

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electronique
Filière : Génie électronique
Option: Microélectronique et Hyperfréquence

Réf:.....

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

MASTER

Thème

**Effet des défauts sur les caractéristiques
électriques du transistor BMFET à base de 4H-SiC**

Présenté par :

BENDRIHEM OMAYMA

Soutenu le : Juin 2014

Devant le jury composé de :

Dr.Tobbeche Souad	Pr	Présidente
Dr. Megherbi Mohamed LARBI	MAA	Encadreur
Dr. Belgacem Hocine	MCB	Examineur

Année universitaire : 2013 / 2014

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electronique
Filière : Génie électronique
Option: Microélectronique et Hyperfréquence

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

MASTER

Thème

**Effet des défauts sur les caractéristiques électriques
du transistor BMFET à base de 4H-SiC**

Présenté par :

BENDRIHEM OMAYMA

Avis favorable de l'encadreur :

Avis favorable du Président du Jury

Tobbeche Souad

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electronique
Filière : Génie électronique
Option: Microélectronique et Hyperfréquence

Thème

Effet des défauts sur les caractéristiques électriques du transistor BMFET à base de 4H-SiC

Proposé et Dirigé par : Dr. Maghrebi Mohamed Larbi

Résumé

Le transistor (Bipolar Field Effect Transistor) à base carbure de silicium noté BMFET 4H-SiC est un nouveau composants majeur utilisé dans les dispositifs électroniques.

Le principal but de notre travail est de simuler numériquement l'effet des défauts du matériau (section de capture et la densité) dans les caractéristiques courant tension en utilisant le simulateur Atlas Silvaco, Technical Computer Aided Design (TCAD).

Le projet contient une partie sur les généralités du carbure de siliciums et un résumé de certaine propriété physique. Nous établirons aussi une inspection principaux des défauts native dans le SiC.

Dans ce travail, la simulation a montré que le courant drain-source ($I_{ds}-V_{ds}$) démunie avec l'augmentation de la densité des pièges, même remarque pour la section de capture ce qui entrain une démunition dans le gain.

Mots clés : BMFET, 4H-SiC, Défauts, SILVACO, Simulation, Gain.

Abréviations utilisées

Acronyme	Ce qui signifie
Si	Silicium
C	Carbone
SiC	Carbure de Silicium
4 H	4- Hydrogène
C	Cubique
H	Hexagonale
R	Rhomboédrique
K	Constant de Boltzmann
M e	Masse d'électrons

M h

Masse de trous

N₂

Azote

H

Constante de Planck

V

Vitesse de porteurs

F

Champ électrique

n

Section de capture

N_t

Densité

μ

Mobilité des porteurs

BJT

Bipolar Junction Transistor

JFET

Junction Field Effect Transistor

SILVACO

Silicon Valley Corporation

SPIC

Simulation Program with Integrated Circuit

Emphasis

VWF

Virtual Wafer Fabrication

GUI

Graphical User Interface

BMFET

Bipolar Mode Field Effect Transistor

BSIT

Bipolar Static Induction Transistor

CONSRH

Concentration de Shockley-Read-Hall

BGN

Band Gap Narrowing

GCB

Generation Conduction Band

GVB

Generation Valence Band

REMERCIEMENT

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force de faire ce travail, de m'avoir guidé vers la réussite dans ma vie, et de m'avoir protégé jusqu'à ce qu'on atteigne mon but.

J'exprime ma profonde gratitude à mon encadreur Dr. MEGHREBI MOHAMED LARBI, Je le remercie très sincèrement pour la qualité scientifiques de ses conseils, sa disponibilité, sa patience et son aide tout au long de mon travail.

A mon Professeur S.TOBECHÉ et Dr. H.BELGACEM, je suis très sensible à l'honneur que vous me faites en acceptant de participer comme du jury de cette Thèse. Soyez assuré, de mes plus profonds respects.

Mes remerciements s'adressent également à Dr. S .Houara enseignante à l'université de Biskra.

Je n'oublie bien évidemment pas mon chef de filière Dr.O.Belmir.

Aussi, je remercie mes collègues de la spécialité microélectronique-hyperfréquence spécialement Kahloul Mohamed et Kebaili Amine.

Un grand merci à mes parents qui m'ont toujours encouragé à poursuivre mes études et à aller toujours de l'avant.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ce qui est les plus chères au monde :

A mon cher Papa MOHAMED et ma chère maman SALIMA

Pour leurs sacrifices, leurs encouragements et leurs inquiétudes.

A mon frère RAMI.

A ma spirituelle sœur jumelle précieuse RAMLA Et la prunelle de mes yeux et ma sœur RADIA MALAK.

A mes sœurs amies MERIEM, KHAOULA et HAFIDA.

A tous les membres de ma famille BENDRIHEM et BENAÏSSA.

A ma Chère grand-mère Meriem Dieu peut prolonger la vie.

A mes Chères amies

Selma, Basma, Sara, Zahra, Somia, Imen, Ahlem. Khaoula.

A Dr Hicham Omar pour m'aider .

A mon oncle Dr Benaïssa Abdullah enseignant à l'université de BATNA.

A toutes mes amies de près ou de loin.

Résumé

Le transistor (Bipolar Field Effect Transistor) à base carbure de silicium noté BMFET 4H-SiC est un nouveau composants majeur utilisé dans les dispositifs électroniques.

Le principal but de notre travail est de simuler numériquement l'effet des défauts du matériau (section de capture et la densité) dans les caractéristiques courant tension en utilisant le simulateur Atlas Silvaco, Technical Computer Aided Design (TCAD).

Le projet contient une partie sur les généralités du carbure de silicium et un résumé de certaine propriété physique. Nous établirons aussi une inspection principaux des défauts native dans le SiC.

Dans ce travail, la simulation a montré que le courant drain-source ($I_{ds}-V_{ds}$) démunie avec l'augmentation de la densité des pièges, même remarque pour la section de capture ce qui entrain une démunition dans le gain.

الترانزستور (ثنائي القطب حقل تأثير الترانزستور) على أساس كربيد السيليسيوم المسمى BMFET 4H SiC هو واحد المكونات الرئيسية الجديدة المستخدمة في الأجهزة الإلكترونية. الهدف الرئيسي لعملنا هو محاكاة عدديا تأثير أخطاء الموجودة في المادة من خلال مقطع الإستلاء و الكثافة على الخصائص الكهربائية باستخدام برنامج المحاكاة أطلس Silvaco و تقنية التصميم بمساعدة الكمبيوتر TCAD. يحتوي الـ كربيد السيليسيوم تكنو لوجيه و قمنا بإعطاء نظرة حول الأخطاء الطبيعية الموجودة في المادة. من خلال المحاكاة يتبين أن شدة التيار تنخفض مع الزيادة في كثافة الفخاخ ونلاحظ ذلك أيضا بالنسبة لمقطع الإستلاء و يرافقهم انخفاض في الكسب .

Mots clés

BMFET, 4H-SiC, Défauts, SILVACO, Simulation, Gain.

Liste des Tableaux

Tableau. I.1. Comparaison des propriétés électriques du matériau semi-conducteur de puissance traditionnelle Si et GaAs et les semi-conducteurs à large bande SiC, GaN et Diamant. 6

Tableau. I.2. Énergies d'ionisation d'impuretés les plus courantes dans 4H et 6H-SiC. 7

Tableau I.3. Paramètres N_C , N_V et n_i calculés à 300 K. 8

Tableau 1.4 . Paramètres pour le calcul des déplacements du bord de la bande interdite pour le SiC de type N. 9

Tableau I.5. Paramètres pour le calcul des déplacements du bord de la bande interdite Pour le SiC de type P. 10

Tableau I.6. Paramètres pour le calcul de la mobilité sous champ faible. 11

Tableau. I.7. Sommaire des niveaux généralement observés à bande en type n 4H-SiC. 14

Liste de Figure

Figure I.1. Environnement tétraédrique d'un atome de carbone entouré de ses plus proches voisins.	4
Figure. I.2. Structure cubique et hexagonale du SiC.	5
Figure. I.3. Représentation dans le plan (1120) du motif de base polytype 3C,4H-SiC et 6H-SiC.	5
Figure I.4. Intrinsèque dépendance de concentration de porteurs de la température pour le silicium et les deux polytypes SiC plus courants.	9
Figure I.5. Un réseau à 2 dimensions schématique, illustrant (1) génération d'un atome interstitiel natif, (2) l'anéantissement d'un interstitiel avec un poste vacant, (3) un atome interstitiel natif migration à travers le cristal et (4) interstitiel et des impuretés de substitution.	13
Figure I.6. La décomposition du premier ordre de Z1 / 2 lors de l'oxydation thermique après 4.3 MeV-Si. Implantation avec la concentration enregistrée à une profondeur de 0,8 um à partir de la surface.	17
Figure I.7 Procédés de capture et d'émission vers et depuis un niveau profond situé dans la bande interdite d'un semi-conducteur.	18
Figure. II.1. Structure et symbole de transistor NPN et PNP.	22
Figure II.2. Un schéma de la structure et profils de dopage d'un transistor à jonction bipolaire avec une vue simplifiée de la section transversale.	22
Figure. II.3 .Diagramme de bandes d'un transistor bipolaire NPN.	23
Figure. II.4. Réseau des caractéristiques du transistor bipolaire.	25
Figure II.6. Transistor à effet de champ en coupe transversal.	26
Figure II.7. structure et symbole de transistor NJFET et PJFET.	26
Figure II.8. Comportement du JFET en fonction de V_D pour $V_G < 0$.	27
Figure. II.9. Réseau de caractéristiques du JFET.	28

Figure. II.10. Coupe transversale d'un BMFET singulier.	29
Figure. II.11. Section transversale d'un dispositif d'un doigt avec la définition de la géométrie.	30
Figure II.12. Comparaison entre le drain et le collecteur et la grille et la tension de base de. BMFET et BJT commutation. Le courant maximum de drain a été limitée à 0,5 A tandis que le courant de collecteur à 0,05 A avec la puissance du laser égale à 25 mW.	31
Figure III.1. Organigramme de la structure VWF.	36
Figure.III.2. Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD-SILVACO.	37
Figure.III.3. Entrées et sorties du logiciel Atlas.	38
Figure III.4. Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas (les commandes fondamentales afférentes).	39
Figure IV.1. Définition de région.	44
Figure IV.2. Maillage à deux dimensions.	45
Figure IV.3. Définition des électrodes.	46
Figure IV.4. Définition de dopage.	47
Figure. IV.5. Net doping pour une section vertical du 4H-SiC BMFET.	54
Figure IV.6. Caractéristique $I_{gate} - V_{gate}/source$.	54
Figure IV.7. La caractéristique $J_d - V_{ds}$ du transistor BMFET pour température 630 K.	55
Figure IV.8. Influence des différentes densités des pièges sur la caractéristiques $J_d - V_{ds}$ du transistor BMFET .	56
Figure IV.9. Influence la section de capture de pièges sur la caractéristiques $J_d - V_{ds}$ du transistor BMFET .	56

Figure IV.10. Influence des différentes densités des pièges sur la caractéristiques Jd-Vds du transistor BMFET. 57

Figure IV.11. Influence la section de capture de pièges sur la caractéristiques Jd-Vds du transistor BMFET. 57

Figure IV.12. Influence la densité des pièges des différents défauts sur la caractéristiques Jd-Vds du transistor BMFET pour $J_g=30A/cm^2$. 58

Figure IV.13. Influence la densité de défaut Z1/Z2 sur le gain pour $V_{ds}=0.6V$. 58

Figure IV.13. Influence la section de capture de défaut Z1/Z2 sur le gain pour $V_{ds}=0.6V$.59

Figure IV.14. Influence la section de capture de défaut EH6/7 sur le gain pour $V_{ds}=0.6V$.59

Figure IV.15. Influence la densité de défaut EH6/7 sur le gain pour $V_{ds}=0.6V$. 60

Sommaire

Remerciement	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	iv

<i>Introduction Générale.....</i>	1
--	----------

Chapitre I

Présentation du SiC et imagerie de défauts structuraux

I.1 Introduction.....	3
I.2 Le carbure de silicium.....	3
I.3 La cristallographie du matériau.....	4
I.3.1 Liaison Si-C.....	4
I.3.2 Poly type de SiC.....	4
I.4 Propriétés fondamental du matériau.....	6
I.4.1 Dopage.....	6
a. Type P.....	6
b. Type N.....	7
I.4.2 Concentration de porteurs intrinsèques et densité d'états.....	7
I.4.3 Propriétés électroniques du SiC extrinsèque.....	9
I.4.3.1 Energie d'activation.....	10
I.4.3.2 Ionisation incomplète des dopants.....	10
I.4.3.3 Mobilité des porteurs.....	10
I.5 Application de SiC.....	11

Sommaire

I.5.1 Application de haute température.....	11
I.5.2 Application de haute puissance.....	11
I.6 Défauts dans le SiC.....	12
I.6.1 Défauts ponctuels.....	12
I.6.2 Centres de défauts intrinsèques.....	13
I.6.2.1 le centre Z1/Z2.....	14
I.6.2.2 Le centre EH6/ 7.....	15
I.6.2.3 Le centre S1/S2.....	15
I.6.3 Recuit à l'oxydation améliorée des défauts ponctuels.....	16
I.6.4 Longue portée migration latérale.....	17
I.7 États de charge des défauts et des énergies de formation.....	17
I.8 Conclusion.....	19

Chapitre II

Notions de base sur le BMFET,BJT et JFET

II.1 Introduction.....	21
II.2 LE transistor bipolaire (BJT).....	21
II.3 Principe de fonctionnement.....	22
II.4 Les relations fondamentales d'un transistor bipolaire.....	24
II.5 Caractéristiques électrique du transistor bipolaire.....	24
II.6 LE transistors à effet de champ(JFET).....	25
II.7 Principe de fonctionnement.....	26
II.8 Relation fondamentales du transistor à effet de champ.....	27

Sommaire

II.9 Caractéristiques du transistor à effet de champ (JFET).....	28
II.10 Le transistor BMFET.....	28
II.11 Principe de fonctionnement.....	29
II.12 Comparaison entre BMFET et BJT.....	30
II.13 Conclusion.....	32

Chapitre III

Généralité sur le logiciel de la simulation SILVACO

III.1. Introduction.....	34
III.2. Présentation du logiciel TCAT-SOLVACO.....	34
III.2.1 Les outils de simulation (VWF core Tools).....	35
III.2.2. Les outils interactifs (VWF interactive Tools)	35
III.2.3. Les outils d'automatisation (VWF automation tools)	35
III.3. Présentation ATLAS.....	38
III.4. Logique de programmation.....	39
III.5. Organigramme de simulation.....	41
III.6 Conclusion	42

Chapitre IV

Résultats de simulation et interprétations

IV.1. Introduction.....	44
IV.2. Spécification de la structure.....	44
IV.2.1. Définition des régions.....	44
IV.2.2. Le maillage.....	45

Sommaire

IV.2.3. Les contacts.....	46
IV.2.4. Définition du Dopage.....	46
IV.3. Spécification des modèles et des matériaux.....	47
IV.3.1. Les matériaux.....	47
IV.3.2. Les modèles.....	47
IV.3.2.1. CONSRH.....	48
IV.3.2.2 AUGER.....	48
IV.3.2.3BGN.....	49
IV.3.2.4. Incomplète ionisation.....	49
IV.3.2.5. Mobilité.....	50
IV.3.3. Piège mise en œuvre dans les modèles de recombinaison.....	50
IV.3.3.1. La déclaration de TRAP active le modèle.....	52
IV.4. Méthodes numérique de calcul.....	52
IV.5. Spécification de Solution.....	52
IV.5.1. Log.....	53
IV.5.2. SOLVE.....	53
IV.5.3. LOAD et SAVE.....	53
IV.6. Analyse des résultats.....	53
IV.7. Les résultats du caractéristique J_d/V_{ds} pour les défauts intrinsèques $Z1/Z2$ et EH6/7...55	
IV.7.1. Influence les défauts sur la caractéristique J_d-V_{ds}	56
IV.8. Influence les défauts sur le gain.....	58
IV.9. Interprétation.....	60

Sommaire

IV.10. Conclusion61

Conclusion Générale

Bibliographie

Annexe

Introduction générale

L'industrie de l'électronique a grandi et devenu l'un des plus grand du monde. La demande croissante de petits dispositifs électroniques avec une meilleure performance à moindre coût pousser la technologie à base de silicium classique de ses limites. . Pour satisfaire aux exigences de l'industrie et d'étendre les applications des dispositifs à semi-conducteurs, les nouveaux matériaux et techniques de fabrication doivent être utilisés.

Le carbure silicium est un matériau électronique dominant pour le dispositif fabrication Cependant, c'est un matériau idéal pour une puissance élevée, haute température, et large bande interdite.

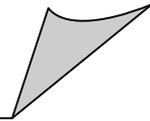
. Un certain nombre des problèmes dans le développement de matériau 4H-SiC sont étroitement liés avec la compréhension de défauts dans le matériau. La nature du composé binaire et sa structure cristalline donnant lieu à différents inéquivalentes sites du réseau une grande variété de défauts existe dans le matériau. À ce jour, seulement quelques centres de défauts ponctuels ont été clairement identifiés dans SiC.

La caractérisation du transistor BMFET à base 4H-SiC est une étape essentielle afin de connaître au mieux leur comportement. Parmi ces logiciels de simulation, le simulateur TCAD développé par le groupe SILVACO, ce dernier est un logiciel de simulation des composants qui est capable de prédire les caractéristiques électriques de composants BMFET, en plus il fournit l'effet des défauts ponctuel de 4H-SiC dans ces caractéristiques.

Dans ce mémoire, nous consacrons une partie au matériau 4H-SiC en présentant leurs propriétés fondamentale et leurs défauts ponctuels. Ensuite, nous créerons une présentation sur les transistors BMFET, Bipolaire et JFET. D'autre part, nous avons présenté les résultats de la simulation que nous avons appliquée au transistor BMFET, en citant l'influence des défauts de matériau sur les caractéristiques de ces derniers.

CHAPITRE I

Présentation du SiC et Imagerie de Défauts Structuraux



I.1. INTRODUCTION

Parmi les semi-conducteurs à large bande interdite le carbure de silicium (SiC) fait l'objet d'une attention particulière de la part de la communauté scientifique. L'amélioration de la qualité cristallographique de ce matériau a permis de fabriquer des composants réellement fonctionnels. Les premiers résultats ont fait espérer l'avènement rapide de dispositifs aux performances prometteuses pour les applications forte puissance, haute fréquence et haute température. Le SiC a en effet la particularité de posséder l'essentiel des propriétés physiques du semi-conducteur idéal dans ces domaines.

Dans cette première partie, nous présenterons le matériau carbure de silicium et établirons un récapitulatif de certaines propriétés physiques. Nous établirons également une revue des principaux défauts intrinsèques du SiC.

I.2. LE CARBURE DE SILICIUM

Le carbure de silicium (4H-SiC) est le seul composé stable dans le système à l'équilibre de SiC à la pression atmosphérique. Ses propriétés comme un semi-conducteur est une découverte relativement récente, mais aujourd'hui, il a été un matériau éprouvé en haute température application résistantes à hautes résistances et à l'abrasion. L'application principale comme matériau électronique. Le SiC a été observé en 1824 par le scientifique suédois John J. Berzelius. Novateur recherche a commencé au début du 20^e siècle avec des résultats importants dans la production de masse industrielle processus de la matière et une démonstration de la première diode électroluminescente jamais la lumière (LED) dans n'importe quel matériau. En effet, les dispositifs électroniques à base de SiC devraient travailler à température plus élevée, une puissance plus élevée, et une fréquence plus élevée en raison de sa grande lacune de la bande, un grand champ de claquage diélectrique, grande conductivité thermique, haute vitesse de saturation et une très faible sensibilité aux environnement chimique agressifs.

L'électronique de puissance est aujourd'hui essentiellement en Si, mais transistor à base de Si arrêtent de travailler à 200°C pendant un dispositif correspondant de fait SiC pourrait bien fonctionner à peut-être 600°C sans tenir compte des problèmes liés à l'emballage.

En principe, il semble maintenant tout à fait possible de réaliser des dispositifs intégrés de SiC. [1]

En plus de son attractif propriétés, SiC est constituée d'éléments non toxique et très abondantes, comme Si contrairement à celle de concurrence de nouveaux matériaux tels que le GaN.

I.3. La cristallographie du matériau

L'application SiC un nom générique recouvrant toutes les formes stœchiométriques connus de carbone et de silicium cristallisant en phase solide, en parlant SiC on ne fait donc pas référence à une forme cristallographique unique parfaitement identifiée mais à une famille de cristaux il sont tous différents mais partagent cependant certaines propriétés physiques fondamentales. Cette multitude de structures constitue l'ensemble de variétés poly type recensées de SiC. la littérature en rapporte aujourd'hui près de 200 se répartissant dans la géométrie cubique, hexagonale et rhomboédrique.[2]

I.3.1. Liaison SiC

Les structures électroniques du silicium ($[\text{Ne}] 3s^2 3p^2$) et du carbone ($[\text{He}] 2s^2 2p^2$) sont similaires. Ils appartiennent à la colonne IV du tableau périodique. En volume, les quatre électrons de valence se répartissent sur les orbitales hybrides sp^3 suivant une structure en tétraèdre au centre duquel un atome de carbone (ou de silicium) est en liaison avec les atomes du silicium (respectivement de carbone) placés aux sommets, comme le montre la figure. I.1 l'atome de carbone est à égale distance de 1.89 \AA des quatre atomes de silicium. la distance entre le plus proche voisin silicium ou carbone est 3.08 \AA environ [3]. les liaisons SiC ont un caractère essentiellement covalent (88% de covalence et 12% d'ionocité, c'étant plus électronégatif que Si) qui confère une énergie élevée d'environ 5 eV .

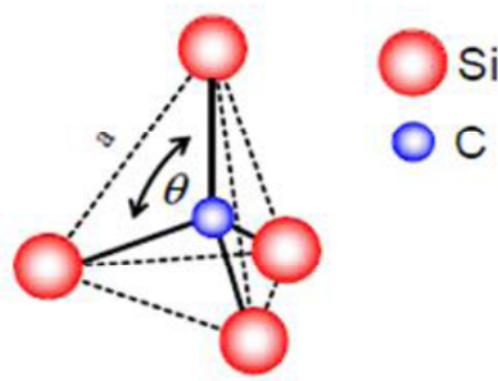


Figure I.1. Environnement tétraédrique d'un atome de carbone entouré de ses plus proches voisins [2].

I.3.2. Poly type de SiC

Le poly type est caractérisé par une séquence et période d'empilement de ces plans ou des bicouches silicium-carbone [4]. Cependant, la classification Ramsdell a proposé une nomenclature $nX\text{-SiC}$ basée sur le nombre de plans cristallins et le type cristallographique, où n désigne la période élémentaire constituant le cristal et X la structure cristallographique : C

pour cubique, H pour hexagonale et R pour rhomboédrique. L'unique forme cubique aussi appelée .les phases rhomboédrique et hexagonale sont regroupé sous le nom générique .

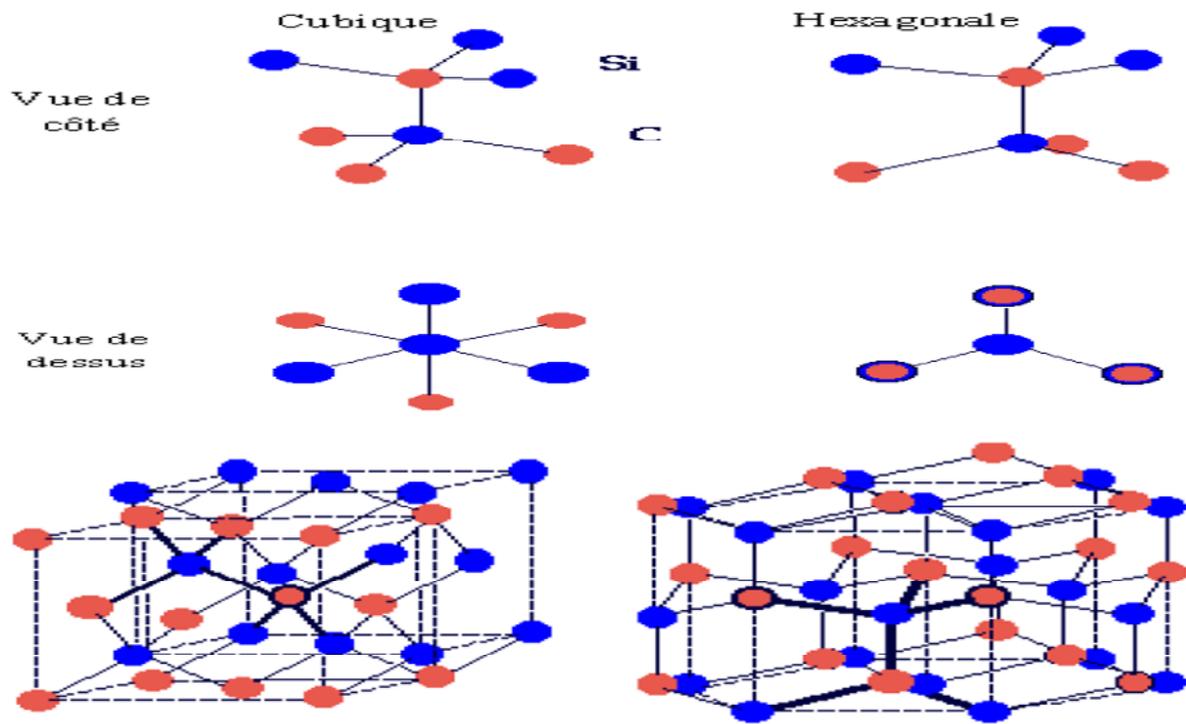


Figure. I.2. Structure cubique et hexagonale du SiC.

La présentation dans le plan (1120) perpendiculaire au plan des bicouches permet de visualiser aisément les trois types de position des atomes Si et C notés arbitrairement A, B, C pour quelques polytypes parmi les plus courants.

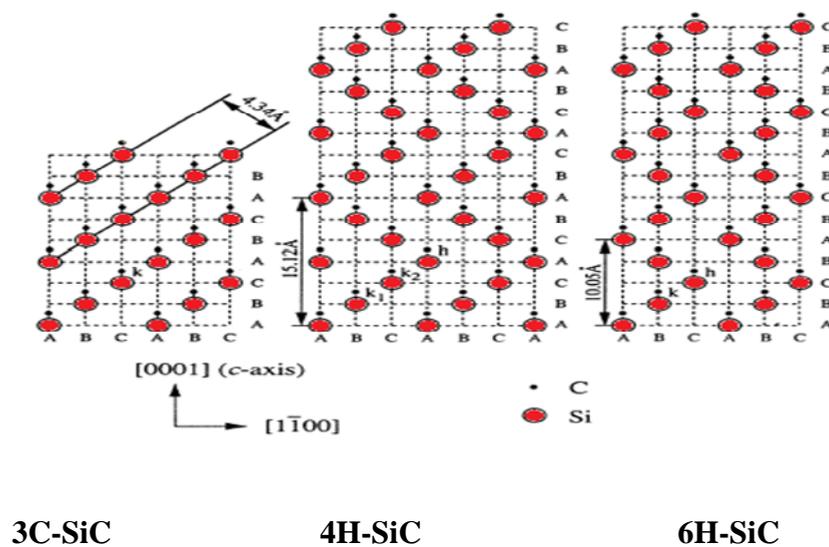


Figure. I.3. Représentation dans le plan (1120) du motif de base polytype 3C 4H-SiC et 6H-SiC [2].

I.4. Propriétés fondamentale du matériau

En raison de sa force de liaison élevée et la dureté, le SiC est physiquement robuste et chimiquement inerte. La structure cristalline va influencer la structure de bande, qui se manifeste dans la caractéristique électrique du polytype à travers la densité d'états et de dispersion des phonons. Les propriétés des matériaux tels que l'énergie de bande interdite varie de 2,2 à 3,3 eV pour le différent polytype. Les niveaux des dopants d'énergie d'ionisation sont également différents, et assez profond, conduisant à une ionisation incomplète des dopants à la température ambiante. Plus frappant est l'anisotropie variant de polytypes de carbure de silicium: seule la structure 3C cubique présente des propriétés isotropes complètement en vrac. Parmi plusieurs polytype SiC, 4H-SiC est le plus attractif en raison de la mobilité des porteurs supérieur et de la nature plus isotrope de ses propriétés. Certaines des propriétés électriques de polytype de carbure de silicium la plus courante par rapport à d'autres semi-conducteurs sont énumérés dans le tableau I.1.[5]

Property at T=300K	Silicon	GaAs	3C-SiC	4H-SiC	6H-SiC	GaN	Diamond
E_g (eV)	1.12	1.42	2.3	3.26	2.96	3.4	5.45
n_i (cm ⁻³)	1.5×10^{10}	2.1×10^6	6.9	8.2×10^{-9}	2.3×10^{-6}	1.6×10^{-10}	1.6×10^{-27}
μ_n (cm ² /V·s)*	1200	6500	750	//c:950 ⊥c:800	//c:85 ⊥c:400	1000	1900
μ_p (cm ² /V·s)*	420	320	40	115	90	30	1600
v_{sat} (cm/s)	1×10^7	2×10^7	2.5×10^7	2×10^7	2×10^7	2.5×10^7	2.7×10^7
E_C (MV/cm)**	0.2	0.4	2	2.5	2.4	3.3	5.6
λ (W/cm·K)	1.5	0.5	4.9	4.9	4.9	1.3	20
ϵ_r	11.8	12.8	9.6	10	9.7	8.9	5.5

Tableau. I.1 : Comparaison des propriétés électriques du matériau semi-conducteur de puissance traditionnelle Si et GaAs et les semi-conducteurs à large bande SiC, GaN et Diamant

I.4.2. Dopage

a. Type p

Le dopage type p, l'aluminium est le plus souvent utilisé à une faible diffusion dans SiC sur la plage de température d'intérêt, l'efficacité élevée de constitution et, par rapport à une énergie inférieure d'ionisation de l'accepteur. L'incorporation est presque linéaire à l'écoulement de triméthylaluminium et un niveau de dopage maximum pour environ $2.10^{20} \text{ cm}^{-3}$

³ peut être atteint. Bore est moins utilisé, en partie en raison de sa plus l'énergie d'ionisation de l'accepteur et de sa faible solubilité dans SiC. Bore a également un coefficient de diffusion plus élevé que l'aluminium, et une tendance à coller à la paroi du réacteur, puis s'évaporer. Ces deux effets conduisent à un profil de dopage non brusque.

Type	Dopant	Ionisation energy (meV)	
		4H-SiC	6H-SiC
n (donors)	N	42 (hex), 82 (cub)	82 (hex), 137 (cub)
	P	53 (hex), 93 (cub)	82 (hex), 115 (cub)
p (acceptors)	B	300	310
	Al	190	225
	Ga	281	290

Tableau. I.2 : Énergies d'ionisation d'impuretés les plus courantes dans 4H et 6H-SiC[5]

b. Type N

Le dopage de type n, de l'azote est préféré au phosphore, bien que l'énergie d'ionisation de l'accepteur est pratiquement la même pour les deux. L'incorporation de l'azote à partir de N₂ est un processus thermiquement limité, même à la température de croissance, en raison de l'énergie de dissociation élevée du gaz. L'incorporation de dopants est proportionnelle au débit de N₂, et sature à environ $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. La pression de vapeur du phosphore est extrêmement élevée à la température de croissance, ce qui réduit la probabilité d'incorporation de deux ordres de grandeur en dessous de celle de l'azote. En outre, la phosphine est un précurseur hautement toxique, et doit donc être évitée, si possible les plus bas niveaux de dopage de base obtenues sont dans la gamme basse. [6]

I.4.3. Concentration de porteurs intrinsèques et densité d'états

La concentration de porteurs intrinsèques d'un semi-conducteur est un paramètre important car elle détermine la limite supérieure de la température de fonctionnement des composants à base de semi-conducteurs. De plus, elle contribue au courant de fuite en inverse des jonctions (bipolaires ou Schottky). Ce paramètre dépend de la largeur de la bande interdite ainsi que des densités d'états permis dans les bandes de conduction N_c et bandes de valence N_v . Son expression est donnée dans l'Équation I.1

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

Avec (I.1)

$$N_c = 2M_c \left(\frac{2m_{dos,n} \pi k T}{h^2}\right)^{3/2}$$

(I.2)

Et

$$N_v = 2M_v \left(\frac{2m_{dos,p} \pi k T}{h^2}\right)^{3/2}$$

(I.3)

- M_c, M_v nombre de minima équivalents dans les bandes de conduction et de valence.
- $m_{dos,n}, m_{dos,p}$ masses effectives de densité d'états des électrons et des trous.
- k constantes de Boltzmann $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$.
- h constante de Planck.

Les densités d'états et la concentration n_i à température ambiante sont indiquées dans le Tableau 1.3 .

Polytypes	SiC-6H	SiC-4H	SiC-3C
$N_c(\text{cm}^{-3})$	$8,65 \times 10^{19}$	$1,68 \times 10^{19}$	$1,56 \times 10^{19}$
$N_v(\text{cm}^{-3})$	$3,30 \times 10^{19}$	$3,3 \times 10^{19}$	$3,3 \times 10^{19}$
$n_i(\text{cm}^{-3})$	$1,44 \times 10^{-5}$	$6,12 \times 10^{-8}$	7,54

Tableau 1.3 : Paramètres N_c , N_v et n_i calculés à 300 K[7].

La concentration intrinsèque de porteurs est définie comme Figure.4 montre la dépendance de la température de la concentration en porteurs intrinsèque de la 4H par rapport au silicium. La ligne horizontale indique la température à laquelle les dispositifs peuvent cesser de fonctionner puisque n_i supérieure à la concentration de dopage de fond. Comme cela peut être observé. SiC à une température supérieure à 1000 ° intrinsèque.

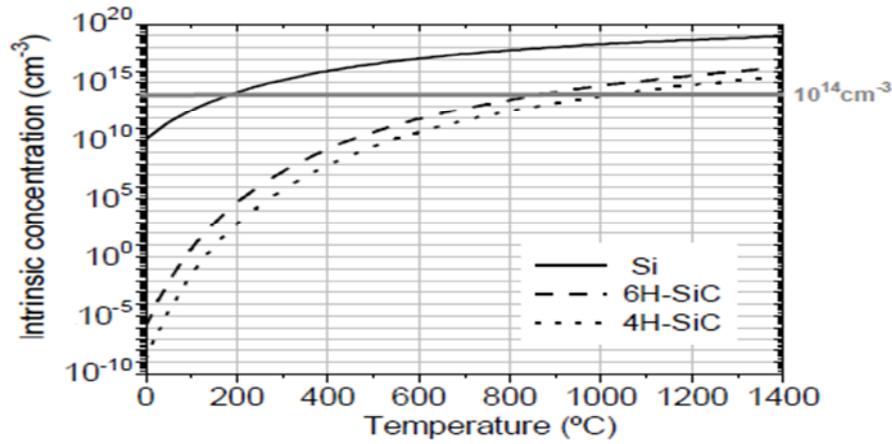


Figure 1.4. Intrinsèque dépendance de concentration de porteurs de la température pour le silicium et les deux polytypes SiC plus courants.

I.4.4. Propriétés électroniques du SiC extrinsèque

Les déplacements du bord de la bande interdite (la limite inférieure de la bande de conduction et la limite supérieure de la bande de valence) ou le rétrécissement de la bande interdite sont induits par les dopants ionisés. Pour le SiC de type N, les déplacements pour la bande de conduction et la bande de valence sont respectivement présentés dans l'Équation 1.4 et l'Équation 1.5 avec les paramètres donnés dans le Tableau I.4.

$$\Delta E_c = A_{nc} \left(\frac{N_D^+}{10^{18}} \right)^{1/3} + B_{nc} \left(\frac{N_D^+}{10^{18}} \right)^{1/2} \quad (\text{I.4})$$

$$\Delta E_v = A_{nv} \left(\frac{N_D^+}{10^{18}} \right)^{1/4} + B_{nv} \left(\frac{N_D^+}{10^{18}} \right)^{1/2} \quad (\text{I.5})$$

Type N	A_{nc}	B_{nc}	A_{nv}	B_{nv}
SiC-3C	$-1,48 \times 10^{-2}$	$-3,06 \times 10^{-3}$	$1,75 \times 10^{-2}$	$6,85 \times 10^{-3}$
SiC-4H	$-1,50 \times 10^{-2}$	$-2,93 \times 10^{-3}$	$1,90 \times 10^{-2}$	$8,74 \times 10^{-3}$
SiC-6H	$-1,12 \times 10^{-2}$	$-1,01 \times 10^{-3}$	$2,11 \times 10^{-2}$	$1,73 \times 10^{-3}$

Tableau 1.4 : Paramètres pour le calcul des déplacements du bord de la bande interdite pour le SiC de type N.

Et pour le SiC de type P, les déplacements sont calculés selon l'Équation 1.6 et l'Équation 1.7 avec les paramètres donnés dans le Tableau I.5.

$$\Delta E_C = A_{pc} \left(\frac{N_A^-}{10^{18}} \right)^{1/4} + B_{pc} \left(\frac{N_A^-}{10^{18}} \right)^{1/2} \quad (\text{I.6})$$

$$\Delta E_V = A_{pv} \left(\frac{N_A^-}{10^{18}} \right)^{1/3} + B_{pv} \left(\frac{N_A^-}{10^{18}} \right)^{1/2} \quad (\text{I.7})$$

Type P	A_{pc}	B_{pc}	A_{pv}	B_{pv}
SiC-3C	$-1,50 \times 10^{-2}$	$-6,41 \times 10^{-4}$	$1,30 \times 10^{-2}$	$1,43 \times 10^{-3}$
SiC-4H	$-1,57 \times 10^{-2}$	$-3,87 \times 10^{-4}$	$1,30 \times 10^{-2}$	$1,15 \times 10^{-3}$
SiC-6H	$-1,74 \times 10^{-2}$	$-6,64 \times 10^{-4}$	$1,30 \times 10^{-2}$	$1,14 \times 10^{-3}$

*Tableau 1.5 : Paramètres pour le calcul des déplacements du bord de la bande interdite
Pour le SiC de type P[8]*

I.4.4.1. Energie d'activation

L'énergie d'activation des dopants dans le SiC est bien supérieure à celle observée dans le Si pour un même dopant. Donc tous les dopants ne sont pas ionisés à température ambiante et le gel des porteurs (« freeze-out of carriers ») peut être observé au-dessus de 100K, contrairement au Si où cet effet n'est observé que pour des températures inférieures à 80 K.

I.4.4.2. Ionisation incomplète des dopants

L'ionisation incomplète des dopants. Cette propriété du SiC influence de façon remarquable les caractéristiques des composants, car elle peut conduire à une augmentation de la résistance série et à une diminution de l'injection des porteurs. Le pourcentage de dopants ionisés à une température donnée dépend peu de la compensation et diminue avec le niveau de dopage. Les énergies d'activation des principaux dopants.

I.4.4.3. Mobilité des porteurs

La mobilité des porteurs est un paramètre introduit pour faciliter l'étude des courants de conduction. Sous faible champ électrique, la mobilité des porteurs μ est définie par :

$$v = \mu F \quad (\text{I.8})$$

Où : v est la vitesse des porteurs et F est le champ électrique.

On distingue ici la mobilité parallèle $\mu //$ et la mobilité perpendiculaire $\mu \perp$. La mobilité parallèle ($//$ à l'axe c) est celle qui intervient dans les composants verticaux, alors que dans les composants horizontaux, c'est la mobilité perpendiculaire (transversale) qui intervient.

La mobilité sous champ faible est décrite par le modèle de Caughey-Thomas[8] :

$$\mu_{||} = \frac{\mu_{300} \left(\frac{T}{300} \right)^{(-\zeta)}}{1 + \left(\frac{N_d}{Cr} T^{-\beta} \right)^\alpha} \quad (I.9)$$

Avec les paramètres donnés dans le Tableau I.6

Polytypes (1)	μ_{300}	ζ	α	Cr (2)	β
SiC-4H, type n	1210,8	2,675	0,95	$1,738 \times 10^{16}$	2,944
SiC-4H, type p 0%	170	1,99	0,8	3×10^{19}	2,2
SiC-4H, type p 1%	170	2	0,83	$2,5 \times 10^{19}$	2,2
SiC-4H, type p 10%	170	1,85	0,67	$1,12 \times 10^{19}$	2,2
SiC-6H, type n	89,15	2,53	0,75	$1,954 \times 10^{16}$	3,23

(1) Le pourcentage indiqué est le pourcentage de compensation (N_a/N_d)
(2) Paramètres utilisés dans la modélisation de Caughey-Thomas avec N_d en m^{-3} et T en K.

Tableau I.6. Paramètres pour le calcul de la mobilité sous champ faible[7].

La mobilité sous fort champ électrique F peut être décrite comme suit

$$\mu = \frac{\mu_{LF}}{\left[1 + \left(\frac{\mu_{LF} F}{v_{sat}} \right)^\alpha \right]^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (I.10)$$

Avec : μ_{LF} est la mobilité sous champ faible décrite ci-dessus et v_{sat} est la vitesse de saturation de porteurs.[7]

I.5. Application de SiC

I.5.1. Application de haute température

La principale grandeur qui caractérise le SiC parmi celles citées dans le tableau I.1 est la large bande d'énergie interdite. Cette dernière limite la création des porteurs intrinsèques ni, thermiquement activés qui sont à l'origine des courants de fuite. Le SiC possède une faible concentration de n_i , nous avons par exemple à 300 K, pour le polytype 4H une concentration de porteurs intrinsèques de seulement $8,9 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^{-3}$. Le courant de fuite des dispositifs SiC reste faible à haute température d'où l'intérêt pour ces applications notamment dans le secteur de l'automobile.

I.5.2. Application de haute puissance

Le champ électrique critique du SiC est dix fois plus élevé que dans le Si. Il désigne un seuil à partir duquel le champ électrique entraîne la multiplication de porteurs par phénomène

d'avalanche et donc le claquage du dispositif. Pour une même épaisseur de couche active, le SiC est en mesure de bloquer une tension nettement plus élevée que le Si.

De plus sa conductivité thermique est proche de celle du cuivre ce qui permet une meilleure dissipation d'énergie par le substrat que pour le Si. Ces propriétés font du SiC un candidat idéal pour des applications de puissance (MOSFET, Schottky ...) .

La vitesse de saturation des porteurs deux fois supérieure à celle du silicium laisse envisager la réalisation de composants hautes fréquences utilisables particulièrement dans les télécommunications. [9]

1.6. Défauts dans le SiC

Bien que le SiC ait des propriétés exceptionnelles et que beaucoup de recherches soient effectuées sur ce matériau depuis une vingtaine d'années, le développement des composants en SiC en est encore à ses débuts.

Le problème le plus critique se trouve lié à la qualité du matériau de départ. En effet, les défauts dans le SiC sont nombreux et ont une densité importante. Nous pouvons classer les défauts dans le SiC en défauts ponctuels.

1.6.1. Défauts ponctuels

En raison de la bicouche SiC et de l'existence de sites inéquivalents dans ses différents polytypes, les défauts ponctuels dans le SiC sont nombreux. Les principaux sont les lacunes, les interstitiels, les anti sites et les impuretés. Les lacunes se forment quand des atomes sont éjectés de leur site cristallin. Il existe donc les lacunes de silicium (Si) et les lacunes de carbone (C). Un interstitiel est créé par introduction d'un atome en un site qui n'est pas sur les nœuds du réseau cristallin originel. On parle d'un auto-interstitiel s'il s'agit d'un atome de silicium ou de carbone. Dans le cas contraire, il s'agit d'une impureté interstitielle. Si un atome de carbone (respectivement silicium) occupe l'emplacement d'un atome de silicium (respectivement carbone), nous parlons des anti sites[10]. Les impuretés sont des atomes étrangers en site interstitiel ou substitutionnel dans le matériau. Elles soient présentes de façon involontaire dans le matériau, soient introduites volontairement (dopants).

Les défauts dus aux atomes du réseau cristallin sont nommés des défauts intrinsèques et les défauts dus aux atomes étrangers sont appelés des défauts extrinsèques. En pratique, nous distinguons et groupons les défauts ponctuels selon leur niveau d'énergie dans la bande d'énergie interdite. Nous allons présenter ensuite les centres de défauts intrinsèques et les niveaux d'énergie des principaux dopants dans le SiC.

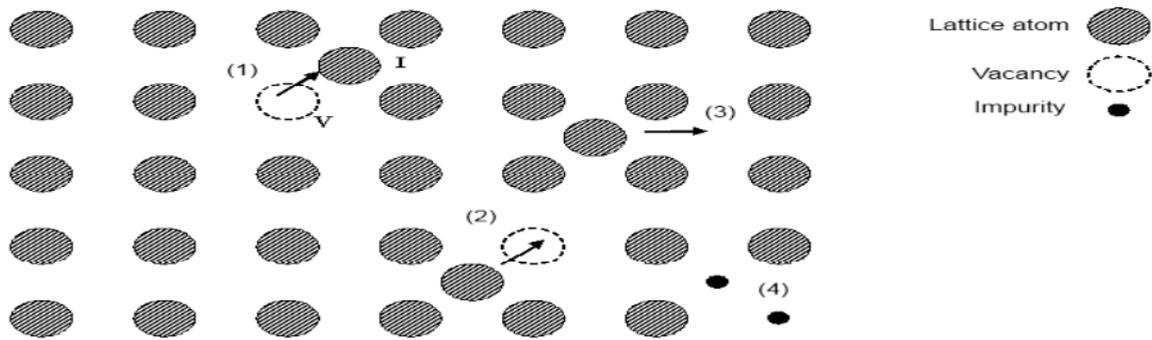


Figure I.5. Un réseau à 2 dimensions schématique, illustrant (1) génération d'un atome interstitiel natif, (2) l'anéantissement d'un interstitiel avec un poste vacant, (3) un atome interstitiel natif migration à travers le cristal et (4) interstitiel et des impuretés de substitution

I.6.2. Centres de défauts intrinsèques

Les défauts électriquement actifs introduites involontairement dans un cristal semi-conducteur peuvent conduire à propriétés du périphérique indésirables, et il est donc important de prendre le contrôle et de la compréhension de ces défauts afin de parvenir à un contrôle au niveau de l'appareil. Défauts intrinsèques sont généralement plus difficile d'enlever et de contrôler que les impuretés, et en SiC ces défauts ne sont pas seulement nombreux, mais aussi extrêmement stable thermiquement, ce qui les rend un peu difficile à supprimer ou désactiver. Masse défauts, en particulier ceux correspondant aux niveaux mesurés à l'aide de profondeur niveau spectroscopie transitoire (DLTS).

Les centres de défauts intrinsèques sont divisés en deux groupes : les centres situés dans la moitié inférieure de la bande d'énergie interdite (proches de la bande de valence) et les autres situés dans la moitié supérieure de cette bande (proches de la bande de conduction).

Les centres situés dans la moitié inférieure de la bande d'énergie interdite sont nommés : L, i, D. Les centres de piégeage les plus en vue comme adulte, d'électrons et de protons irradié de 4H-SiC, sera décrite dans cette section. Seuls les niveaux profonds dans la moitié supérieure de la bande interdite sera considéré, Les spectres DLTS dans l'intervalle de température de 100 à 750 K est tracée avec des étiquettes pour la S1/S2, Z1 / 2, et EH6 / 7 niveau. Un niveau profond qui est loin d'être l'une des bandes peut agir principalement comme un centre de recombinaison puisque les transporteurs piégés passer plus de temps au niveau, ce qui augmente la probabilité de transporteurs de piégeage de deux polarités avant le premier est émis. La position de l'énergie en dessous de la limite de bande de conduction et n la section de capture de niveaux profonds les plus pertinents intrinsèques dans la moitié supérieure de la bande interdite de 4H- SiC.[10]

Label	Position below E_c (eV)	Extrap. σ_n (cm ²)	Meas. σ_n (cm ²)
Z _{1/2}	0.60 – 0.70 eV	5×10^{-14}	5×10^{-17}
EH _{6/7}	1.50 – 1.65 eV	5×10^{-13}	$> 5 \times 10^{-15}$
S ₁	0.40 – 0.45 eV	5×10^{-15}	8×10^{-17}
S ₂	0.72 eV	$10^{-14} - 10^{-15}$	3×10^{-15}

Tableau. I.7. Sommaire des niveaux généralement observés à bande en type n 4H-SiC.

I.6.2.1. Le centre Z1/Z2

Le centre Z1/Z2 est le seul niveau de profondeur trouvé dans une concentration importante n-type que cultivé 4H-SiC. Le concentration de ce centre est à la fois inversement corrélée la durée de vie des porteurs minoritaire, ainsi que la concentration des donneurs d'azote. DLTS effectuée et les mesures de durée de vie sur une série de 4H-SiC couches épitaxiales d'épaisseur croissante, et a observé que la concentration Z1/Z2 était très fortement corrélée avec la durée de vie effective inverse[11]. Le centre Z1/Z2 donne effectivement lieu à deux centres différents et chacun donne deux DLTS différents pics correspondant à deux transitions d'état de charge des niveaux d'énergies très rapprochés .cependant, Hemmingsson et Al ont trouvé que en vidant optiquement ces pièges qui ont capturé sur deux électrons avant chaque impulsion de remplissage DLTS, et en utilisant une impulsion assez courte de remplissage empêcher la capture de deux électrons, l'état de charge du milieu peut également être observée.il est largement admis que la Z1/Z2 défaut est intrinsèque à la nature, mais son microscopique la structure est encore controversée.

Au total, les preuves de l'implication de carbone dans Z1/Z2 est maintenant plentifol. Dans fait, la majorité de l'implantation et de rayonnement des défauts induits dans le type n-4H-SiC apparaissent d'impliquer les défauts sur le sous réseau de carbone. , peut-être en raison de la faible énergie nécessaire pour générer des paires de Fränkel de carbone. La principale preuve de l'implication de carbone et pas de silicium provient d'expériences avec irradiation d'électrons de faible énergie. Il a fait valoir que Z1/Z2 peut être inoccupation défauts liés de carbone situés à deux différents sous-réseaux, en raison de leurs niveaux d'énergie proches et souvent 1h01 correspondance irradiation électrons expériences.

Des conditions normales, Z1/Z2 a une stabilité thermique extrêmement élevé, persistant jusqu'à 2000°C après le recuit partiellement dans un processus en plusieurs étapes lorsque la température augmente ce qui indique qu'il réagit avec d'autre défauts qui deviennent mobiles

ou se dissocie à certaines températures. L'énergie de dissociation de Z1 / Z2 elle même est d'environ 8 eV.[12]

I.6.2.2. Le centre EH6/7

Les EH6/7 niveaux se trouvent généralement dans les matériaux comme cultivés à des concentrations de l'ordre de 10^{12} - 10^{13} cm⁻³, qui plus augmente fortement en raison de l'électron et du proton irradiation, et l'implantation d'ions. ils sont positionnés assez profondément dans la bande intermédiaire, d'environ 1,65 eV au-dessous du limite la bande de conduction, et avoir grande transversale de capture d'électrons sections estimé à environ 10^{-13} - 10^{-14} cm² extrapolées à partir d'un terrain d'Arrhenius, et supérieur à 5×10^{-5} cm² lorsqu'elle est mesurée en faisant varier la largeur d'impulsion de remplissage pendant DLTS mesure[13]. Les EH6 / 7 niveaux ont été soutenu comme accepteur comme raison de l'absence d'observée changement de température du pic DLTS avec différents champ électrique appliqué. Le pic DLTS est assez large et se compose de deux niveaux de près de chevauchement, EH6 et EH7. Pour cette raison, et comme ils apparaissent habituellement ensemble, ces niveaux se chevauchent sont parfois traités ensemble, malgré un comportement différent. La preuve de l'implication de carbone dans ce niveau est convaincante et principalement basée sur les mêmes arguments que pour Z1 / Z2; sa formation est supprimée par l'augmentation du rapport C / Si , EH7 est observée après irradiation d'électrons à des énergies inférieures au seuil pour endommager le Si-sous-réseau, et les deux EH6 et EH7 exposition très améliorée recuit, soit après l'implantation de carbone. Les niveaux EH6 / 7 sont générés dans des concentrations similaires en tant que le centre Z1 / Z2 par rayonnement, et leur comportement de recuit est également très similaires. Tous les deux avoir stabilités thermiques très élevées, persistant jusqu'à 2000 °C, et recuire à plusieurs étapes. L'énergie de dissociation finale pour EH6 / 7 a été estimé à au moins 7,5 eV.[14]

I.6.2.3. Le centre S1/S2

Les niveaux S1/S2 se composent du niveau S1 à $E_c - 0,45$ eV et le niveau S2 à $E_c - 0,71$ eV, avec capturer des sections 8×10^{-17} et 3×10^{-17} cm², respectivement, mesurée par largeur d'impulsion variation. David et al ont constaté qu'ils apparaissent dans une relation de près de 1h01 suite à la fois de l'énergie d'électrons et l'irradiation du proton à basse et haute, après un post- irradiation recuit à environ 200 °C[11]. Les positions des pics DLTS ont été trouvés, ce qui pourrait indiquer que les niveaux sont accepteur comme. Ils ont fait valoir que ces niveaux correspondent probablement à différents états de charge du même défaut centre. Cette

conclusion est appuyée par la section efficace de capture beaucoup moins d'électrons pour S1. Ce qui pourrait indiquer que le centre est accepteur comme et capable de capturer deux électrons depuis une capture d'électrons du premier conduit à un centre de charge négative, et par conséquent une bien taux de capture inférieure du second électron dû à la répulsion Coloumbic. Le fait que les deux niveaux S1 et S2 présentent ces propriétés relativement rares a été considérée comme une preuve supplémentaire qu'ils ne correspondent à différents états de charge de la même centre de défauts. Les niveaux commencent à recuire à des températures supérieures à 250 °C [15]. Lors de l'exécution irradiation en faisceau concentré de faible énergie.

I.6.3. Recuit à l'oxydation améliorée des défauts ponctuels

la EH6 / 7 niveaux S1/S2, Z1 / 2 et tous subissent une meilleure recuit lors des traitements thermiques dans une atmosphère oxydante, à savoir l'oxydation thermique, comme l'a découvert par Hiyoshi et Kimoto. Un nouveau niveau, dénommé Hk0 et situé à EV +0,78 eV, est généré dans la moitié inférieure de la largeur de bande interdite lors de l'oxydation, mesurée sur de type p matériau. L'oxydation thermique conduit à une augmentation de la recombinaison des porteurs minoritaires à vie. Cette hypothèse pour expliquer l'amélioration de recuit de ceux-ci centre de défauts dans le matériau C-implanté. La température à laquelle le niveau Z1 / 2 commence à disparaître diminue de 2000 °C [13] pour températures qui donne un taux d'oxydation raisonnable, par exemple, supérieure à 1100 °C sur (0001) face 4H-SiC à la suite de l'oxydation. Oxydation thermique comme une procédure de recuit sur les centres Z1 / 2 et EH6 / 7 a été montré pour être plus efficace à proximité de la surface de plus profondément dans le matériau, ce qui est une conséquence naturelle de la concentration plus élevée en raison de CI à la migration de ce défaut à partir de l'interface, 4.3 MeV Si-ions ont été implantés à une dose de $3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ dans le profil de pointe, générant Z1 / 2 à une concentration d'environ $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, et par la suite le recuit a été effectué en N2 et O2 à des températures de l'ordre de 1050 à 1175 °C Z1 / 2 a été observée à la pourriture dans un premier ordre réaction avec une énergie d'activation de $5,4 \pm 0,3 \text{ eV}$, comme indiqué dans la figure.I.6. Une désintégration du premier ordre est en raison d'une concentration essentiellement indépendant du temps de CI dans la région du pic de Z1 / 2, qui permet l'extraction de la concentration normalisée de CI.

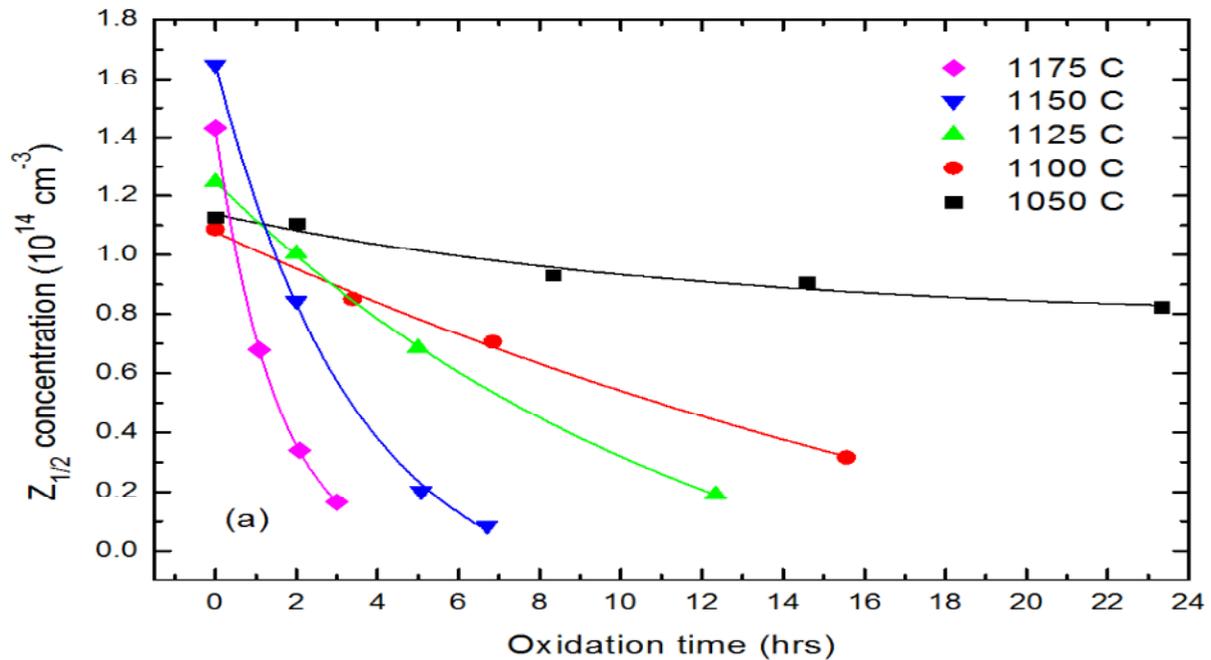


Figure I.6 : La décomposition du premier ordre de Z1 / 2 lors de l'oxydation thermique après 4.3 MeV-Si. Implantation avec la concentration enregistrée à une profondeur de 0,8 um à partir de la surface.

I.6.4. Longue portée migration latérale

Les observations de la migration latérale de longue portée dans 4H-SiC, c'est à dire dans le plan de base, de intrinsèque défauts suivants irradiation de protons au moyen d'un faisceau focalisé, sera étendu dans cette section afin d'inclure également l'irradiation au fond d'un pré-pulvérisé cratère[10]. Comme on le verra, ce qui conduit à une couche étroite et riche défaut lorsque les défauts de migration extrêmement longue distances latérales mais sont confinés dans une épaisse couche de 1 um. Directement défauts ponctuels observés sont la S1/S2 et Z1 /Z 2 niveaux, bien que le phénomène de la migration est effectivement attribué à la motion de recombinaison accrue des dislocations.

I.7. États de charge des défauts et des énergies de formation

Un centre profond, avec le niveau d'énergie E_T situé dans la bande interdite et avec une concentration uniforme des défauts N_T cm⁻³ au cours de la matière semi-conductrice (figure. I.7). Il ya quatre processus décrivant le comportement dynamique de l'état profond, à savoir la processus de capture et d'émission individuelles de deux électrons et des trous, avec correspondant émission et de capture coefficients (probabilité par unité de temps) de e_n , e_p , c_n et c_p .

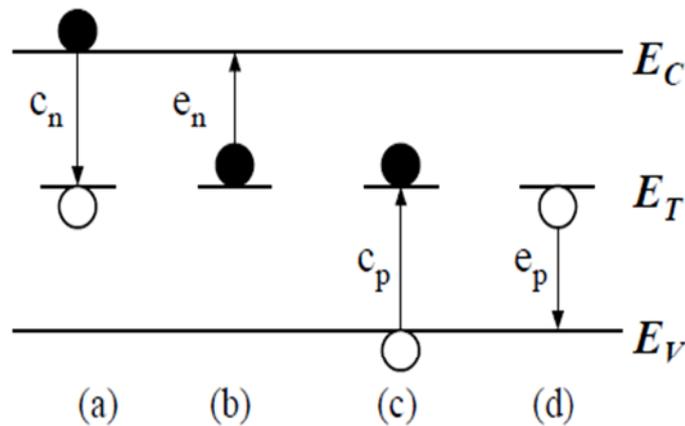


Figure. I.7. Procédés de capture et d'émission vers et depuis un niveau profond situé dans la bande interdite d'un semi-conducteur.[10]

La capture d'un électron de la E_C et E_T comme événement (a). et l'émission de un électron E_T à E_C événement (b). De même, la capture d'un trou de E_V à E_T est l'événement (c). Et l'émission d'un trou de E_T pour événement E_V est (d). Aujourd'hui, quatre procédés différents peuvent être considérer (Figure. I.7) [10].

- 1 Une recombinaison: Cas (a) est suivie d'événement (c) .
- 2 Génération : cas (b) est suivie d'événement (d) .
- 3 Piège géant les électrons: cas (a) est suivie par cas (b) .
- 4 Piège géant les trous : événement (c) est suivie par cas (d).

I.8.CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons faire une petite présentation aussi simple que possible de SiC cette présentation contient des définitions la cristallographie de matériau.

Et mis en relief ses propriétés fondamentale .ensuite, nous avons mentionné à propriété électronique intrinsèque et extrinsèque.

Il apparaît notamment que le SiC est particulièrement adapté pour des applications haute puissance et haute fréquence.

Après étudié des généralités sur les défauts dans ce matériau on a parlé les défauts ponctuels. Et se concentrer sur un type important d'erreurs intrinsèque et la définition de centre de ce type défauts.

CHAPITRE II

Notions de base sur le BMFET, BJT et JFET

II.1 Introduction

Le transistor bipolaire à jonction inventé en 1948 par les américains J.Barden et W.Brattain et W.SHOKLEY, il est considérablement développé et a été utilisé dans tous les domaines de l'électronique électronique analogique, électronique numérique, électronique de puissance .il a atteint son apogée dans les années 70.le pourcentage des montage ou il intervient comme composant principal se réduit continuellement au profit des transistors à effet de champ.[16]

Le concept d'un semi-conducteurs à triode comme structure similaire au transistor à effet de champ à jonction (JFET) a été proposé, la première fois, par Jules Lilienfeld dans trois révélations de brevet au alentour de 1925, suivis d'un brevet semblable par Oskar Heil en 1935. Après ces années, les efforts cumulatifs d'un certain nombre de chercheurs aux laboratoires de Bell comprenant Atalla, Barden, Brattain, Shokley, Spitzer, et Warner ont lentement mené à la réalisation de ce dispositif.[17]

Au cours des dernières années, la famille de semi-conducteurs de puissance dispositifs a connu une expansion rapide et de nouvelles structures combinant les modes unipolaires et bipolaires de fonctionnement ont été développés, ce dispositif appelé BMFET (Bipolar Mode Field Effect Transistor) le transistor à effet de champ bipolaire, également connu sous le transistor à induction statique bipolaire (BSIT).[18]

II.2 LE transistor bipolaire (BJT)

Le transistor bipolaire est un composant électronique composé de trois couches de semi-conducteurs dopés. L'émetteur fortement dopé son rôle est de réaliser "l'injection" massive de porteurs majoritaires. La base fine couche faiblement dopée, son rôle est de transmettre ou de stopper les porteurs majoritaires venant de l'émetteur et allant vers le collecteur. Le collecteur couche épaisse faiblement dopée, son rôle est de recevoir les porteurs majoritaires et d'assurer une bonne tenue en tension inverse. En fonction de la nature des porteurs majoritaires choisie, on distinguera les transistors appelés NPN et PNP. Reposent sur l'exploitation des deux types de porteurs (électrons et trous)[16].

Il s'agit donc de deux jonctions PN tête-bêche ayant une région en commun. Le transistor bipolaire considéré un transistor formé d'un barreau qui comprend trois couches successives définissant 2 jonctions : la jonction base-émetteur (jonction BE) et la jonction base-collecteur (jonction BC).Si on assimile ces jonctions à deux diodes.

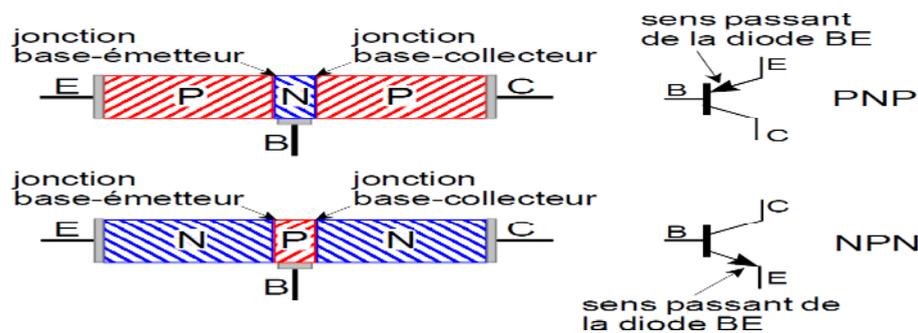


Figure. II.1. Structure et symbole de transistor NPN et PNP.

Le transistor NPN est le plus utilisé pour les applications nécessitant des circuits rapides car la conduction repose principalement sur les électrons, qui sont plus rapides que les trous. L'objet des développements les plus poussés au cours des dernières années, il faut cependant noter que les différents courants du transistor bipolaire font intervenir les deux types de porteurs (électrons et trous), contrairement aux composants à effet de champ, où un seul type de porteur est sollicité.[19]

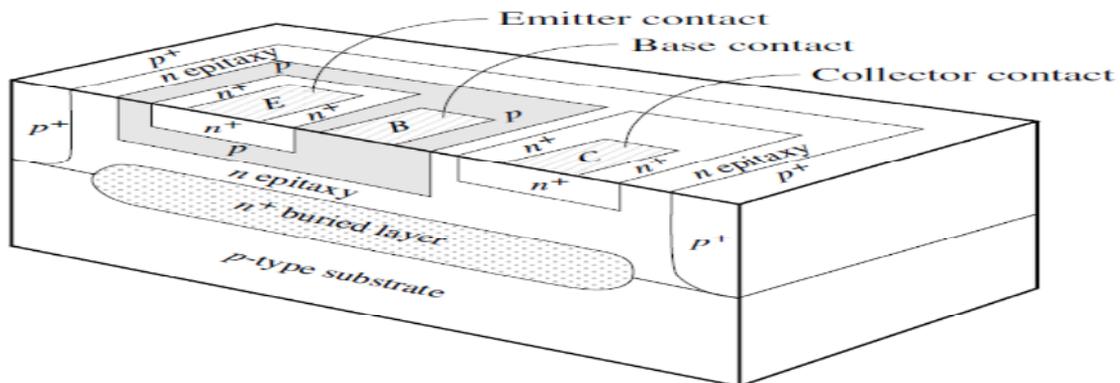


Figure II.2. Un schéma de la structure et profils de dopage d'un transistor à jonction bipolaire avec une vue simplifiée de la section transversale.[19]

Le transistor bipolaire peut être polarisé de 4 manières différentes, qui déterminent chacune un mode de fonctionnement. Les différents modes de fonctionnement du transistor bipolaire sont

- Mode direct : Jonction émetteur/base en direct et base/collecteur en inverse.
- Mode saturation : Jonction émetteur/base en direct et base/collecteur en direct.
- Mode inverse : Jonction émetteur/base en inverse et base/collecteur en direct.
- Mode bloqué : Jonction émetteur/base en inverse et base/collecteur en inverse.

II.3.Principe de fonctionnement

Le bon fonctionnement du transistor nécessite que les porteurs minoritaires, injectés dans la base depuis l'émetteur, atteignent la jonction base-collecteur. Il est donc impératif que ces

porteurs ne se recombinent pas à la traversée de la base, il faut par conséquent que l'épaisseur de la base soit très inférieure à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires.

Ceci implique l'emploi de bases assez fines pour éviter la recombinaison en volume, il est impératif que la longueur de diffusion des électrons soit supérieure à l'épaisseur de la base neutre WB.

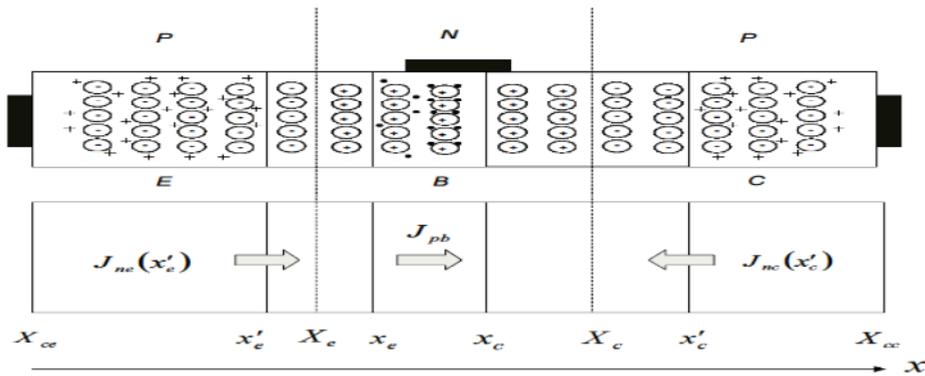
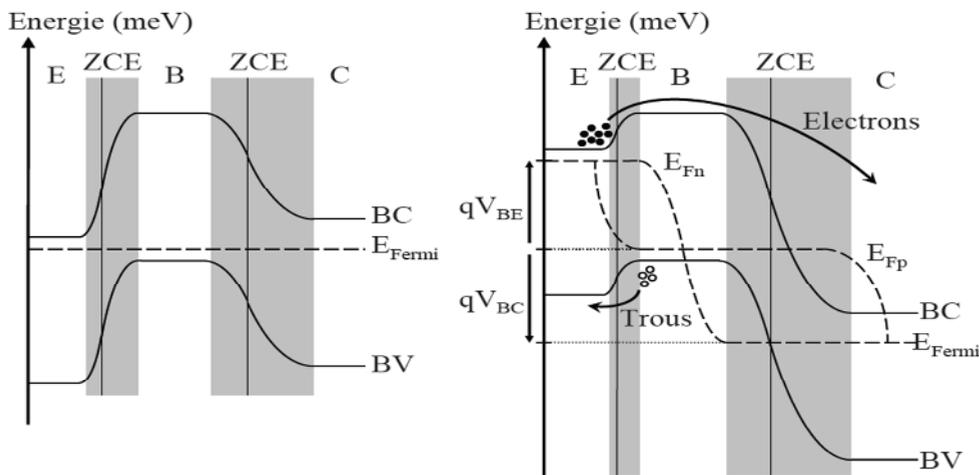


Figure II-3 : représente les charges et les courants d'un transistor pnp polarisé.

Le profil de bandes d'un transistor NPN au repos est présent sur la figure II.3. Lorsque la jonction émetteur/base est polarisée en direct, les barrières s'abaissent pour les trous et les électrons, autorisant ainsi le passage du courant [20]. Les électrons diffusent de la base vers le collecteur, et sont happés par la zone de charge d'espace (ZCE) base/collecteur. La polarisation inverse de cette jonction base/collecteur sert à créer un très fort champ électrique qui accélère les électrons.



a) Au repos (polarisation nulle)

b) Sous polarisation normale directe

Figure. II.3. Diagramme de bandes d'un transistor bipolaire NPN.

Le transistor bipolaire est un composant dit actif qui se comporte comme une source de courant commandée en tension. La jonction émetteur/base contrôle le courant principal du transistor.

Dans le cas d'un transistor à homo-jonction, il faut que la jonction émetteur-base soit fortement dissymétrique (dopage d'émetteur très supérieur au dopage de base) pour que la majorité des porteurs injectés soient des électrons, permettant ainsi d'obtenir une efficacité d'injection maximale. La quantité de trous injectés dans l'émetteur sera très faible en regard des électrons injectés dans la base. Ces électrons injectés dans la base atteignent la jonction base/collecteur par un mécanisme de diffusion. Le courant collecteur dépend donc du gradient d'électrons dans la base. Dans un transistor idéal le courant ne doit pas varier lorsque la polarisation de la jonction base-collecteur varie.

II.4. Les relations fondamentales d'un transistor bipolaire

Le courant d'émetteur I_e est le courant d'une jonction p-n, la jonction émetteur base, polarisée par une tension V_{eb} .

$$I_e = I_{s1} \left(e^{eV_{eb}/kT} - 1 \right) \quad (\text{II.1})$$

Où I_{s1} est le courant de saturation de la jonction émetteur-base.

Le courant collecteur est donc une fraction importante du courant d'émetteur, ce courant s'écrit :

$$I_c = -\alpha I_e = -\alpha I_{s1} \left(e^{eV_{eb}/kT} - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

" α " représente le gain courant du transistor à tension collecteur-base nulle, $V_{cb} = 0$. Le courant collecteur I_c se distribue entre l'électrode d'émetteur et celle de base, si on appelle α_i la proportion de ce courant qui constitue le courant d'émetteur, ce dernier s'écrit :

$$I_e = -\alpha_i I_c = -\alpha_i I_{s2} \left(e^{eV_{cb}/kT} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

" α_i " représente le gain en courant inverse du transistor à tension émetteur-base nulle. Il faut noter que pour des raisons de dissymétrie, à la fois dans le dopage et dans la Géométrie, les coefficients α et α_i sont différents $\alpha > \alpha_i$. [20]

II.5. Caractéristiques électrique du transistor bipolaire

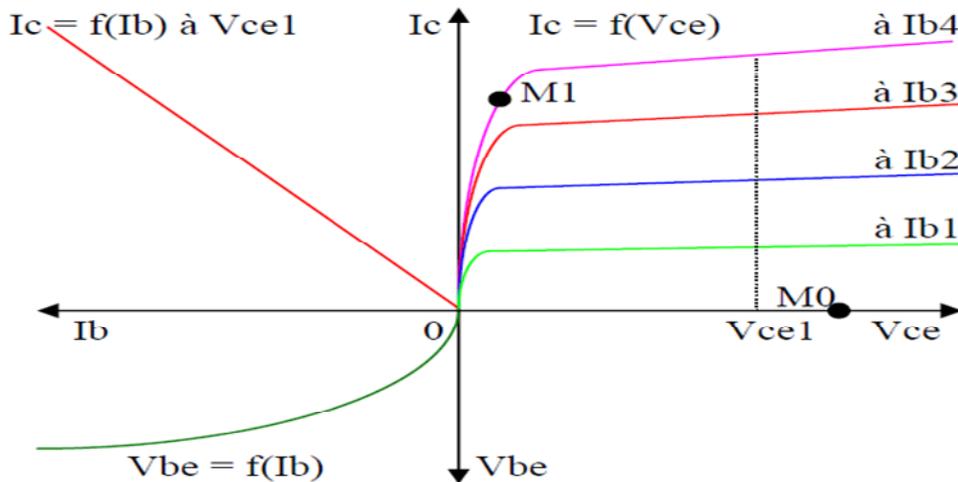


Figure. II.4. Réseau des caractéristiques du transistor bipolaire.

La fonction $I_C = f(V_{CE})$ caractérise de sortie est maîtrisée par la valeur du courant de base. Celle-ci comporte essentiellement deux domaines ; la partie où I_C est peu variable pour une valeur de I_B c'est le régime linéaire, la partie coudée où la transistor est en régime saturé. La fonction $V_{BE} = f(I_B)$ caractérise d'entrée est celle d'une jonction PN entre la base et l'émetteur. La fonction $I_C = f(I_B)$ caractérise « l'effet transistor » et de transfert en régime linéaire. C'est une droite de pente (ordre de grandeur de 100). En régime linéaire $I_C \approx \beta \cdot I_B$ et en régime saturé $I_C < \beta \cdot I_B$.

Au point M0 le transistor est bloqué. Entre son collecteur et son émetteur le transistor est équivalent à un interrupteur ouvert. Au point M1 le transistor est saturé. Entre son collecteur et son émetteur le transistor est équivalent à un interrupteur fermé.

Par la variation spontanée du courant I_b de 0 à I_{b4} ou inversement on peut passer de M0 à M1 ou inversement. Dans ce type de fonctionnement tout ou rien on dit que le transistor fonctionne en commutation. En faisant varier I_b tout en conservant le transistor en régime linéaire on peut utiliser le transistor en amplificateur de courant. [21]

II.6. LE transistors à effet de champ (JFET)

Le transistor à effet de champ à jonction est un premier exemple de transistor unipolaire. C'est un dispositif semi-conducteur unipolaire qui utilise un seul type de porteur sur un substrat (P+) très fortement dopé, on diffuse une zone dopée N le canal. Au centre du dispositif, on diffuse une grille nommée aussi porte ou gate, dopée P+ reliée au substrat et de part et d'autre de cette grille, deux îlots très fortement dopés N+ : la source est une zone d'entrée des électrons dans le dispositif et le drain est un zone de sortie des charges. il repose sur un contrôle du courant de drain à l'aide d'un champ électrique générée par une

polarisation entre grille et source[22]. Il existe aussi des JFET (acronyme pour Junction Field Effect Transistor) ayant un canal P qui sont complémentaires des transistors canal N. Pour ces transistors canal P, toutes les tensions et les courants sont à inverser.

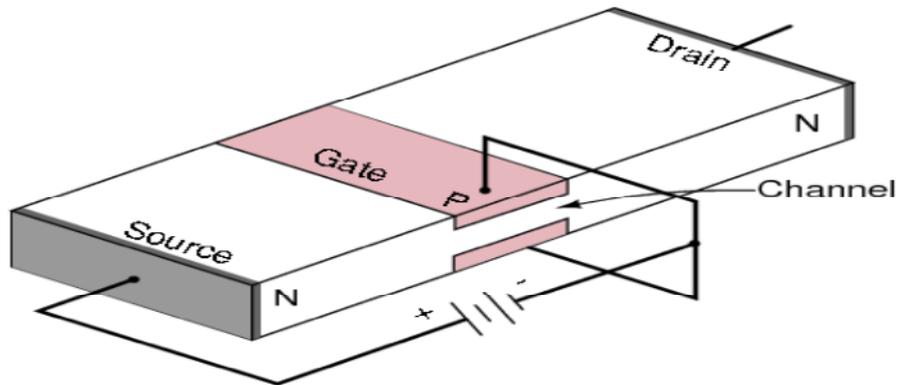


Figure II.6. Transistor à effet de champ en coupe transversal.[23]

Le symbole utilisé pour les représenter est donné ci-dessous. Le trait qui correspond au canal est continu. La grille et le canal forment une jonction PN, la flèche correspondante est orientée dans le sens passant de cette jonction. Sur les schémas, elle est parfois décalée du côté de la source.

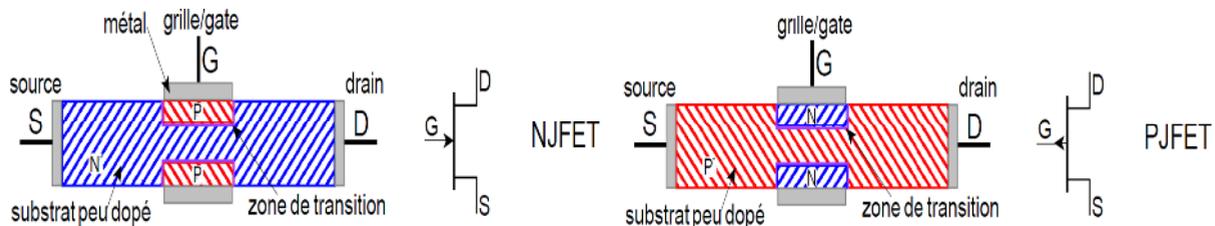


Figure II.7. structure et symbole de transistor NJFET et PJFET.

II.7.Principe de fonctionnement

Dans le transistor à effet de champ à jonction (JFET), la variation de la tension de polarisation permet la modulation de la largeur de la zone de charge d'espace de la jonction latérale "P+N". Autrement dit, la variation de la polarisation module la variation de la section conductrice du canal.

Sans polarisation, il peut y avoir une zone de désertion sur une certaine profondeur dans le canal. La désertion est liée à différents paramètres tels que le matériau de la grille et les propriétés d'interface.[24]

Pour une tension drain source (V_d) nulle, la variation de la tension grille (V_g) module la profondeur de la zone de désertion, et donc la partie conductrice du canal. Pour une polarisation < 0 (et $V_d = 0$ volt), la zone de désertion se développe plus profondément dans le canal, provoquant le rétrécissement de celui-ci et donc une augmentation de sa résistance.

Pour une tension $V_g = V_p$ (tension de pincement), la zone de charge d'espace occupe la totalité du canal. La résistance entre drain et source devient très élevée.

Pour une tension V_d non nulle et une tension V_g négative, on a un canal conducteur. Un courant I_d circule entre le drain et la source. Si V_d devient de plus en plus positive, le champ électrique à travers le canal augmente ainsi que la vitesse des électrons. La distribution de tension à travers le canal aura pour conséquence une différence de potentiel entre la grille et le canal sur la longueur de celui-ci[25]. Ceci explique la différence observée pour la profondeur de la zone de désertion le long du canal, qui augmente vers le drain, si la tension V_d atteint la valeur V_{dsat} (tension de saturation), le régime de pincement apparaît. Le courant I_d atteint sa valeur de saturation. L'augmentation de la tension V_d au-delà de V_{dsat} n'affecte pas l'évolution du courant I_d qui garde une valeur relativement constante.

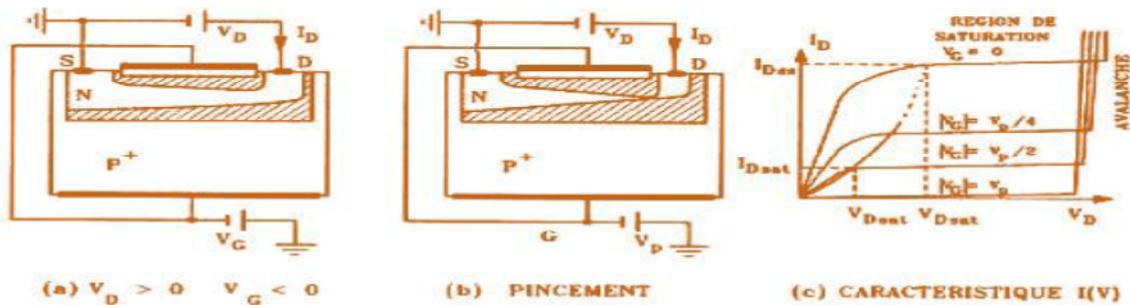


Figure II.8. Comportement du JFET en fonction de V_D pour $V_G < 0$.

II.8.Relation fondamentales du transistor à effet de champ

La tension de pincement dans un transistor à effet champ est identifié par

$$V_p = \frac{eN_d h^2}{2\epsilon} \tag{II.4}$$

Où : e est la charge d'électron, N_d est les densités des donneurs, ϵ est le diélectrique.

La relation entre le courant de drain et la tension drain/source caractérisé par la formule suivante :

$$I_D = g_o \left\{ V_{DS} - \frac{2 \left[(V_{DS} + V_{bi} - V_{GS})^{3/2} - (V_{bi} - V_{GS})^{3/2} \right]}{3V_p^{1/2}} \right\} \tag{II.5}$$

Dans la zone de saturation, le courant de drain devient :

$$I_D(sat) = g_o \left[\frac{V_p}{3} - V_{bi} + V_{GS} + \frac{2(V_{bi} - V_{GS})^{3/2}}{3V_p^{1/2}} \right] \tag{II.6}$$

Dans le régime ohmique dans la caractéristique du JFET. On a la transconductance est modelé par :

$$g_m = \frac{g_o V_{DS}}{2V_p^{1/2}(V_{bi} - V_{GS})^{1/2}} \quad (\text{II.7})$$

Dans le régime de saturation, la transconductance devient sous la forme :

$$g_m(\text{sat}) = g_o \left[1 - \left(\frac{V_{bi} - V_{GS}}{V_p} \right)^{1/2} \right] \quad (\text{II.8})$$

Où : V_{DS}, V_{GS} ,sont la tension de saturation de drain et de grille respectivement , V_{bi} la tension appliquée.[26]

II.9.Caractéristiques du transistor à effet de champ (JFET)

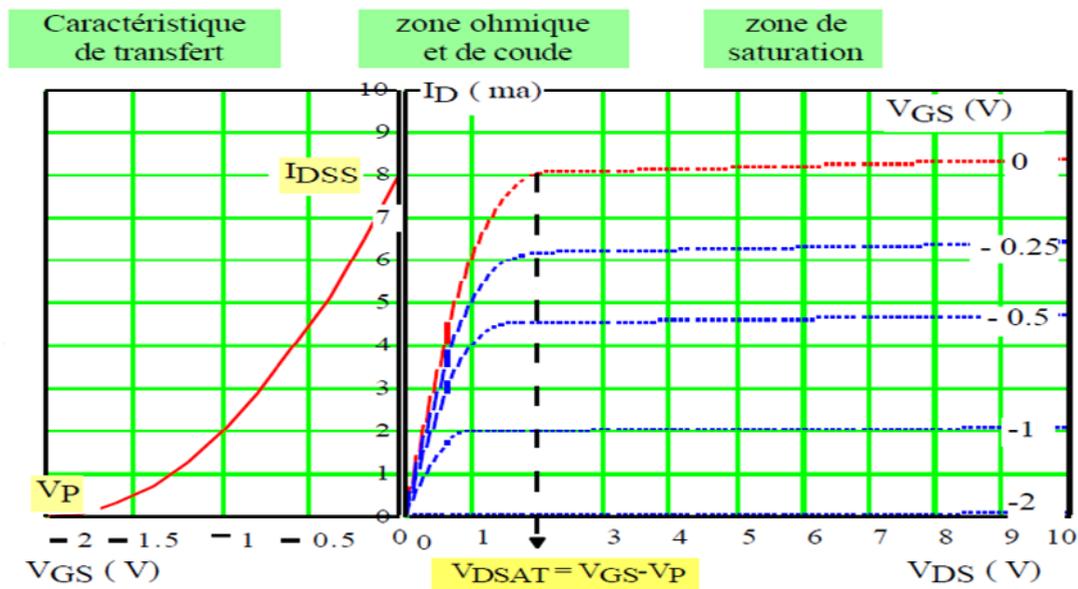


Figure. II.9. Réseau de caractéristiques du JFET.[27]

La caractéristique d'entrée est celle d'une diode polarisée en inverse. On a donc toujours $I_G=0$ La fonction $I_D=f(V_{DS})$ caractérise de sortie, cette caractéristique par trois régions la région ohmique, la zone de coude et la zone de saturation.

La fonction $I_D=f(V_{GS})$ caractérise de transfert pour $V_{DS}=\text{constante}$.

II.10.Le transistor BMFET

Le transistor à effet de champ de mode bipolaire (BMFET), également connu sous le nom du transistor à induction statique bipolaire (BSIT), à la fin des années 1970, Le BMFET est le premier dispositif classé comme un dispositif qui fusionne les avantages de transistor bipolaire et des transistor à effet de champ, c'est-à-dire il est formé par la compensation du deux transistor précédent (BJT, JFET), à savoir une faible résistance et le gain de courant élevé d'un côté, et une bonne tension de blocage. Fondamentalement, le BMFET se compose des régions, grille p^+ , de source n^+ inter digitées, réalisé sur le dessus de n^-n^+ (drain) plaquette. Dans un fonctionnement bipolaire, dont la grille est polarisée par rapport à la source un plasma électron-trou à l'intérieur de la couche épit axiale sera formé.[28]

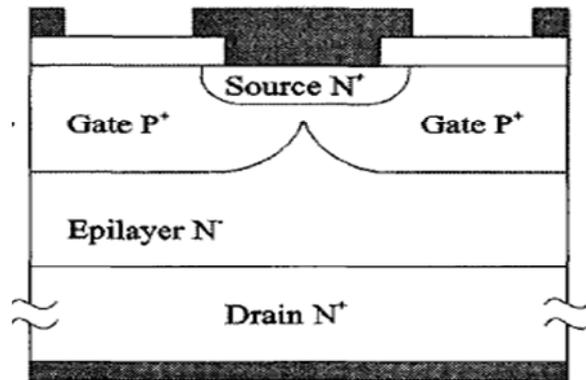


Figure. II.10. Coupe transversale d'un BMFET singulier. [28]

L'objectif principal pour ce type de dispositifs est leur capacité à passer une puissance électrique élevée, récemment, des dispositifs que fusion FET et la technologie bipolaire ont été développés. Ils gagnent une importance croissante dans l'électronique de puissance. Comme les circuits ont besoin de surmonter certains problèmes de défaillance qui affectent les transistors bipolaires purs, nous avons souligné notre intérêt sur l'analyse et sur l'optimisation de BMFET appartenant au premier groupe nous pouvons diviser les dispositifs électroniques de puissance en trois classes : les redresseurs non contrôlés par exemple (des diodes PIN, Schottky), les transistors de puissance par exemple (BJT, MOS de puissance) et thyristors par exemple (thyristors MOS contrôlés (MCT, porte thyristors d'extinction GTO), le transistor à effet de champ de mode bipolaire (BMFET) est devenu compétitif par rapport à d'autres dispositifs de puissance à semi-conducteurs.[29]

BMFET et BSIT dispositifs ont fait l'objet d'un certain nombre de documents et maintenant deviennent également disponibles dans le commerce.

II.11.Principe de fonctionnement

Normalement ouvert, ce comportement est dû à la tension intégrée de la grille, une région de pincement est créée qui entraîne une barrière de potentiel qui empêche l'écoulement des charges de la source vers le drain. Le dispositif peut être activé par polarisation des jonctions grille-source. Cela entraîne une réduction de la hauteur de la barrière de potentiel et donc une injection des porteurs minoritaires dans la couche épitaxiale, qui est responsable de la très faible résistance ON de l'appareil. Une vue en coupe de la cellule d'une unité de BMFET est schématisée par la figure II.11. Par l'application d'une tension grille-source avant, on obtient une injection des porteurs minoritaires à partir de la région de grille dans la couche épitaxiale qui induit une modulation de conductivité dans cette couche. Par conséquent, en fonction des porteurs injectés par la grille, un grand courant ne peut circuler entre la source et

le drain. Dans le cas contraire, dans l'état OFF de l'appareil, le courant drain-source est inhibée selon le mode de fonctionnement du transistor FET ; en fait, sans appliquer une tension grille-source, le canal sous la zone de source est maintenu en pincement par la jonction grille de tension intégré.

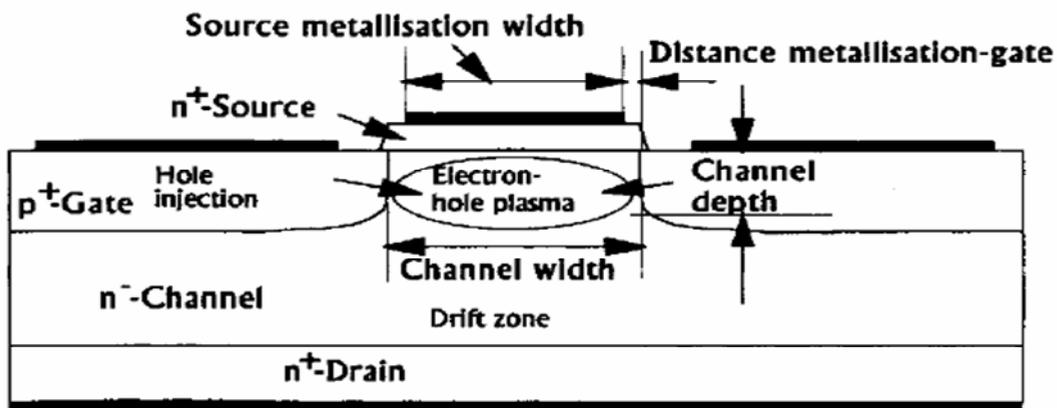


Figure. II.11. Section transversale d'un dispositif d'un doigt avec la définition de la géométrie.[30]

Dans la structure de l'appareil un chevauchement faible entre les deux zones de grille par diffusion à la source. Cela a été introduite dans la dernière génération de BMFET pour atteindre une répartition supérieure des porteurs des charges à celles disponibles par BMFET précédente .Il est possible de réaliser le recouvrement en commandant la diffusion latérale des régions de grille et les distances entre les masques pour d'implantation. Les dispositifs BMFET montrent une Caractéristiques similaires à celles BJT à l'état OFF sans souffrir de phénomènes dégradation, ainsi l'augmentation de la zone d'opération de sécurité (SOA) induction statique peuvent être collectées directement ou peut être amplifié par la structure interne de l'appareil pour obtenir un courant externe commandé.[29]

II.12.Comparaison entre BMFET et BJT

Le BMFET fonctionne beaucoup mieux quand le transistor est équivalent électriquement à une jonction bipolaire (BJT) .Le BJT et BMFET atteindre une capacité de commutation très différent. En particulier, le courant de collecteur BJT maximale admissible est inférieur au courant de drain BMFET. Cela a été démontré avec différentes mesures. Dans la Fig .II.12. A été montré que l'évolution dans le temps du collecteur (drain) et la base (grille) des tensions de la sous appareils de test animés par la même impulsion, les deux dispositifs sont passés de

la coupure de la saturation mais avec un courant de drain différentes. En fait, l'électrique externe Bien que les deux appareils ont été polarisés à la même tension, le BJT n'est pas en mesure de livrer un courant égal à celui du BMFET, le collecteur conduisant ainsi à une plus petite valeur possible de l'énergie de commutation électrique. En outre, le temps de descente BMFET est cinq fois plus petits que BJT de, et le temps de montée BMFET est proche de la moitié des temps de montée du BJT.[31]

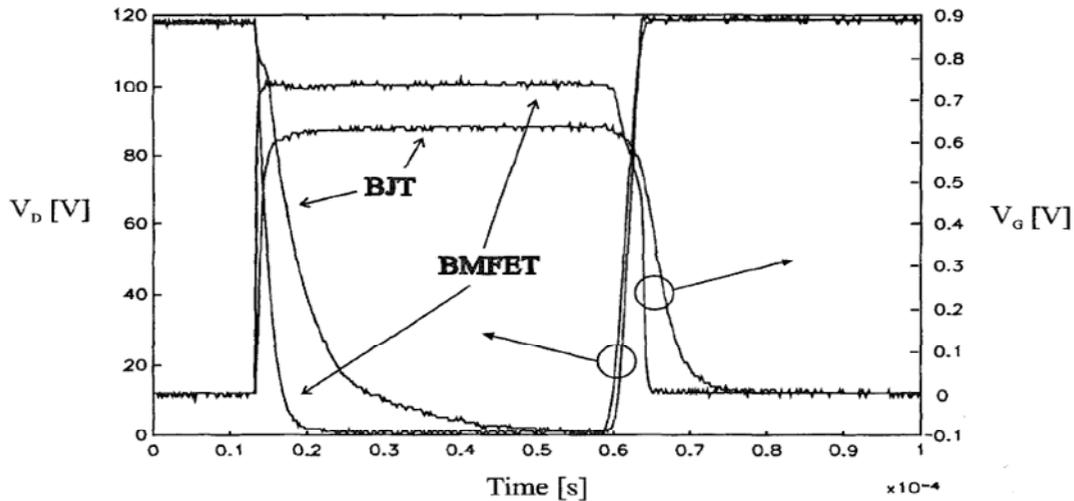


Figure II.12. Comparaison entre le drain et le collecteur et la grille et la tension de base de BMFET et BJT commutation. Le courant maximum de drain a été limitée à 0,5 A tandis que le courant de collecteur à 0,05 A avec la puissance du laser égale à 25 mW.[31]

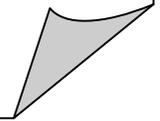
II.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné quelque notion de base sur l'un des deux transistors plus connus et utilisé actuellement. Nous avons parlé donc successivement les transistors BJT et JFET. D'autre part nous avons parlé sur le nouvel dispositif BMFET.

Le transistor bipolaire sont constitués de trois bornes : la base, l'émetteur et le collecteur (qui sont l'équivalent pour les FET de : la grille, la source et le drain). Le transistor BMFET est formé du deux transistor, le premier est le bipolaire qu'il formé de la jonction $P^+ N^+ P^+$ d'un côté, et du transistor à effet de champ à Canal N d'autres part.

CHAPITRE III

Généralité sur le logiciel de la simulation SILVACO



III.1 Introduction

Durant les dernières années et vu les coûts élevés de l'expérimentation (méthodes d'élaboration et technique de fabrication des composants électroniques), les chercheurs se sont orientés vers la simulation..

L'étude de transistors BMFET à l'aide d'un simulateur consiste à comprendre le comportement de ces dispositifs en fonction des paramètres.

Les simulateurs TCAD (Technologie Computer-Aided Design) permettent la modélisation du comportement physique et électrique d'un composant électronique, dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, et ainsi de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Les simulateurs existants sur le marché (SILVACO, PC1D, SCAPS, ISE TCAD et SYMBOLE..).

Dans ce chapitre, nous allons présenter le logiciel de simulation TCAD-SILVACO, son principe de fonctionnement, et ces modules de simulation : ATHENA pour la simulation des processus technologiques, et ATLAS pour la simulation du comportement électrique des composants, en expliquant les étapes suivies pour simuler notre structure objet pour visualiser les résultats des caractéristiques.

III.2. Présentation du logiciel TCAT-SOLVACO

Le logiciel TCAT-SOLVACO est un ensemble d'outils permettant la simulation physique des dispositifs et des systèmes électroniques. L'outil de calcul de ce logiciel résout des équations différentielles issues de la physique du composant comme celles de la diffusion ou de transport pour des géométries discrètes. Deux logiciels principaux composent généralement cet ensemble d'outils dédiés à la simulation composant, à savoir, le simulateur du procédé de fabrication (ATHINA) et le simulateur de composant (ATLAS). Le premier permet de simuler les étapes d'implantation d'ions de dépôt, de gravure, de recuit d'oxydation. Le second permet la simulation du comportement électrique d'un composant créé comme par exemple une diode ou un transistor[32].

Le développement de SILVACO, les ventes et les équipements, de soutien sont stratégiquement localisés dans le monde entier pour soutenir la clientèle, une majeure partie du modèle des affaires de SILVACO se fonde sur la capacité de la compagnie à fournir des ingénieurs technico-

commerciaux bien formé et expérimentés pour le support à la clientèle sur place dans toutes les régions principales de fabrications de semi-conducteur[33] .

Historiquement la compagnie a été fondée en 1984 par Dr. Ivan Presic pour répondre aux besoins des designers de circuits intégrés (IC,integrated circuits) analogique pour des modèles SPICE (Simulation Program With Integrated Circuit Emphasis) de plus en plus précises et linéaires. Sous SILVACO l'ensemble des outils de simulation et des outils interactifs permettant la conception et l'analyse de le plupart des dispositifs semi-conducteur s'appelle VWF(Virtual Wafer Fab[34] les composant de base VWF sont :

III.2.1.Les outils de simulation (VWF core Tools) :

Ces outils simulent soit leurs processus de fabrication ou soit leurs comportements électrique.les outils de simulation sont Athéna, Atlas et SSuprem3.

III.2.2.Les outils interactifs (VWF interactive Tools) :

Ces outils sont désignes pour être utilises en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée. En, étant base 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 utilises soit en relation avec un ensemble de fichiers, ou comme des composants intègres dans l'environnant<< VWF automation Tools>>

III.2.3.Les outils d'automatisation (VWF automation tools) :

Ces outils permettent a l'utilisateur d'exécuter sur une grande échelle des études expérimentales pour créer des résultats pour l'analyse statique suivante. Ces outils automatiques se servent de la technologie de base de données repartie et des méthodes de logiciels de transmissions d'interprocessus.

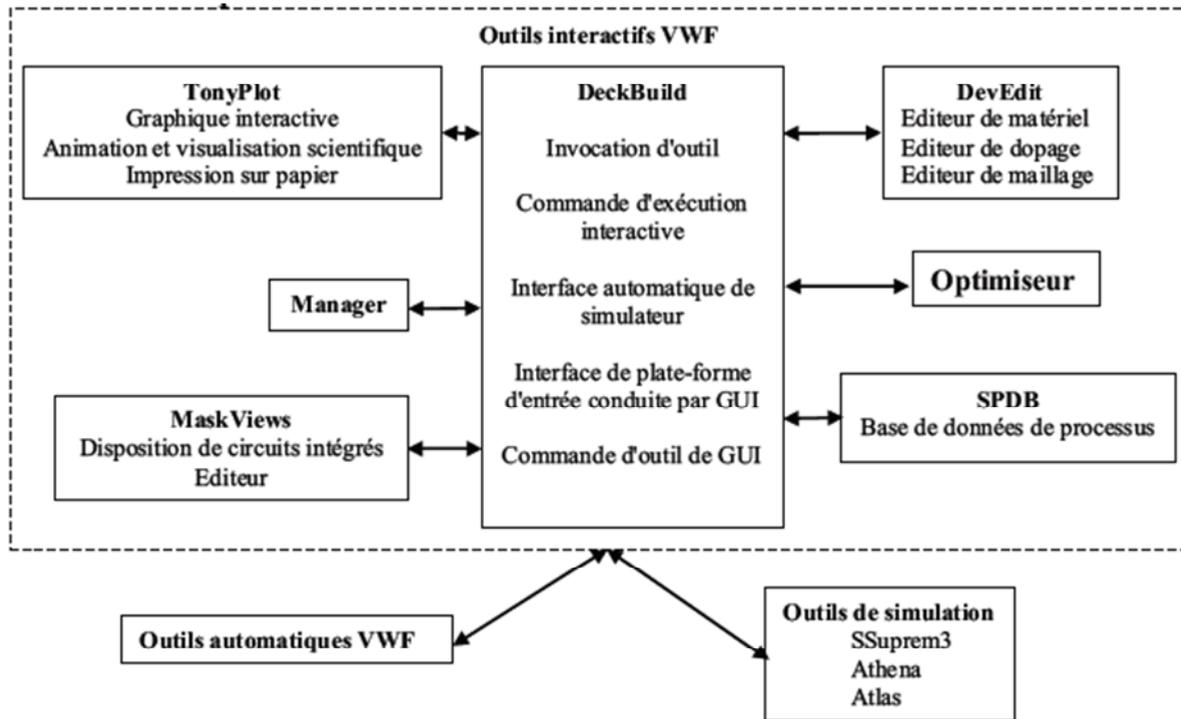
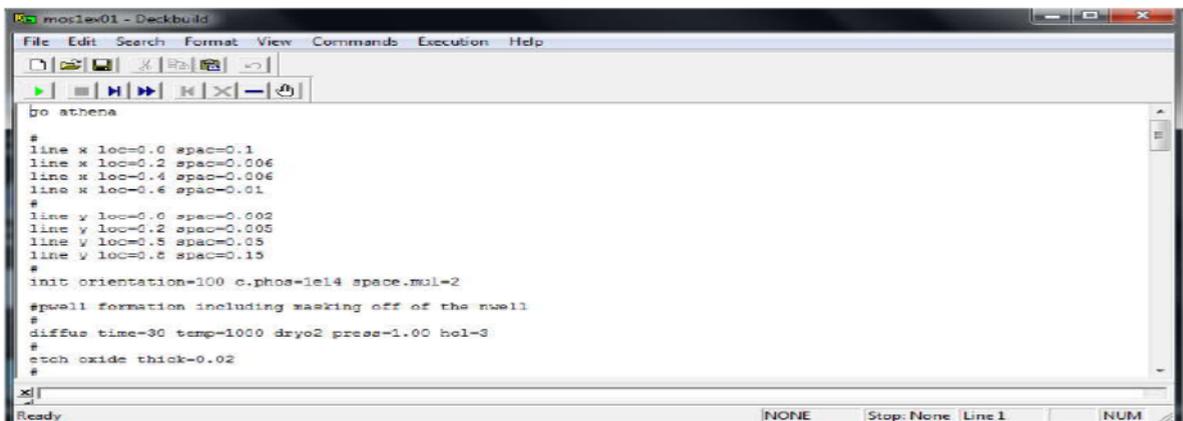


Figure III.1. Organigramme de la structure VWF.[35]

Parmi les outils interactifs VWF on a :

Tony plot : C’est l’environnement où sont visualisés les résultats des simulations. Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l’analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil de dopage, et caractéristiques électriques). Selon le programme de simulation, TONYPLOT peut donner des caractéristiques de sortie en une dimension (1D), deux dimensions (2D), ou trois dimensions (3D).

DeckBuild : C’est l’environnement où est défini le programme de simulation à travers des commandes spécifiques. De multiples simulateurs considérés comme des entrées peuvent être utilisés avec DECKBUILD : ATHENA, ATLAS, SSUPREM3, etc. L’affichage des résultats de simulation tels que les paramètres technologiques (profondeur de jonction, concentration des porteurs) et même les paramètres électriques (tension de seuil, courant, etc.) est effectué à l’aide d’une fenêtre d’information (output Windows).



DevEdit : C'éditeur de structure et outil de maillage permettant de générer ou de modifier la structure du dispositif à simuler. DevEdit peut être contrôlé par des lignes de commande ou par un écran graphique interactif.

ATLAS : simulateur 2D ou 3D de dispositifs semi-conducteur qui permet d'obtenir leurs caractéristiques électriques (statiques ou dynamiques).

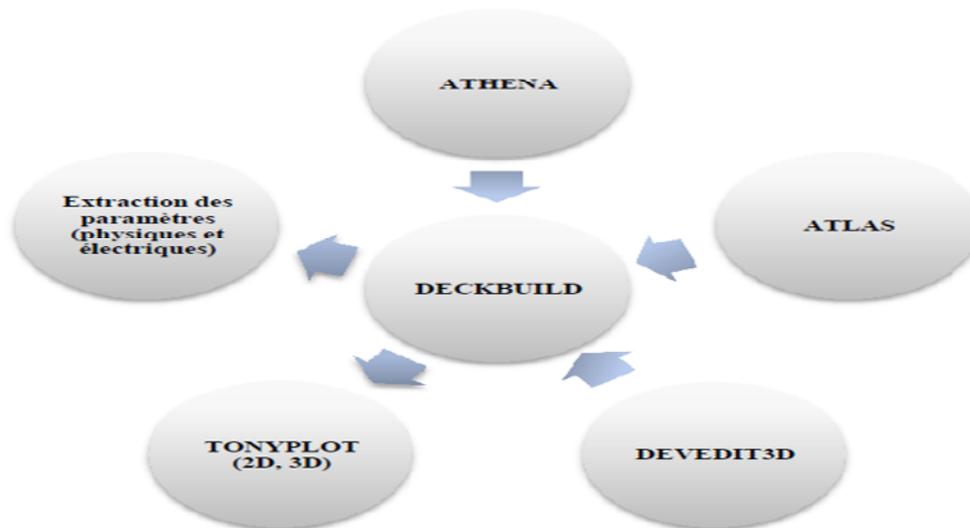


Figure.III.2.Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD-SILVACO.[36]

Le projet réalise dans le cadre de ce travail de thèse été basé principalement sur les interfaces graphiques <<DevEdit>> et <<DeckBuild>> et sur l'outil de simulation par éléments finis <<Atlas>>. La structure créée sous DevEdit implique la définition des couches (dimensions, type de matériel (métal, semi-conducteur), si c'est le cas, le type de dopant et la forme du dopage (uniforme, gaussien, etc.) ainsi que le maillage (avec des pas fixes, adaptable d'une couche à l'autre et plus ou moins raffiné)). La structure ainsi créée est à travers DeckBuild importée sous Atlas . Mais Atlas met aussi à notre disposition un outil propre de définition de la structure qui simplifie beaucoup le travail du programmeur. Une difficulté rencontrée a été le fait que l'importation de la structure créée sous DevEdit n'est pas tout le temps parfaite, Atlas a une façon d'interpréter le maillage qui est légèrement différente. DevEdit a l'avantage de nous aider didactiquement et graphiquement pour réaliser nos structures en créant en final le code à exporter. Enfin une fois

la simulation effectuée sous Atlas, la visualisation des résultats se fait via le logiciel Tony-Plot. Par la suite nous allons développer la présentation de l'outil Atlas que nous avons utilisé principalement pour effectuer la simulation de notre structure.

III.3 Présentation ATLAS :

Atlas est un simulateur 2D et 3D des dispositifs basés sur la physique de semi-conducteurs. Il prédit le comportement électrique des structures semi-conductrices spécifiées et fournit des aperçus de mécanismes physiques internes associés au fonctionnement des dispositifs. ATLAS peut être utilisé autonome ou comme un outil noyau dans le milieu de simulation VWF de SILVACO. Dans le but de prévoir l'impact des variables du processus sur le comportement du circuit, la simulation du dispositif joint la simulation du processus et l'extraction du modèle SPICE.

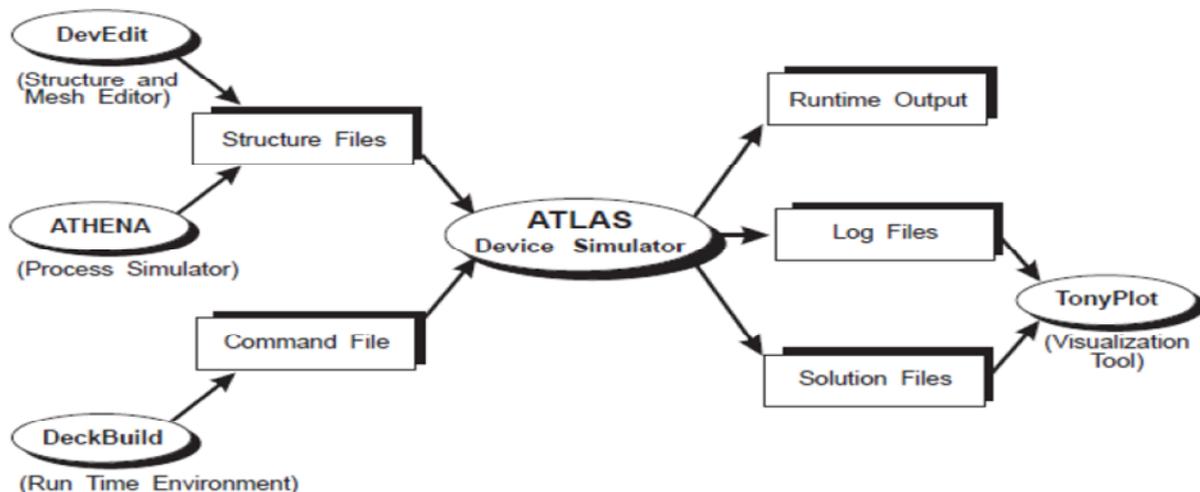


Figure.III.3.Entrées et sorties du logiciel Atlas.[36]

Dans le schéma de la figure (III.3) nous voyons les types d'informations qui circulent en entrée et en sortie d'ATLAS. La plupart des simulations réalisées par ATLAS utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier fichier est un fichier script contenant les commandes pour qu'ATLAS s'exécute (représente par Fichier de commande). Le second fichier est un fichier de structure qui définit la structure qui va être simulée. A la sortie d'ATLAS, nous avons trois types de fichiers. Le premier de ces fichiers est la sortie "Runtime" qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. Le deuxième type de fichier est le fichier "log" qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (c'est le fichier du comportement électrique). Le troisième fichier de sortie est le Fichier de solution, ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des

variables solutions dans le dispositif en un point donné (c'est le fichier physique, il contient la structure dans un état particulier). Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation.

III.4 Logique de programmation :

Après la présentation du logiciel TCAD-SILVACO, sa composition interne et le fonctionnement d'ATLAS nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation d'ATLAS. Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement figure (III.4). Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte. Par exemple, si les paramètres ou les modèles de matériaux ne sont pas placés dans l'ordre approprié, le simulateur ne les prend pas en considération [36].

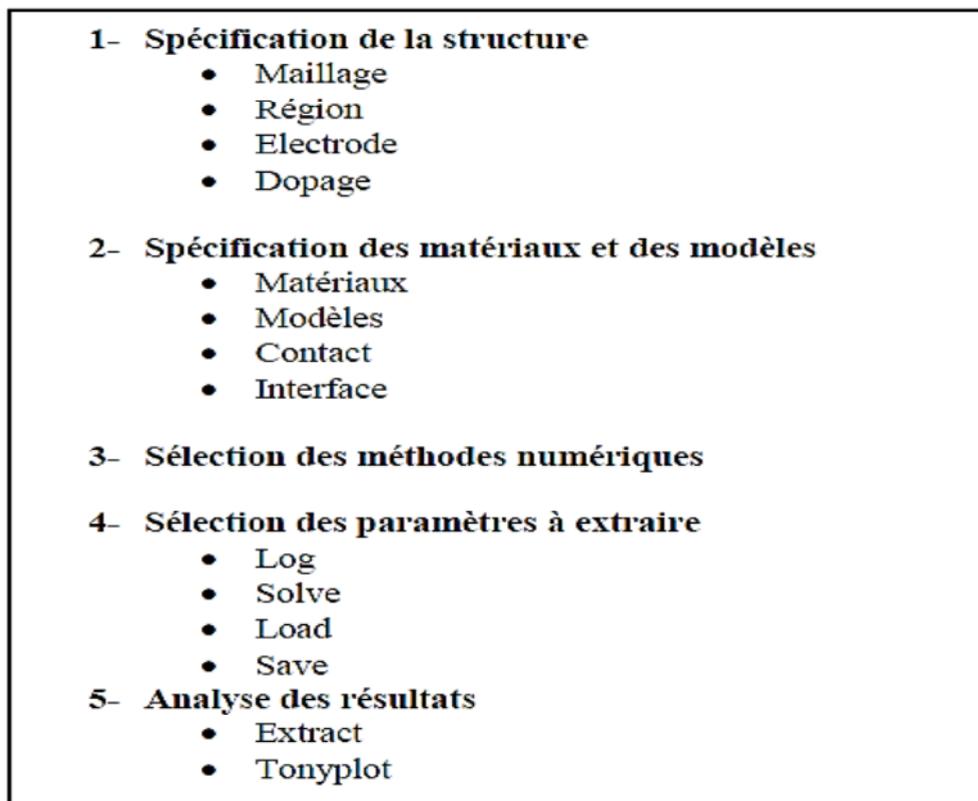


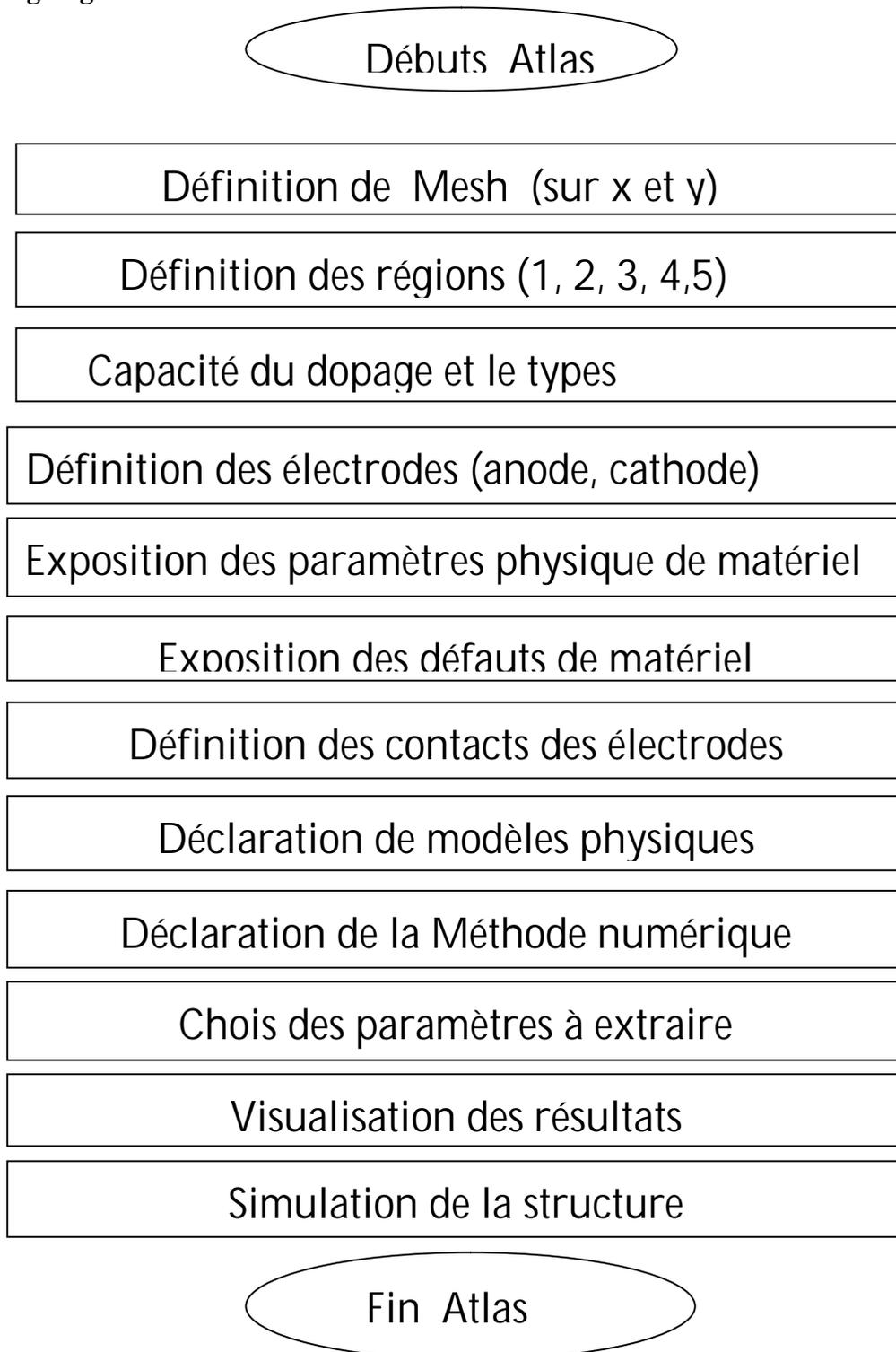
Figure III.4. Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas (les commandes fondamentales afférentes)[37].

Les commandes fondamentales sont :

- **MESH** : cette commande génère un maillage ou lit un maillage qui a été défini auparavant.
- **REGION** : c'est une instruction qui définit une région dans une structure.
- **ELECTRODE** : indique l'endroit et le nom d'une électrode dans une structure.
- **DOPING** : indique le type et le profil de dopage.
- **MATERIAL** : associe des paramètres concernant les propriétés d'un matériau utilisé dans la simulation. Les paramètres spécifiés dans l'instruction MATERIAL sont par exemple : affinité de l'électron, énergie du gap, la fonction de la densité des états, les vitesses de saturation, les durées de vie des porteurs minoritaires, etc. Dans le simulateur ATLAS, il y'a des paramètres des matériaux définis par défaut pour les semi-conducteurs standard.
- **MODELS** : Cette instruction permet de faire appel aux modèles physiques existants dans le logiciel, nous pouvons citer comme exemples les modèles de recombinaison Shockley Read Hall (SRH), Auger et les modèles concernant les statistiques des porteurs de Boltzmann, Fermi, etc.
- **CONTACT** : indique le nom d'un contact : anode, cathode, drain, etc.
- **INTERFACE** : cette instruction spécifie les paramètres situés à l'interface semi-conducteur/isolant, comme exemple, la vitesse de recombinaison en surface et la densité de charge à l'interface.
- **METHOD** : permet de faire le choix entre les différentes méthodes numériques à utiliser dans la résolution des équations de transport dans les semi-conducteurs. Les méthodes numériques qui peuvent être spécifiées par cette instruction incluent des méthodes telles que celles de Gummel et de Newton.
- **LOG** : cette instruction est employée pour stocker les caractéristiques d'un dispositif calculé par ATLAS.
 - **SOLVE** : cette instruction dans ATLAS permet de calculer une solution I/V pour une ou plusieurs tensions de polarisation.
 - **LOAD** : charge des solutions précédemment calculées pour être utilisées en tant que conditions initiales à d'autres tensions de polarisation.
 - **SAVE** : elle permet de sauvegarder dans un fichier toutes les informations concernant un nœud de la structure.
 - **EXTRACT** : cette commande est utilisée pour extraire des valeurs de paramètres bien précis du fichier log et du fichier solution.

- **TONYPLOT** : elle permet de présenter les solutions trouvées pendant la simulation sous forme de graphes.

III.5.Organigramme de simulation :



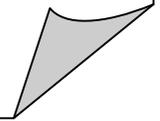
III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la signification et le principe de fonctionnement, le module de simulation et ATLAS, l'environnement où sont définis le programme de simulation (DECKBUILD), et l'outil de visualisation (TONYPLOT) du logiciel TCAD-SILVACO.

D'après l'étude simplifiée sur le logiciel TCAD-SILVACO on conclut que c'est un logiciel complet pour la simulation des comportements des composants semi-conducteurs. Puis, nous ferons une description des étapes de simulation de notre structure BMFET.

CHAPITRE IV

Résultats de Simulation et Interprétations



IV.1. Introduction

Plusieurs outils physiques de simulation de périphériques ont été conçus pour comprendre le dispositif opération. Il utilise des modèles physiques basés sur la théorie des semi-conducteurs de base et simule le comportement électrique des dispositifs semi-conducteurs. Dans ce chapitre, TCAD Silvaco simulateur utilisée pour donner les courbe de caractéristique, et pour extraire des simulations complètes de dispositif BMFET à base 4H-SiC à comprendre l'influence de pièges structaux du matériau.

IV.2. Spécification de la structure

La spécification de la structure de ce dispositif est effectuée en définissant les régions, le maillage, les électrodes et le niveau de dopage.

IV.2.1. Définition des régions

C'est la première étape, il est exprimé par définie les limites des régions par des lignes horizontales et des lignes verticales dont le format de définition des régions est le suivant:

Region nombre = < integer > < material_type > / < position des paramètres >.

La figure (IV-1) montre les régions définie dans notre structure. Il y'a 5 régions, les limites de chaque région sont explicitement identifiés dans les axes x et y.

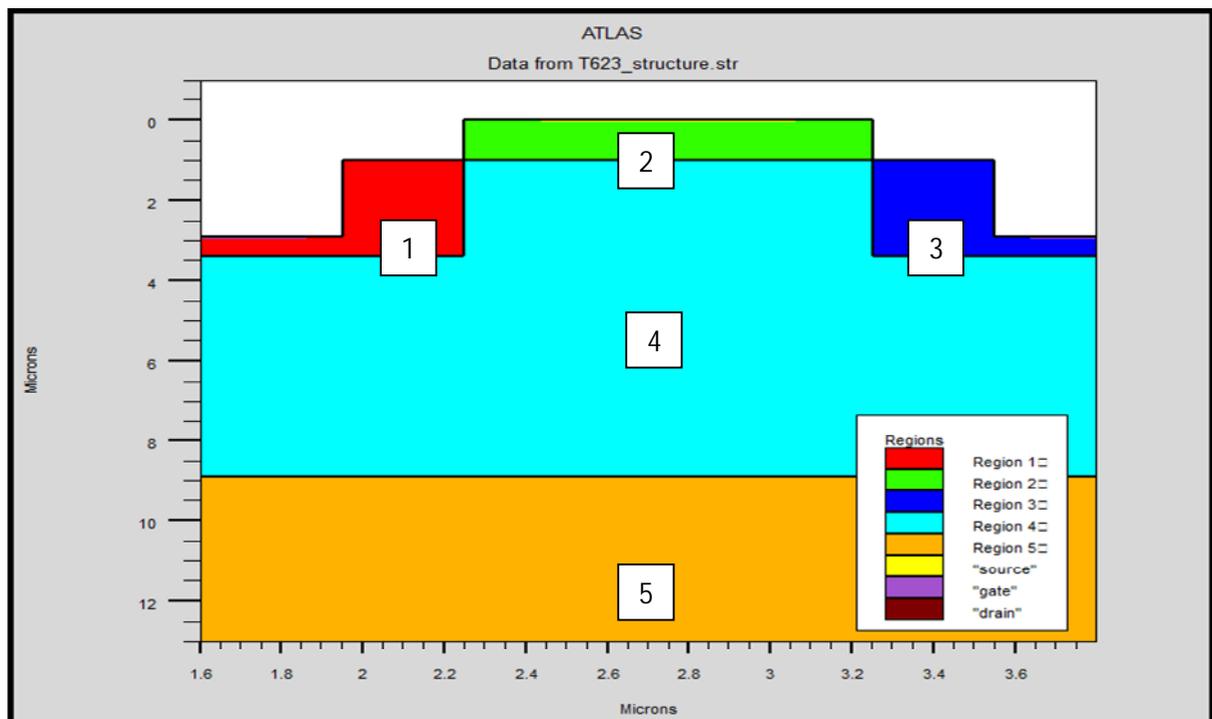


Figure IV.1. Définition de région.

D'après la **figure IV** on a : 1 et 3 Gate, 2-Source, 4-Canal, 5-Drain

IV.2.2 Le maillage

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Il est un ensemble des lignes distribuent horizontalement et verticalement. On a utilisé un maillage à deux dimensions. Le premier selon l'axe X et le deuxième selon Y. la syntaxe pour exprimer le maillage est la suivante :

Constr.mesh max.width= (integer) max.height= (integer)

Min.width= (integer) min.height= (integer)

La figure (IV-2) montre le maillage utilisé dans notre simulation.

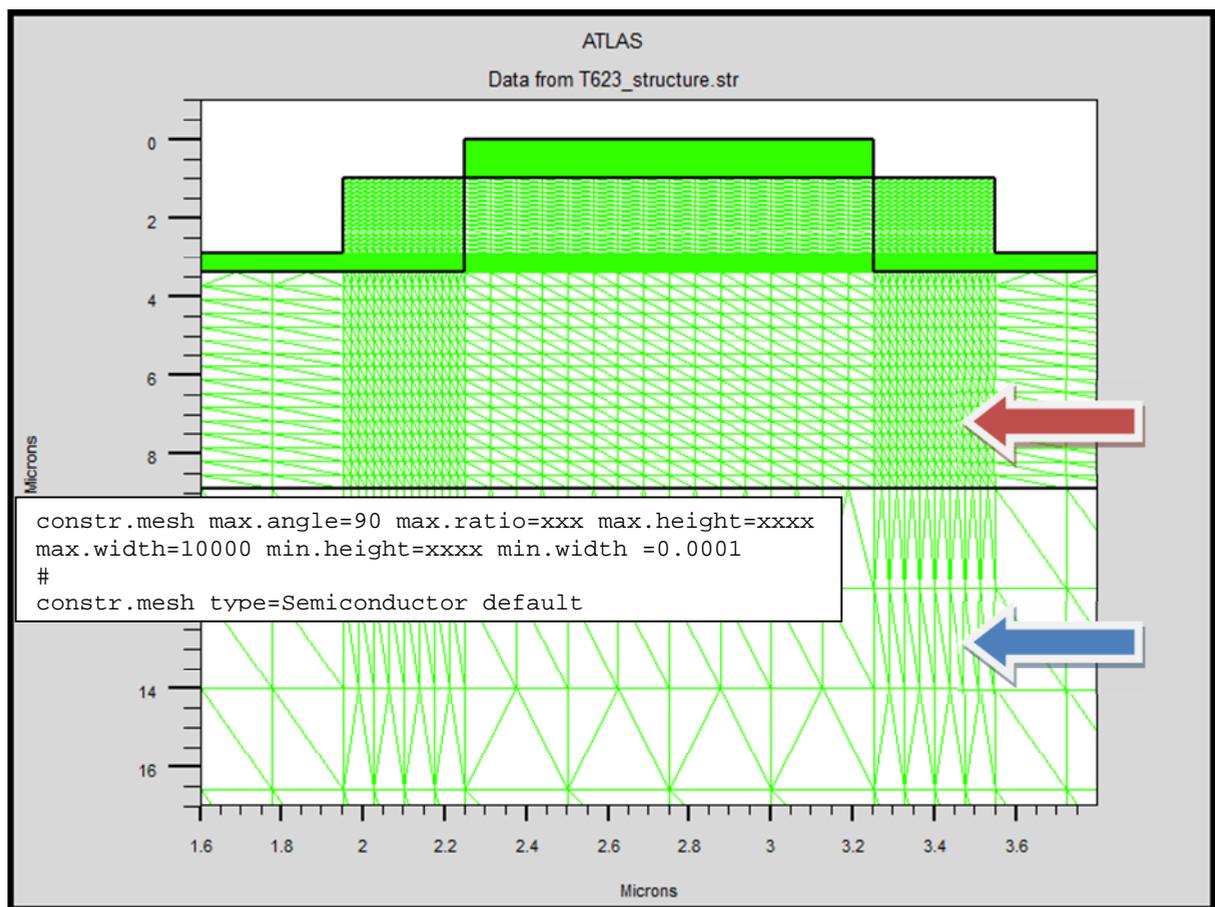


Figure IV.2. Maillage à deux dimensions.

La flèche rouge représente le maillage dense et très fins tel que les régions où il y a des jonctions, au contraire pour la flèche bleu c'est le maillage dans la région lui-même.

IV.2.3 Les contacts

« ATLAS » à une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Le contact détermine les attributions des électrodes.

ELECTRODE NAME = < nom de l'électrode > < position des paramètres >

Cette expression montre la déclaration « contact ». On prend un exemple de déclaration d'une contacte de notre dispositif :

ELECTRODE NAME = < nom de l'électrode > < position des paramètres >

Source x.min=2.4 x.max=3.1

(x.min=2.4 x.max=3.1) exprime la localisation du contacte dans la structure.

La figure (IV-5) montre la position des électrodes (contactes) par des valeurs de x et de y.

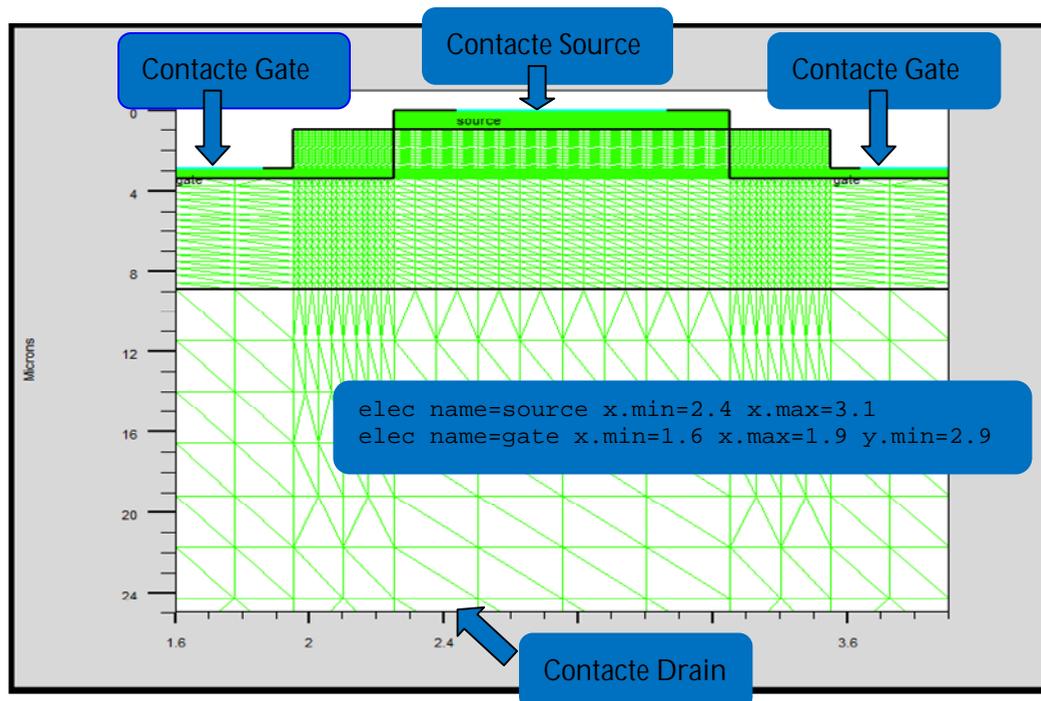


Figure IV.3. Définition des électrodes.

IV.2.4. Définition du 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 paramètres >

Dans la figure (IV-4), les types de dopage et les niveaux de dopage sont définis. Le dopage peut être de type N ou P. Le type de distribution peut être uniforme ou gaussienne.

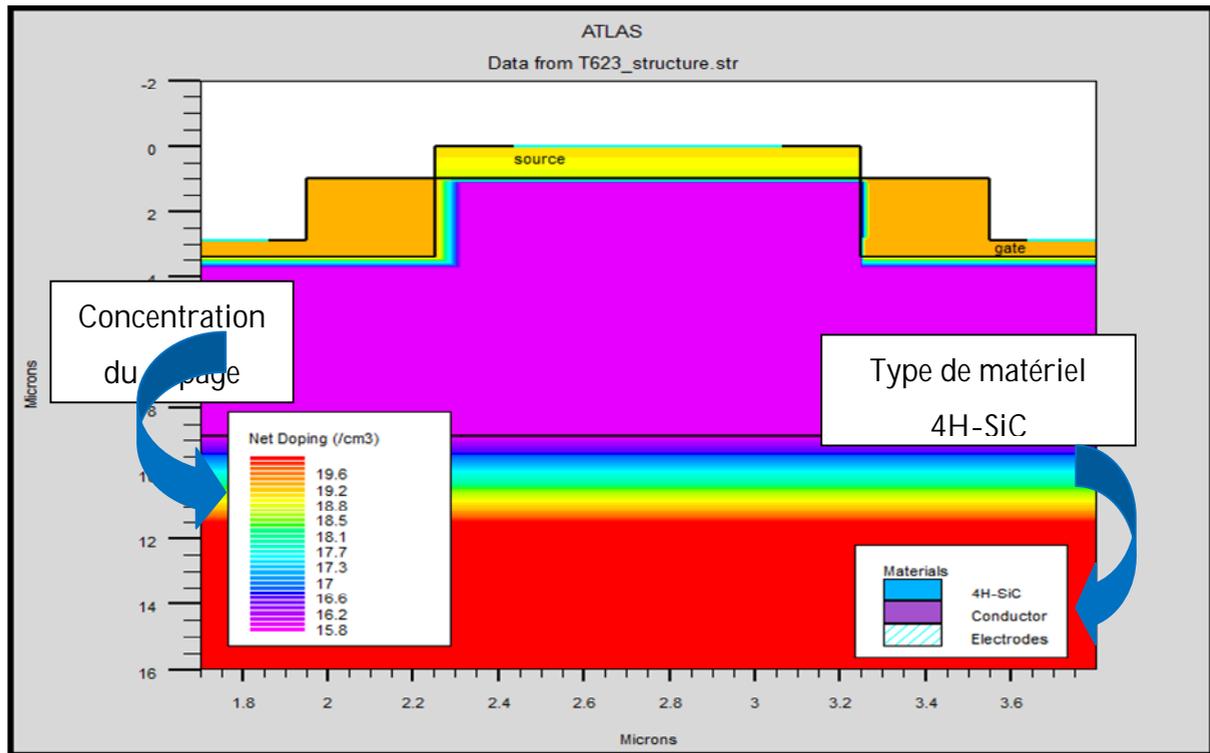


Figure IV.4. Définition de dopage.

Gate P^+ : $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Drain N^+ : $7 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Source N^+ : 10^{19} cm^{-3} . Canal N : $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

IV.3. Spécification des modèles et des matériaux

Après la définition de la structure, il faut spécifier les matériaux puis les modèles, elle se compose de deux parties : matériau, modèles.

IV.3.1. Les matériaux

Le format de la déclaration du matériau dans SILVACO est le suivant :

MATERIAL < localisation > < définition du matériau >

Dans cet exemple, « Matériel » apparaît deux fois, le premier est considéré comme la déclaration du matériau et la deuxième est considérée comme un paramètre de localisation.».

Plusieurs autres paramètres peuvent être définis par la déclaration « matériel »,

Par exemples de ces paramètres : la mobilité d'électrons (MUN) et la mobilité de trous (MUP), (TAUN0) et (TAUP0) qui sont les durées de vie d'électrons et de trous respectivement.

IV.3.2 Les modèles

Les modèles physiques sont classés en cinq catégories:

- Mobilités des porteurs de charges

- Mécanismes de génération-recombinaison.

- Les statistiques de transport

- Incomplète ionisation

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

MODEL< paramètres générales > / < paramètres du modèle >

IV.3.2.1. CONSRH

C'est le modèle Shockley-Read-Hall avec la dépendance de la concentration des porteurs, dont la formule est la suivante : cette excitation introduit une génération de paires électrons/trous. Ensuite, le système revient à l'état d'équilibre par le processus de recombinaison. La simulation par ATLAS prend en compte les recombinaisons SRH sur des niveaux profonds. Le taux de recombinaison est donné par l'expression suivante :

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\tau_p \left[n + n_{ie} \exp\left(\frac{E_{TRAP}}{kT_L}\right) \right] + \tau_n \left[p + n_{ie} \exp\left(\frac{-E_{TRAP}}{kT_L}\right) \right]} \quad (IV.1)$$

Où :

$$\tau_n = \frac{TAUN0}{AN + BN\left(\frac{Ntotal}{NSRHN}\right) + CN\left(\frac{Ntotal}{NSRHN}\right)^{EN}} \quad (IV.2)$$

$$\tau_p = \frac{TAUP0}{AP + BP\left(\frac{Ntotal}{NSRHP}\right) + CP\left(\frac{Ntotal}{NSRHP}\right)^{EP}} \quad (IV.3)$$

Où : AN, AP, BN, BP, NSRHP, EP, EN et ETRAP sont des paramètres de **fitting** dans le simulateur SILVACO C'est à dire des paramètres relatifs dépend des matériaux.(voir l'annexe)

IV.3.2.2 AUGER

Recombinaison Auger se fait par une transition de trois particules par lequel un transporteur mobile est capturé ou émis.[38]. Ce modèle est présenté par :

$$R_{Auger} = AUGN \left(pn^2 - nn_{ie}^2 \right) + AUGP \left(np^2 - pn_{ie}^2 \right) \quad (IV.4)$$

Ou AUGN, AUGP sont des paramètres de **fitting**. [38]

IV.3.2.3 BGN

Band Gap Narrowing ou effets de rétrécissement de la bande interdite, dans ATLAS ces derniers sont activés en spécifiant le paramètre BGN de la déclaration MODÈLES. Ces effets peuvent être décrits par une expression analytique concernant la variation de la bande interdite, E_g , à la concentration de dopage N. [38] L'expression utilisée dans ATLAS est :

$$\Delta E_g = BGN \cdot E_g \left\{ \ln \frac{N}{BGN \cdot N} + \left[\left(\ln \frac{N}{BGN \cdot N} \right)^2 + BGN \cdot C \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (IV.5)$$

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

IV.3.2.4. Incomplète ionisation

L'incomplète ionisation est modélisée par la formule suivante : [38]

$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + GCB \exp \left(\frac{\varepsilon_{Fn} - (E_C - EDB)}{kT_L} \right)} \quad (IV.6)$$

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + GVB \exp \left(\frac{E_V + EAB - \varepsilon_{Fp}}{kT_L} \right)} \quad (IV.7)$$

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

.Énergie de la bande interdite

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

$$E_g(T_L) = E_G(0) - \frac{EGALPHA(T_L^2)}{T_L - EGBETA} = EG300 + EGALPHA \left[\frac{300^2}{300 + EGBETA} - \frac{T_L^2}{T_L + EGBETA} \right] \quad (IV.8)$$

Les paramètres EG300, EGALPHA et EGBETA considérées comme des constantes dépendent du matériau à utiliser.(voir l'annexe)

IV.3.2.5.Mobilité

La mobilité est défini comme le coefficient de proportionnalité entre v_d et E en tant que:

$$v_d = \mu \cdot E \quad (IV.9)$$

La concentration de dopage augmente, la mobilité diminue en raison de la diffusion.

La dépendance de la mobilité avec la concentration de dopage et de la température est donnée par le modèle Caughey.

$$\mu_{n0} = MU1N \cdot CAUG \cdot \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{ALPHAN \cdot CAUG} \quad (IV.10)$$

$$+ \frac{MU2N \cdot CAUG \cdot \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{BETAN \cdot CAUG} - MU1N \cdot CAUG \cdot \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{ALPHAN \cdot CAUG}}{1 + \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{GAMMAN \cdot CAUG} \cdot \left(\frac{N}{NCRITN \cdot CAUG} \right)^{DELTAN \cdot CAUG}} \quad (IV.11)$$

$$\mu_{p0} = MU1P \cdot CAUG \cdot \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{ALPHAP \cdot CAUG} + \frac{MU2P \cdot CAUG \cdot \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{BETAP \cdot CAUG} - MU1P \cdot CAUG \cdot \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{ALPHAP \cdot CAUG}}{1 + \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{GAMMAP \cdot CAUG} \cdot \left(\frac{N}{NCRITP \cdot CAUG} \right)^{DELTAP \cdot CAUG}} \quad (IV.12)$$

Cette méthode est utilisé pour simuler la dépendance entre le dopage et la mobilité en SiC.[38]

IV.3.3.Piège mise en œuvre dans les modèles de recombinaison

Pour maintenir l'auto-cohérence, nous devons prendre en compte que les électrons sont émis ou capturés par le piège donneur et pièges accepteurs. Par conséquent, la concentration de porteurs n'est affectée. Ceci s'explique par la modification de la vitesse de recombinaison dans les équations de continuité de support.[39]

$$R = \sum_{\alpha=1}^l R_{D\alpha} + \sum_{\beta=1}^m R_{A\beta} \quad (\text{IV.13})$$

l est le nombre de pièges par les donneurs, m est le nombre de pièges accepteurs.

Pour les pièges de donateurs la fonction R est :

$$R_{D\alpha} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\text{TAUN} \left[p + \text{DEGEN} \cdot \text{FAC} n_{ie} \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT_L}\right) \right] + \text{TAUP} \left[n + \frac{1}{\text{DEGEN} \cdot \text{FAC}} n_{ie} \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT_L}\right) \right]} \quad (\text{IV.14})$$

Pour accepteur des pièges de la fonction R est:

$$R_{A\beta} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\text{TAUN} \left[p + \frac{1}{\text{DEGEN} \cdot \text{FAC}} n_{ie} \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT_L}\right) \right] + \text{TAUP} \left[n + \text{DEGEN} \cdot \text{FAC} n_{ie} \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT_L}\right) \right]} \quad (\text{IV.15})$$

Les durées de vie des électrons et de trous **TAUN** et **TAUP** sont liés aux sections support de capture signe et **SIGP** par les équations:

$$\text{TAUN} = \frac{1}{\text{SIGN} v_n \text{DENSITY}} \quad (\text{IV.16})$$

$$\text{TAUP} = \frac{1}{\text{SIGP} v_p \text{DENSITY}} \quad (\text{IV.17})$$

Les vitesses thermiques v_n et v_p sont calculées à partir des masses effectives d'électrons et de trous suivants :

$$v_n = \left(\frac{3kT}{m_n m_0} \right)^{1/2} \quad (\text{IV.18})$$

$$v_p = \left(\frac{3kT}{m_p m_0} \right)^{1/2} \quad (\text{IV.19})$$

Pour spécifier directement les masses efficaces, utilisez les paramètres **M.VTHN** et **M.VTHP** de la mention du matériel. Si **M.VTHN** ou **M.VTHP** ou les deux ne sont pas spécifiés, la densité d'états masse effective est extraite de la densité d'états (**Nc** ou **Nv**)

Par exemple dans le cas du silicium si **M.VTHN** ou **M.VTHP** ne sont pas spécifiées, les masses effectives sont calculées à partir de:[39]

$$m_n = 1.045 + 4.5 \times 10^{-4} T \quad (\text{IV.20})$$

$$m_p = 0.523 + 1.4 \times 10^{-3} T - 1.48 \times 10^{-6} T^2 \quad (\text{IV.21})$$

IV.3.3.1.La déclaration des défauts

La déclaration des défauts est activée par le paramètre TRAP. [39]

- Indiquez le type de pièges : donneur ou accepteur.
- Spécifiez le paramètre niveau d'énergie :**E.LEVEL**.
- Spécifiez la densité des centres des pièges : **DENSITÉ**.
- Indiquez le de facteur de dégénérescence : **DEGEN.FAC** .
- Spécifiez la section des captures **SIGN** et **SIGP**.

IV .4.Méthodes numérique de calcul

Après la précision du modèle de matériaux, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée. Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équations, trois types de techniques sont utilisées dans ATLAS -SILVACO méthode de Gummel, méthode de Newton et Méthode des blocs La méthode qu'on a utilisée dans « Silvaco-Atlas » est méthode de Newton .la méthode de Newton est la valeur par défaut de la dérive diffusion calculs dans ATLAS. Chaque itération de la méthode de Newton résout une version linéarisée de l'ensemble du système non linéaire algébrique, et chaque itération prend un temps relativement long.

IV .5. Spécification de Solution

La spécification des solutions est faite par les instructions suivantes :

Log, Solve, Load ET Save.

IV .5.1. Log

Log enregistre toutes les caractéristiques finales de simulation dans un fichier de données. N'importe quel type de données. Générées par la commande SOLVE et sauvé après la commande LOG.

```
LOG OUTFILE = BMFET.log
```

IV .5.2. SOLVE

L'instruction SOLVE suit l'instruction LOG. Elle effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

IV .5.3. LOAD et SAVE

L'instruction **LOAD** introduit, à partir d'un fichier existant, pour chaque point de Polarisation les solutions précédentes en tant que proposition initiale.

L'instruction **SAVE** permet l'enregistrement de toutes les informations obtenues pour un nœud dans un fichier de sortie.

IV .6. Analyse des résultats

Afin de terminé tous les étapes de la simulation il ne reste que les dernières étapes, c'est l'affichage graphiquement des résultats obtenus on utilisant « TONY-PLOT ».

Nous avons exploité aussi le logiciel « **Origin** » pour l'extraction des courbes.

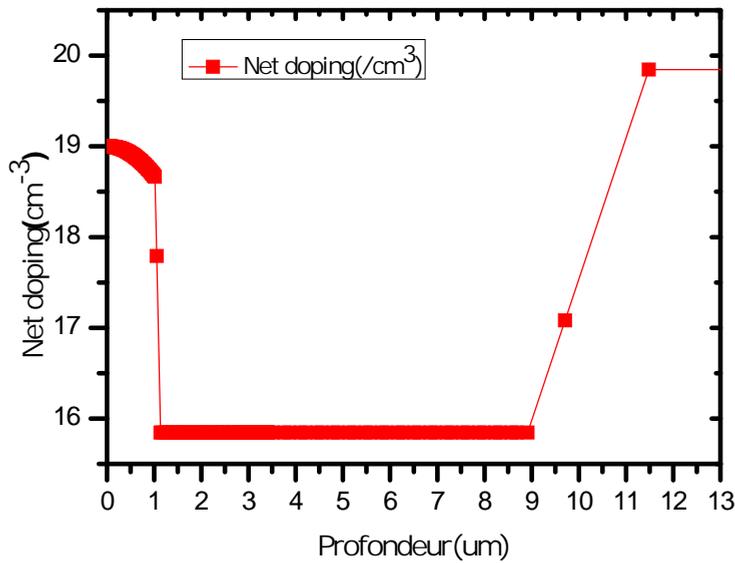


Figure. IV.5. Net doping pour une section vertical du 4H-SiC BMFET.

La figure IV.5. Représente le net doping à la température 630 K et $I_g = 10\text{A}/\text{cm}^2$, ce dernier est obtenu par l'option « Cutline » pour une coupe selon les coordonnées vertical (2.770, 12.355) selon l'axe Y.

- Caractéristique de sortie de la jonction Gate-Source

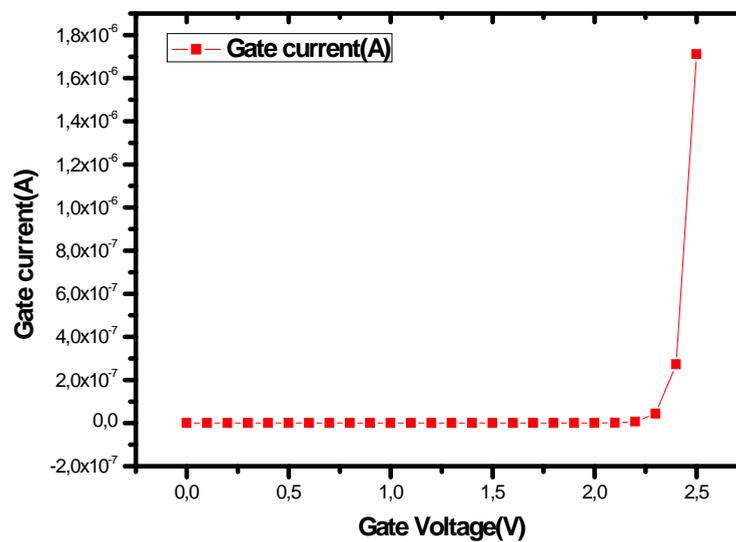


Figure IV.6. Caractéristique $I_{gate} - V_{gate}/source$.

La figure IV.6. Représente la caractéristique $I_g - V_{gs}$ de la jonction gate, source, cette dernière semble à la caractéristique d'une diode (jonction PN), nous avons cité cette figure pour indiquer la polarisation de cette jonction en directe.

IV.7 .Les résultats du caractéristique J_d/V_{ds} pour les défauts intrinsèques Z1/Z2 et EH6/7

Après avoir fait la simulation, on obtient les caractéristique $J_d - V_{ds}$ du transistor BMFET sans l'influence (impact) des défauts Z1/Z2 et EH6/7 sur ces caractéristiques.

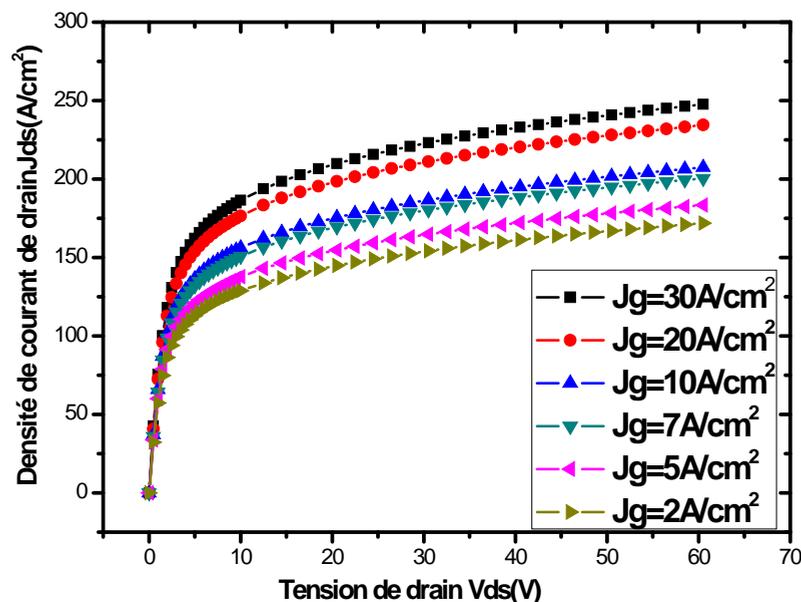


Figure IV.7. La caractéristique $J_d - V_{ds}$ du transistor BMFET pour température 630 K.

La figure (IV-7) représente la caractéristique $J_d - V_{ds}$ de BMFET à température $T=630\text{K}$.

IV .7.1. Influence des défauts sur la caractéristique Jd-Vds

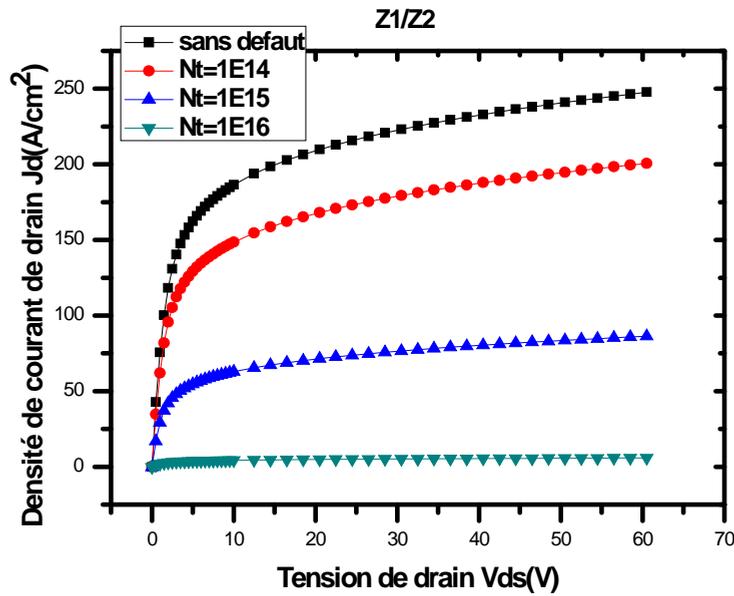


Figure IV.8. Influence des différentes densités des pièges sur la caractéristiques Jd-Vds du transistor BMFET

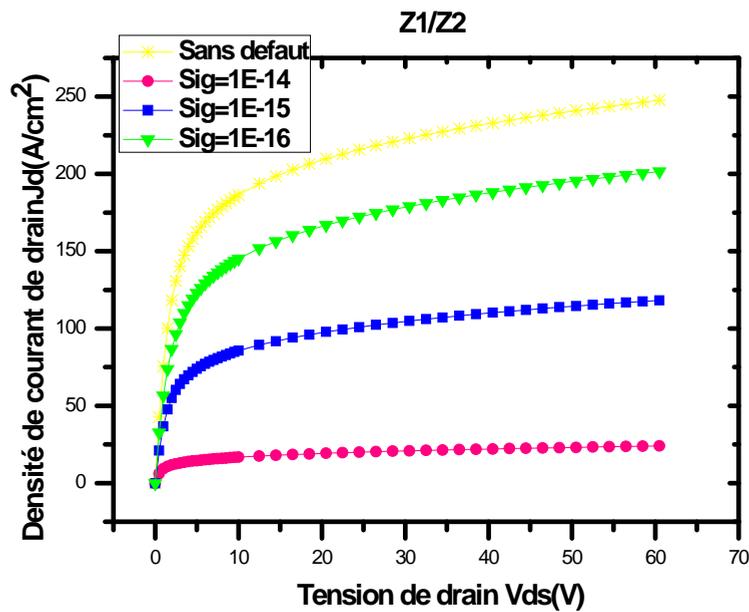


Figure IV.9. Influence la section de capture de pièges sur la caractéristiques Jd-Vds du transistor BMFET.

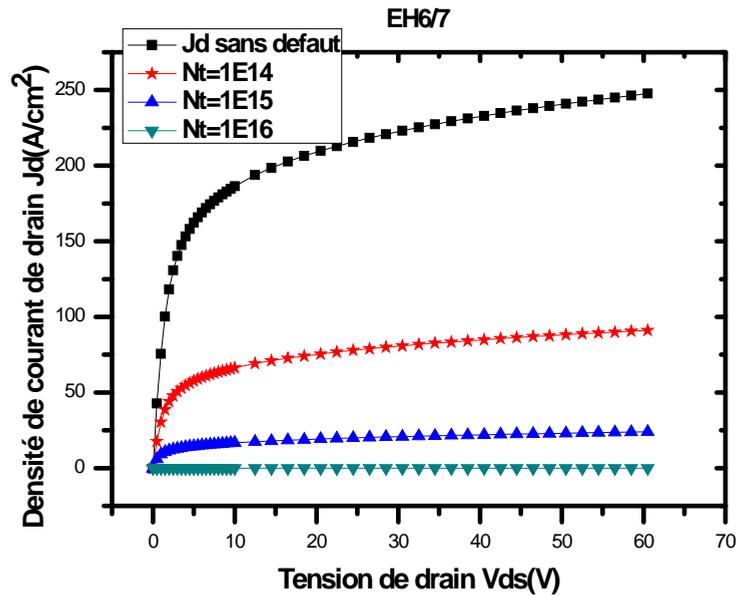


Figure IV.10. Influence des différentes densités des pièges sur la caractéristique J_d - V_{ds} du transistor BMFET.

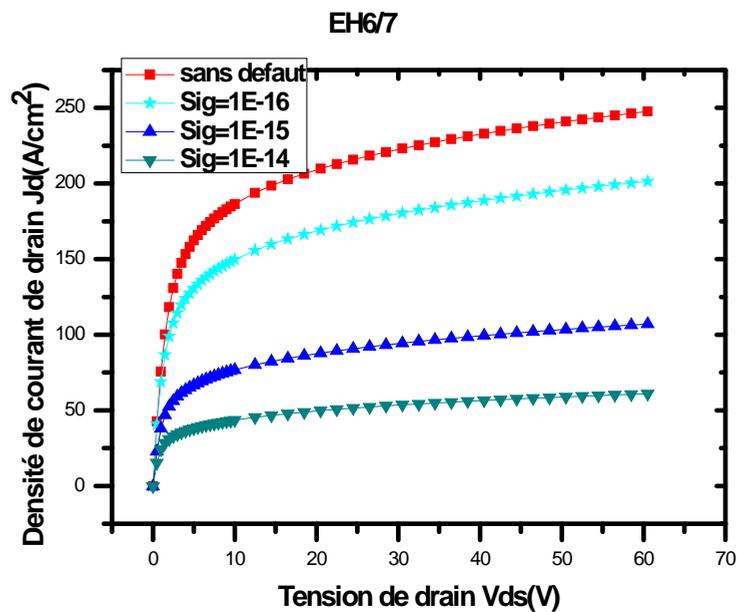


Figure IV.11. Influence de la section de capture de pièges sur la caractéristique J_d - V_{ds} du transistor BMFET.

D'après les figures IV.8, IV.9, IV.10, IV.11 on observe que la descente de densité du courant de drain est dépend avec l'augmentation de la densité de défaut du 4H-SiC et aussi avec l'augmentation de la section de capture.

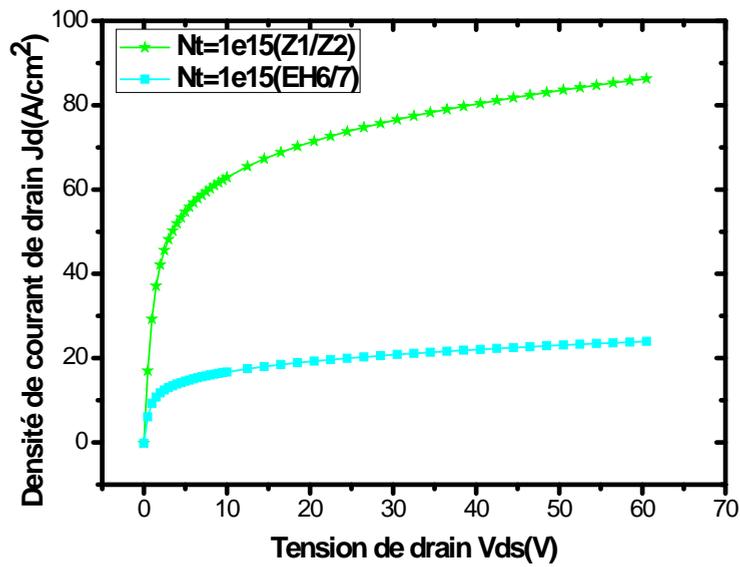


Figure IV.12. Influence la densité des pièges des différents défauts sur la caractéristiques Jd-Vds du transistor BMFET pour $J_g=30A/cm^2$.

IV .8.Influence les défauts sur le gain.

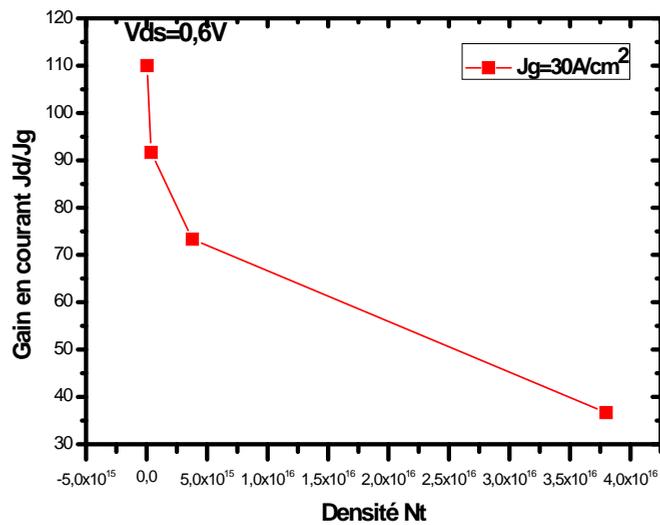


Figure IV.13. Influence la densité de défaut Z1/Z2 sur le gain pour $V_{ds}=0.6V$.

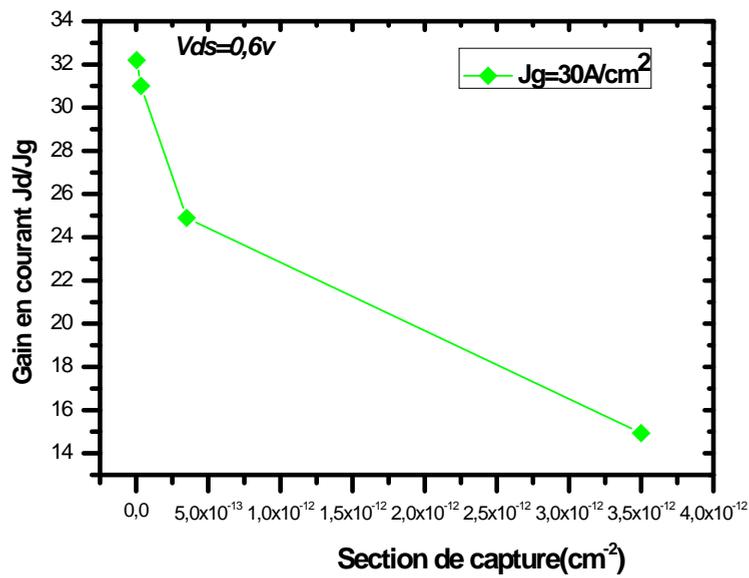


Figure IV.13. Influence la section de capture de défaut Z1/Z2 sur le gain pour Vds=0.6V

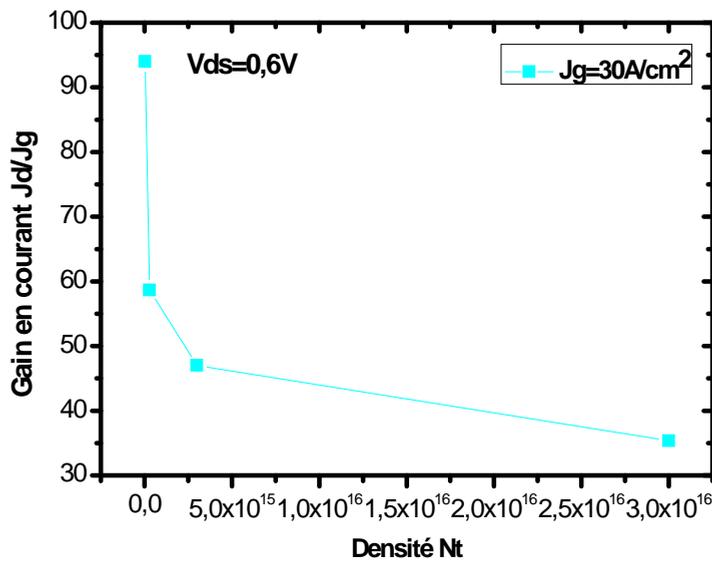


Figure IV.14. Influence la section de capture de défaut EH6/7 sur le gain pour Vds=0.6V.

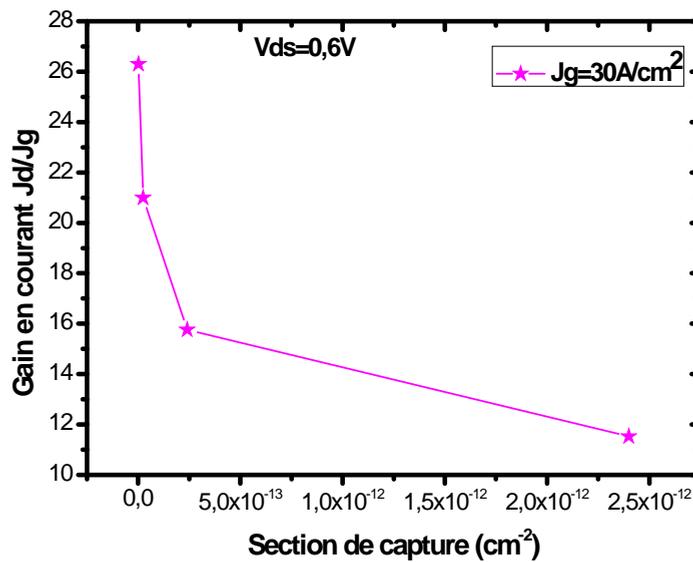


Figure IV.15. Influence la densité de défaut EH6/7 sur le gain pour $V_{ds}=0.6V$.

IV.9. Interprétation

D'après Les résultats des figures (IV.13, IV.14, IV.15, IV.16), on remarque que le gain de transistor est diminué en fonction de l'augmentation de la densité et la section de capture dans diffèrent défaut. Ces défauts ont également une influence négative sur les performances du dispositif. La concentration de pièges a également été observée comme un paramètre important qui contrôle la sortie du dispositif. D'une manière similaire, lorsque la densité de pièges est augmentée, une chute du courant le gain est due à une augmentation du taux de recombinaison.

IV.10. Conclusion

Dans cette partie, nous avons exploité le simulateur « SILVACO » pour faire l'étude du comportement et des phénomènes physique dans le transistor BMFET.

Premièrement, on a parlé la conception structurelle de BMFET par définitions leurs régions, leurs contacts et leur concentration du dopage.

Deuxièmes, on a situé les différents résultats obtenus, les propriétés physiques du transistor, et l'influence de différents défauts du matériau sur les caractéristiques de ce dispositif.

Conclusion Générale

L'objectif de cette étude était d'appuyer la simulation électrique de l'effet des défauts du transistor BMFET à base carbure de silicium avec logiciel TCAD Silvaco.

Le premier chapitre est une étude théorique sur nouveau matériau carbure de silicium et ces défauts ponctuels (intrinsèque), continu d'une définition sur le nouveau dispositif BMFET autant que transistor bipolaire et JFET, ensuite on a donné un esquisse sur le simulateur SILVACO.

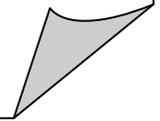
On a développé et concevoir une structure de transistor BMFET en tenant compte des contraintes physique et électrique du matériau 4H-SiC utilisé ainsi du transistor. Dans notre étude, la simulation a montré l'influence des défauts Z1/Z2 et EH6/7 celui le courant du drain diminue avec l'augmentation de la densité et la section de capture.

Les défauts de matériau peuvent également être introduits lors de la fabrication de BMFET. Le transporteur pièges peuvent influencer sur les caractéristiques générales ce dernier.

Dans le simulateur de BMFET, les défauts matériels peuvent être modélisés en introduisant des pièges dans le dispositif pour obtenir un aperçu du comportement de dispositif en présence de défauts (pièges). Les défauts intrinsèques un forte influence sur l'ensemble propriétés physique et électrique de BMFET.

Le gain en courant du dispositif est négativement affecté. La concentration de pièges et la section efficace de capture des pièges fortement affecter la sortie.

Bibliographie



Bibliographies

- [1] C. G. Hemmingsson, N. T. Son, A. Ellison, J. Zhang, and E. Janzen, *Physical Review B* 58, R10 119(1998).
- [2] W.R. L, Lambrecht, S.Limpijumnong.S.N.Rashkeev.B.Segall.Electronic Band Structure of SiC polytypes: A discussion of Theory Experiment.*Phys.Stat.Sol.B*.202.1997.
- [3] J.Lefevre : Etude des effets d'irradiation dans le polytype cubique du carbure de silicium par les techniques spectroscopique de photoluminescences et résonance paramagnétique électronique. Thèse de doctorat à l'Ecole Polytechnique, Palaiseau :2008 .
- [4] U.Lindefelt,H.Iwata, S.Oberg, and P.Briddon, "Theoretical calculation of staking faults energies in carbide",*Materials Science Forum*, vols.389-393 pp439-442
- [5] R.OkOjie, M.Xhang, P.Pirouz, S.Tumakha, G.Jessen and L.Brillson, "4H- to 3C-SiC polytypic transformation during oxidation".*Materials Science Forum*, vols,389-389,pp451-455,2002
- [6] A. A. Lebedev, "Deep level centers in silicon carbide: A review," *Semiconductors*, vol.33, n°. 2, p. 107-130, 1999
- [7] C. Raynaud, "Propriétés physiques et électroniques du carbure de silicium (SiC),"*Techniques de l'ingénieur*, 10-Mai-2007.
- [8] U. Lindefelt, "Doping-induced band edge displacements and band gap narrowing in 3C-, 4H-, 6H-SiC, and Si," *Journal of Applied Physics*, vol. 84, n°. 5, p. 2628, 1998.
- [9] Rapport, les céramiques Industrielles et développement potentiel dans les Alpes Marritimes.etude réalisé par CARMA, Octobre 1999.
- [10] T. Kimoto, K. Hashimoto, H. Matsunami. *Japanese Journal of Applied Physics*.2003;42:7294-7295.

Bibliographies

- [11] C. Hemmingsson, N. T. Son, O. Kordina, et al. *Journal of Applied Physics*.1997;81:6155.
- [12] L. Storasta, J. P. Bergman, E. Janzén, A. Henry. *Journal of Applied Physics*.2004;96:4909.
- [13] N. T. Son, X. T. Trinh, L. S. Løvlie, et al. *To be published*. 2012.
- [14] J. Wong-Leung, B. G. Svensson. *Applied Physics Letters*. 2008; 92:142105.
- [15] T. Hiyoshi, T. Kimoto. *Applied Physics Express*. 2009;2:41101.
- [16] Tak H. Ning, -2491, Nov.2001“History and future perspective of the modern silicon bipolar transistor”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 48, Issue 11, p. 2485
- [17] Renuka P. Jindal "Compact Noise Models for MOSFETs" IEEE Transactions On Electron Devices, Vol. 53, NO. 9, SEPTEMBER 2006.
- [18] Caruso A,Spirito P and Vital G 1979 New semiconductor active device : the conductivity controlled transistor Electron lett. 15 267-8.
- [19] Semiconductor Device Physics and Design, UMESH K. MISHRA University of California, Santa Barbara, CA, USA and JASPRIT SINGH The University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA
- [20] H. Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", 2ème Edition, Masson, 1990.
- [21] https://fr.wikipedia.org/wiki/Junction_Field_Effect_Transistor
- [23] http://www.allaboutcircuits.com/vol_3/chpt_2/9.html
- [24] Henry MATHIEU " physique des semi-conducteurs et des composants électroniques" Edition MASSON (2004).
- [25] Rachid KHLIL "hétérostructures AlGaAs/GaAs par des mesures courant–tension "Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2005.

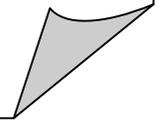
Bibliographies

- [26] Semiconductor device physics and design by UMESH K. MISHRA University of California, Santa Barbara, CA, USA, A C.I.P. Catalogue record for this book is available from the Library of Congress.
- [27] <http://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/unip/unip621.htm>
- [28] A. Caruso, P. Spirito, G. F. Vitale, G. Busatto, G. Ferla, and S. Musumeci, "Performance analysis of a bipolar mode FET (BMFET) with normally off characteristics," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 3, pp. 157-163, 1988.
- [29] G. Busatto, G. Vitale, G. Ferla, A. Galluzzo, and M. Melito, "Comparative analysis of power bipolar devices," in *Proc. IEEE PESC Cont*,
- [30] Schweeger G.Cocorullo G.Della Corte F .Hartnagel H L ,Vitale G and Spirito P 1991 GaAs vertical JFET operated in the bioalar mode (GaAs BMFET) *Electron Lett.*27 1097-8
- [31] Ibh TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL I I , NO 6, Novemvre 1996 755 The Bipolar Mode Field Effect Transistor(BMFET) as an Optically Controlled Switch: Numerical and Experimental Results.
- [32] http://www.Silvaco.com/products/device_simulation/atlas.html. Mai 2012.
- [33] Alan Hastings, "The Art of Analog Layout", pp.194, Prentice-Hall Inc. New Jersey, 2001
- [34] W. Mönch, 125 years of metal-semiconductor contacts: Where do we stand?, in *Advances in Solid State Physics*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Vol. 39 (1999), pp. 13-24
- [35] Thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole polytechnique, Conception et modélisation de pixels de photo détection Photodiodes PIN en silicium amorphe en vue de leurs Utilisations comme détecteurs de particules, Soutenue le 12 Juin 2008.

Bibliographies

- [36] Mémoire de Master, Etude de lasers à base des composés semi-conducteurs (InP, GaAs, GaP).Dehimi Said ,2011
- [37] K.E. Bohlin, *Generalized Norde plot including determination of the ideality factor*, Journal of Applied Physics, Vol. 60, No. 3 (1986), pp. 1223-1224
- [38] ATLAS User's Manual DEVICE SIMULATION SOFTWARE, SILVACO, Inc. 4701 Patrick Henry Drive, Bldg. 1 April 20, 2010 Santa Clara, CA 95054.
- [39] ATLAS User's Manual DEVICE SIMULATION SOFTWARE, SILVACO Shockley W., and W.T. Read, "Statistics of the Recombination of Holes and Electrons", *Phys. Rev.* 87 (1952): 835-842.

Annexe



Annexe

Tableaux des paramètres de « fitting » utilisés dans la simulation.

- Les tableaux suivants sont tirés à partir de manuel de logiciel SILVACO.

Table B-27b. Materials Defaults for binary compound semiconductors

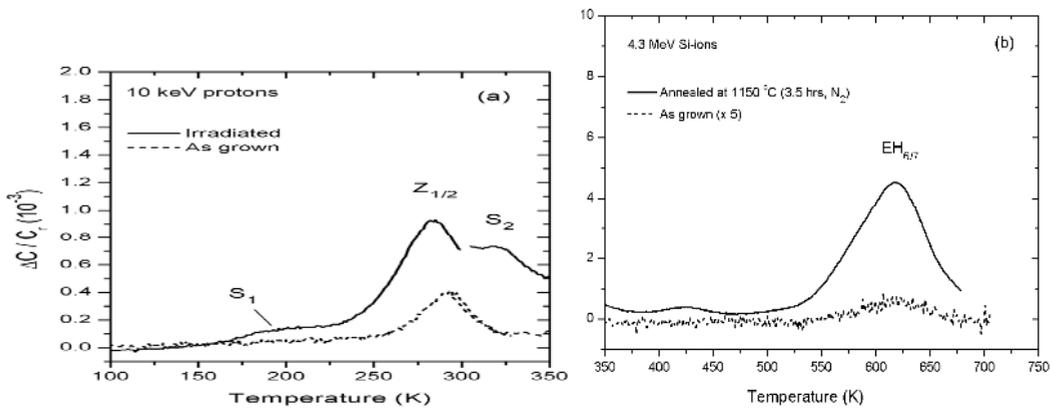
Material	6H-SiC	4H-SiC	3C-SiC	InSb	HgS	InAs	HgSe	AIP
Epsilon	9.66	9.7	9.72	18	0	14.6	25	9.8
Eg (eV)	2.9	3.26	2.2	0.17	2.5	0.35	0	2.43
Chi (eV)	0		0	4.59	0	4.13	0	0
Nc (per cc)	7.68E+18	1.60E+19	6.59E+18	4.16E+16	1	9.33E+16	1	1
Nv (per cc)	4.76E+18	3.30E+19	1.68E+18	6.35E+18	1	8.12E+18	1	1
ni (per cc)	2.63E-06	1.03E-08	1.1	1.92E+16	9.99E-22	9.99E+14	1	3.87E-21
Gc	2		2	2	2	2	2	2
Gv	4		4	4	4	4	4	4
Ed (eV)	0.044		0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044
Ea (eV)	0.045		0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
Lifetime (el)	1		1	1	1	1	1	1
Lifetime (ho)	1		1	1	1	1	1	1
Auger cn	2.80E-31	5.00E-29	0	0	0	0	0	0
Auger cp	9.90E-31	9.90E-32	0	0	0	0	0	0
Auger kn	0		0	0	0	0	0	0
Auger kp	0		0	0	0	0	0	0
Copt	0		0	0	0	0	0	0
An**	54.6		49.3	1.68	1.40E-11	2.88	1.40E-11	1.40E-11
Ap**	39.7		19.8	48.1	1.40E-11	56.6	1.40E-11	1.40E-11
betan	1		1	1	1	1	1	1
betap	1		1	1	1	1	1	1
egran	0		0	0	0	0	0	0
an1	1.66E+06		7.03E+05	7.30E+04	7.03E+05	7.30E+04	7.03E+05	7.03E+05
bn1	1.27E+07		1.23E+06	1.23E+06	1.23E+06	1.23E+06	1.23E+06	1.23E+06
an2	1.66E+06		7.03E+05	7.30E+04	7.03E+05	7.30E+04	7.03E+05	7.03E+05
an2	1.27E+07		1.23E+06	1.23E+06	1.23E+06	1.23E+06	1.23E+06	1.23E+06
ap1	5.18E+06		6.71E+05	6.71E+05	6.71E+05	6.71E+05	6.71E+05	6.71E+05
bp1	1.40E+07		1.69E+06	1.69E+06	1.69E+06	1.69E+06	1.69E+06	1.69E+06
ap2	5.18E+06		1.58E+06	1.58E+06	1.58E+06	1.58E+06	1.58E+06	1.58E+06
bp2	1.40E+07		2.04E+06	2.40E+05	2.04E+06	2.40E+05	2.04E+06	2.04E+06
Vsath (cm/s) :	2.00E+07	1.25E+07	2.00E+07	1.00E+06	1.00E+06	1.00E+06	1.00E+06	7.70E+06
Vsatp (cm/s) :	1.00E+06	1.00E+07	1.00E+06	1.00E+06	1.00E+06	1.00E+06	1.00E+06	7.70E+06
m _{un} (cm ² /Vs)	330	460	1000	78000		33000	5500	80
tmun	1.5	1	1.5	1.5		1.5	1.5	1.5
m _{up} (cm ² /Vs)	60	124	50	750		460		
tmup	1.5	1	1.5	1.5		1.5		

Table B-32. Mobility Parameters for Miscellaneous Semiconductors

Material	MUNO (cm ² /Vs)	MUPO (cm ² /Vs)	VSATN(cm/s)	VSAT(cm/s)
Ge	3900.0 (a)	1900.0 (b)		
Diamond	500.0	300.0	2.0×10 ⁷	
6H-SiC	330.0	300.0	2.0×10 ⁷	1×10 ⁷
4H-SiC	460	124	2.2×10 ⁷	1×10 ⁷
3C-SiC	1000.0	50.0	2.0×10 ⁷	1×10 ⁷

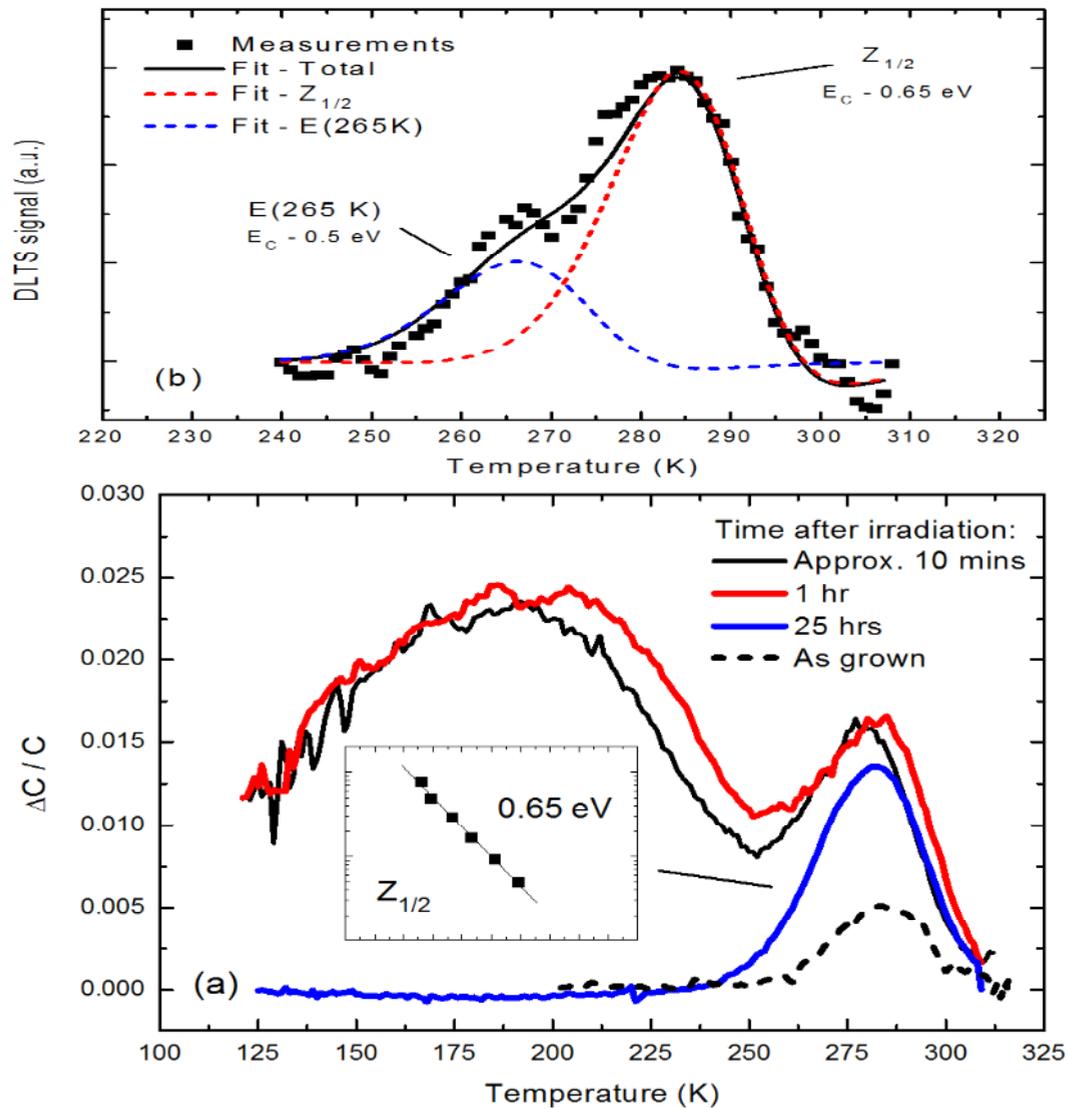
Material	E _g (0)eV	E _g (300)eV	a	b	m _c	m _v	χeV
Silicon							
Polysilicon							
Ge	0.7437		4.77×10 ⁻⁴	235.0	0.2225	0.2915	4.0
Diamond		5.45	4.77×10 ⁻⁴	0.0	(a)	(b)	7.2
6H-SiC	2.9	2.9	0.0	0.0	0.454	0.33	3.5
4H-SiC	3.26	3.26	0.0	0.0	0.76	1.20	4.0
3C-SiC	2.2	2.2	0.0	0.0	0.41	0.165	3.2

Parameter	Value
EGRAN	0.0
BETAN	1.0
BETAP	1.0
AN1	1.66×10 ⁶
AN2	1.66×10 ⁶
BN1	1.273×10 ⁷
BN2	1.273×10 ⁷
AP1	5.18×10 ⁶
AP2	5.18×10 ⁶
BP1	1.4×10 ⁷
BP2	1.4×10 ⁷



Référence:

[1] T. Hatayama, S. Hino, N. Miura, T. Oomori, E. Tokumitsu. *IEEE transactions on electron devices*. 2008;55:2041–2045.



[2] J. P. Doyle, M. K. Linnarsson, P. Pellegrino, et al. *Journal of Applied Physics*. 1998;84:1354.

[3] A. Galeckas, J. Linnros, P. Pirouz. *Applied Physics Letters*. 2002;81:883.