627 ± 0.035	18.62 ± 0.762
300	1.155 ± 0.003	1.512 ± 0.019	26.623 ± 0.358
350	1.224 ± 0.002	1.476 ± 0.013	36.869 ± 0.199
400	1.275 ± 0.035	1.462 ± 0.056	46.839 ± 0.14
443	1.312 ± 0.057	1.445 ± 0.081	57.172 ± 0.002

and $R_S = \frac{V_{D2} - V_{D1} - \eta k T q^{-1} \ln(I_{D2}/I_{D1})}{I_{D2} - I_{D1}}$, where (I_{D1}, V_{D1}) and (I_{D2}, V_{D2}) are two biasing points in the ohmic region of the I_D - V_D curve.

The extracted data for the four diodes are reported in Tab.1, and the average values are plotted in Fig. 4 as function of T . Using such calculated values in (1), the experimental I - V - T characteristics are well fitted by the analytical model as shown in Fig. 5. The root mean square error (*rmse*), calculated between the experimental measurements and the analytical model, for each temperature in the wide considered current range ($10 \mu\text{A} \leq I_D \leq 10 \text{ mA}$), is lower than 3 mV. The *rmse* decreases down to 0.9 mV in the biasing current range where the sensor shows its best performances ($30 \mu\text{A} < I_D < 270 \mu\text{A}$).

In our analysis, when I_D is few mA or lower, the dependency of I_D - V_D on T shows a negative temperature coefficient, dV_D/dT , since the saturation current, I_s , increases

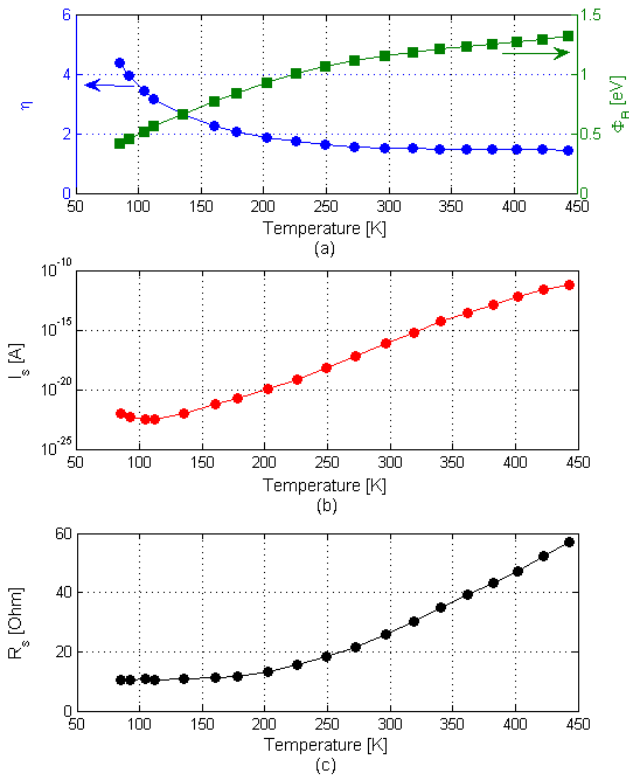


Fig. 4. Temperature dependence of Schottky diode model parameters. a) η and Φ_B , b) I_s and c) R_S .

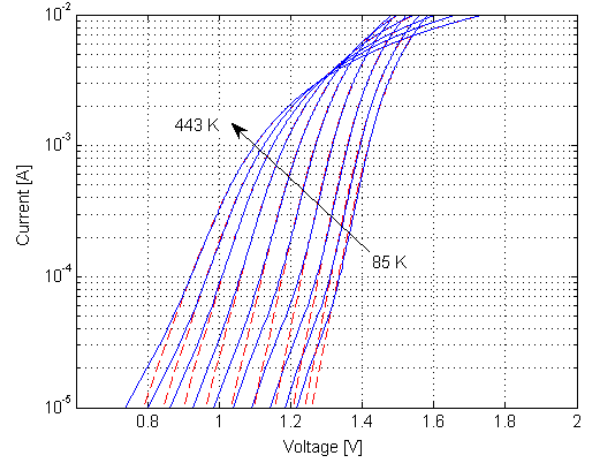


Fig. 5. Comparisons between experimental curves and model results from (1) of I_D - V_D characteristics in the temperature range of 85K– 443K. Diode physical parameters are reported in Table 1.

with the temperature, as reported in Fig. 4 (b). In addition to its explicit dependency on T , I_D is affected by the thermal behavior of η and Φ_B (Fig.4 (a)). However, when the current values are higher than $\sim 3 \text{ mA}$ and from $T=273 \text{ K}$ to higher values, a positive dV_D/dT is observed due to the increase of R_S with the temperature (see Fig.4 (c)) [24]. In this case, the term f_i of (3) begins to dominate and therefore the ohmic contribution cannot be neglected. This suggests that, the impact of the series resistance on the sensor linearity could be reduced if the current bias point I_D is fixed at low values. Further details are provided in the next section.

IV. DIODE TEMPERATURE SENSOR

From I_D - V_D - T measurements, the V_D - T characteristics have been extracted in the considered current and temperature range as shown in Fig. 6. In our analysis, the coefficient of determination (R^2) [25] has been calculated to evaluate the agreement between the experimental measurements and their linear best-fit, $f_L(T)$. In particular, R^2 allowed us to quantify the sensor linearity goodness by fitting the experimental data

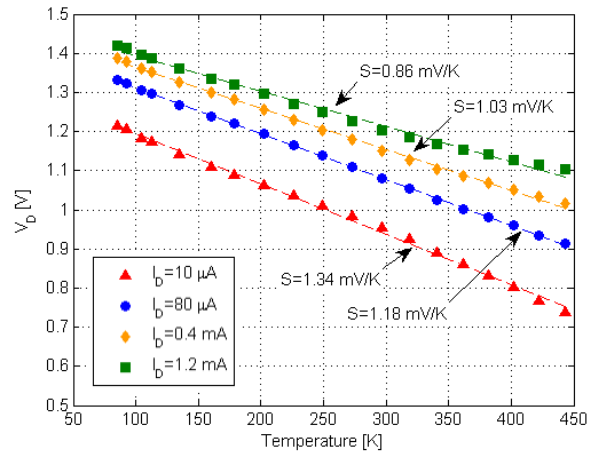


Fig. 6. Measured (points) V_D - T for four bias currents values, I_b , and corresponding sensitivities. The dashed lines are the best linear fittings, $f_L(T)$, of the experimental data.

with a linear model. In the same figure, the measured V_D is fitted with the best-calculated linear model showing the degree of linearity for the considered range of I_D , $10 \mu\text{A}$ to 1.2 mA . In Fig. 6, a minimum R^2 of 0.990 has been calculated corresponding to $rmse < 9.6 \text{ mV}$ while the maximum temperature error is lower than 5.7% calculated at $T = 300 \text{ K}$ for $I_D = 1.2 \text{ mA}$. At $I_D = 80 \mu\text{A}$ the sensor shows its best performances with a $rmse \sim 2.7 \text{ mV}$.

The sensitivity S , defined as the temperature derivative of V_D (3), was calculated from the slope of the V_D characteristics. As reported in Fig. 6, when I_D is 1.2 mA the sensitivity is 0.86 mV/K and increases up to 1.34 mV/K at $I_D = 10 \mu\text{A}$.

The temperature sensor resolution, \mathcal{E}_T , is limited by the measurement system resolution, \mathcal{E}_V , according to the following expression:

$$\mathcal{E}_T = \frac{\mathcal{E}_V}{S}$$

when the sensitivity of the sensor, $S = dV/dT$, does not vary significantly within the considered temperature range. In the experimental setup, the measured voltage resolution is 0.5 mV leading to a theoretical device resolution of 1.7 mK .

Finally, four 4H-SiC integrated temperature sensors were accurately tested, at the same current of $I_D = 80 \mu\text{A}$, in order to evaluate how consistently they maintain a stable output over time by iteratively repeating four cycles of measurements, from (up to) 85 K up to (from) 443 K , over a long period of time (one month). Each temperature sweep requires approximately a full day of measurements. In fact, after the operating temperature was set, the system was kept in a stable temperature condition for tens of minutes, with an allowed maximum variation $< 0.01 \text{ K}$ measured on both the reference sensors, before I-V measurement started. The single I-V plot requires only a few seconds.

Furthermore, in order to analyze the effects of long-term experiments, we performed thermally accelerated degradation by heating the chip up to 623 K which is much higher than typical operating conditions of Ti/4H-SiC [26], for several hours (6 h). After this stress, we repeated the same tests described above and still obtained results well reproducing those obtained before the thermal stress.

The overall results are summarized in Fig. 7, always for $I_D = 80 \mu\text{A}$, and led to a calculated maximum $rmse$ error lower than 3.1 mV . Moreover, the coefficient of determination is $R^2 = 0.9997 \pm 1 \times 10^{-4}$ and the corresponding sensitivity is $S = 1.18 \text{ mV/K}$ with a standard deviation of 0.08 mV/K .

As shown in the previous paragraph, the ideality factor, series resistance and Schottky barrier height are separately three non-linear temperature functions limiting the working temperature range. In the following, the achieved good linear dependence of the voltage drop on temperature was studied more in detail.

Using the extracted parameters of Table I, we analytically calculated $f_1(T)$, $f_2(T)$ and $f_3(T)$, for three different bias currents, $I_D = 80 \mu\text{A}$, 1.2 mA , and 5 mA , as reported in Fig.

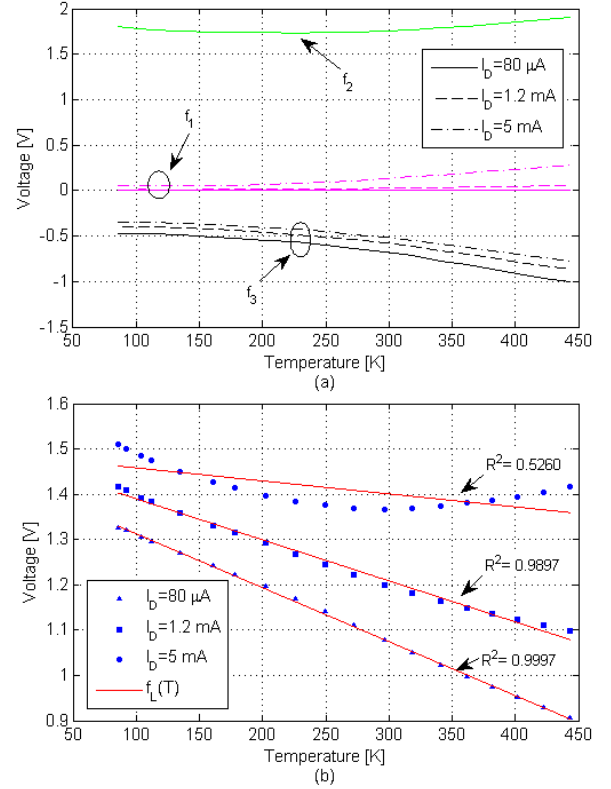


Fig. 8. (a) f_1 , f_2 and f_3 as function of temperature for three constant currents: $80 \mu\text{A}$ (solid lines), 1.2 mA (dashed lines) and 5 mA (dot lines). (b) V_D - T characteristics for the three bias currents. The red lines are the best-linear fittings, $f_L(T)$, of the experimental data.

8(a). In Fig. 8(b) their sum, namely the V_D - T graph, is shown and compared with experimental data. It is worth noting that at low currents ($I_D = 80 \mu\text{A}$), V_D shows a good linearity with T (Fig. 8 (b)), as result of an almost perfect compensation between the non-linear contributions of f_2 and f_3 (Fig. 8 (a)), while f_1 is negligible due to the low bias current. On the other hand, when current increases (e.g. $I_D = 5 \text{ mA}$), f_1 becomes non-null determining a non-linear behavior in the output sensor characteristic. Such behavior is mainly due to the temperature dependency of R_s , as also highlighted in Fig. 4 (c), and clarifies the disadvantage of biasing the diode at these high current levels.

In practice, a way to minimize the series resistance, without changing the Schottky barrier property, is to make the semiconductor layers thin. In particular, the series resistance can be reduced to $\sim 15.6 \Omega$ at $T = 300 \text{ K}$ [26] by using a $5 \mu\text{m}$ -thick epilayer.

A more detailed analysis of both R^2 and S is shown in Fig. 9(a) for different values of I_D . It is worth noting that the coefficient of determination varies by only 0.29% from an average of $R^2 = 0.9962$ over the considered temperature range leading to a temperature sensor with a highly linear behavior over a wide range of bias currents. The maximum of $R^2 \sim 0.9997$ has been calculated for $I_D = 80 \mu\text{A}$ corresponding to a sensitivity $S = 1.18 \text{ mV/K}$.

To evaluate the mismatch between the calculated linear best-fit, $f_L(T)$, and the experimental measurements, the

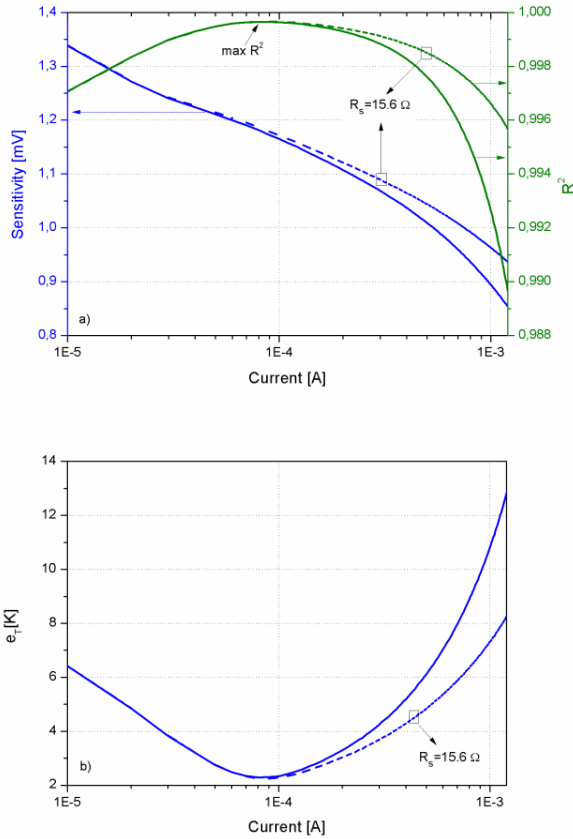


Fig. 9. (a) Coefficients of determination and sensitivities calculated for bias currents between $I_D=10 \mu\text{A}$ -1.2 mA, and corresponding (b) *rms* errors. The experimental values (solid lines) are compared to the calculated ones for $R_s=15.6 \Omega$ (dashed lines).

corresponding *rmse* was first calculated and subsequently converted to a temperature error value using the following formula:

$$e_T = \frac{RMS_e}{S} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_D(T_i) - f_L(T_i))^2}}{S} \quad (5)$$

The calculated plot, e_T - I_D , for the whole considered temperature range is reported in Fig. 9(b). e_T is always lower than 4 K in the range from $I_D=30 \mu\text{A}$ up to 270 μA , while the minimum $e_T=2.3$ K is achieved for $I_D=80 \pm 10 \mu\text{A}$. For such biasing current range, the maximum error (worst case) is 3.7 K registered at $T=85$ K.

Moreover, in Fig. 9(a) and (b) the values of R^2 , S and e_T are compared with those obtained for a 4H-SiC diode with $R_s=15.6 \Omega$ at $T=300$ K. In this last case, the values of R^2 and S increase for bias currents higher than 100 μA , and the *rms* error decreases by more than 37% when the sensor is used at high currents ($I_D > 1$ mA).

V. CONCLUSIONS

A high-performance cryogenic temperature sensor based on an integrated 4H-SiC Schottky diode has been characterized.

The linear dependence of the voltage drop across the forward-biased diode on temperature, in a range from $T=85$ up to 443 K, was demonstrated. Measurements showed both a good degree of linearity ($R^2=0.9997$) and a high sensitivity ($S=1.18$ mV/K) in the considered wide temperature range. Moreover, the non-linear effects of R_s , limiting the linearity of the V_D - T characteristics for bias currents higher than 100 μA , were analytically analyzed. Such dependency has also been correlated to the Schottky diode parameters extracted from the forward electrical I - V - T characteristics.

The proposed sensor showed a good repeatability maintaining a stable output over four cycles of measurements, taken in about a month, for four different diodes fabricated with the same technological process.

ACKNOWLEDGMENTS

Dr. Roberta Nipoti from CNR-IMM-UOS Unit of Bologna (Italy) is gratefully acknowledged for providing the p-i-n diodes and for helpful discussions.

REFERENCES

- [1] M. Mansoor, I. Haneef, S. Akhtar, A. De Luca, and F. Udrea, "Silicon diode temperature sensors—A review of applications," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 232, pp. 63–74, 2015.
- [2] C. J. Yeager, and S. S. Courts, "A Review of Cryogenic Thermometry and Common Temperature Sensors", *IEEE Sensors Jour.*, Vol. 1, No. 4, pp. 353-360, 2001.
- [3] N. S. Boltovets, V. V. Kholevchuk, R. V. Konakova, V. F. Mitin, and E. F. Venger, "Ge-film resistance and Si-based diode temperature microsensors for cryogenic applications," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 92, no. 1–3, pp. 191–196, 2001.
- [4] Y. M. Shwarts, M.M Shwartz, S.V. Sapon "A new Generation of Cryogenic Silicon Diode Temperature Sensors," *7th Intern. Conf. on Advanced Semic. Dev. and Microsystem*, pp. 239-242, 2008.
- [5] A. Szymrka-Grzebyk and L. Lipiński, "Linear diode thermometer in the 4–300 K temperature range," *Cryogenics*, vol. 35, no. 4, pp. 281–284, 1995.
- [6] F. Udrea, S. Santra, and J. W. Gardner, "CMOS temperature sensors - concepts, state-of-the-art and prospects," *Proc. Int. Semicond. Conf. CAS*, vol. 1, no. 0, pp. 31–40, 2008.
- [7] R. Pérez, N. Mestres, D. Tournier, P. Godignon, J. Millán, "Ni/Ti ohmic and Schottky contacts on 4H-SiC formed with a single thermal treatment," *Diam. & Rel. Mat.*, Vol. 14, pp. 1146-1149, 2005.
- [8] S. Bellone, L. Di Benedetto, and A. Rubino, "On the electrical behavior of $V_2O_5/4H$ -SiC Schottky diodes," *J. Appl. Phys.*, vol. 113, 2013.
- [9] T. N. Oder, E. Sutphin, R. Kummari, "Ideal SiC Schottky barrier diodes fabricated using refractory metal borides," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 27, pp. 1865, 2009.
- [10] P. Godignon, X. Jordà, N. Banu, M. Vellvehi, J. Millan, P. Brosselard, D. Lopez, J. Barbero, "Long term stability of packaged SiC Schottky diodes in the -170°C/+280°C temperature range," *Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD)*, 22nd International Symposium on, Hiroshima, pp. 351-354, 2010.
- [11] S. Rao, G. Pangallo, F. Pezzimenti, and F. G. Della Corte, "High-Performance Temperature Sensor Based on 4H-SiC Schottky Diodes," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 36, no. 7, pp. 720–722, Jul. 2015.
- [12] N. Zhang, C.-M. Lin, D. G. Senesky, and A. P. Pisano, "Temperature sensor based on 4H-silicon carbide pn diode operational from 20 °C to 600 °C," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 7, p. 073504, Feb. 2014.
- [13] I. Josan, C. Boianceanu, G. Brezeanu, V. Obreja, M. Avram, D. Puscasu, and A. Ioncea, "Extreme environment temperature sensor based on silicon carbide Schottky Diode," *2009 Int. Semicond. Conf.*, vol. 2, pp. 525–528, 2009.
- [14] S. Rao, G. Pangallo, and F. G. Della Corte, "4H-SiC p-i-n diode as Highly Linear Temperature Sensor," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 63, no. 1, pp. 414–418, Jan. 2016.

- [15] F. Nava, G. Bertuccio, A. Cavallini and E. Vittone, "Silicon carbide and its use as a radiation detector material," *Meas. Sci. Technol.*, Vol.19, no. 10, 2008.
- [16] L. Di Benedetto, G. Landi, G.D. Licciardo, H.-C. Neitzert, and S. Bellone, "Photovoltaic Behavior of $V_2O_5/4H\text{-SiC}$ Schottky Diodes for Cryogenic Applications" *Jour. of Electron Device Society*, Vol. 3, no. 5, pp. 418-422, 2015.
- [17] Cree Research Inc. Durham, NC, USA, <http://www.cree.com/power>.
- [18] R. Nipoti, F. Moscatelli, and P. De Nicola, "Al + Implanted 4H-SiC p + -i-n Diodes : Forward Current Negative Temperature Coefficient," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 34, no. 8, pp. 966-968, Aug. 2013.
- [19] F. Moscatelli et al., "Extraction of the Schottky barrier height for Ti/Al contacts on 4H-SiC from I-V and C-V measurements," *Mater. Sci. Forum*, vols. 457-460, pp. 993-996, Jun. 2004.
- [20] Janis Research Company, USA, <http://www.janis.com/>.
- [21] Lake Shore Cryotronics Inc, USA, <http://www.lakeshore.com/>.
- [22] S. Sze, K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, J. Wiley & Sons Inc., pp. 134-180, 2006.
- [23] B. J. Baliga, *Silicon Carbide Power Devices*. World Scientific, pp. 83-100, 2005.
- [24] L. Di Benedetto, G. D. Licciardo, R. Nipoti, and S. Bellone, "On the Crossing-Point of 4H-SiC Power Diodes Characteristics," vol. 35, no. 2, pp. 244-246, 2014.
- [25] N. J. D. Nagelkerke, "A note on a general definition of the coefficient of determination," *Biometrika*, vol. 78, no. 3, pp. 691-692, Sep. 1991.
- [26] T. Kimoto, J.A. Cooper, *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications*, Wiley-IEEE Press pp. 249-255, 2014.



S. Bellone graduated in Electronic Engineering at the University of Naples in 1978. He has been assistant professor at the University of Calabria from 1979 to 1983, researcher of Electronics at the University of Naples from 1983 to 1985, associate professor up to 1994 and then full professor of Electronics at the University of Sannio. Since 1999 he is with the Industrial Department of University of Salerno. His current research topics concern: the modeling of wide bandgap devices, new methods for the device characterization and the circuit

analysis, the organic electronics.



F.G. Della Corte received the Laurea degree in Electronic Engineering from the University of Napoli in 1988. He is a Full Professor of Electronics at Università Mediterranea (Italy). Formerly, from 1992 to 1994, he has been a Senior Researcher at the National Consortium for the Technologies of InP, while from 1994 to 2011 he has been a Researcher at the IMM-CNR. He is currently active in the fields of silicon photonics, wide gap semiconductor device modelling for high temperature and high power applications, and

wireless smart sensors.



S. Rao received the B.Sc. and the M.Sc. degrees (cum laude) in Electronic Engineering from "Mediterranea" University (I) in 2005, and the Ph.D. in 2008. Researcher of Electronics from 2012, he is actually involved in the design, realization, and characterization of CMOS compatible electro-optical modulators based on the amorphous silicon technology. He works also on modelling and testing of wide gap semiconductor devices for high temperature and high power

applications.



L. Di Benedetto was born in Salerno, Italy, in 1984. He received the B.Sc. and the M.Sc. degrees (cum laude) in Electronic Engineering and the Ph.D. degree in solid state electronics from the University of Salerno, Fisciano, Italy, in 2006, 2009 and 2013, respectively. Since 2013 he is a research fellow. In 2013 he worked as Visiting Scientist at the Fraunhofer IISB and at Friedrich-Alexander University, Erlangen-Nürnberg, Germany, investigating on blocking behavior of 4H-SiC high voltage bipolar devices. His main

research interests include the modeling, simulation and development of high-power electronic devices based on wide bandgap semiconductor.



G. Pangallo was born in Reggio Calabria, Italy, in 1986. He received the B.E. and M.E. degrees in Electronic Engineering from the University "Mediterranea" of Reggio Calabria (Italy) in 2010 and 2013, respectively, where he is currently pursuing Ph.D. degree in Information Engineering. His current research interests include photovoltaic power systems and temperature sensors for hostile environments.



A. Rubino was born in Naples, Italy. He received the degree in physics (cum laude) from Università degli Studi di Napoli "Federico II". In 1989, he was with the Italian National Agency for New Technologies, Energy and the Environment (ENEA), Portici, Italy. Since 2005, he has been an Associate Professor of electronics, University of Salerno, Salerno, Italy. His research interests are electronics technology and organic electronics.

Bibliographie

- [1] Besar Asllani. *Caractérisation et modélisation de diodes Schottky et JBS SiC-4H pour des applications haute tension*.
- [2] H. S. Lee. *Fabrication and Characterization of Silicon Carbide Power Bipolar Junction Transistors*. Doctorial thesis, Swede, 2008.
- [3] R. S. Okojie P. G. Neudeck and L. Y. Chen. Chigh-temperature electronics - a role for wide bandgap semiconductors. 2011.
- [4] M.B.J. Wijesundara and R.G. Azevedo. *Silicon Carbide Microsystems for Harsh Environments*. Proceedings of IEEE, 2002.
- [5] 5.O.BARIR. diode pin en sic utilisée comme capteur de haute temérature. 2017.
- [6] M.BALIGA. *Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for power devices*. IEEE Transactions, 1993.
- [7] S. M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices (second edition)*. A Wiley-Interscience publication, Canada, 1981.
- [8] A. E. Bazin. *Conception de doidesschottky sur 3C-SIC épitaxie sur silicium*. François-Rabelais de Tours, France, 2009.
- [9] E. H. Rhoderick and R. H. Williams. *Metal-Semiconductor Contacts, 2nd ed*. Oxford, 1998.
- [10] N.herissi. *Extraction des paramètres des structures Métal/ Semiconducteurs (Ti/Pt/Au-GaAs) à partir des caractéristiques courants- tensions (I-V)*. Mémoire magister Université de Tébessa, 1998.
- [11] Mr. KAABACHE CHOKRI. *simulation et étude des caractéristique électrique d'un contact métal/semi-conducteur a base de GaAs*. Université A.MIRA-BEJAIA.
- [12] Nikhil Karkhanis. *FABRICATION, ELECTRICAL CHARACTERIZATION AND ANNEALING OF AL/, CU/, AND AU/4H-SIC SCHOTTKY DIODES*. Clemson University, 2007.
- [13] Ali'Asqhar ZAHEDI MOCHADAM. Etude du processus de recombinaison des paires " Électron-trou " dans le germanium irradiÉ par les rayons v du cobalt 6 0 a l'aide de l'effet photovoltaïque dans les jonctions p-n.

-
- [14] *Simulation et Analyse des caractéristiques électriques de la diode à barrière de Schottky (SBD) Métal/Carbure de Silicium*, author=KAMAL ZEGHDAR . PhD thesis.
- [15] Silvaco international.
- [16] *User's Manual DEVICE SIMULATION SOFTWARE*. ATLAS, 2012.
- [17] « *Etude par simulation des propriétés électriques des composants HEMTs à base d'hétéro structure ALGaAs/GaAs*. Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana.
- [18] BENOUADFEL Yacine. *Caractérisation et simulation des diodes à barrière Schottky sous environnement Silvaco*. Université A.Mira Bejaia.
- [19] BAARIR OMAR. *diode p-i-n en carbure de silicium utilisé comme capteur de haute température*.
- [20] Ping A. T. Khan M. A. Chen Q. Yang J. W. Adesida I Schmitz, A. C. Schottky barrier properties of various metals on n-type gan. 1964.
- [21] *Caractérisation et modélisation de diodes Schottky et JBS SiC-4H pour des applications haute tension*.
- [22] *MODELISATION ET SIMULATION DES CONTACTS METAL-SEMICONDUCTEUR A BARRIERE INHOMOGEN*. Université FERHAT ABBAS-SETIF.