

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : Technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Thème

**Propriétés physiques et électroniques de semi-
Conducteur à grand Gap : Carbure de Silicium**

Présenté Par :

- 1) BOUBEKEUR Fatima Zohra
- 2) HAZAM Amina

Devant les jurys composés de :

Dr. FEROUANI Souheila	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Présidente
Dr. AYACHE (née SAYAH) Choukria	MCA.	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante
Dr. BENCHERIF Kaddour	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2017/2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

📖 Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

📖 Ce travail a été effectué au centre universitaire de Belhadj Bouchaib à Ain Témouchent sous la direction du Docteur Choukria AYACHE. Je tiens aussi à remercier le Docteur Choukria AYACHE, qui a assuré la direction de ce travail. Je lui exprime mes vifs remerciements pour l'aide constante durant la préparation de ce travail, ses conseils, l'enthousiasme qu'elle a su me communiquer et ses compétences scientifiques et humaines m'ont permis d'accomplir mon travail dans les meilleures conditions. Je la remercie chaleureusement et amicalement.

📖 Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements au Docteur FEROUANI Souheila, qui me fait l'honneur d'être la présidente du jury. Mes respectueuses reconnaissances s'adresse également à Dr BENCHERIF Kaddour d'avoir accepté d'examiner mon travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

📖 Je terminerai en remerciant aussi tous nos collègues du centre universitaire de Belhadj Bouchaib, Département Génie-Electrique.

Dédicace

- 📖 *Je rends grâce à Dieu de m'avoir donné le courage et la volonté, pour terminer mes études.*
- 📖 *Je dédie ce mémoire à mes parents À l'homme de ma vie, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que Dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père Brahim*
- 📖 *.Mon adorable mère Khedidja pour son soutien, son amour et ses encouragements*
- 📖 *À mes chères sœurs Soumia, Nadia et mon cher frère Habib qui m'encouragent toujours*
- 📖 *Je dédie mes chers amis Feyza, Hafida, Abdalkader.F et Billal et je remercie spécialement mon ami et mon frère Boukra Abdelkader qui m'a toujours encouragé de faire mon travail et mes études*
- 📖 *Je dédie mes beaux frères Houcin et Kouider*
- 📖 *À ma nièce Malak et mes neveux et Boubekour, Amine et Younes les petits bijoux de la famille*
- 📖 *Enfin, je dédie mon amie Amina, qui m'a aidé dans tous mes moments difficiles, Merci beaucoup « Sahbati »*

Fatima Zohra

Dédicace

 Je dédie ce modeste travail

 *A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, mon père que j'aime.*

 *A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, maman que j'adore.*

 *A mes grands parents Qu' Allah leur fasse miséricorde.*

 *A mes frères et ma sœur MOURAD, FAROUK et NOUREL HOUDA.*

 *A ma tante Hafida, son époux et leurs enfants MOHAMED, SARA, DOHA, YUCEF.*

 *A ma cousine CHAHRAZED.*

 *Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, mes amies les plus sincères SOUAD et KHADRA et mon binôme ma chère FATIMA ZOHRRA<3.*

 *A tous les enseignants et étudiants*

 *Et A toute la famille HAZAM.*

AMINA

Sommaire

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I. Les propriétés Physiques et électroniques du Carbure de Silicium

1.1. Introduction.....	4
1.2. Généralités sur les semi-conducteurs à grand gap:	4
1.3. Facteur de mérite du SiC	8
1.4. Propriété électroniques du Carbure de Silicium	9
1.4.1. Structure Cristalline.....	10
1.4.2. Structure de bande et zone de Brillouin	12
1.4.3. Bande d'énergie interdite.....	13
1.4.4. Concentration des porteurs intrinsèques	15
1.5. Mobilité des porteurs de charge	16
1.5.1. Modèle de mobilité à faible champ	17
1.5.2. Modèle de mobilité à fort champ	23
Références Bibliographiques.....	26

Chapitre II. Simulation, Résultats et Interprétations

II.1. Introduction.....	33
II.2. Variation de la bande interdite avec la température :	33
II.3. Transport électronique à faible champ électrique : mobilité des électrons et des trous	35
II.3.1. Modèle de Caughey et Thomas :	35
II.3.2. Modèle d'Arora	40
II.3.3. Modèle de Masetti	44
II.4. Transport électronique à fort champ électrique : relations « vitesse moyenne » Vs champ	45
II.4.1. Effet de la température sur les caractéristiques de transport	46
II.4.1.1. Vitesse des électrons en fonction du champ électrique:	46
II.4.1.2. Vitesse des trous en fonction du champ électrique:	49

Sommaire

II.4. 2. Effet du dopage sur les caractéristiques de transport	51
II.4.2.2. Vitesse des trous en fonction du champ électrique:.....	53
II.5.Conclusion	55
Conclusion général.....	58

Chapitre I :

Figure I- 1:Les propriétés électriques du SiC comparé au Si 6

Figure I-2:Limites théoriques du silicium, de l'arséniure de gallium et des matériaux semi-conducteurs grand gap en terme de compromis « résistance passante spécifique/tenue en tension »..... 8

Figure I- 3:Structure de base du SiC. 11

Figure I- 4:Zone de Brillouin 12

Figure I- 5:Illustration du maximum de la bande de conduction entre 3C-SiC et 2H-SiC [6]. 13

Figure I- 6:Structure de bande du matériau 3C-SiC. 14

Figure I- 7:Structure de bande du matériau 4H-SiC. 14

Figure I- 8:Structure de bande du matériau 6H-SiC 15

Figure I- 9:Evolution de la concentration intrinsèque en fonction de la température 16

Chapitre II :

Figure II-1 : la variation de la bande interdite de 4H-SiC en fonction de la température.....33

Figure II- 2 : la variation de la bande interdite de 6H-SiC en fonction de la température. 34

Figure II- 3 : la variation de la bande interdite de 3C-SiC en fonction de la température. 34

Figure II- 4:Variation de la mobilité des électrons de 4H-SiC en fonction..... 36

Figure II- 5:Variation de la mobilité des électrons de 4H-SiC 37

Figure II- 6: Variation de la mobilité des électrons de 6H-SiC 37

Figure II- 7: Variation de la mobilité des électrons de 6H-SiC 37

Figure II- 8: Variation de la mobilité des électrons de 3C-SiC..... 38

Figure II- 9 : Variation de la mobilité des trous de 4H-SiC 39

Figure II- 10: Variation de la mobilité des trous de 6H-SiC..... 39

Figure II- 11: Variation de la mobilité des trous de 3C-SiC 40

Figure II- 12: Variation de la mobilité des électrons de 4H-SiC 41

Figure II- 13: Variation de la mobilité des électrons de 4H-SiC 41

Figure II- 14: Variation de la mobilité des électrons de 4H-SiC 42

Figure II- 15: Variation de la mobilité des électrons de 6H-SiC 42

Figure II- 16: la variation de la mobilité des trous de 6H-SiC..... 43

Figure II- 17 : Variation de la mobilité des trous de 6H-SiC..... 43

Figure II- 18: Variation de la mobilité des trous de 6H-SiC..... 44

Liste des figures

Figure II- 19: Variation de la mobilité des électrons en fonction de la température selon Nallet	44
Figure II- 20: Variation de la mobilité des électrons de 4H-SiC	45
Figure II- 21: La vitesse des électrons de 4H-SiC en fonction du champ électrique.....	46
Figure II- 22: La vitesse des électrons de 6H-SiC en fonction du champ électrique.....	47
Figure II- 23: La vitesse des électrons de 3C-SiC en fonction du champ électrique.	47
Figure II- 24: La vitesse des électrons de 4H-SiC en fonction du champ électrique selon Nallet	48
Figure II- 25: La vitesse des électrons de 4H-SiC en fonction du champ électrique.....	48
Figure II- 26: La vitesse des trous de 4H-SiC en fonction du champ électrique.	49
Figure II- 27: La vitesse des trous de 6H-SiC en fonction du champ électrique.	50
Figure II- 28: La vitesse des trous de 3C-SiC en fonction du champ électrique.....	50
Figure II- 29: La vitesse des électrons de 4H-SiC en fonction du champ électrique.....	51
Figure II- 30: La vitesse des électrons de 6H-SiC en fonction du champ électrique.....	52
Figure II- 31: La vitesse des électrons de 3C-SiC en fonction du champ électrique.	52
Figure II- 32: La vitesse des électrons de 4H-SiC en fonction du champ électrique selon Nallet	52
Figure II- 33: La vitesse des électrons de 4H-SiC en fonction du champ électrique.....	53
Figure II- 34: La vitesse des trous de 4H-SiC en fonction du champ électrique.	53
Figure II- 35: La vitesse des trous de 6H-SiC en fonction du champ électrique.	54
Figure II- 36: La vitesse des trous de 3C-SiC en fonction du champ électrique.....	54

Chapitre I :

Tableau I- 1: Comparaison des propriétés électriques des semi-conducteurs conventionnels et grand gap à 300 K..... 6

Tableau I- 2: Facteurs de mérite pour plusieurs semi-conducteurs à large bande interdite en comparaison avec le silicium 9

Tableau I- 3: L'énergie de gap à T=0 et les paramètres α et β 14

Tableau I- 4: Paramètres N_C , N_V et n_i calculés à 300 K 15

Tableau I- 5: Les paramètres de valeurs estimées pour le 3C-SiC, et 4H et 6H..... 19

Tableau I- 6: Coefficients d'ajustement de Caughey-Tomas pour la mobilité électronique dans le 4H-SiC de type n. 20

Tableau I- 7: Coefficients d'ajustement de Caughey-Tomas pour la mobilité électronique dans le 4H-SiC de type p. 21

Tableau I- 8: Coefficients d'ajustement d'Arora pour la mobilité électronique dans 4H-SiC et 6H-SiC de type n et p. 21

Tableau I- 9: Valeur des coefficients de l'expression de la mobilité de 23

Tableau I- 10: Paramètres pour le calcul de la mobilité sous fort champ..... 24

Tableau I- 11: Paramètres pour le calcul des différents paramètres (v_{max} , β_o , a, T_{ref} , a et b) .
..... 25

Résumé

La simulation est aujourd'hui un des outils, les plus utilisés pour l'étude du fonctionnement physique des composants électroniques. La simulation nécessite une bonne connaissance des caractéristiques du matériau étudié. En particulier les caractéristiques de la bande de conduction jouent un rôle prépondérant dans l'étude des phénomènes de transport. La présente étude a pour but d'étudier les potentialités du matériau Carbone de Silicium en particulier 4H-SiC, 6H-SiC et 3C-SiC. On détermine leurs bandes interdites, vitesses de dérive et la mobilité des porteurs. Pour cela, nous utiliserons la modélisation décrite dans ce mémoire. Au cours de cette étude, nous serons amenés à mettre en évidence l'influence de la température et de la présence d'impuretés au sein du réseau cristallin sur la caractéristique du transport électronique des matériaux. Les résultats obtenus sont satisfaisants après leurs comparaisons avec d'autres résultats expérimentaux existant dans la littérature.

Abstract

Simulation is now one of the most widely used tools for studying the physical functioning of electronic components. The simulation requires a good knowledge of the characteristics of the material studied. In particular, the characteristics of the conduction band play a preponderant role in the study of transport phenomena. The purpose of this study is to study the potentialities of Silicon carbide material, in particular 4H-SiC, 6H-SiC and 3C-SiC. Their forbidden bands, drift velocities and carrier mobility are determined. To do this, we will use the modeling described in this paper. During this study, we will be able to show the influence of temperature and the presence of impurities within the crystal lattice on the characteristic of the electronic transport of materials. The results obtained are satisfactory after their comparison with other experimental results existing in the literature.

المخلص

تعتبر المحاكاة اليوم إحدى الأدوات ، الأكثر استخدامًا لدراسة الأداء المادي للمكونات الإلكترونية. تتطلب المحاكاة معرفة جيدة بخصائص المادة المدروسة. على وجه الخصوص، فإن خصائص الفرقة التوصيل تلعب دورًا راجحًا في دراسة ظواهر النقل. الغرض من هذه الدراسة هو دراسة إمكانات مادة كربيد السيليكون على وجه الخصوص. 4H-SiC 6H-SiC 3C-SiC

يتم تحديد فرقهم المحرمة ، سرعات الانجراف و حركة الناقل . للقيام بذلك سوف نستخدم النمذجة الموصوفة في هذه الورقة ، وخلال هذه الدراسة ، سيكون علينا إبراز تأثير درجة الحرارة ووجود شوائب داخل الشبكة البلورية على خاصية النقل الإلكتروني للنتائج التيتم الحصول عليها مرضية بعد مقارنتها مع النتائج التجريبية الأخرى الموجودة في الأدب.

Introduction Générale

La demande actuelle sur des dispositifs microélectroniques capables d'opérer dans des milieux hostiles (hautes températures et fortes puissance) a conduit à une amélioration remarquable des procédés de fabrication et donc les performances électriques de ces dispositifs. Cette amélioration s'appuie sur l'utilisation de nouveaux matériaux semi-conducteurs à larges bandes interdites appelés semi-conducteurs de troisième génération comme le carbure de silicium (SiC). Les propriétés électriques et cristallographiques de ce dernier, les rend un matériau incontournable pour les applications de fortes puissances et de hautes températures. Le polymorphisme du SiC reste la propriété la plus avantageuse en comparaison avec d'autres semi-conducteurs de même type. Ainsi, pour bénéficier des propriétés électriques du SiC et améliorer le rendement des dispositifs à base de ce matériau, une modélisation approfondie des phénomènes physiques régissant le comportement de ces dispositifs est toujours exigée. L'étude du transport de charges constitue un outil adéquat pour le suivi et l'analyse du comportement des charges électriques (électrons/trous) que ce soit dans les massifs ou les dispositifs, sous de différentes conditions (température, dopage, etc.). Or, la complexité mathématique des équations a, pour longtemps, constitue un défi pour la résolution analytique. L'amélioration des moyens de calcul numérique a donné l'opportunité aux chercheurs d'implémenter des méthodes numériques capables de surmonter cette complexité. Elles permettent aussi la résolution numérique de ces équations dans un temps largement réduit. La modélisation de la mobilité présente un moyen efficace pour la simulation et l'analyse numérique des phénomènes physiques. Dans le cadre du transport de charges, cette méthode offre un outil statistique performant pour l'extraction correcte des différentes caractéristiques électriques.

Dans notre travail ; nous nous intéressons à étudier les propriétés électriques du Carbure de Silicium. Nous présentons notre travail selon les étapes suivantes :

Dans le premier chapitre, nous commençons par un aperçu sur le Carbure de Silicium et nous présentons les propriétés générales et de transport électronique des polytypes 4H-SiC, 6H-SiC et 3C-SiC en se basant sur une modélisation analytique. Ensuite, Le deuxième

chapitre s'appuyera de manière fondamentale sur les résultats obtenus. Nous mènerons notre étude approfondie sur le Carbure de Silicium en particulier 4H-SiC, 6H-SiC et 3C-SiC en commençant par une étude de la bande interdite, ensuite calculer les paramètres cinétiques tels que la vitesse de dérive des électrons et leur mobilité qui nous permettra d'analyser les principaux effets physiques mis en jeu. Au cours de cette étude, nous serons amenés à mettre en évidence l'influence de la température et de la présence d'impuretés sur la caractéristique du transport électronique du matériau. Enfin ; nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I
Les propriétés
Physiques et
électroniques
Du Carbure
De Silicium

1.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter le carbure de silicium (SiC) et ses propriétés physiques et électroniques. Une bonne connaissance de celles-ci nous est en effet indispensable pour la mise en place de modèles physiques, qui seront ensuite employés pour interpréter les résultats expérimentaux. Nous commencerons par une vue d'ensemble regroupant son développement historique, ses propriétés cristallographiques et ses propriétés électroniques principales. Dans un second temps, les connaissances actuelles concernant ses propriétés semi-conductrices seront abordées : gap, dopage et propriétés de transport.

1.2. Généralités sur les semi-conducteurs à grand gap:

Depuis quelques années, les semi-conducteurs à large bande interdite sont devenus les candidats par excellence qui ont permis de faire un saut qualitatif en technologie dans le domaine de la forte puissance. Leurs propriétés physiques (champ électrique de claquage, vitesse de saturation, conductivité thermique) en font des matériaux sans concurrents pour un grand nombre d'applications de forte puissance à haute fréquence et à haute température. Les semi-conducteurs à grand gap permettent d'étendre l'utilisation des dispositifs électroniques dans le domaine des hautes températures, du fait de leur grande bande interdite, et des fortes puissances, du fait de leur fort champ électrique de claquage [1]. Dans cette classe de matériaux, le diamant présente des propriétés exceptionnelles : bande interdite très large (5.45 eV), mobilité importante des deux types de porteurs ($\mu_n=2200\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ et $\mu_p=1600\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ à 300K, sans dopage intentionnel) et une très grande conductivité thermique.

Parmi les semi-conducteurs à large bande interdite, les nitrures d'éléments III-V (GaN, AlGaN) possèdent des propriétés électroniques particulièrement intéressantes pour les applications hyperfréquences. La vitesse maximum des électrons (2.7×10^7 m/s du GaN en structure hexagonale) est supérieure à celle de l'arséniure de gallium. Par ailleurs, leur largeur de bande interdite élevée (3.4 eV pour le GaN) et le fort champ électrique de claquage de 3.5×10^6 V/cm permettent un fonctionnement en puissance et à haute température. De plus, un avantage très grand réside dans la possibilité de réaliser des hétérostructures AlGaN/GaN avec de fortes mobilités électroniques de l'ordre de $1500\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$.

Enfin, leur grande stabilité chimique leur assure une excellente résistance aux conditions extrêmes [1].

Le Carbure de Silicium est parmi ces semi-conducteurs connu depuis longtemps. Le carbure de silicium (SiC) est un cristal semi-conducteur à grand gap dont les propriétés physiques et électriques sont très intéressantes pour de nombreuses applications. En effet, en 1907, l'ingénieur anglais, Henry Joseph Round, constate que lorsqu'un courant électrique circule dans un morceau de Carbure de Silicium, celui-ci émet de la lumière. Mais il faudra attendre 1979 pour que la première diode électroluminescente en Carbure de Silicium émettant dans le bleu soit réalisée. Dès les années 60 et 70, le développement du SiC en tant que matériau semi-conducteur est lié aux progrès réalisés dans le domaine de la croissance de substrats de bonne qualité et l'utilisation de nouvelles techniques d'épitaxie pour faire croître des couches actives n et p. Actuellement, le Carbure de Silicium est le semi-conducteur à large bande interdite dont on maîtrise le mieux la cristallogenèse et la technologie de réalisation des dispositifs électroniques. En effet, les étapes technologiques pour le SiC sont relativement proches de celles utilisées dans la technologie du Si. De plus le SiC possède, comme le Silicium, l'immense avantage de s'oxyder pour former du SiO₂.

Le **Tableau 1.1** donne les principales propriétés électriques des matériaux semi-conducteurs conventionnels et à large bande interdite et la **Figure 1.1** présente les propriétés électriques du SiC par rapport au Si [3].

	Semi-conducteurs conventionnels		Semi-conducteurs grand gap			
	Si	GaAs	6H-SiC	4H-SiC	GaN	Diamant
Largeur de bande interdite E_g (eV)	1,12	1,43	3,03	3,26	3,39	5,45
Mobilité des électrons μ_n(cm².V⁻¹.s⁻¹)	1450	6500	85	980	1250	2000
Mobilité des trous μ_p (cm².V⁻¹.s⁻¹)	450	400	101	115	35	2000
Champ critique de claquage E_c(MV.cm⁻¹)	0,3	0,4	2,5	3	3,3	10
Concentration intrinsèque des porteurs n_i (cm⁻³)	1,1×10 ¹⁰	2,1×10 ⁶	2,3×10 ⁻⁶	8,2×10 ⁻⁹	1 ×10 ⁻¹⁰	1,6×10 ⁻²⁷
Conductivité thermique λ (W.cm⁻¹.K⁻¹)	1,412	4,055	4,9	4,9	1,3	20

Permittivité relative ϵ_r	11,8	13,1	9,66	10,1	9,5	5,7
Vitesse de saturation des électrons $v_{sat}(\times 10^7 \text{ cm.s}^{-1})$	1	1	2	2	2,2	2,7
BFM/BFM _{%Si}	1	15,6	110	130	650	4110
BHFM/BHFM _{%Si}	1	10,8	16,9	16,9	77,8	470

Tableau I- 1: Comparaison des propriétés électriques des semi-conducteurs conventionnels et grand gap à 300 K [2].

Le diamant présente les propriétés les plus avancées pour les applications de puissance, suivi par le nitrure de gallium qui peut être très intéressant pour les applications optoélectroniques et de puissance grâce à son gap direct et son champ électrique de claquage 10 fois supérieur à celui du silicium. Par contre, il présente la conductivité thermique la plus faible, comparativement aux autres matériaux et c’est environ la même que le silicium. Le carbure de silicium présente plusieurs types de substrats dont deux intéressants pour l’électronique de puissance ; le 4H-SiC et le 6H-SiC, qui ne diffèrent que par leur mobilité et la structure cristalline. En effet, la mobilité dans le 4H-SiC est isotrope et supérieure à la mobilité anisotrope des électrons dans le cas du 6H-SiC.

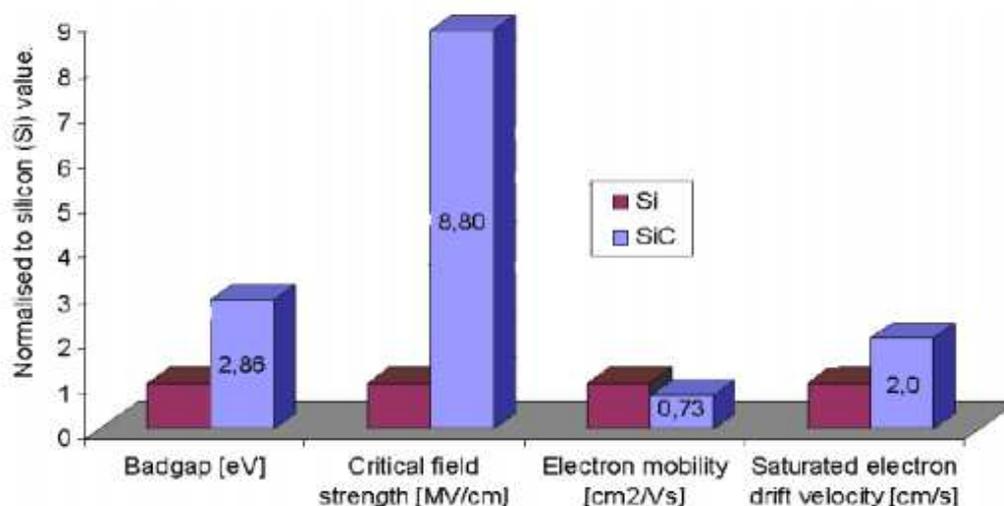


Figure I- 1: Les propriétés électriques du SiC comparé au Si [3].

D’après le **Tableau 1.1**, on observe que les matériaux semi-conducteurs à grand gap possèdent un champ de claquage beaucoup plus élevé que celui du silicium, leur procurant une tenue en tension au moins 10 fois supérieure. Par conséquent, pour une même tenue en tension, un composant en matériau semi-conducteur grand gap peut être réalisé avec une

épaisseur dix fois plus faible ou bien avec un dopage 100 fois plus élevé de la région de dérive d'une jonction PN-. Ces améliorations permettront de produire des composants de plus faible résistance et donc des pertes à l'état passant minimisées. En effet, pour une jonction PN-, la tension de claquage théorique dépend du champ critique de claquage du matériau semi-conducteur utilisé selon la relation [2]:

$$V_{DBR}(V) = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E_c^2}{2 \cdot q \cdot N_d} \quad (1.1)$$

Où ϵ_0 et ϵ_r représentent les permittivités du vide et du semi-conducteur respectivement, q est la charge élémentaire de l'électron, N_d le dopage et E_c le champ critique de claquage. La résistance passante spécifique idéale à l'état passant peut être donnée par la relation suivante [4]:

$$R_{ON} \cdot S(\Omega \cdot \text{cm}^2) = \frac{27 \cdot V_{DBR}^2}{8 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_n \cdot E_c^3} \quad (1.2)$$

Où μ_n est la mobilité des électrons. La **Figure 1.2** montre clairement la supériorité des matériaux semi-conducteurs grands gap par rapport au silicium. On peut noter également que, pour un composant unipolaire avec des pertes à l'état passant convenables (inférieures à $1 \Omega \cdot \text{cm}^2$), la limite du silicium est d'environ 1 kV alors que les matériaux semi-conducteurs grand gap permettent de réaliser des composants dépassant 10 kV. Pour les applications de puissance avancées situées dans la zone hachurée de la **Figure 1.2**, seuls les semi-conducteurs à large bande interdite peuvent donc répondre au besoin. En particulier, le diamant est le matériau qui présente les meilleures propriétés électriques et thermiques. Il est ainsi capable, grâce à sa faible concentration intrinsèque, de fonctionner à de très hautes températures. Par contre, son processus de fabrication est très peu avancé et nécessite des températures très élevées et difficile à mettre en œuvre. Toutefois, cette manière de calculer les limites théoriques du matériau ne prend pas en compte certains aspects technologiques pouvant jouer un rôle important comme, par exemple, la variation de la mobilité en fonction du dopage ; il ne tient pas compte non plus de l'une des contraintes technologiques majeures dans le cas du diamant, qu'est la profondeur du niveau d'ionisation des dopants, qui affecte directement la conductivité de la zone de drift et donc la résistance passante spécifique des composants [5].

Le carbure de silicium est le matériau semi-conducteur à large bande interdite qui présente une technologie bien avancée par rapport au Diamant et GaN ; des composants de puissance en carbure de silicium sont commercialisés actuellement. Le transistor JFET en SiC est l'interrupteur le plus avancé dans son développement ; ses performances permettent de fonctionner à 300 °C. Le grand désavantage de ce matériau est le prix élevé de ses substrats massifs et des épitaxies associées (~100 fois plus cher que l'équivalent en silicium) qui rend le rapport qualité/prix discutable.

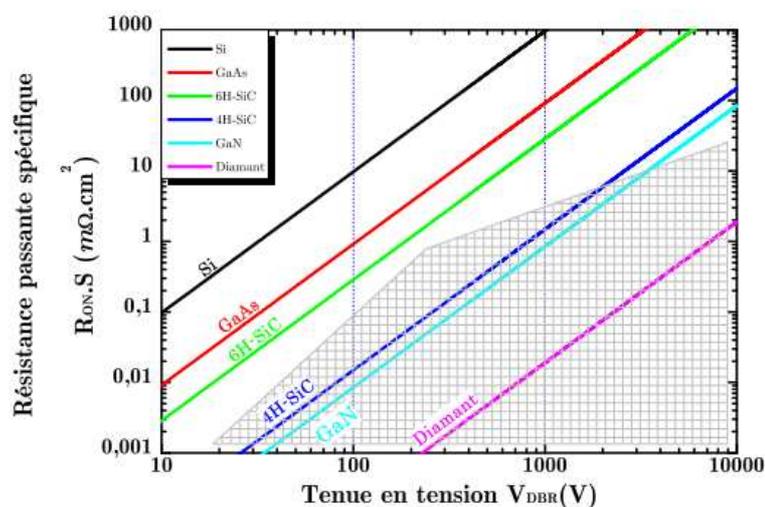


Figure I-2: Limites théoriques du silicium, de l'arséniure de gallium et des matériaux semi-conducteurs grand gap en terme de compromis «Résistance passante spécifique/tenue en tension» [2].

1.3. Facteur de mérite du SiC

Dans ce paragraphe, nous rappelons un classement par ordre de mérite du 4H-SiC comparé au silicium afin de montrer l'avantage de son utilisation dans les systèmes de puissance (Tableau 1.2). Les facteurs de mérite résumés les qualités des matériaux en fonction de leurs propriétés physiques. Ce sont les facteurs de Mérite de Johnson [6], Keyes [7] et Baliga [8]. Ces facteurs ne tiennent pas compte de l'état de la technologie, mais seulement des propriétés des matériaux.

Le facteur de mérite de Johnson JMF détermine l'aptitude du matériau pour les applications haute fréquence et haute puissance, il est proportionnel au champ électrique critique et à la vitesse de saturation [9]:

$$JMF = \frac{E_c \cdot v_{sat}}{2\pi} \quad (1.3)$$

Le facteur de mérite de Keyes KMF nous informe sur les performances thermiques et fréquentielles, il prend en considération la conductivité thermique du matériau, la vitesse de saturation et sa permittivité [10]:

$$KMF = \lambda \sqrt{\left(\frac{C \cdot v_{sat}}{d\pi\epsilon_r}\right)} \quad (1.4)$$

Enfin le facteur de mérite de Baliga BMF est proportionnel à la mobilité des porteurs, à la permittivité du matériau et au champ électrique [9]:

$$BMF = \mu\epsilon_r E_c^3 \quad (1.5)$$

Ces facteurs de mérite traduisent alors bien les performances du SiC pour les composants de puissance, plus le facteur est important plus les composants présentent de bonnes performances. Les valeurs relevées font du SiC un excellent candidat pour la réalisation des composants de puissance.

Matériaux	Si	SiC-3C	4H-SiC	SiC-6H	GaN	Diamant
JFM	1	65	180	260	760	2540
KFM	1	1.5	4.61	4.68	16	32.1
BFM	1	33.4	130	110	650	4110

Tableau I- 2: Facteurs de mérite pour plusieurs semi-conducteurs à large bande interdite en comparaison avec le silicium [9].

1.4. Propriété électroniques du Carbure de Silicium

Le Carbure de Silicium (SiC) est un matériau artificiel qui n'a quasiment pas d'existence naturelle sur terre. On le trouve en très faible quantité dans des sites géologiques très particuliers tels que les cheminées diamantifères, les cratères volcaniques kimberlitiques et même dans certaines météorites. Essentiellement synthétisé pour des besoins technologiques, il a été découvert accidentellement en 1824 par le suédois Berzelius alors même qu'il essayait de synthétiser du diamant. Plus tard en 1905, le SiC a été découvert à

l'état naturel dans les fragments d'une météorite aux Etats-Unis par H. Moissan [11], d'où le nom donné par la suite moissanite.

Le SiC est un cristal semi-conducteur à large bande interdite dont les propriétés physiques et électriques sont très intéressantes pour de nombreuses applications. Notamment, il est destiné à des applications électroniques, à haute température et à forte puissance. Son développement est lié aux progrès réalisés dans le domaine de la croissance de substrats et il est actuellement le semi-conducteur à large bande interdite dont on maîtrise le mieux la cristallogenèse et la technologie de la réalisation des dispositifs électroniques. Dans ce chapitre, nous rappelons dans un premier temps les propriétés principales du SiC.

Afin de répondre à l'exigence croissante de composants électroniques fonctionnant en hautes fréquences, hautes températures et hautes puissance, les scientifiques se sont intéressés par de nouveaux matériaux à hautes potentialité notamment le carbure de silicium. Ce dernier possède un gap indirect jusqu'à trois fois plus élevé (de 2.4 à 3.3 eVselon le polytype considéré) que ceux des semi-conducteurs utilisés jusqu'alors, comme le silicium Si, le germanium Ge ou l'arséniure de gallium GaAs[12].

Les propriétés physico-chimiques et électroniques du carbure de silicium les rend un redoutable concurrent pour de nombreux matériaux. Leur avantage apparait surtout dans les applications optoélectroniques, les applications de hautes températures (1200-1750K), et les fortes puissances. D'autres paramètres significatifs sont aussi à citer comme la vitesse de saturation des électrons de l'ordre de $2 \cdot 10^7$ cm/s, sa grande mobilité de porteurs 1000 cm²/vs, sa grande stabilité thermique, sa résistance chimique, ainsi que leur conductivité thermique $\sim 5 \cdot 10^7$ W/cmK[12].

1.4.1. Structure Cristalline

L'appellation SiC est un nom générique recouvrant toutes les formes stœchiométriques connues de carbone et de silicium cristallisant en phase solide. En parlant de SiC, on ne fait donc pas référence à une forme cristallographique unique parfaitement

identifiée comme pour Si ou GaAs mais à une famille de cristaux : ils sont tous différents mais partagent cependant certaines propriétés physiques fondamentales. Cette multitude de structures constitue l'ensemble des variétés polytypes recensés de SiC. La littérature en rapporte aujourd'hui près de 200 se répartissant dans les géométries cubiques, hexagonales et rhomboédriques [13]. Quelle que soit la variété polytype, chaque atome de silicium se lie à 4 atomes de carbone selon des liaisons sp^3 pour former des tétraèdres au sein desquels un atome de carbone est entouré de 4 atomes de silicium comme le montre la figure (Figure 1.3). L'environnement des atomes vis à vis de leurs premiers voisins est donc identique dans toute la structure cristalline de SiC. Les tétraèdres sont arrangés de telle sorte que les atomes se situent dans des plans parallèles contenant des nœuds d'hexagones réguliers. Les polytypes se différencient alors seulement par une séquence et une période d'empilement de ces plans ou bicouches silicium-carbone.

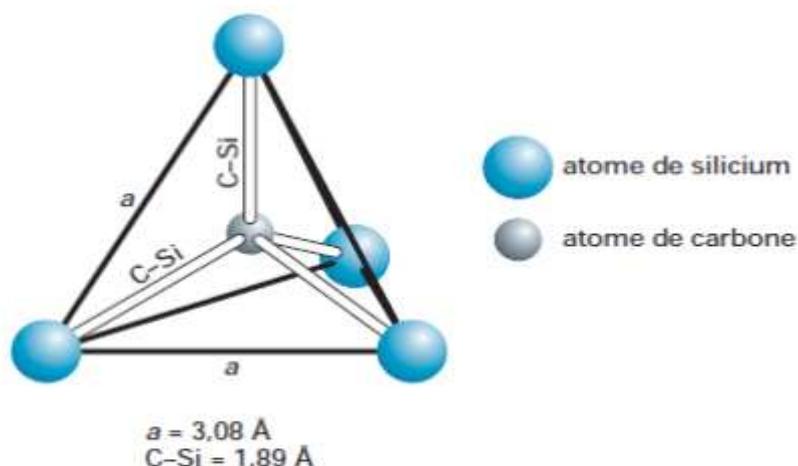


Figure I- 3: Structure de base du SiC[14].

Les polytypes élémentaires les plus réponsus dans les applications microélectroniques sont: le cubique composé par un seul polytype **3C-SiC** et l'hexagonal (**2H**, **4H** et **6H-SiC**).

- 2H-SiC pour le polytype wurtzite (de symétrie identique à celle de GaN).
- 3C-SiC pour le polytype cubique ou b -SiC (de symétrie identique à celle de GaAs).
- 4H-SiC et 6H-SiC pour les deux matériaux à structure hexagonale les plus considérés, improprement appelés α -SiC.

On note que ces polytypes peuvent changer de formes à cause des effets thermiques. Par exemple, il a été prouvé que le 3C-SiC peu se transformer en 6H-SiC au-dessus de 2150°C [6-15].

1.4.2. Structure de bande et zone de Brillouin

Après l'invention du Carbure de Silicium, plusieurs travaux ont été orientés vers l'étude (d'une manière intensive) de sa structure de bande dans le but de comprendre ses propriétés physiques et électroniques. Une grande partie de ces travaux été concentré sur la structure électronique du matériau pur et dopé, ainsi que sur ses propriétés optiques et électriques [6]. Les caractéristiques des bandes d'énergie électroniques sont obtenues en traçant les valeurs propres de l'énergie des électrons pour différentes valeurs du vecteur d'onde « k » dans la zone de Brillouin (voir **Figure 1.4**).

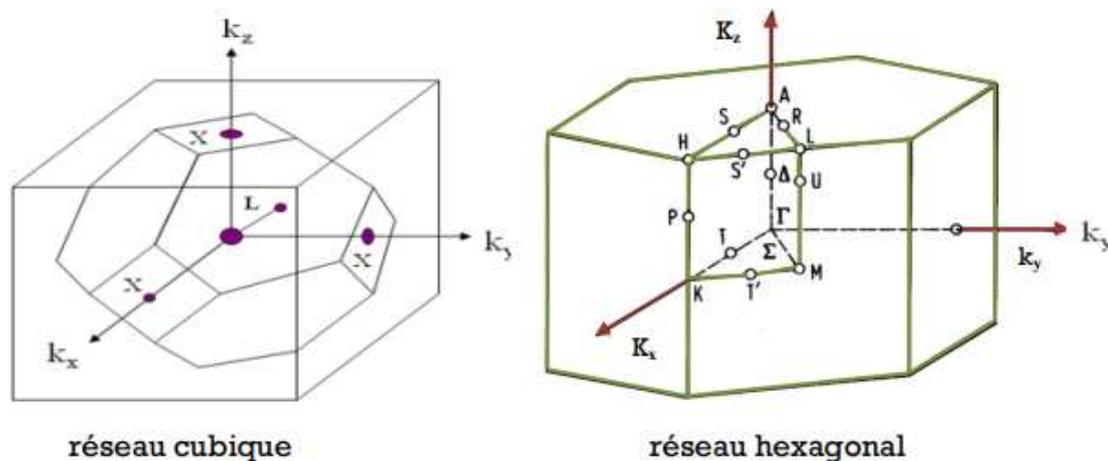


Figure I- 4: Zone de Brillouin [6].

Cette zone représente la cellule la plus petite dans le réseau réciproque. Ce dernier est invariant sous le même groupe de points que pour le réseau direct correspondant. Dans le cas du SiC, Les propriétés électriques des différents polytypes sont pas les même.

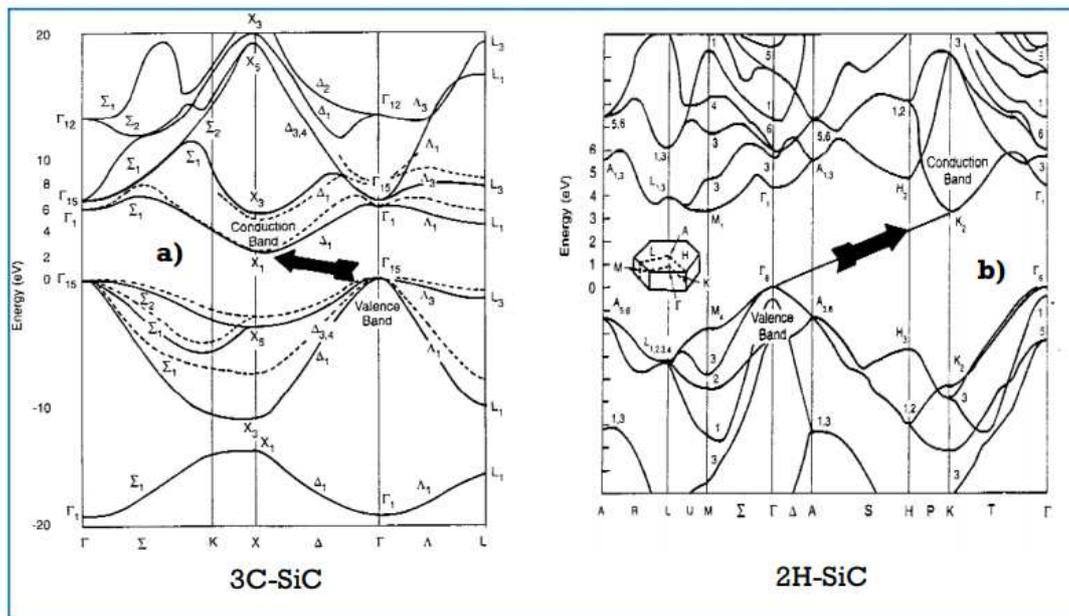


Figure 1-5: Illustration du maximum de la bande de conduction entre 3C-SiC et 2H-SiC [6].

Ceci est dû à la position du minimum de la bande de conduction qui n'est pas la même pour tous les polytypes. D'après la figure 1.3 on aperçoit que les deux polytypes 3C-SiC et 2H-SiC sont à gap indirecte mais la position du minimum se diffère : ($X1c- \Gamma15v$) pour le 3C-SiC et ($K2c- \Gamma8v$) pour le 2H-SiC (Figure 1.5).

1.4.3. Bande d'énergie interdite :

Du fait de l'agitation thermique dans le réseau cristallin, la hauteur de la bande interdite des matériaux diminue quand la température augmente pouvant à l'extrême rendre le matériau conducteur. Néanmoins, une large bande interdite induit une faible densité de porteurs intrinsèques, ce qui permet d'envisager un fonctionnement à des températures sensiblement plus élevées.

Les semi-conducteurs grands gaps possèdent une bande interdite minimum trois fois supérieure à celle des semi-conducteurs conventionnels (Si, GaAs), ce qui leur confère une plus grande capacité à fonctionner à haute température. En effet, l'énergie des semi-conducteurs grands gaps nécessaire pour passer de la bande de valence à la bande de conduction ($E_g > 3eV$) est plus large que celle des semi-conducteurs conventionnel

($E_g < 1,5\text{eV}$). Cela implique qu'il est moins probable qu'un électron traverse cette bande par une excitation thermique. Par conséquent, les températures maximales de fonctionnement des semi-conducteurs grands gaps vont être supérieures à celles des semi-conducteurs conventionnels et peuvent aller au-delà de 500°C [16]. L'énergie de gap diminue avec la température selon la loi empirique [17]:

$$E_g(T) = E_g(T_0) - \frac{\alpha \cdot T^2}{T + \beta} \quad (1.6)$$

Où $E_g(T_0)$ est l'énergie de bande interdite à température nulle ; α et β sont des constantes déterminées expérimentalement (**Tableau I.2**).

	$E_g(T_0)$ (eV)	α (eV/K)	β (K)	T (K)	Références
4H-SiC	3.265	3.3×10^{-2}	10^5	4-700	[18]
	3.342	3.3×10^{-4}	0	300-700	[19]
	3.26	6.5×10^{-4}	1300		[20-21]
		8.2×10^{-4}	1800		[22]
6H-SiC	3.023	3.3×10^{-2}	10^5	4-700	[18]
	3.1	3.3×10^{-4}	0	300-700	[19]
		8.2×10^{-4}	1800		[22]
3C-SiC	2,396	$6,0 \times 10^{-4}$	1200		[23]
		8.2×10^{-4}	1800		[22]

Tableau I- 3: L'énergie de gap à $T=0$ et les paramètres α et β des trois matériaux 4H-SiC, 6H-SiC et 3C-SiC.

Les **Figures 1.6, 1.7 et 1.8** représentent l'allure des structures de bandes des matériaux semi-conducteurs 3C-SiC, 4H-SiC et 6H-SiC [23].

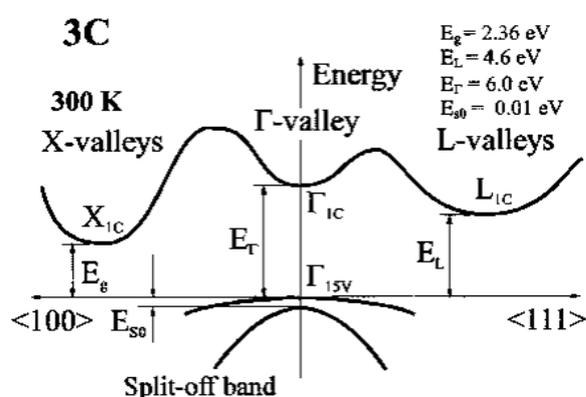


Figure I- 7: Structure de bande du matériau 3C-SiC [23].

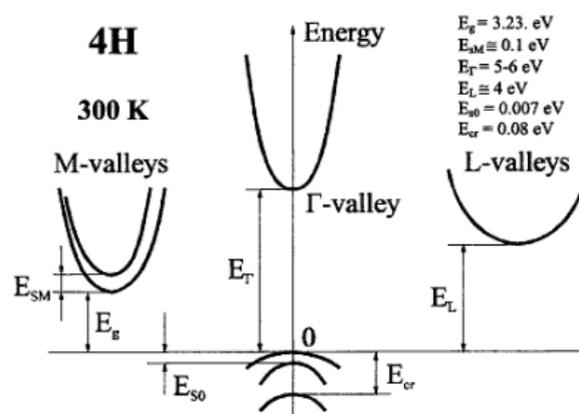


Figure I- 6: Structure de bande du matériau 4H-SiC [23].

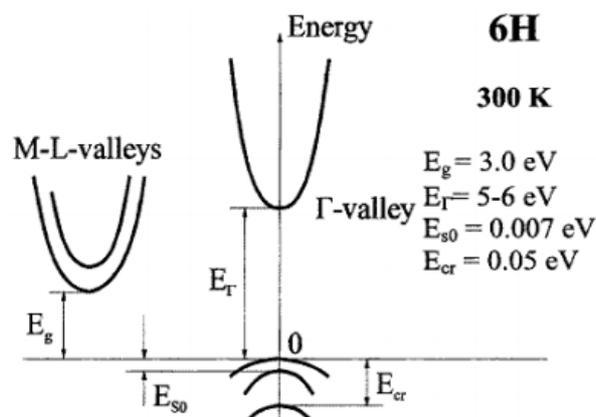


Figure I- 8: Structure de bande du matériau 6H-SiC [23].

1.4.4. Concentration des porteurs intrinsèques :

La concentration des porteurs intrinsèques, notée (n_i), 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 détermine l'intensité des courants de fuite en inverse des jonctions bipolaires et Schottky. Cette concentration est liée à la largeur de la bande interdite ainsi qu'aux densités d'états permis dans la bande de conduction N_c et bande de valence N_v . De plus, elle augmente rapidement avec l'élévation de la température. L'expression analytique de cette concentration est donnée par l'équation 7 [16 -25-26].

$$N_i(T) = (N_c N_v)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_g(T)}{2kT}\right) \quad (1.7)$$

Où T est la température (en K), k la constante de Boltzmann ($8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$), E_g la largeur de la bande interdite (en eV), et N_c et N_v sont respectivement la densité d'électrons et de trous présents initialement dans le semi-conducteur (en cm^{-3}). Les densités d'états et la concentration n_i à température ambiante sont indiquées dans le **Tableau 1.4** [27]:

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 I- 4: Paramètres N_c , N_v et n_i calculés à 300 K [27].

A température ambiante, la densité de porteurs intrinsèques du silicium est de l'ordre de 10^{10} cm^{-3} ce qui est négligeable par rapport au dopage (de 10^{14} à 10^{17} cm^{-3}). Sous l'effet de l'élévation de température, la concentration des porteurs intrinsèques va augmenter si bien qu'elle va pouvoir influencer de manière non négligeable la conductivité électrique au-delà de 300°C . Les semi-conducteurs grand-gap (largeur de bande interdite autour de 3 eV) ayant moins de porteurs intrinsèques que le silicium, peuvent travailler à des températures plus élevées sans que ces porteurs intrinsèques n'influencent leur conductivité. Typiquement pour du carbure de silicium (SiC), la température maximale d'utilisation est estimée à 600°C .

L'évolution de la concentration intrinsèque en fonction de la température, en tenant compte de la variation d' E_g avec la température, est présentée dans la **Figure 1.9**[27]. D'après cette figure, on voit clairement que pour le 6H-SiC et 4H-SiC, la concentration intrinsèque reste très inférieure aux dopages généralement utilisés ($> 10^{14} \text{ cm}^{-3}$). Par conséquent, le SiC fonctionne en régime extrinsèque jusqu'à 1000 K au minimum. A titre de comparaison, la température maximale de fonctionnement du Si est de 550 K.

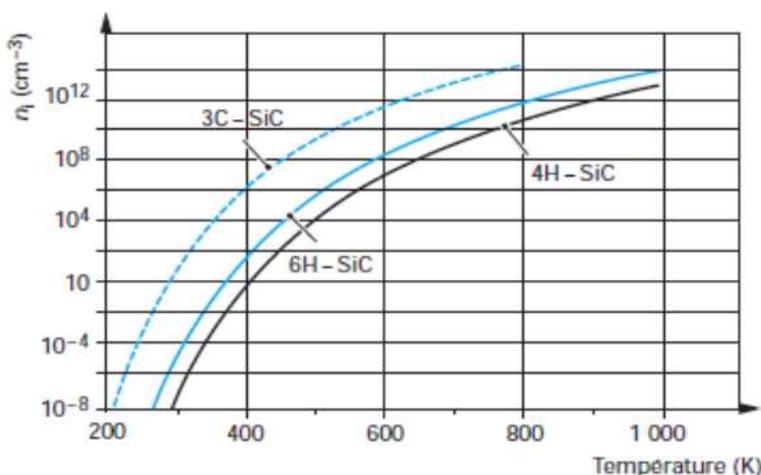


Figure I- 9: Evolution de la concentration intrinsèque en fonction de la température [27].

1.5. Mobilité des porteurs de charge :

La mobilité est une grandeur macroscopique, caractéristique du matériau et décrivant la facilité des porteurs à se déplacer dans le cristal. Elle est différente suivant le type de

porteurs: les électrons ont des masses effectives plus légères que les trous dans la plupart des semi-conducteurs et ont ainsi des mobilités supérieures, et anisotropes. La mobilité dépend aussi du champ électrique, du dopage et surtout de la température. Etant un paramètre fondamental pour le dimensionnement et la technologie des composants la mobilité a fait l'objet d'importants travaux en vue d'obtenir des modèles fins pour la simulation. D'après la définition de la mobilité, le transport électronique dépend essentiellement de deux paramètres: la masse effective des électrons et la fréquence des interactions avec le réseau cristallin. Tout d'abord les porteurs interagissent avec les phonons et les défauts, aboutissant à une mobilité relativement élevée dans le volume d'un semi-conducteur faiblement dopé. Cette mobilité est réduite par les interactions coulombiennes avec les atomes d'impuretés ionisées.

1.5.1. Modèle de mobilité à faible champ

A partir de la méthode de Caughey-Thomas, des modèles ont pu être développés pour proposer une expression analytique simple, représentative de l'évolution de la mobilité des porteurs en fonction de la température et du niveau de dopage.

- **Modèle de Caughey-Thoma :**

La plupart des modèles s'appuient sur l'expression empirique établie par Caughey et Thomas [28] qui donne la mobilité des porteurs libres dans le Carbure de Silicium :

$$\mu = \mu_{min} \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{1 + \left(\frac{N}{N_{ref}}\right)} \quad (1.8)$$

Avec N est la densité de dopage totale, et $\alpha, \mu_{min}, \mu_{max}$ et N_{ref} sont des paramètres qui peuvent être déterminé soit par expérience, soit par simulation de Monte Carlo. Ils sont des coefficients qui peuvent varier légèrement selon les auteurs et donc selon les modèles (CONMOB, ANALYTICAL, ARORA, CVT). Cette expression donne la valeur des mobilités à la température ambiante pour des porteurs majoritaires en fonction du dopage en impuretés dans le matériau.

- Pour des concentrations en impuretés faibles, la mobilité des porteurs ne dépend que du seul phénomène de "LatticeScattering", c'est-à-dire de "dispersion" des

porteurs avec le réseau cristallin. Ainsi, la mobilité des électrons et la mobilité des trous due à ce phénomène correspond à la valeur limite de l'équation Caughey et Thomas [28] lorsque la concentration en impuretés tend vers zéro :

$$\mu_{lattice} = \mu_{max}$$

- Lorsque la concentration en impuretés augmente, c'est le phénomène d' "Impurity Scattering", c'est-à-dire de "dispersion" des porteurs par les impuretés ionisées, qui devient prépondérant : cela se traduit par une réduction importante de la mobilité à partir de la valeur N_{ref} .

Selon [28] le principal problème concernant l'ajustement du modèle de mobilité pour 3C SiC sont publiées les données de mobilité de ce polytype. Bien qu'il existe beaucoup de données, elles ne sont pas uniformes. Le principal problème est l'absence de substrat 3C SiC puisque tous les échantillons sont cultivés en hétéroépitaxie sur Si ou 6H-SiC. Ceci entraîne de grandes mésappariements de réseau (environ 20% pour les substrats de Si) et une densité de défauts élevée correspondante. En outre, il y a peu de volonté d'établir 3C SiC commercialement, ce qui entraîne de grandes différences dans la qualité du matériel rapporté.

Les critères permettant une sélection appropriée des données de mobilité rapportées dans la littérature, aux fins de la formation du modèle de mobilité 3C, sont donnés dans [28]. Cependant, même pour de telles figures soigneusement triées, un ajustement de Caughey-Thomas pour la mobilité de faible champ ne semble pas fonctionner particulièrement bien [28]. Il ne semble pas être défini par μ_{min} . De plus, ce type de comportement ne peut être approché par l'équation de Caughey-Thomas qu'en supposant un très grand μ_{max} et un faible N_{ref} et α . Il est suggéré, cependant, que la mobilité peut être décrite sous la forme suivante:

$$\mu = \frac{C \times \left(\frac{N}{N_{ref}}\right)^{\alpha - \delta} + \mu_{max}}{1 + \left(\frac{N}{N_{ref}}\right)^{\alpha}} \quad (1.10)$$

Chapitre I : les propriétés physiques et électroniques du carbure de silicium

où μ_{max} , C , $N_{réf}$, α et δ sont des paramètres appropriés. En raison de l'absence totale de données expérimentales pour le SiC 3C faiblement dopé, les données MC ont été utilisées dans la procédure d'ajustement. Les paramètres de valeurs estimées pour le modèle de mobilité de champ faible et élevé pour le 3C-SiC, et 4H et 6H sont également résumés dans le **Tableau 1.5** [28-29-30].

Parameter	3C-SiC				4H-SiC				6H-SiC			
	electrons		holes		electrons		holes		electrons		holes	
μ_{max} [cm ² /Vs]	650 1550	[28-29] [30]	20	[29]	950 1400	[28] [30]	125	[29]	420 650	[28] [30]	100	[31]
μ_{min} [cm ² /Vs]	40 50	[28] [30]	15	[29]	40 0	[28] [30]	15.9	[29]	30 0	[28] [30]	6.8	[31]
$N_{réf}$ [cm ⁻³]	3×10^{16} 1.5×10^{17}	[28] [30]	3×10^{16}	[29]	1.94×10^{17} 2×10^{17} 1×10^{17}	[29] [28] [30]	1.76×10^{19}	[29]	6×10^{17} 1×10^{18}	[28] [30]	2.1×10^{19}	[31]
A	0.8 1×10^{17}	[28] [30]	0.8	[29]	0.61 0.76 0.5	[29] [28] [30]	0.34	[29]	0.8 0.6	[28] [39]	0.31	[31]
γ	-2.5	[29]	-2.5	[29]	-2.40	[29]	-2.15	[29]	-2.50	[29]	-2.15	[31]
η	-0.5	[29]	-0.5	[29]	-0.5	[29]	-0.5	[29]	-0.5	[29]	-0.5	[31]
C [cm ² /Vs]	330	[28]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
δ	0.2	[28]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau I- 5: Les paramètres de valeurs estimées pour le 3C-SiC, et 4H et 6H.

De point de vue thermique, la température se traduit par des vibrations des atomes du cristal autour de leur position d'équilibre dans le réseau. Ces vibrations diminuent la section de passage des porteurs et augmentent la probabilité de collision d'un porteur et d'un atome ou d'un ion du cristal. La mobilité décroît donc rapidement lorsque la température augmente. Les vibrations thermiques de ceux-ci, dépendent de la température du cristal suivant les lois suivantes [31]:

$$\mu_{max} = \mu_{max,300} \cdot \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{\gamma} \quad (1.11)$$

$$\mu_{min} = \mu_{min,300} \cdot \left(\frac{T_L}{300K} \right)^{\eta} \quad (1.12)$$

Où $T_0 = 300$ K. Les valeurs des coefficients α_n , α_p , μ_{n0} et μ_{p0} varient selon les auteurs : α_n et α_p varient de 2,2 à 2,7, μ_{n0} de 1330 à 1600 cm² .V⁻¹ .s⁻¹ et μ_{p0} de 465 à 600 cm² .V⁻¹ .s⁻¹.

Bien que l'on relève une assez grande dispersion dans la littérature sur la mesure des mobilités [32- 33- 34], il est acquis, d'après les expressions (A2.3) et (A2.4), que la mobilité décroît sensiblement lorsque la température augmente. Les modèles proposés pour PISCES prenant en compte les effets de la température sur la mobilité sont le modèle CONMOB associé à ANALYTICAL et le modèle CVT de Lombardi [35]. Si on utilise ces modèles à la température ambiante $T = 300\text{ K}$, on retrouve les valeurs du modèle de base établi par Caughey et Thomas.

Dans cette expression, la mobilité est fonction de la concentration en impuretés N_i et la température selon la relation suivante [36]:

$$\mu = \mu_{min} \left(\frac{T}{300K} \right)^\alpha + \frac{\mu_{max} \left(\frac{T}{300K} \right)^\beta - \mu_{min} \left(\frac{T}{300K} \right)^\alpha}{1 + \left(\frac{T}{300K} \right)^\gamma \left(\frac{N}{N_{ref}} \right)^\delta} \quad (1.13)$$

Coefficients d'ajustement de Caughey-Tomas pour la mobilité électronique dans le 4H-SiC de type n rapporté par différents groupes (**Tableau 1.6**).

μ_{max} [cm ² /Vs]	μ_{min} [cm ² /Vs]	N_{ref} [cm ⁻³]	α	β	γ	δ	Ref.
950	40.00	2.00×10^{17}	0.0	-2.40	-0.76	0.73	[37]
950	40.00	1.94×10^{17}	-0.5	-2.40	0.00	0.61	[38]
950	27.87	1.94×10^{17}	0.0	-1.80	0.00	0.61	[39]
950	40.00	2.00×10^{17}	-0.5	-2.40	-0.76	0.34	[40]
947	0.00	1.94×10^{17}	0.0	-2.15	0.00	0.61	[41]
947	88.00	1.94×10^{17}	0.0	-2.15	0.00	0.61	[42]
950	40.00	2.00×10^{17}	0.0	-2.40	0.73	0.34	[43]
950	28.00	1.94×10^{17}	0.0	-2.40	0.73	0.61	[36]

Tableau I- 6: Coefficients d'ajustement de Caughey-Tomas pour la mobilité électronique dans le 4H-SiC de type n.

Coefficients d'ajustement de Caughey-Tomas pour la mobilité électronique dans le 4H-SiC de type p rapporté par différents groupes (**Tableau 1.7**).

μ_{max} [cm ² /Vs]	μ_{min} [cm ² /Vs]	N_{ref} [cm ⁻³]	α	B	γ	δ	δ	Ref.
105.4	53.30	2.20×10^{18}	0.0	-2.10	-0.76	0.00	0.70	[37]
125	15.90	1.76×10^{19}	-0.5	-2.15	0.00	0.00	0.34	[38]
124	15.90	1.76×10^{19}	0.0	-1.80	0.00	0.00	0.34	[39]
125	15.90	1.76×10^{19}	-0.5	-2.15	-0.76	-0.76	0.34	[40]
124	15.90	1.76×10^{19}	0.0	-2.15	0.00	0.00	0.34	[41]
74	43.00	1.76×10^{19}	0.0	-2.15	0.00	0.00	0.34	[42]
105.4	15.30	2.20×10^{18}	0.0	-2.10	0.73	0.00	0.70	[43]
114.1	00.00	5.38×10^{18}	0.0	-2.72		2.44		[36]
114.1	00.00	5.38×10^{18}	0.0	-2.72	0.73	2.44		[44]

Tableau I- 7:Coefficients d'ajustement de Caughey-Tomas pour la mobilité électronique dans le 4H-SiC de type p.

• **Model d'Arora :**

Une modification des formules couramment utilisées pour le silicium, c.-à-d. Caughey-homas, et Arora avec combinaison de formules proposées pour le carbure de silicium sont utilisés pour modéliser la mobilité à faible champ dans le 4H et 6H. La mobilité de faible champ (modèle Arora) est donnée par [45-46-47] :

$$\mu = \mu_{min} + \frac{\mu_{max} \times \left(\frac{T}{300K}\right)^\alpha}{1 + \left(\frac{N_A}{N_{ref}}\right)^\gamma} \tag{1.14}$$

Coefficients d'ajustement d'Arora pour la mobilité électronique dans 4H-SiC et 6H-SiC de type n et p rapporté par différents groupes(**Tableau 1.8**).

Parameter	4H-SiC				6H-SiC			
	electrons		holes		electrons		holes	
μ_{max} [cm ² /Vs]	947	[48]	108.1	[48-49]	415	[48]	99	[48]
	460	[49]			400	[50]	75	[50]
Γ	0.61	[48]	0.34	[48-49]	0.59	[48]	0.31	[48]
	0.34	[49]			0.45	[50]	0.5	[50]
μ_{min} [cm ² /Vs]	0	[48-49]	15.9	[48-49]	0	[48]	6.8	[48]
					20	[50]	5	[50]
N_{ref} [cm ⁻³]	1.94×10^{17}	[48-49]	1.76×10^{19}	[48-49]	1.1×10^{18}	[48]	2.1×10^{19}	[48]
					4.5×10^{17}	[50]	1×10^{19}	[50]
A	-2.15	[48]	-2.15	[48]	-3	[48-50]	-3	[48-50]

Tableau I- 8:Coefficients d'ajustement d'Arora pour la mobilité électronique dans 4H-SiC et 6H-SiC de type n et p.

- **Modèle de Masetti :**

Pour leur part, Masetti et al. [51] ont considéré que l'expression de Caughey et Thomas n'était pas suffisante pour traduire les effets de "ultra-hautes" concentrations; ils ont alors proposé une expression plus générale de la mobilité en fonction de la concentration :

$$\mu = \mu_{min} + \frac{\mu_{max} + \mu_{min}}{1 + (N/N_{ref,1})^{\alpha_1}} - \frac{\mu_1}{1 + (N_{ref,2}/N)^{\alpha_2}} \quad (1.15)$$

Les effets de "ultra-hautes" concentrations sur la mobilité sont représentés par le troisième terme de cette expression : au-dessous d'une concentration de 10^{20} cm^{-3} , on retrouve bien l'expression de Caughey et Thomas, représentée par les deux premiers termes de l'expression (A2.2). A titre d'information, nous fournissons, dans le tableau (A2.1), les valeurs des paramètres de l'expression (A2.2) d'après Masetti[51].

En France l'équipe du Pro CHANTE du CEGELY propose une modélisation pour le SiC issue de celles du Silicium proposées par Masetti[51] et Caughey et Thomas [52]. Pour le SiC, la formule générale proposée par [53] est:

$$\mu = \mu_{min_1} + \frac{\mu_{max} + \mu_{min,2}}{1 + (N/N_{ref,1})^{\alpha_1}} - \frac{\mu_1}{1 + (N_{ref,2}/N)^{\alpha_2}} \quad (1.16)$$

Avec
$$\mu_{max} = \mu_L \left(\frac{T}{300} \right)^{-\xi}$$

Cette formule est paramétrée par différents coefficients, donnés pour le SiC-4H dopé à l'Azote (N) et à l'Aluminium (P) dans le **Tableau 1.9**. L'expression se trouve simplifiée dans le cas du SiC, où 2 grandeurs sont nulles ou d'influence négligeable.

Paramètre	4H-SiC dopé N	4H-SiC dopé P
$\mu_{min,1} [\text{cm}^2 / \text{Vs}]$	20	20
$\mu_{min,2} [\text{cm}^2 / \text{Vs}]$	0	0
$\mu_1 [\text{cm}^2 / \text{Vs}]$	0	0
$N_{réf1} [\text{cm}^{-3}]$	4.5×10^{17}	10^{19}
$N_{réf2} [\text{cm}^{-3}]$	3.43×10^{20}	6.1×10^{20}
α_1	0.45	0.5
α_2	2	2
$\mu_L [\text{cm}^2 / \text{Vs}]$	700	350
ξ	3	3

Tableau I- 9: Valeur des coefficients de l'expression de la mobilité de [51].

Un autre modèle, proposé par M. ROSCHKE et F. SCHWIERZ décrit aussi assez finement la mobilité pour le SiC-4H, -6H et 3C [54], et est comparé aux résultats expérimentaux publiés. On présente les expressions développées des deux modèles de mobilité en fonction du dopage, de la température et du champ dans le semi-conducteur:

Modèle [53] :

$$\mu_0(N, T) = 20 + \frac{700 \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{-3}}{1 + \left(\frac{N}{4,5 \cdot 10^{17}}\right)^{0,45}} \quad (1.17)$$

Modèle [54] pour le SiC-4H:

$$\mu_0(N, T) = 1,25 \cdot \left[40 \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{-0,5} + \frac{950 \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{-2,4} - 40 \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{-0,5}}{1 + \left(\frac{N \cdot 300}{2,10^{17} \cdot T}\right)^{0,76}} \right] \quad (1.18)$$

1.5.2. Modèle de mobilité à fort champ

Dans les deux paragraphes précédents, nous avons évoqué les modèles de mobilité dépendant de la concentration en impuretés et de la température. Ces modèles sont suffisants pour rendre compte de la valeur de la mobilité pour les porteurs majoritaires lorsque les champs électriques appliqués sont faibles. En fait, nous avons admis que, dans cette gamme de champs faibles, la mobilité μ_0 était indépendante du champ électrique, c'est-à-dire que la vitesse moyenne de dérive des porteurs était strictement proportionnelle à l'intensité du champ :

$$v = \mu_0 \cdot E \quad (1.19)$$

Ceci n'est plus vrai pour les champs électriques intenses : pour des valeurs de champ supérieures à 10^3 V/cm, la mobilité n'est plus indépendante du champ électrique; elle décroît lorsque l'intensité du champ croît. La vitesse de dérive des porteurs n'augmente alors plus de manière linéaire avec le champ électrique. Enfin, au-delà d'un champ de 10^5 V/cm d'intensité, la mobilité moyenne des porteurs décroît selon une loi inversement proportionnelle au champ électrique, ce qui signifie que la vitesse de dérive des porteurs est constante : les porteurs libres ont alors atteint leur vitesse limite, ou vitesse de saturation.

Les différents auteurs, dont les modèles sont inclus dans PISCES, proposent des équations empiriques permettant de tenir compte de l'effet du champ électrique. La mobilité est représentée par le modèle de Canali[55]:

$$\mu(E) = \frac{\mu_0}{\left[1 + \left(\frac{\mu_0 E}{v_{sat}}\right)^\beta\right]^{\frac{1}{\beta}}} \quad (1.20)$$

Avec E le champ électrique, μ_0 est la mobilité sous champ faible décrite ci-dessus et v_{sat} est la vitesse de saturation de porteurs. Les valeurs des paramètres β et v_{sat} sont présentées dans le Tableau 1-6. Ces valeurs sont soit théoriques, déterminées par des simulations de type Monte-Carlo (MC), soit expérimentales.

Parameters	Values for 4H-SiC at 300K				Values for 4H-SiC at 593K				4H-SiC at 300K		
	Electrons		Trous		Electrons		Trous		Electrons	Trous	
μ_0 cm ² /Vs	450	[56]	450	[56]	130	[56]	130	[56]			
v_{sat} cm/s	2.2×10 ⁷	[56]	2.2×10 ⁷	[56]	1.6×10 ⁷	[56]	1.6×10 ⁷	[56]	2×10 ⁷	[58]	2×10 ⁷ [58]
	1.25×10 ⁷	[57]	1 ×10 ⁷	[67]							
β	1.2	[56]	1.2	[56]	2.2	[56]	2.2	[56]	2	[57]	
	2	[57]	2	[57]							

Tableau I- 10: Paramètres pour le calcul de la mobilité sous fort champ.

Pour SiC, l'expression analytique utilisée pour calculer la vitesse v_{sat} et le coefficient β est analogue à celui largement employé pour le silicium [54]. Pour les électrons, la vitesse v_{sat} et le coefficient β dépendent de la température selon la loi suivante [59] :

$$\begin{cases} v_{sat} = \frac{v_{max}}{1 + 0.6 e^{\frac{T}{600}}} \\ \beta = \beta_0 + \alpha e^{\frac{T - T_{ref}}{b}} \end{cases} \quad (1.21)$$

À la température ambiante, la vitesse de saturation des électrons 4H-SiC vaut : $v_{sat}=2.2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ et les différents paramètres (v_{max} , β_0 , a , T_{ref} et b) sont résumés dans le **Tableau 1.11**.

Parameters	4H-SiC	6H-SiC	6H-SiC
$v_{max}[\text{cm/s}]$	4.38×10^7	4.77×10^7	4.6×10^7
$T_{ref}[\text{K}]$	103	327	333
β_0	0.676	0.816	0.95
a	0.464	4.27×10^{-2}	4.55×10^{-3}
b	359	98.4	71.8

Tableau I- 11: Paramètres des électrons pour le calcul des différents paramètres (v_{max} , β_0 , a , T_{ref} , a et b) [60].

La vitesse des porteurs tend alors vers une limite de saturation qui est de l'ordre de $2,2 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ avec un coefficient α égal à 2 avec

$$v(E) = \mu(E) \times E \tag{1.22}$$

Pour l'expression de Masetti[51] et Caughey et Thomas [52], l'expression de la mobilité à fort champ est :

$$\mu(E, N, T) = \frac{\mu_0(N, T)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu_0(N, T) \cdot E}{V_{sat}}\right)^2}} \text{ et } V_{sat} = V_{sat0} \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^k \tag{1.23}$$

Avec $V_{sat0}=2.10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ et $K=0.5$ (D'après [61] et [51] et réf.).

Pour le modèle proposé par M. ROSCHKE et F. SCHWIERZ, les expressions développées des deux modèles de mobilité en fonction du dopage, de la température et du champ dans le semi-conducteur.

Modèle [53] :

$$\mu(E, N, T) = \frac{\mu_0(N, T)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu_0(N, T) \cdot E}{2.10^7 \cdot \left(\frac{T}{300}\right)}\right)^2}} \tag{1.24}$$

Modèle [54] pour le SiC-4H:

$$\mu(E, N, T) = \frac{\mu_0(N, T)}{\left\{ 1 + \left[\frac{\mu_0(N, T) \cdot E \left(1 + 0.6 \cdot \exp\left(\frac{T}{600}\right)\right)}{V_{max}} \right]^{\beta(T)} \right\}^{\frac{1}{\beta(T)}}} \tag{1.25}$$

Références Bibliographiques

- [1] FERADJI Ahmed, Modélisation TLM de la diffusion thermique dans les composants semi-conducteurs à grand gap, Doctorat en Sciences, Université d'Oran, 2017.
- [2] Elias AL ALAM, Développement de briques technologiques pour la réalisation de transistor MOS de puissance en Nitrure de Gallium, DOCTORAT en Micro-nanoélectronique, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, 28 avril 2011,
- [3] IMHIMMADAIsadikAbood , nvestigation of Silicon Carbide Based High Voltage And High Power Electronics Components , Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy, University of Belgrade, 2015.
- [4] T. Fujihira. Theory of semiconductor superjunction devices. Japanese journal of applied physics, vol. 36, no. 10, pages 6254–6262, 1997. 13, 14, 22
- [5] G. Civrac. Vers la réalisation de composants haute tension, forte puissance sur diamant CVD. Développement des technologies associées. Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009. 23
- [6] E. O. Johnson, "Physical Limitations on Frequency and Power Parameters of Transistors" RCA Rev., 1963, Vol. 26, pp 163-177.
- [7] R. Keyes, "Figure of Merit for Semiconductors for High-Speed Switches", Proc. IEEE, 1972, Vol. 60, pp 225-232.
- [8] B. J. Baliga, "Semiconductors for High-Voltage, Vertical Channel FET's", J. Appl. Phys., 1982, Vol. 53, No. 3, pp 1759-1764.
- [9] Farah Laariedh, Technologie d'intégration monolithique des JFET latéraux, doctorat en Génie électrique, EEA de Lyon, 2013.
- [10] Tarek BEN SALAH, Contribution à la conception des dispositifs de puissance en carbure de silicium: étude et extraction des paramètres, doctorat en Génie Electrique, INSA de Lyon, 2007.
- [11] H. Moissan, compte-rendu des sciences de l'Académie des Sciences, Paris 140, 405-406, (1905).
- [12] Youcef BELHADJI, Analyse et modélisation des mécanismes de transport électronique dans les dispositifs à effet de champ à l'aide des techniques Monte Carlo : Application au MESFET à base de carbure de silicium, GaSb, et ternaires, DOCTEUR EN SCIENCES En :

Electronique, Spécialité : microélectronique, Université AboubakrBelkaïd– Tlemcen –, 08 / 12 / 2016

[14] D. Tournier, "Composants de puissance en SiC - Technologie," Techniques de l'ingénieur, 10-Fev-2007

[13] S. E Sadowet A. Agarwal, "Advanced in silicon carbide processing and Application", Artech house, (2004).

[15] L. Ottaviani, "Réalisation de jonctions pn dans le carbure de silicium 6H par implantation ionique d'aluminium", Thèse, INSA, (1999).

[16] Dhouha Othman , Etude d'interrupteurs en carbure de silicium et potentiel d'utilisation dans des applications a´eronautiques,Doctorat Génie électrique Université Paris-Saclay, 2015.

[17] [Bennett-84] H. S. Bennett and C. L. Wilson, "Statistical comparisons of Data on Band-Gap Narrowing in Heavily Doped Silicon : Electrical and optical Measurements, " J.Appl.Phys., 1984, vol.55, no. 10, pp. 3582-87.

[18] TesfayeAyalew,SiC Semiconductor Devices Technology, Modeling, and Simulation, D I S S E R T A T I O N, eingereichtan der TechnischenUniversität Wien , FakultätfürElektrotechnik und Informationstechnik, Januar 2004

[19] R.P. Devaty, W.J. Choyke, "Optical Characterization of Silicon Carbide Polytypes", *phys. stat.sol.*, (a) vol. 162, 1997, pp. 5-38.

[20] Levinshtein, M. E., Rumyantsev, S. L., and Shur, M. S. (2001b). Propertiesof Advanced Semiconductor Materials :GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe. John Wiley & Sons.

[21] <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/SiC/bandstr.html>

[22] T. KIMOTO et J. A. COOPER, *Fundamentals of Silicon Carbide Technology :Growth, Characterization, Devices and Applications*. John Wiley & Sons, 24 nov. 2014, 553 p., ISBN : 9781118313527 (cf. p. 17, 24, 26, 27).

[23] Y. Goldberg, M. Levinshtein, and S. Rumyantsev. Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, SiC, BN, SiGe. Eds. Levinshtein M.E., Rumyantsev S.L., Shur M.S., John Wiley and Sons, Inc., New York, (2001), p. 93.

[24] Persson, C., U. Lindefelt, "Relativistic band structure calculation of cubic and hexagonal SiCpolytypes", J. Appl. Phys, Vol.82, No. 11, pp 5496-5508, (1997);

[25] Ruff, M., Mitlehner, H., and Helbig, R. (1994). Sic devices : physics and numerical simulation. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 41(6) :1040–1054.

- [26] Wondrak, W. (1999). Physical limits and lifetime limitations of semiconductor devices at high temperatures. *MicroelectronicsReliability*, 39(6) :1113–1120.
- [27] C. Raynaud, “Propriétés physiques et électroniques du carbure de silicium (SiC),” *Techniques de l'ingénieur*, 10-Mai-2007.
- [28] “Electron Mobility Models for 4H, 6H, and 3C SiC”, M. Roschke, F. Schwierz, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 48, No. 7, July, (2001);
- [29] A. Arvanitopoulos et Al., “Physical parameterisation of 3C- Silicon Carbide (SiC) with scope to evaluate the suitability of the material for power diodes as an alternative to 4H-SiC, *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 565-571. ISBN 978-1-5090-0409-6. DOI: 10.1109/DEMPED.2017.8062411 <http://dx.doi.org/10.1109/DEMPED.2017.8062411>
- [30] Sadao Adachi, *Properties of Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*, John Wiley & Sons, 14 juin 2005 - 406 pages
- [31] TesfayeAyalew, *SiC Semiconductor Devices Technology, Modeling, and Simulation*, ausgeführtzumZwecke der Erlangung des akademischen Grades, einesDoktors der technischenWissenschaften, Wien, imJanuar 2004.
- [32] N.D. ARORA, J.R. HAUSER, D.J. ROULSTON “Electron and Hole Mobilities in Silicon as a Function of concentration and Temperature” *IEEE Transactions On Electron Devices*, Vol. 29, pp. 292-295, 1982.
- [33] D.B.M. KLAASSEN “A Unified Mobility Model for device Simulation : II. Temperature Dependence of Carrier Mobility and Lifetime” *Solid-state Electronics*, Vol. 35, pp. 961-967, 1992.
- [34] J-M. DORKEL, P. LETURCQ “Carrier Mobilities in Silicon Semi-empirically Related to Temperature, Doping and Injection Level” *Solid-state Electronics*, Vol. 24, pp. 821-824, 1981.
- [35] C. LOMBARDI, S. MANZINI, A. SAPORITO, M. VANZI “A Physically Based Mobility Model for Numerical Simulation of Nonplanar Devices” *IEEE Transactions On Computer-Aided Design*, Vol. 7, N° 11, pp. 1164-1171, 1988.
- [36] DionysiosStefanakis and KonstantinosZekentes. *TCAD Models of the Temperature and Doping Dependence of the Bandgap and Low Field Carrier Mobility in 4H-SiC*. *Microelectronic Engineering*, 116:65–71, 2014.

- [37] S Balachandran, T Paul Chow, and Anant K Agarwal. Low and High Temperature Performance of 600 V 4H-SiC Epitaxial Emitter BJTs. In Materials Science Forum, volume 483, pages 909–912. Trans Tech Publ, 2005.
- [38] TesfayeAyalew. SiC Semiconductor Devices Technology, Modeling, and Simulation. PhD thesis, 2004.
- [39] SILVACO ATLAS User’s Manual, 2012.
- [40] F.G. Della Corte and F. Pezzimenti. Incomplete reference from [17]. 2012.
- [41] Pierre Brosselard. Conception, réalisation et caractérisation d’interrupteurs (thyristors et JFETs) haute tension (5kV) en carbure de silicium. PhD thesis, 2004.
- [42] M Bakowski, U Gustafsson, and Ulf Lindefelt. Simulation of SiC High Power Devices. *physica status solidi (a)*, 162(1):421–440, 1997.
- [43] Muhammad Nawaz. On the Assessment of Few Design Proposals for 4H-SiC BJTs. *Microelectronics Journal*, 41(12):801–808, 2010.
- [44] Atsushi Koizumi, Jun Suda, and Tsunenobu Kimoto. Temperature and Doping Dependencies of Electrical Properties in Al-Doped 4H-SiC Epitaxial Layers. 2009.
- [45] Narain D Arora, John R Hauser, and David J Roulston. Electron and Hole Mobilities in Silicon as a Function of Concentration and Temperature. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 29(2):292–295, 1982.
- [46] Larry X Li, Yan Bin Luo, Jian H Zhao, Petre Alexandrov, M Pan, and M Weiner. On the Temperature Coefficient of 4H-SiC npn Transistor Current Gain. In Materials Science Forum, volume 389, pages 1333–1336. Trans Tech Publ, 2002.
- [47] Hideharu Matsuura, Masahiko Komeda, Sou Kagamihara, Hirofumi Iwata, Ryohei Ishihara, Tetsuo Hatakeyama, Takatoshi Watanabe, Kazutoshi Kojima, Takashi Shinohe, and Kazuo Arai. Dependence of Acceptor Levels and Hole Mobility on Acceptor Density and Temperature in Al-Doped p-Type 4H-SiC Epilayers. *Journal of Applied Physics*, 96(5):2708–2715, 2004.
- [48] Sang-Kwon Lee, Processing and Characterization of Silicon Carbide (6H- and 4H-SiC) Contacts for High Power and High Temperature Device Applications, Ph.D Dissertation, KTH, Royal Institute of Technology Department of Microelectronics and Information Technology Device Technology Laboratory Stockholm 2002.
- [49] “Determining 4H silicon carbide electronic properties through combined use of device simulations and metal-semiconductor field-effect-transistor terminal

characteristics”, M. Huang, N. Goldsman, Ch-H. Chang, I. Mayergoyz, J. M. McGarrity and D.Woolard, Journal of Applied Physics, Vol. 84, No. 4, August, (1998);

[50] “SiC Devices: Physics and Numerical Simulations”, M.Ruff, H. Mitlehner, and IñigoNeila “Applying numerical simulation to model SiC semiconductor devices” 51 R. Helbig, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 41, No. 6, June, (1994);

[51] G. MASETTI, M. SEVERI, S. SOLMI “Modeling of Carrier Mobility against carrier Concentration in Arsenic-Phosphorus-, and Boron- Doped Silicon” IEEE Transactions On Electron Devices, Vol. 30, N° 6, pp. 764-769, 1983.

[52] Carrier Mobilities in Silicon Empirically Related to Doping and Field, D.M. CAUGHEY and R.E. THOMAS, ~roc. IEEE 55, Dec. 1967, pp.2192-2193.

[53] Comparison of static, switching and thermal behavior between a 1500 V silicon and silicon carbide- bipolar diodes, NALLET, F.; PLANSON, D.; ISOIRD, K.; LOCATELLI, M.L.; CHANTE, J.P., Semiconductor Conference, 1999. CAS ~9 Proceedings. 1999 International, Volume: 1, Page(s): 195 -198 vol.I.

[54] Electron mobility models for 4H, 6H, and 3C SiC, ROSCHKE, M.; SCHWIERZ, F., Electron Devices, IEEE Transactions on, Volume: 48 Issue: 7 , July 2001, Page(s): 1442 -1447.

[55] C. Canali, G.Majni, R. Minder, and G. Ottaviani, "Electron and hole drift velocity measurements in silicon and their empirical relation to electric field and temperature, " IEEE Trans. on Electron Devices, 1975, vol. ED-22, pp. 1045-47.

[56] HandokoLinewih, Design and Application of SiC power MOSFET, PhD thesis, Engineering and information Technology, Giffith University.

[57] “Determining 4H silicon carbide electronic properties through combined use of device simulations and metal-semiconductor field-effect-transistor terminal characteristics”, M. Huang, N. Goldsman, Ch-H. Chang, I. Mayergoyz, J. M. McGarrity and D.Woolard, Journal of Applied Physics, Vol. 84, No. 4, August, (1998);

[58] “SiC Devices: Physics and Numerical Simulations”, M.Ruff, H. Mitlehner, and IñigoNeila “Applying numerical simulation to model SiC semiconductor devices” 51 R. Helbig, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 41, No. 6, June, (1994);

[59] C. JACOBINI, C. CANALI, G. OTTAVIANI, A. ALBERIGI QUARANTA “A Review of some Charge Transport Properties of Silicon” Solid-State Electronics, Vol. 20, pp. 77-89, 1977.

[60] "Electron Mobility Models for 4H, 6H, and 3C SiC", M. Roschke, F. Schwierz, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 48, No. 7, July, (2001);

[61] Saturated Electron Drift Velocity in 6H Silicon Carbide, W.V. MUENCH AND E. PETTENPAUL, Journal of Applied Physics, Vol. 48, No. 4823, 19

Chapitre II
Simulation,
Résultats et
Interprétations

II.1.Introduction :

La simulation est aujourd'hui un des outils, les plus utilisés pour l'étude du fonctionnement physique des composants électroniques. La simulation nécessite une bonne connaissance des caractéristiques du matériau semi-conducteur étudié. Les propriétés de transport dans ce matériau sont obtenues par une modélisation analytique en utilisant le logiciel commercial MATLAB.

II.2. Variation de la bande interdite avec la température :

La connaissance de la structure de bande d'un semi-conducteur est le paramètre essentiel pour la réalisation de dispositifs. Un des points importants de la structure de bande est la valeur de l'énergie séparant le maximum de la bande valence du minimum de la bande de conduction ("gap" du matériau).

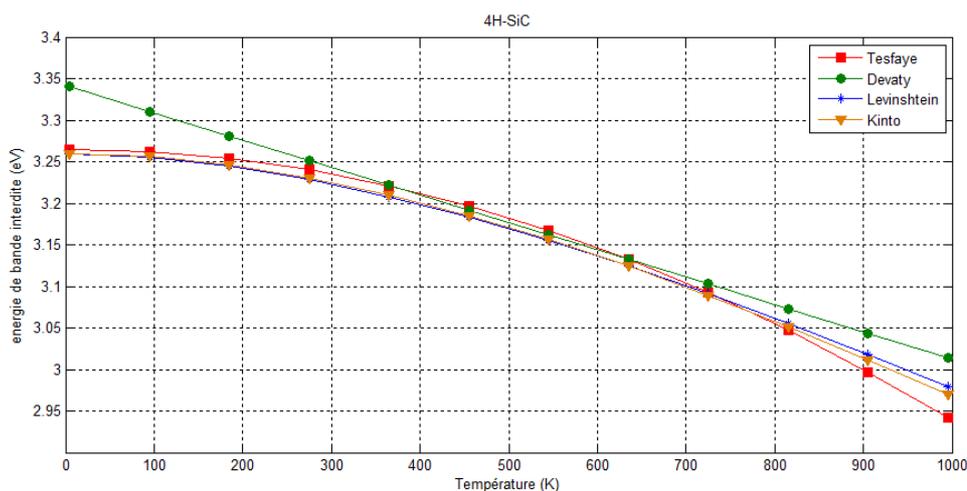


Figure II- 1 : la variation de la bande interdite de 4H-SiC en fonction de la température.

Les **Figures II.1, II.2 et II.3** représentent la variation de la bande interdite du matériau 4H-SiC, 6H-SiC et 3C-SiC. L'augmentation de la température entraîne une légère diminution de l'énergie de la bande interdite. L'évolution de la bande interdite en fonction de la température est non négligeable dans le Carbure de Silicium.

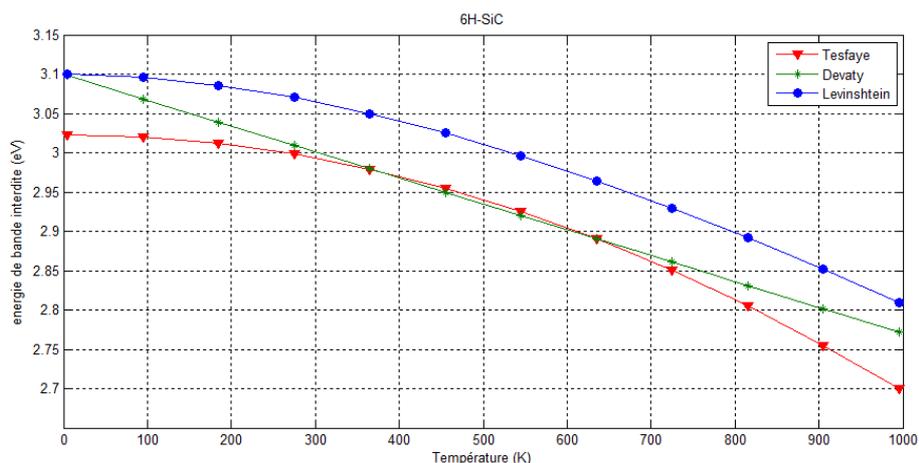


Figure II- 2 : la variation de la bande interdite de 6H-SiC en fonction de la température.

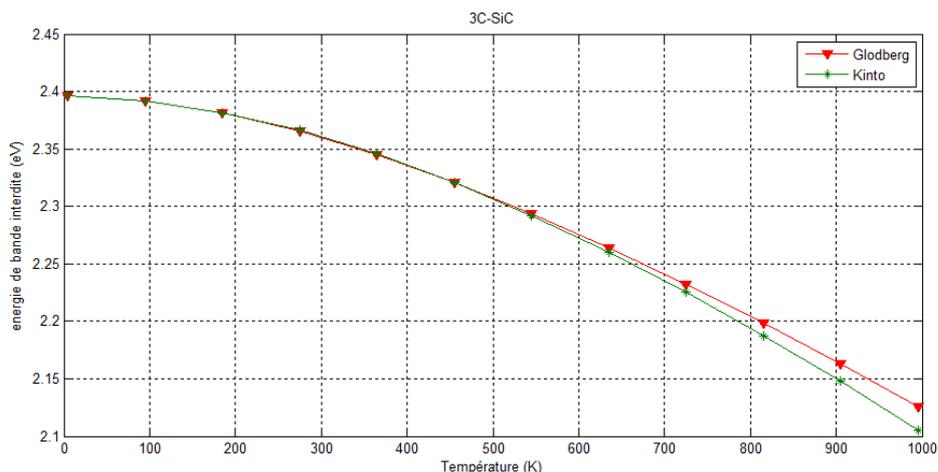


Figure II- 3 : la variation de la bande interdite de 3C-SiC en fonction de la température.

La température du réseau modifie les énergies de transitions du matériau. Classiquement on observe une diminution de l'énergie de bande interdite lorsque la température augmente. Deux mécanismes sont à l'origine de ce phénomène [1].

La dilatation thermique, modifie les distances interatomiques dans le réseau cristallin, ce qui va engendrer une modification des positions de la bande de valence et de la bande de conduction. En effet à haute température les liens interatomique sont affaiblis, et quand on a des liens plus faibles n'a nécessairement besoin que d'une énergie faible pour casser ces liaisons et obtenir un électron dans la bande de conduction. De ce fait en

augmentant la température la largeur de la bande interdite diminue, les porteurs de charge ont plus de facilité d'acquérir une énergie thermique supérieure à l'énergie du gap leur permettant de franchir la bande interdite et passer de la bande de valence à la bande de conduction. Ce phénomène est à l'origine d'environ $\frac{1}{4}$ de la variation totale de la bande interdite en fonction de la température. Les interactions électron-phonon, elles aussi modifient la largeur de bande interdite. Ce sont elles qui ont la principale contribution à cette variation.

II.3. Transport électronique à faible champ électrique : mobilité des électrons et des trous

La mobilité est une grandeur macroscopique, caractéristique du matériau et décrivant la facilité des porteurs à se déplacer dans le cristal. Elle est différente suivant le type de porteurs: les électrons ont des masses effectives plus légères que les trous dans la plupart des semi-conducteurs et ont ainsi des mobilités supérieures. La mobilité dépend aussi du champ électrique, du dopage et surtout de la température. Etant un paramètre fondamental pour le dimensionnement et la technologie des composants la mobilité a fait l'objet d'importants travaux en vue d'obtenir des modèles fins pour la simulation.

A partir de la méthode de Caughey-Thomas [2-3], des modèles ont pu être développés [4-2] pour proposer une expression analytique simple, représentative de l'évolution de la mobilité des porteurs en fonction de la température et du niveau de dopage. La méthode de Caughey-Thomas repose sur une expression mathématique, assez simple et très modulable par un nombre limité de paramètres. Son application à un semi-conducteur donné consiste à déterminer un jeu de constantes conduisant à un écart minimal entre les valeurs données par la formule et celles qui sont mesurées expérimentalement.

II.3.1. Modèle de caughey et thomas :

Dans le domaine des faibles champs électriques, les porteurs libres sont en équilibre thermodynamique avec le réseau et leur vitesse moyenne est proportionnelle au champ électrique. Le modèle de la mobilité à faible champ électrique que nous avons utilisé en simulation et qui a été adapté pour le Carbure de Silicium (4H-SiC, 6H-SiC et 3C-SiC) est

donné par Caughey et Thomas. Les paramètres de l'équation 1.8 chapitre I ont été ajustés par rapport à quelques valeurs de mobilité présentes dans la littérature [5-6-7]. Les Figures ci-dessous montrent les courbes ajustées pour la mobilité des porteurs en fonction de la température pour différentes valeurs de dopage. Les paramètres correspondants aux courbes sont consignés dans le **Tableau 1.5** chapitre I.

▣ Mobilité des électrons :

Les **Figures II.4, II.5, II.6, II.7 et II.8** illustrent l'évolution de la mobilité des électrons dans 4H-SiC, 6H-SiC et 3C-SiC en fonction de la température à différentes valeurs de dopage $N=10^{16}, 10^{17}, 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

La mobilité des porteurs étant liée au libre parcours moyen sans choc dans le semi-conducteur, toute modification du réseau cristallin entraîne une modification de ce paramètre. En effet, l'ajout d'atomes dopants et l'élévation de température créent des perturbations dans le cristal et affectent la mobilité. En effet, plus le dopage du matériau est élevé, plus la mobilité va chuter, ce qui est le cas de tous les semi-conducteurs. On constate également que la variation de la température affecte la mobilité des porteurs. En effet, l'augmentation de la température diminue la mobilité des porteurs. Elle est très importante à basse température comme dans le 4H-SiC où elle atteint $10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ à 50K. Les courbes sont convergentes à haute température, mais ils sont différentes aux basses températures et présentent un étalement.

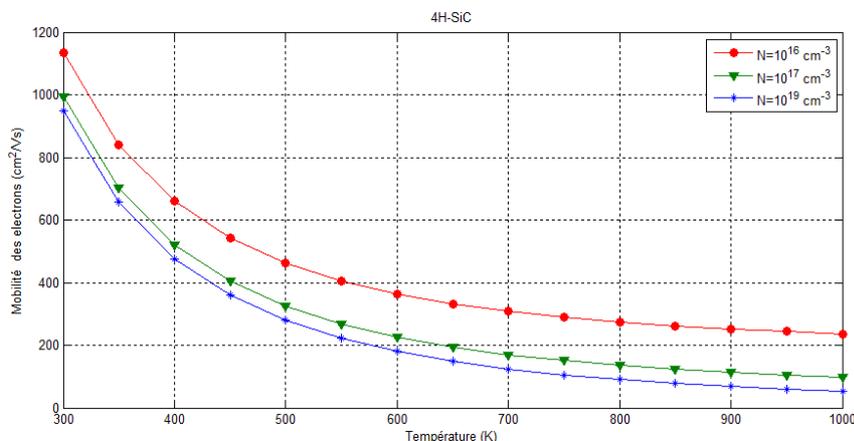


Figure II-4: Variation de la mobilité des électrons de 4H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donnés par Roschke et Schwier.

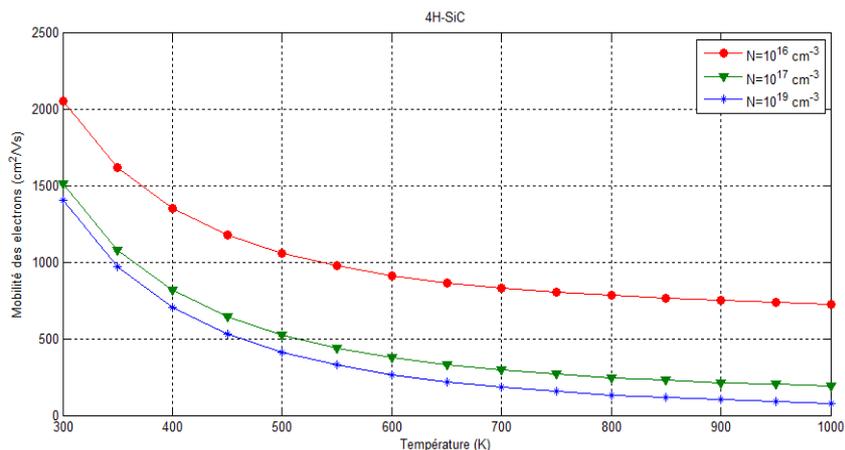


Figure II- 5:Variation de la mobilité des électrons de 4H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donné par Adachi.

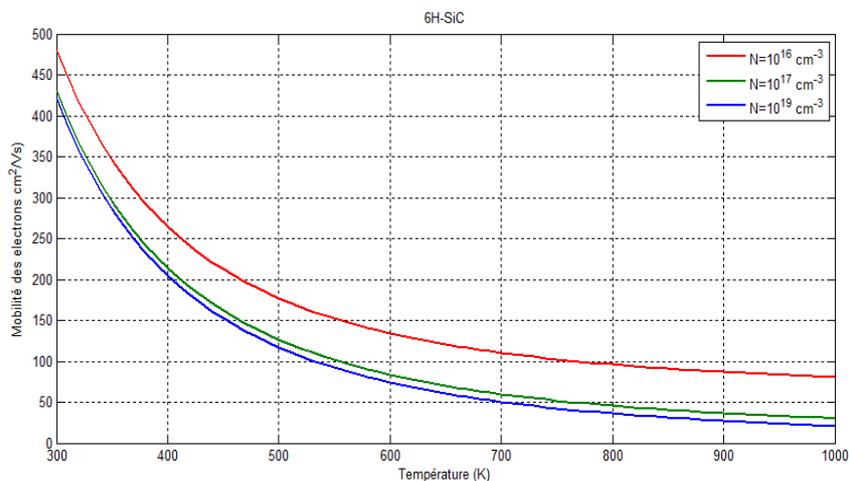


Figure II- 6:Variation de la mobilité des électrons de 6H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donné par Roschke et Schwierz.

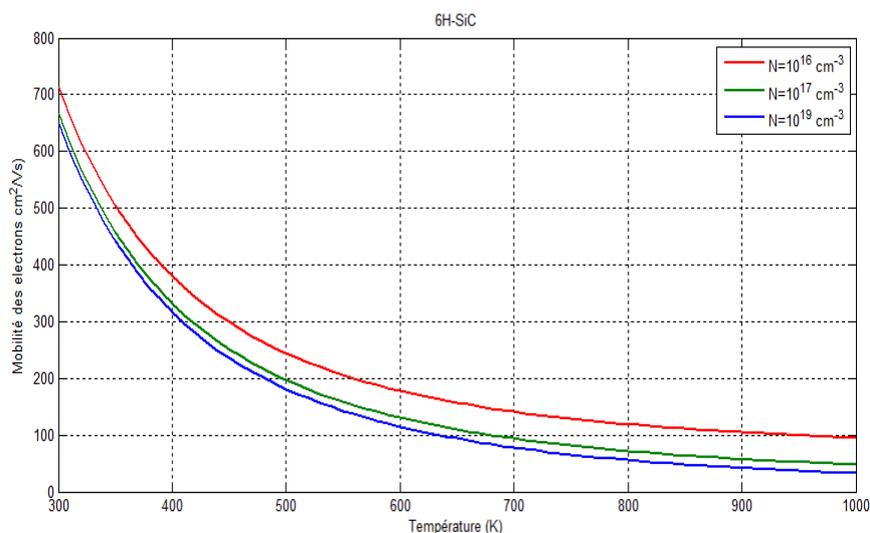


Figure II- 7:Variation de la mobilité des électrons de 6H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donné par Adachi

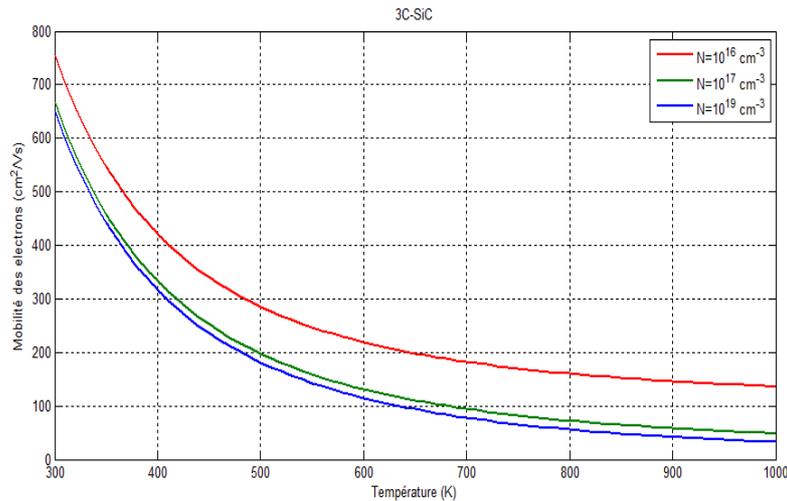


Figure II- 8: Variation de la mobilité des électrons de 3C-SiC en fonction de la température selon les paramètres donnés par Roschke et Schwierz.

On remarque aussi que le maximum de la mobilité diminue quand N_D augmente. On peut donc noter une grande diminution des mobilités entre un dopage $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et 10^{19} cm^{-3} . L'élévation du dopage jusqu'à 10^{19} cm^{-3} diminue la mobilité des électrons de $1150 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ à $950 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ dans le cas de 4H-SiC, de $475 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ à $425 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ dans le cas de 6H-SiC et de $750 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ à $650 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ dans le cas de 3C-SiC pour une température égale à 300 K. Les résultats expérimentaux montrent qu'aux faibles températures, les interactions avec les impuretés ionisées sont les plus pénalisantes pour la mobilité et aux hautes températures, les interactions avec les phonons optiques sont les plus prépondérantes.

Mobilité des trous:

Nous présentons l'évolution de la mobilité des trous de 4H-SiC, 6H-SiC et 3C-SiC en fonction de la température pour différentes concentrations d'impuretés ionisées $N_A = 10^{16}$, 10^{17} , 10^{19} cm^{-3} (Figures II.9, II.10 et II.11). Comme pour les électrons, la mobilité décroît avec la température. Remarquons toutefois que, pour des densités d'impuretés ionisées inférieures à 10^{17} cm^{-3} , les mobilités sont d'autant plus grandes que la densité d'impuretés ionisées est importante. Ce comportement est totalement le même à celui observé dans le cas des électrons. Nous pouvons par ailleurs constater que 4H-SiC possède une mobilité de trous légèrement supérieure à 6H-SiC et 3C-SiC. Par exemple, dans le cas de $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,

nous remarquons que pour le **4H-SiC**, la mobilité vaut $135 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, alors que dans le **6H-SiC** sa valeur maximale est de $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ et **3C-SiC** sa valeur maximale est de $125 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

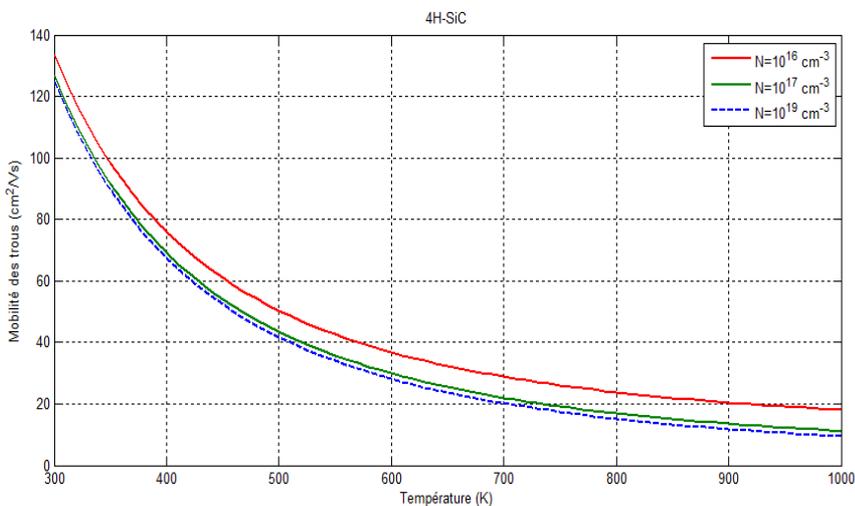


Figure II- 9 : Variation de la mobilité des trous de 4H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donnés par Arvanitopoulos.

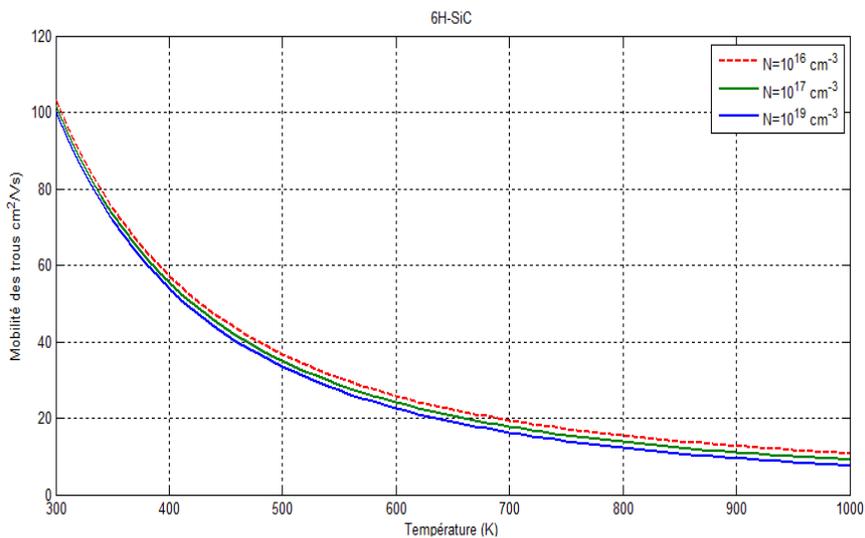


Figure II- 10: Variation de la mobilité des trous de 6H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donnés par Tesfaye.

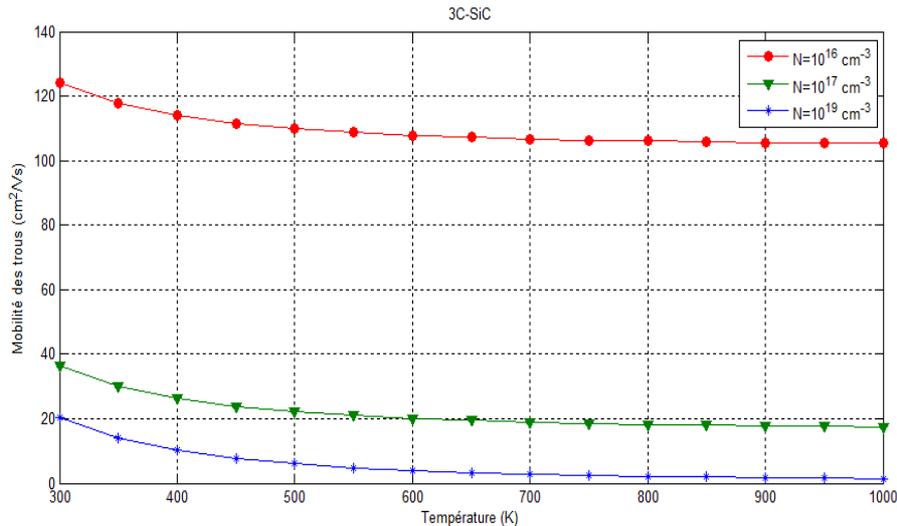


Figure II- 11: Variation de la mobilité des trous de 3C-SiC en fonction de la température selon les paramètres donné par Arvanitopoulos.

On remarque que la mobilité des électrons est plus élevée que celle des trous pour la même concentration de porteurs du fait de leur faible masse effective.

II.3.2. Modèle d'Arora :

Selon le modèle d'Arora, nous représentons la mobilité des porteurs à faible champ des matériaux 4H-SiC, 6H-SiC d'après l'équation 1.14 chapitre I en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration du dopage.

Mobilité des électrons :

Nous montrons par la suite, dans les **Figures II.12, II.13, II.14 et II.15**, la mobilité de 4H-SiC, 6H-SiC en fonction de la température. Les comparaisons et arguments appliqués au cas du modèle de Caughey et Thomas sont similaires et s'appliquent également ici dans le cas des électrons et les trous. En remarque que les mobilités obtenues par ce modèle sont moins faibles par rapport au modèle de Caughey et Thomas.

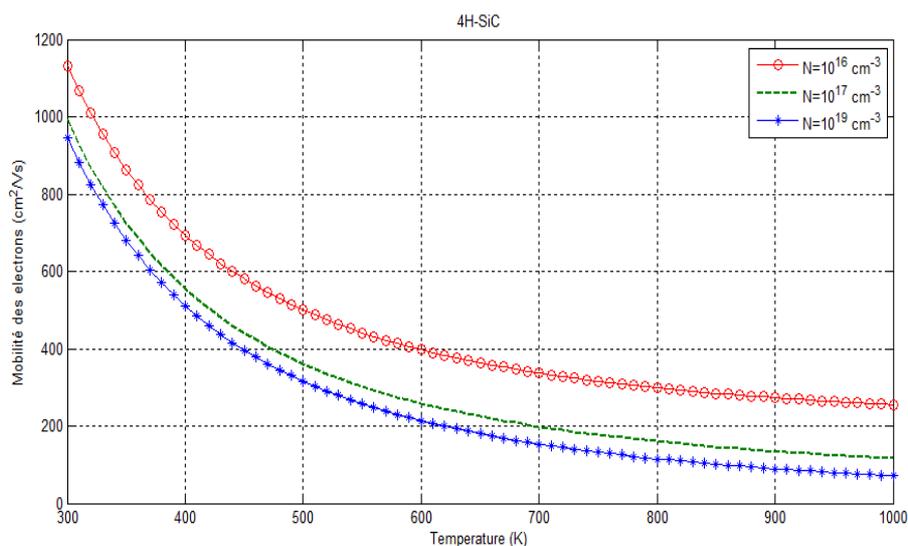


Figure II- 12: Variation de la mobilité des électrons de 4H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donné par Lee.

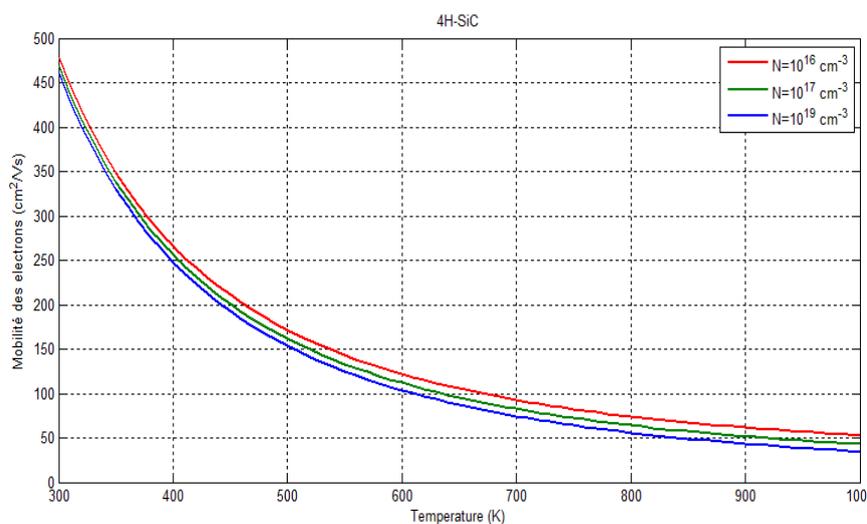


Figure II- 13: Variation de la mobilité des électrons de 4H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donné par Huang.

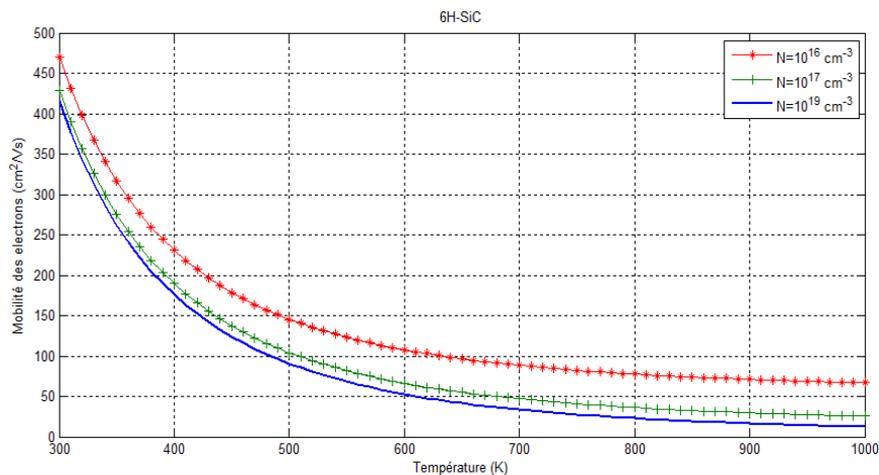


Figure II- 14: Variation de la mobilité des électrons de 6H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donné par Lee.

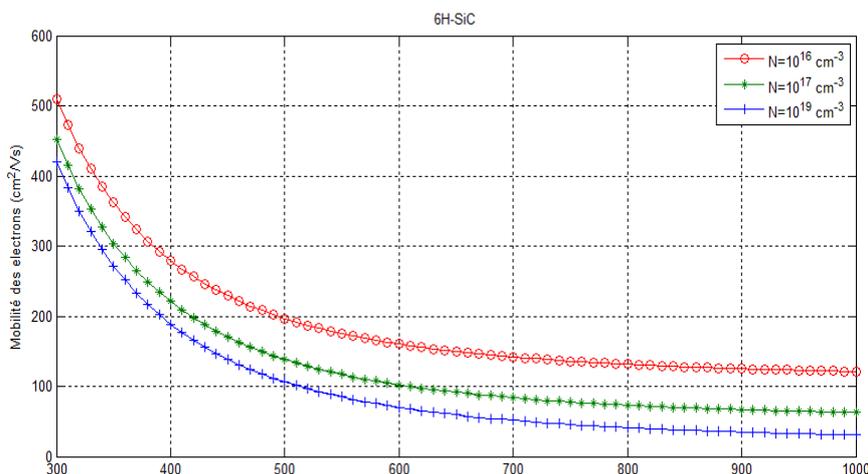


Figure II- 15: Variation de la mobilité des électrons de 6H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donné par Ruff.



Mobilité des trous:

Les Figure II.16, II.17 et II.18 présente la mobilité à faible champ d'et 4H-SiC, 6 H-SiC par le modèle d'Arora en fonction de la température à différentes valeurs de dopage. Sous faible champ électrique, La mobilité dans 4H-SiC à 300 K varie de 135 cm²/Vs pour $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ à 120 cm²/Vs pour $n = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (Figure II.16) et 6H-SiC varie de 90 cm²/Vs pour $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ à 80 cm²/Vs pour $n = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (Figure II.18). La mobilité des trous de ce modèle sont du même ordre que la mobilité du modèle caughey et thomas.

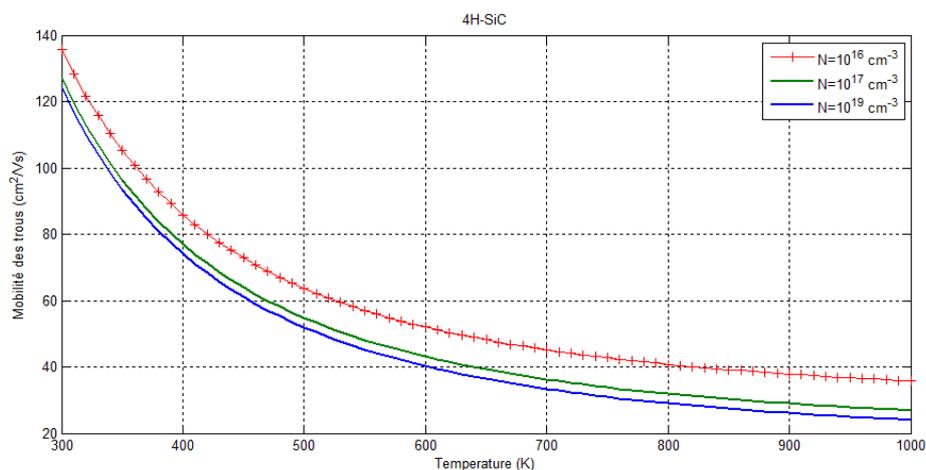


Figure II- 16: la variation de la mobilité des trous de 4H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donné par Lee et Huang.

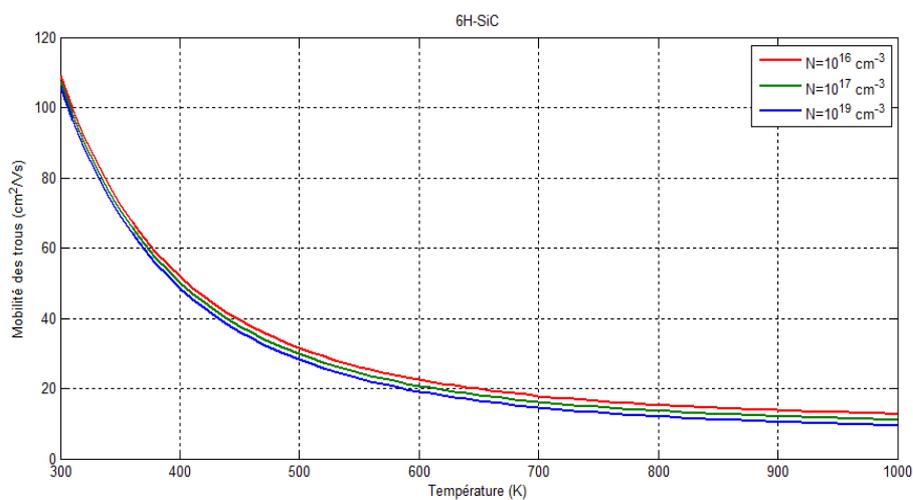


Figure II- 17 : Variation de la mobilité des trous de 6H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donné par Lee.

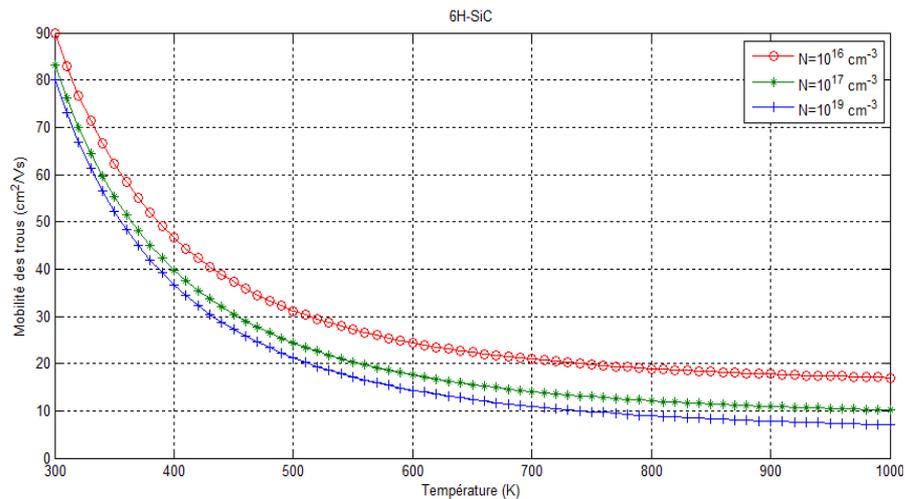


Figure II- 18: Variation de la mobilité des trous de 6H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donnés par Ruff.

II.3.3. Modèle de Masetti :

Pour les deux modèles présentés (chapitre 1), l'hypothèse de champ faible permet l'approximation de ne tenir compte que des équations 1.17 et 1.18 respectivement. Suivant cette dernière hypothèse, on peut donner l'allure de la mobilité dans le SiC-4H suivant la température et le dopage pour les deux modèles (**Figures II.19 et II.20**).

Dans les **Figures II.19 et II.20**, Nous représentons la mobilité des électrons à faible champ de 4H-SiC, modèles de Nallet [12], Roschke et Schwierz [13], en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration du dopage $N_D = 10^{16}, 10^{17}, 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

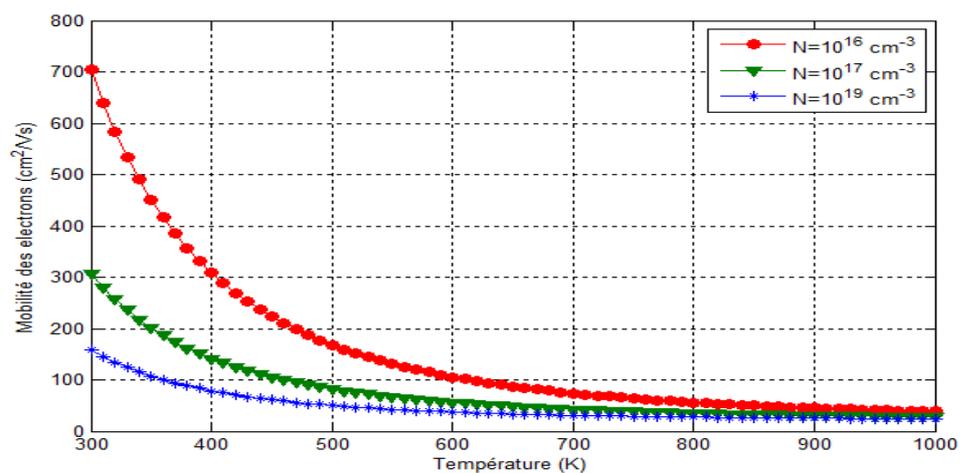


Figure II- 19: Variation de la mobilité des électrons en fonction de la température selon les paramètres donnés par Nallet.

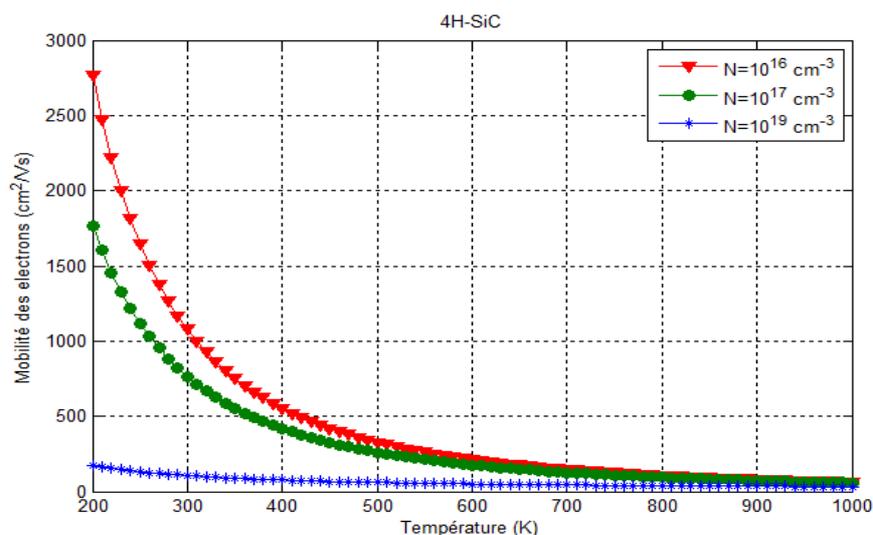


Figure II- 20: Variation de la mobilité des électrons de 4H-SiC en fonction de la température selon les paramètres donnés par Roschke et Schwierz.

Dans les deux cas, la mobilité diminue à mesure que la température augmente. On peut également constater que la diffusion des impuretés domine à basse température. À des températures plus élevées, au-dessus de 300K, l'effet de la diffusion des impuretés sur la mobilité des électrons est minime et sa valeur est déterminée par la force de la diffusion du phonon. Cependant, nous observons un changement significatif dans le résultat ou on constate une différence sensible des mobilités suivant le modèle employé. Roschke et Schwierz [13] justifie l'écart de son modèle comparé aux valeurs usuelles entre autres par une amélioration de la qualité du matériau et des épitaxies. Les deux modèles présentent cependant des variations similaires avec la température et le dopage.

II.4. Transport électronique à fort champ électrique : relations « vitesse moyenne » Vs champ

Sous l'influence d'un fort champ électrique, la vitesse des porteurs n'est plus proportionnelle à ce dernier. Une des manières de prendre en compte la relation non-linéaire entre vitesse moyenne des porteurs et champ électrique est de décrire l'évolution de la « mobilité », définie comme μ , en fonction du champ électrique (E). Du fait du phénomène de transfert électronique vers des vallées secondaires à forte densité d'états (liée à la forte masse effective), qui affecte les électrons de forte énergie cinétique dans la

Bande de conduction, la relation $v(E)$ passe par un maximum avant de redescendre à fort champ électrique [3].

Ainsi, la relation entre la vitesse des porteurs et champ électrique doit être décrite par l'évolution de la mobilité en fonction du champ électrique (E). Nous notons $\mu(E)$ cette mobilité et nous exprimons :

$$v(E) = \mu(E) \cdot E$$

Avec $v(E)$ la vitesse des porteurs en fonction du champ électrique. Il est bien connu que la température joue un rôle décisif en influençant sur les caractéristiques de la vitesse de dérive en fonction du champ électrique.

II.4. 1. Effet de la température sur les caractéristiques de transport :

II.4.1.1. Vitesse des électrons en fonction du champ électrique:

La loi de variation de la mobilité par rapport au champ électrique varie d'un matériau à l'autre, en fonction de la nature de la structure de bandes du semi-conducteur, elle se traduit par une variation non linéaire de la vitesse de dérive des porteurs.

Modèles de Caughey et Thomas :

Les vitesses de dérive en fonction du champ électrique des électrons pour différentes températures ont été représentées dans les **Figures II.21, II.22 et II.23** pour le 4H-SiC et 6H-SiC.

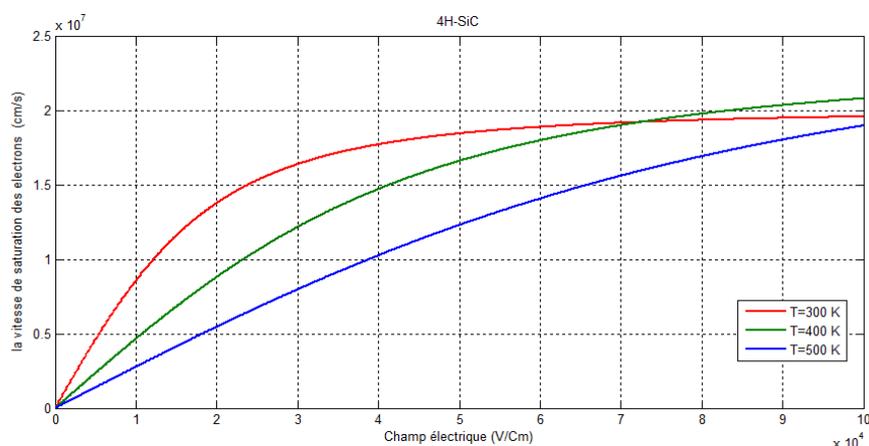


Figure II- 21: La vitesse des électrons de 4H-SiC en fonction du champ électrique.

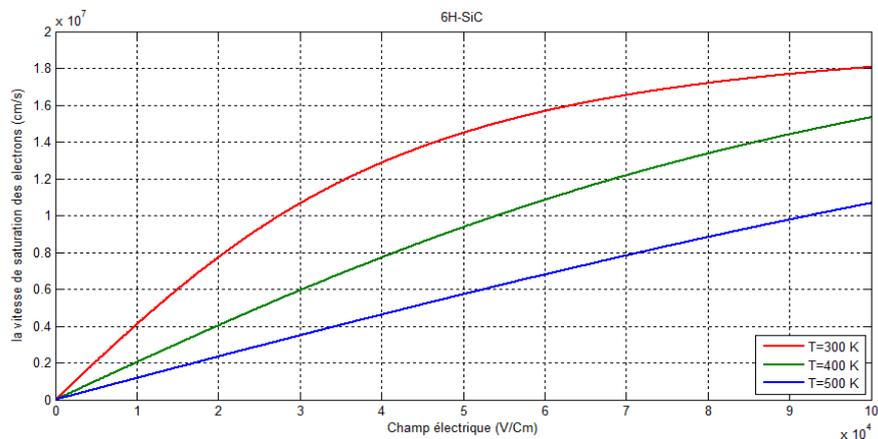


Figure II- 22: La vitesse des électrons de 6H-SiC en fonction du champ électrique.

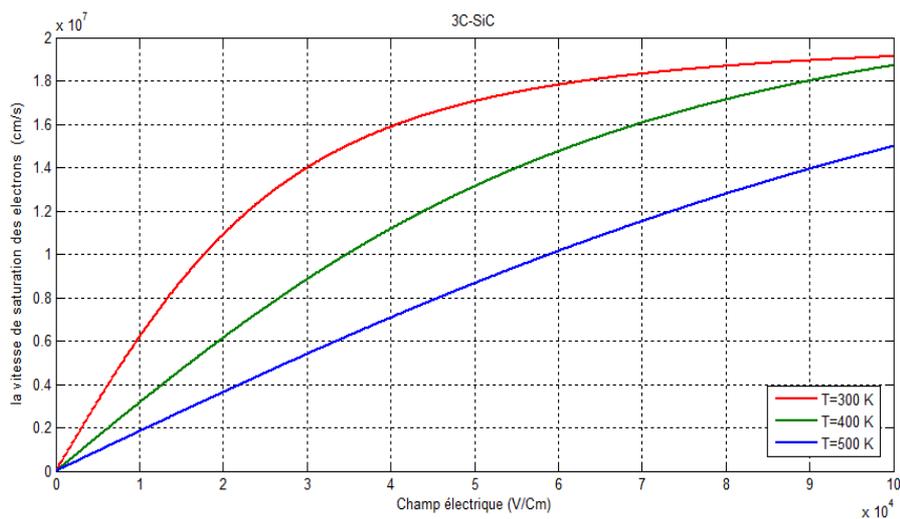


Figure II- 23: La vitesse des électrons de 3C-SiC en fonction du champ électrique.

Modèles de Roschke et Schwiers :

Les Figures II.24 et II.25 montrent la vitesse de dérive des électrons calculée en fonction du champ électrique pour le matériau 4H-SiC selon Nallet [12] et Roschke et Schwierz [13].

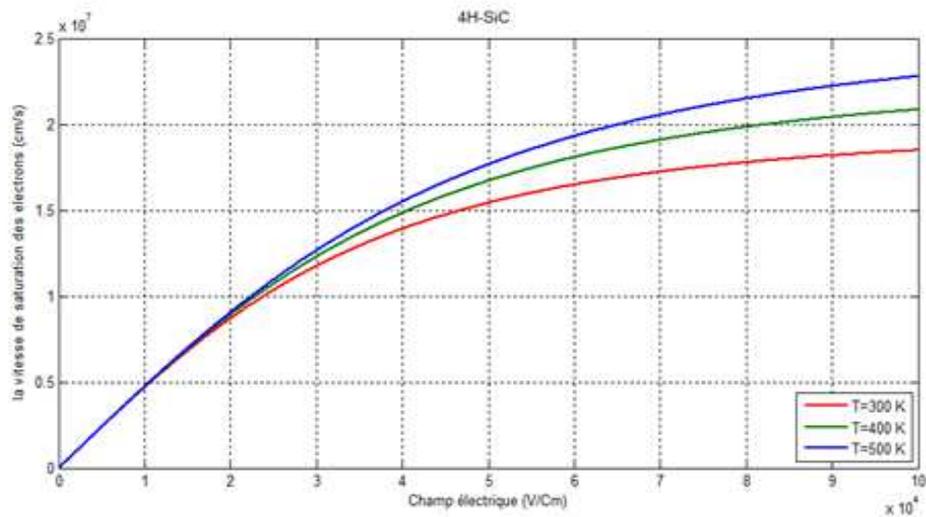


Figure II- 24: La vitesse des électrons de 4H-SiC en fonction du champ électrique selon les paramètres donnés par Nallet.

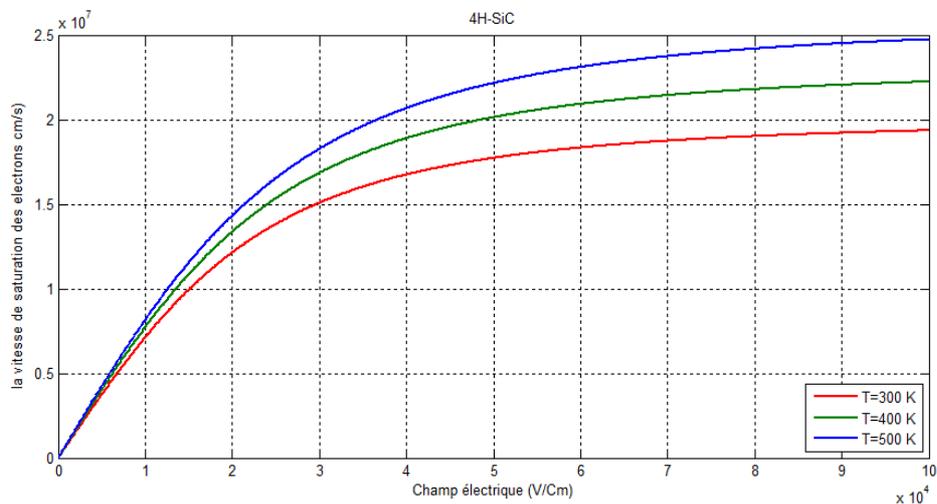


Figure II- 25: La vitesse des électrons de 4H-SiC en fonction du champ électrique selon les paramètres donnés par Roschke et Schwierz.

Seuls les éléments de la colonne III-V présentent un pic de survitesse, alors que pour le carbure de silicium, la vitesse de dérive des porteurs est continûment croissante jusqu'à la saturation. La vitesse maximale des trois polytypes est autour de 2×10^7 cm.s⁻¹ à 300 K.

Nous remarquons que la forme des caractéristiques de vitesse en fonction du champ change sensiblement à mesure que la température augmente. En particulier, la vitesse de dérive maximale et la vitesse de saturation diminuent sensiblement avec la température. Il est intéressant de noter que la mobilité à faible champ augmente pendant que la température diminue, tandis que, la vitesse de saturation montre une dépendance moins prononcée de la température. Ceci peut être expliqué que pour les faibles champs, la dispersion est dominée par les phonons acoustiques, des impuretés ionisées, et l'absorption des phonons optiques polaires qui sont faibles pour des basses températures améliorant ainsi la mobilité.

II.4.1.2. Vitesse des trous en fonction du champ électrique:

Les vitesses de dérive en fonction du champ électrique des trous pour différentes températures ont été représentées dans les **Figures II.26, II.27 et II.28** pour 4H-SiC, 6H-SiC et 3C-SiC selon le modèle cauchy et thomas.

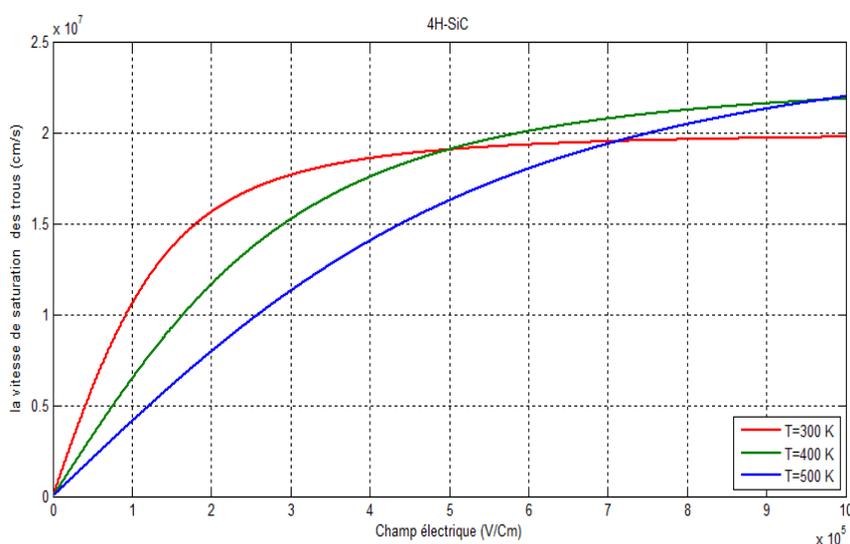


Figure II- 26: La vitesse des trous de 4H-SiC en fonction du champ électrique.

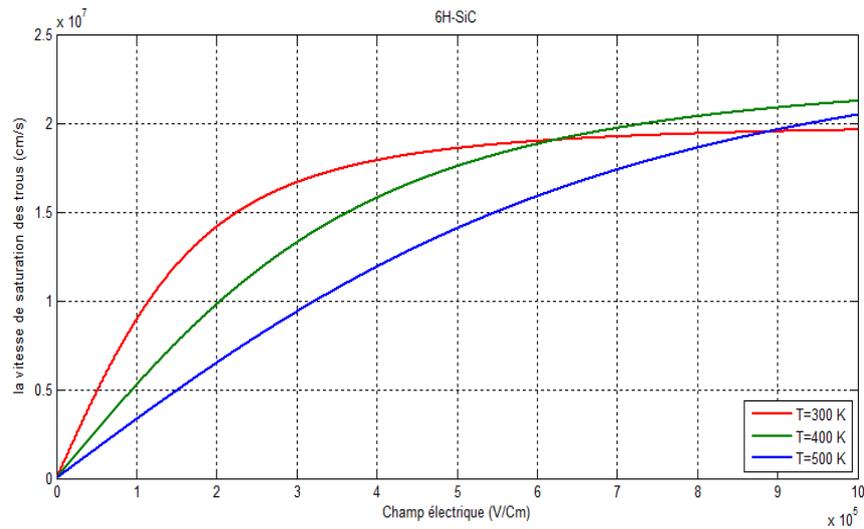


Figure II- 27: La vitesse des trous de 6H-SiC en fonction du champ électrique.

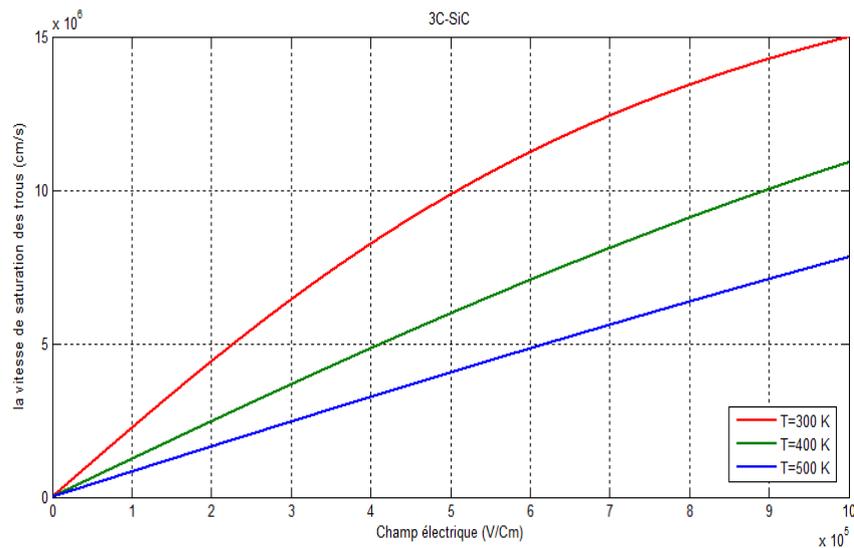


Figure II- 28: La vitesse des trous de 3C-SiC en fonction du champ électrique.

Un pic de vitesse de 2×10^7 cm/s a été enregistré pour les trois polytypes. Aussi, De plus en plus que la température augmente, la vitesse de dérive tend à se croître jusqu'à une valeur dite de saturation. Pour un champ très élevé, la majorité des particules reste dans les bandes supérieures pour donner à la vitesse une valeur constante. Les valeurs des champs critiques enregistrés, montrent l'avantage du SiC d'être un candidat promoteur pour les applications de forte puissance.

II.4. 2. Effet du dopage sur les caractéristiques de transport :

Le dopage des semi-conducteurs est un élément clef pour la fabrication des composants électroniques. En effet, un semi-conducteur pur (intrinsèque) est quasiment un isolant à la température ambiante, avec une bande de valence presque entièrement pleine, et une bande de conduction presque entièrement vide. Les propriétés électroniques intéressantes sont donc liées à la possibilité de "doper" le matériau par l'introduction d'impuretés adéquates (les dopants) permettant d'introduire des porteurs libres et faire fonctionner les composants électroniques.

II.4.2.1. Vitesse des électrons en fonction du champ électrique:

Les vitesses de dérive en fonction du champ électrique pour différents dopages ont été tracées sur les **Figures II.29, II.30** et **II.31** pour 4H-SiC, 6H-SiC et 3C-SiC selon le modèle de Caughey et Thomas.

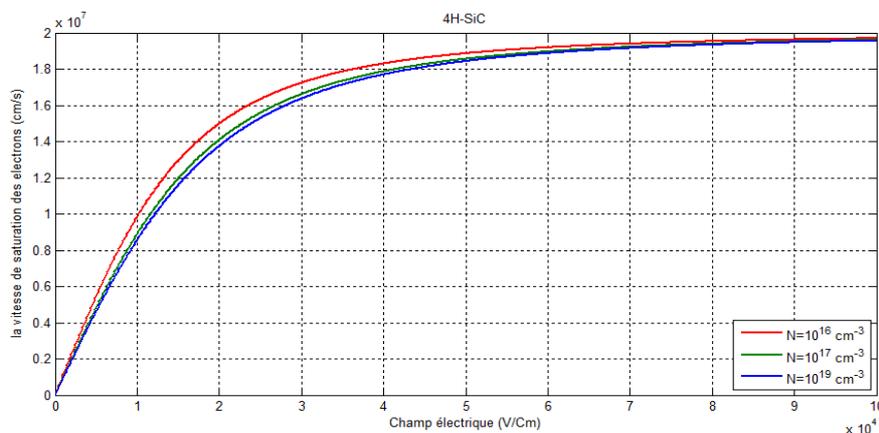


Figure II- 29: La vitesse des électrons de 4H-SiC en fonction du champ électrique.

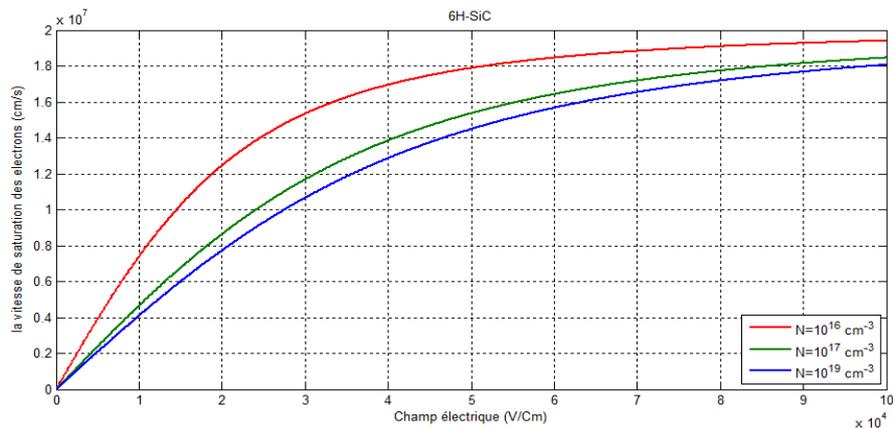


Figure II- 30: La vitesse des électrons de 6H-SiC en fonction du champ électrique.

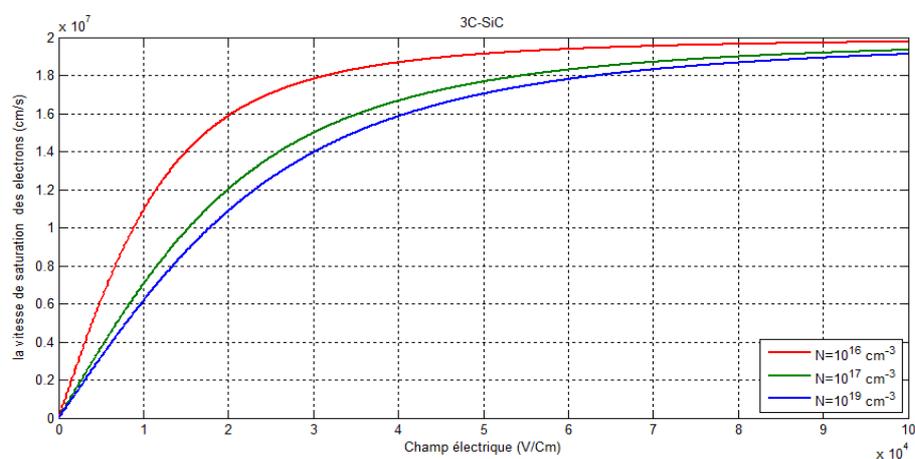


Figure II- 31: La vitesse des électrons de 3C-SiC en fonction du champ électrique.

Les vitesses de dérive en fonction du champ électrique pour différents dopages ont été tracées sur les **Figures II.32** et **II.33** pour 4H-SiC et 6H-SiC selon le modèle de Roschke et Schwiers.

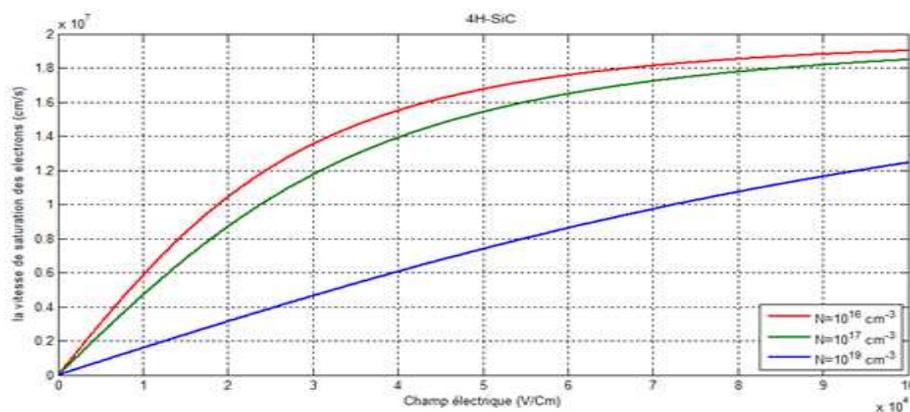


Figure II- 32: La vitesse des électrons de 4H-SiC en fonction du champ électrique selon les paramètres donnés par Nallet.

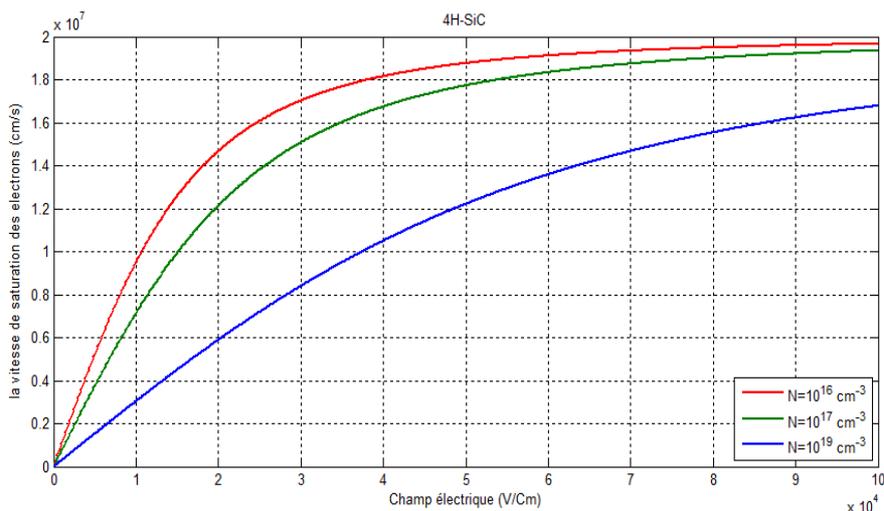


Figure II- 33: La vitesse des électrons de 4H-SiC en fonction du champ électrique selon les paramètres donnés par Roschke et Schwierz.

II.4.2.2. Vitesse des trous en fonction du champ électrique:

Nous présentons la vitesse à fort champ de 4H-SiC, 6H-SiC et 3C-SiC en fonction du champ électrique pour différents dopages 10^{16} , 10^{17} et 10^{19} cm^{-3} (Figures II.34, II.35 et II.36) selon le modèle de Caughey et Thomas.

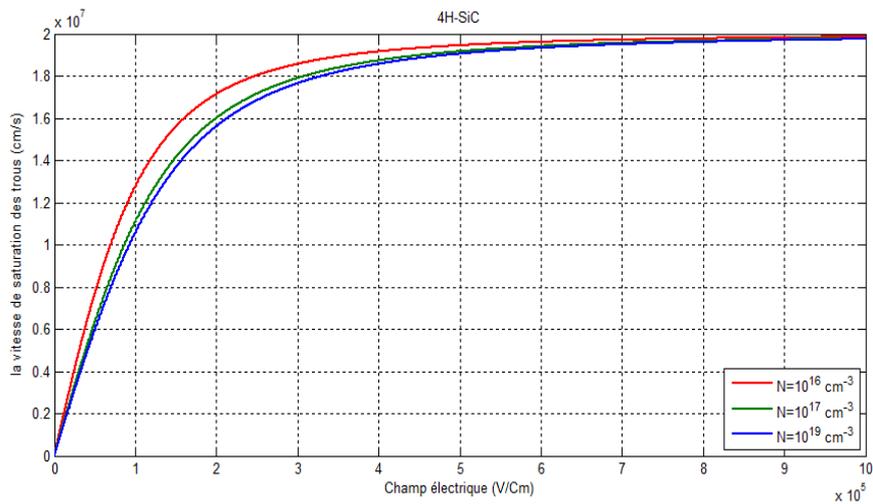


Figure II- 34: La vitesse des trous de 4H-SiC en fonction du champ électrique.

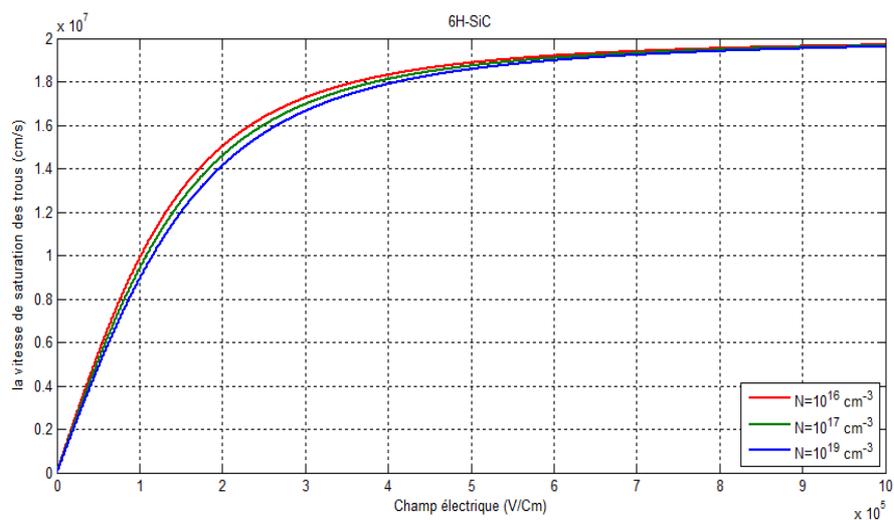


Figure II- 35: La vitesse des trous de 6H-SiC en fonction du champ électrique.

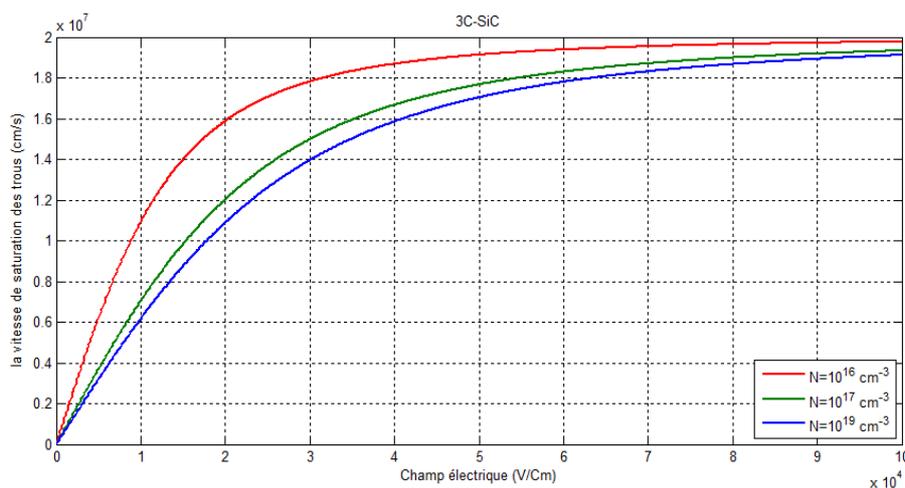


Figure II- 36: La vitesse des trous de 3C-SiC en fonction du champ électrique.

On remarque que la vitesse de dérive des porteurs (électrons et trous) diminue lorsqu'on augmente la concentration des atomes dopants. Les courbes sont convergentes pour des champs électriques élevés.

II.5.Conclusion :

A partir de ce travail, Nous avons donc étudié les propriétés de transport des matériaux SiC en particulier les matériaux 3C-SiC, 4H-SiC et 6H-SiC. Nous avons essentiellement utilisé la modélisation analytique, qui permet de décrire le fonctionnement de systèmes complexes à partir des lois élémentaires régissant le mouvement des électrons. A partir de la méthode de Caughey-Thomas, des modèles ont pu être développés pour proposer une expression analytique simple, représentative de l'évolution de la mobilité des porteurs en fonction de la température et du niveau de dopage. Nous avons étudié deux modèles d'Arora et massetti dans le but de faire une comparaison des résultats obtenus par ces derniers.

II.6. Références bibliographiques

- [1] Stéphane Fanget, « Matériaux et Hétérostructures à base de Nitrures d'éléments III en phase cubique et hexagonale pour l'optoélectronique », doctorat en dispositifs de l'électronique intégrée, Université Joseph Fourier (Grenoble), 2002.
- [2] DM Caughey and RE Thomas, « Carrier mobilities in Silicon empirically related to doping and field. Proceedings of the IEEE, 55(12) :2192–2193, 1967.
- [3] Nicolas Thierry-Jebali, « Caractérisations et modélisations physiques de contacts entre phases métalliques et Nitrure de Gallium semi-conducteur. », DOCTORAT EN MATERIAUX, Université Claude Bernard – Lyon I, 2011.
- [4] Hamdoune AEK, « Elaboration Du Nitrure De Gallium Etude De Ses Propriétés et Applications. », U. Tlemcen, 2006.
- [5] “Electron Mobility Models for 4H, 6H, and 3C SiC”, M. Roschke, F. Schwierz, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 48, No. 7, July, (2001);
- [6] A. Arvanitopoulos et Al., “Physical parameterisation of 3C- Silicon Carbide (SiC) with scope to evaluate the suitability of the material for power diodes as an alternative to 4H-SiC, IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 565-571. ISBN 978-1-5090-0409-6. DOI: 10.1109/DEMPED.2017.8062411 <http://dx.doi.org/10.1109/DEMPED.2017.8062411>
- [7] Sadao Adachi, Properties of Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors, John Wiley & Sons, 14 juin 2005 - 406 pages
- [8] Tesfaye Ayalew, SiC Semiconductor Devices Technology, Modeling, and Simulation, ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades, eines Doktors der technischen Wissenschaften, Wien, im Januar 2004.
- [9] Sang-Kwon Lee, Processing and Characterization of Silicon Carbide (6H- and 4H-SiC) Contacts for High Power and High Temperature Device Applications, Ph.D Dissertation, KTH, Royal Institute of Technology Department of Microelectronics and Information Technology Device Technology Laboratory Stockholm 2002.
- [10] “Determining 4H silicon carbide electronic properties through combined use of device simulations and metal-semiconductor field-effect-transistor terminal characteristics”, M. Huang, N. Goldsman, Ch-H. Chang, I. Mayergoyz, J. M.

McGarrity and D.Woolard, Journal of Applied Physics, Vol. 84, No. 4, August, (1998).

[11] "SiC Devices: Physics and Numerical Simulations", M.Ruff, H. Mitlehner, and IñigoNeila "Applying numerical simulation to model SiC semiconductor devices" 51 R. Helbig, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 41, No. 6, June, (1994).

[12] Comparison of static, switching and thermal behavior between a 1500 V silicon and silicon carbide- bipolar diodes, NALLET, F.; PLANSON, D.; ISOIRD, K.; LOCATELLI, M.L.; CHANTE, J.P., Semiconductor Conference, 1999. CAS ~9 Proceedings. 1999 International, Volume: 1, Page(s): 195 -198 vol.I.

[13] Electron mobility models for 4H, 6H, and 3C SiC, ROSCHKE, M.; SCHWIERZ, F., Electron Devices, IEEE Transactions on, Volume: 48 Issue: 7 , July 2001, Page(s): 1442 -1447.

Conclusion générale

Au cours de ce travail, Nous avons donc étudié les propriétés de transport du Carbure de Silicium en particulier les matériaux 4H-SiC, 6H-SiC et 3C-SiC. Nous avons essentiellement utilisé la modélisation analytique, qui permet de décrire le fonctionnement de systèmes complexes à partir des lois élémentaires régissant le mouvement des électrons. Un certain nombre d'informations sur ces matériaux ne sont pas encore présentés dans la littérature. Dans le but d'approfondir la connaissance de ces matériaux, l'un des points importants de cette étude a consisté en l'extraction des paramètres de transport tels que la vitesse et la mobilité des électrons.

A partir de la méthode de Caughey-Thomas, des modèles ont pu être développés pour proposer une expression analytique simple, représentative de l'évolution de la mobilité des porteurs en fonction de la température et d'un niveau de dopage. Nous avons étudié trois modèles (Caughey-Thomas, Masetti et Arora) dans le but de faire une comparaison des résultats obtenus par ces derniers.

Les résultats obtenus par cette simulation dépendent fortement des propriétés du semi-conducteur surtout de la structure de bande ainsi que les paramètres constituant ce matériau. Pour certains paramètres, il y a aussi plusieurs méthodes de leurs calculs et chaque calcul aboutit à des résultats qui sont des fois différentes des résultats obtenus par d'autre méthode. Alors dans ce cas, le choix de ces paramètres s'avère très difficile. Ces résultats ne sont pas toujours exacts et restent purement théoriques, alors il faut toujours les comparés avec des résultats existant dans la littérature.

Toute l'étude qui peut être faite sur ce matériau est alors transposable à n'importe lequel de ces composés. Il sera alors intéressant de faire des études comparatives des propriétés présentées par ces matériaux afin de choisir celui qui sera le plus approprié à l'application envisagée au niveau du composant, avant toute réalisation technologique.