HAL
open science

Modélisation phénoménologique de la caractéristique IV en direct de diodes Schottky/JBS en carbure de silicium

Besar Asllani, Shiqin Niu, Patrick Denis, Maxime Berthou, Dominique Tournier, Pierre Brosselard

To cite this version:

Besar Asllani, Shiqin Niu, Patrick Denis, Maxime Berthou, Dominique Tournier, et al.. Modélisation phénoménologique de la caractéristique IV en direct de diodes Schottky/JBS en carbure de silicium. Symposium de Génie Electrique (SGE'14), Jul 2014, Cachan, France. hal-01065193

HAL Id: hal-01065193

https://hal.science/hal-01065193v1

Submitted on 18 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation phénoménologique de la caractéristique IV en direct de diodes Schottky/JBS en carbure de silicium

Besar ASLLANI, Shiqin NIU, Patrick DENIS, Maxime BERTHOU, Dominique TOURNIER, Pierre BROSSELARD
Université de Lyon, INSA de Lyon, Laboratoire Ampère, CNRS UMR 5005, 21 av. Jean Capelle F69621 Villeurbanne, France

RESUME – Ce travail de recherche propose une approche nouvelle de modélisation de diodes Schottky/JBS en carbure de silicium en employant la seule équation de Shockley comme terme générique d'un modèle électrique multi-branches. La fonction de Lambert est utilisée pour s'affranchir du caractère implicite de cette équation. In fine, des paramètres - dits phénoménologiques - sont déterminés afin de reconstruire la caractéristique IVT en dessous et au dessus du seuil avec un facteur de qualité convaincant. Deux cas sont traités, celui d'une diode Schottky SiC avec interface en Tungstène stable, et celui de diodes Schottky et JBS avec interface en Nickel issues de procédés de conception/fabrication en cours de développement. Les résultats obtenus permettent de discuter de la maturité/qualité de l'interface métal/semiconducteur étudiée et des possibles mécanismes de conduction à l'oeuvre. Enfin, le modèle phénoménologique présente aussi un intérêt en terme de simulations électriques.

Mots-clés – Modélisation phénoménologique, Multi-branches, Fonction de Lambert, Mécanismes de conduction.

1. INTRODUCTION

La modélisation des composants électroniques de puissance en carbure de silicium représente des enjeux majeurs tant pour la réalisation de simulations de ces composants intégrés dans des systèmes, que pour la compréhension des mécanismes de conduction corrélant architecture et fonctionnement. De nombreux travaux [1, 2, 3, 4] proposent des stratégies d'extraction de paramètres permettant, pour des cas particuliers et dans un domaine de validité donné, de caractériser des composants et d'en proposer une modélisation. Néanmoins, les cas d'études proposés sont souvent relativement stables et matures ou encore triviaux - comme pour l'existence d'une double hauteur de barrière apparaissant comme évidente lors de caractérisation en direct en température et sous le seuil [5].

Des diodes Schottky JBS 4H-SiC 3,5kV ont été conçues au laboratoire en interne et fabriquées en externe par la société IBS (Ion Beam Services). Deux types de structures (Schottky et JBS) sont investiguées afin d'optimiser la tenue en tension en inverse et la réduction des courants de fuite. La modélisation analytique de leurs caractéristiques en direct et en température présente un intérêt majeur pour produire des indicateurs de performance ou d'état de la structure relatifs au "design" particulier et aux procédés de fabrication.

Alors que la conduction par effet thermoïonique est prépondérante pour les diodes Schottky SiC [6], il apparaît que son équation ne permette pas d'ajustement sur les relevés expérimentaux de nos composants d'étude quelque soit le jeu de paramètres R_s, n et ϕ_B. L'enjeu posé est alors de définir un modèle permettant un ajustement satisfaisant sur la caractéristique IVT en direct. Les paramètres extraits n'ont pas de sens physique à ce stade mais y sont relatifs, ils sont alors qualifiés de "phénoménologiques". Dans la mesure où les branches du modèle peuvent être identifiées à des mécanismes de conduction réels, les paramètres deviennent "physiques".

La stratégie d'extraction est un point fondamental de ces travaux. Se basant initialement sur un composant de référence, une diode Schottky pure avec une interface Tungstène/SiC de bonne qualité, elle est définie pour permettre un ajustement sur les composants en développement. Ainsi, deux exploitations distinctes du modèle sont possibles avec, soit un usage à destination de la simulation électrique, soit les informations produites constituent des données d'entrée d'une analyse de fonctionnement amenant des hypothèses sur les mécanismes de conduction en jeu.

2. COMPOSANTS D'ÉTUDE

2.1. *Composant de référence*

Le composant de référence est une diode Schottky pure de surface active de $4,4mm^2$. L'interface métal/semiconducteur est de type W/4H-SiC. A 25°C, l'extraction de paramètres avec un modèle thermoïonique une seule branche s'ajuste parfaitement aux données expérimentales. Cette modélisation analytique donne les résultats suivants : $R_s = 0,35\Omega, n = 1,07$ et $\phi_B = 1,25eV$ [7].

2.2. *Composants développés et fabriqués*

Les diodes Schottky et JBS conçues se différentient essentiellement par l'implantation de caissons p+ dans la zone active de 3 μm de largeur et de 8 μm d'espacement. L'une et l'autre sont pourvues d'un "channel stopper" permettant d'atteindre des tensions de claquage de 2750V et 3250V respectivement, en considérant un critère de courant de fuite en inverse de 200μA. Ainsi, l'efficacité du design JBS est démontré par la réduction des courants de fuite en inverse. La Figure 1 donne la configuration structurale des diodes JBS réalisées.

Il en résulte néanmoins une réduction de la surface active de l'ordre de 50%, pour une surface active de la diode Schottky pure de $3,9mm^2$. Autre inconvénient, la réduction du canal de conduction entre caissons peut être à l'origine d'une résistance significativement plus élevée à l'état passant.

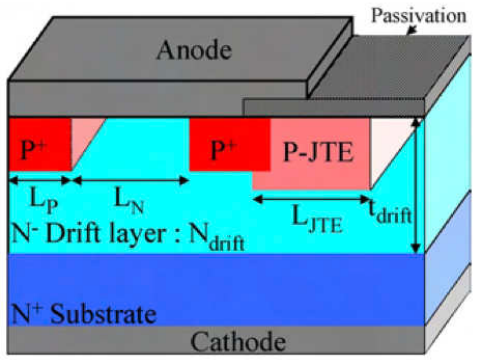

Fig. 1. Schéma en coupe de la structure d'un composant JBS réalisé [8].

Comme le démontre la Figure 2, un modèle thermoïonique simple à 25˚C convient parfaitement pour le composant de référence, ce qui n'est absolument pas le cas pour les composants d'étude.

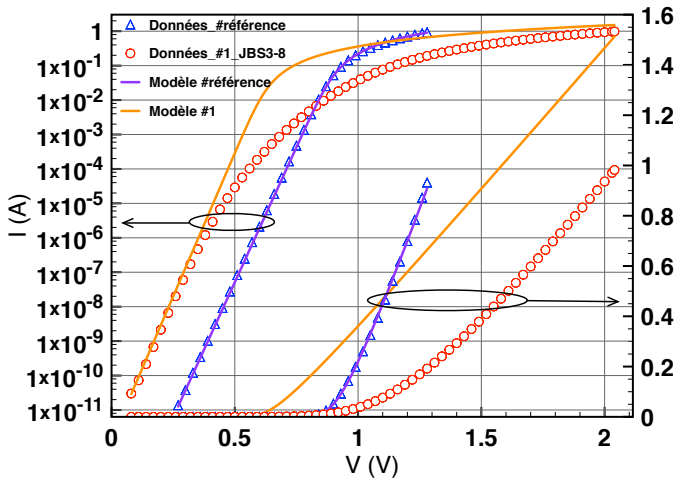

Fig. 2. Illustration de la validité du modèle TE une branche pour le composant de référence et de son inadéquation avec un des composant d'étude (triangles bleus :données du composant de référence ; en trait continu violet : le modèle une branche correspondant ; cercle rouge : données d'un composant d'étude ; en rouge : "modèle" une branche correspondant).

En effet, les données expérimentales et le modèle sont parfaitement confondus pour le composant de référence alors que pour les composants d'étude, le modèle se trouve particulièrement inadapté. Or, la détermination des paramètres a été faite très classiquement par l'exploitation des portions linéaires de la courbe en échelle linéaire pour R_{ON} et en échelle semi-logarithmique pour n et ϕ_B (ceci apparaissant par un parallélisme modèle/courbe expérimentale au dessus et en dessous du seuil).

3. Modèle et stratégie algorithmique

3.1. *Problématique et modèle d'investigation*

A 25˚C, il n'y a pas de modèle multi-branches [3] aisément ajustable sur la courbe IV. L'ensemble de solutions possibles sur le jeu de paramètres est difficilement déterminable. Or, il a été constaté qu'à températures élevées, un minimum de branches s'avèrent nécessaires pour établir un modèle satisfaisant. Le point de départ de la stratégie algorithmique a donc été basé sur cette observation. Ainsi, des caractérisations en températures de 195˚C à -55˚C par pas de 25˚C ont été réalisées. Le modèle double branche à haute température est ensuite ajusté au fur et à mesure des plus faibles températures, jusqu'à y associer des branches supplémentaires pour compléter le modèle si nécessaire.

Ne sachant pas les mécanismes de conduction à l'oeuvre, il est avantageux d'employer le modèle de Shockley :

$$I = I_s \left\{ exp\left[\frac{q(V - IR_{ON})}{nkT}\right] - 1 \right\} \quad (1)$$

Ce modèle est "générique" puisque comme le montrent les équations 2 à 6, la forme des équations des phénomènes de conductions est similaire.

Un courant total peut s'exprimer par une somme de tous les phénomènes de conduction possibles [9] :

$$I_{total} = I_{TE} + I_{GR} + I_{tunnel} + I_{fuites} \quad (2)$$

$$I_{TE} = I_{TE}(0) \left\{ exp\left[\frac{q(V - IR_{ON})}{nkT}\right] - 1 \right\} \quad (3)$$

$$I_{GR} = I_{GR}(0) \left\{ exp\left[\frac{q(V - IR_{ON})}{2kT}\right] - 1 \right\} \quad (4)$$

$$I_{tunnel} = I_{tunnel}(0) \left\{ exp\left[\frac{q(V - IR_{ON})}{E_t}\right] - 1 \right\} \quad (5)$$

$$I_{RL} = \frac{q(V - IR_{ON})}{R_L} \quad (6)$$

Considérons à présent l'hypothèse simplificatrice que le terme (-1) est négligeable tel que vérifié dans le cas de modèle thermoïonique pour V_{AK} $\geq$78mV ($3kT/q$). Et enfin, employons les propriétés de la fonction de Lambert pour exploiter une forme explicite de l'équation de Shockley simplifiée, ce qui amène :

$$I_{generique} = \frac{nkT}{R_{ON}q} W_0 \left[I_s * exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) R_{ON} \frac{q}{nkT} \right] \quad (7)$$

Ainsi, nous pouvons associer autant de branches que nécessaire mais en minimisant leur nombre pour ajuster le modèle complet. Toutefois, à ce stade de modélisation, la forme générique étant employée, il n'y a pas d'identification à des mécanismes de conduction réels, ce qui peut être l'objet d'une analyse dans un second temps. La modélisation est alors élémentairement dite "phénoménologique".

La représentation du modèle électrique n branches associé est donné en Figure 3. $I_{ka} = I$ étant l'hypothèse sur les différentes partie de la courbe, la contribution en courant d'une branche est donc prépondérante sur les autres sur une plage de tension

donnée.

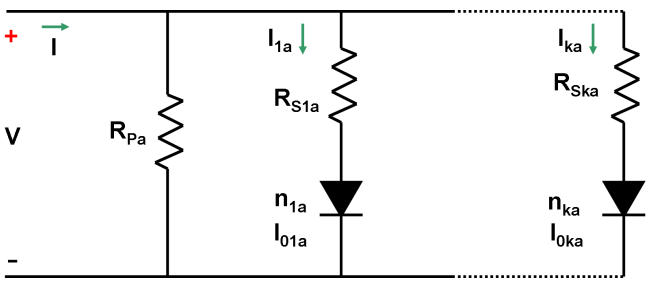

Fig. 3. Modèle électrique de la modélisation phénoménologique n branches.

4. Résultats de modélisation

4.1. *Modèle en température du composant de référence*

Le composant de référence a été caractérisé en température, puis la stratégie algorithmique a été déployée pour identifier le nombre de branches, et ensuite en déterminer des valeurs de paramètres permettant un ajustement satisfaisant. La plage de températures de caractérisation s'étend de -55˚C à +180˚C avec un pas de 20/25˚C. Pour toutes les températures positives, une seule branche permet de modéliser la caractéristique IVT alors qu'une contribution complémentaire est à ajouter pour les températures négatives de caractérisation (-10/-30/-50˚C).

Le résultat de la modélisation sur l'ensemble de la gamme de température est illustré en Figure 4.

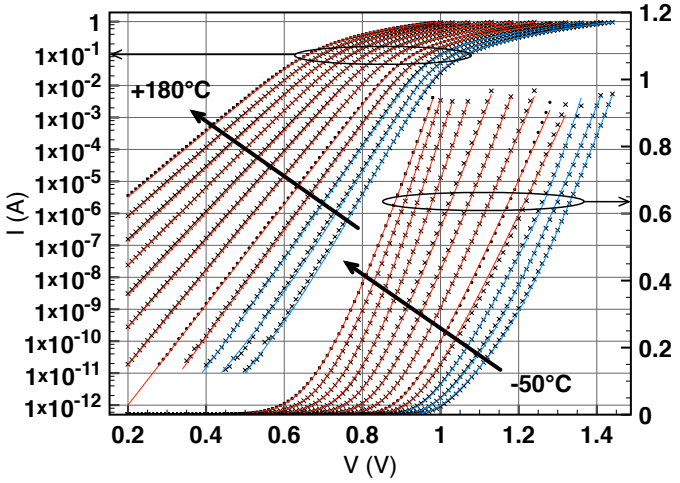

Fig. 4. Modélisation en température du composant de référence Schottky W/SiC (en rouge : températures positives ; en bleu : températures négatives).

La contribution en courant non négligeable à très faible température est modélisée telle que représentée sur la Figure 5.

Par ailleurs, il est notable que l'évolution en température du composant est typique d'un contact Schottky avec une résistance dynamique stable et une dérive en température de la tension de seuil. La diminution du facteur d'idéalité quand la température augmente et l'augmentation de la hauteur de barrière avec la température sont en accord avec la littérature [10].

4.2. *Modèle en température du composant Schottky d'étude*

En premier lieu, le composant d'étude le plus semblable au composant de référence est caractérisé en direct et en température, puis modélisé selon la stratégie retenue. Les résultats de

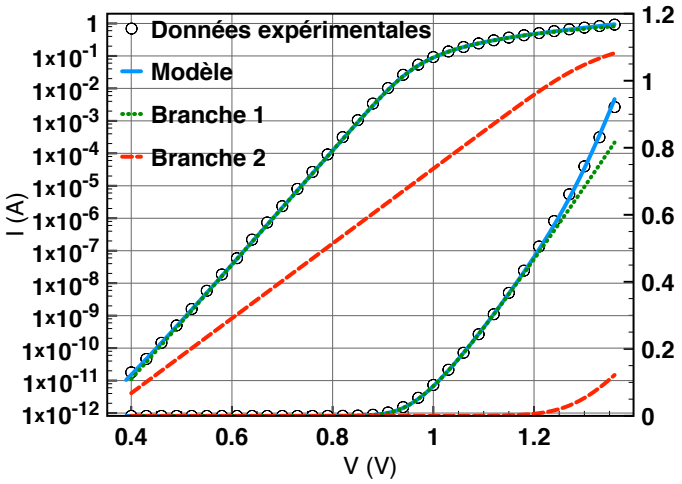

Fig. 5. Modélisation double branche du composant de référence Schottky W/SiC à basse température (-10˚C).

caractérisation/modélisation sont exposés par la Figure 6.

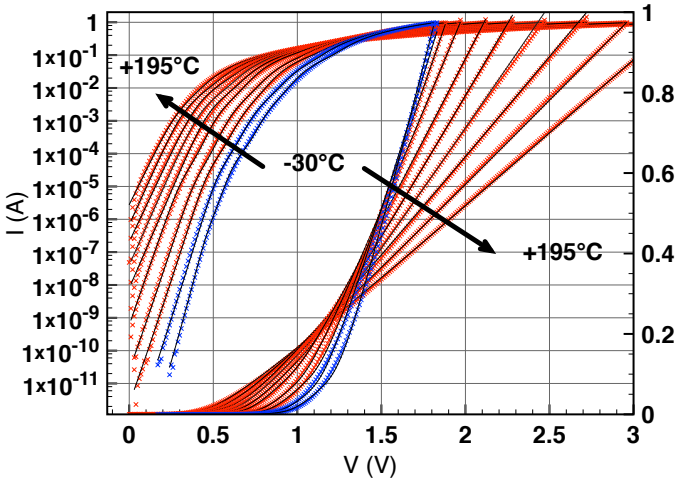

Fig. 6. Caractérisation et modélisation multi-branches en température du composant d'étude Schottky Ni/SiC.

Un comportement plus atypique est observé en température avec des points de concours des courbes permettant de relever des coefficients de température positif puis négatif de part et d'autre de ceux-ci. Cette observation est corroborée dans la littérature pour des dispositifs similaires [12]. Cette dernière référence attribue la diminution de la tension de seuil avec l'augmentation de la température à l'augmentation de l'énergie thermique des électrons leur permettant ainsi le franchissement de la barrière Schottky à faible tension de polarisation. De plus, l'augmentation de la résistance dynamique avec la température traduit une réduction de la mobilité des porteurs majoritaires de ce composant unipolaire. Cependant, des points de concours en température existent aussi pour le composant de référence mais à plus forts niveaux de courants. Comme le souligne aussi la référence [11], l'implantation p+ en périphérie du composant peut amener un effet de polarisation latérale lié à la répartition bidimensionnelle des lignes de courant, engendrant ainsi une conduction plutôt bipolaire à très forts niveau de polarisation en direct.

Concernant la modélisation, deux branches rectifiantes sont efficaces à 195°C, 170°C et 145°C. A 120°C et 95°C, une troisième branche s'avère nécessaire à la modélisation. Dès 70°C, une quatrième branche vient compléter le modèle. Enfin, une cinquième branche est à adjoindre pour ajuster le modèle en dessous de -30°C (le cas -50°C n'étant pas traité car sans intérêt particulier).

A titre d'illustration, la recomposition de la caractéristique IV à 20°C est donnée en échelles linéaire et semi-logarithmique en Figure 7.

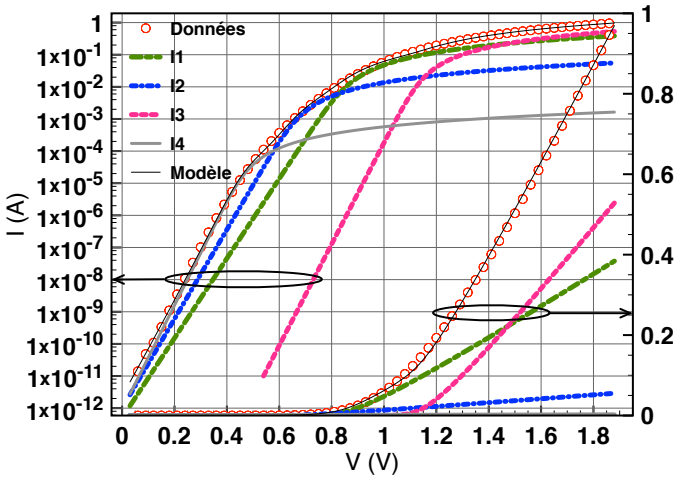

Fig. 7. Modélisation multi-branches à 20°C d'un composant d'étude Schottky Ni/SiC.

Pour appréhender plus aisément l'évolution du modèle, une analyse des différentes branches dissociées et regroupées par rang permet un regard nouveau sur un modèle décomposé (Figure 8). Cependant pour assurer une certaine cohérence, il convient de comparer les branches de modèles en comprenant un nombre identique. Seul les cas de double et triple branches seront présentés dans ce qui suit.

Le cas du modèle triple branche est traité avec la Figure 9.

Alors que les contributions des branches 1 et 2 diminuent avec la température, celle de la troisième branche augmente. Parmi les trois paramètres à évoluer avec la température, un intérêt particulier est porté sur le facteur d'idéalité. En effet, n=1 pour un contact Schottky, n=2 pour une conduction bipolaire et n=3 ou plus, en cas de défauts présents [13, 14, 15, 16] tels que dislocations, "comets tails" ou encore autres inclusions.

La Figure 10 rend compte des évolutions des facteurs d'idéalité des différentes branches.

Tous ces facteurs restent très proche de n=1, attestant d'une nature de conduction de type plutôt Schottky, même si à très faible température, n1 tend vers 2. Ceci est assez cohérent avec une diode Schottky pure au détail près de son "channel stopper".

Enfin, une étude comparative d'une modélisation multi-branches du composant de type JBS est menée pour des analyses comparatives.

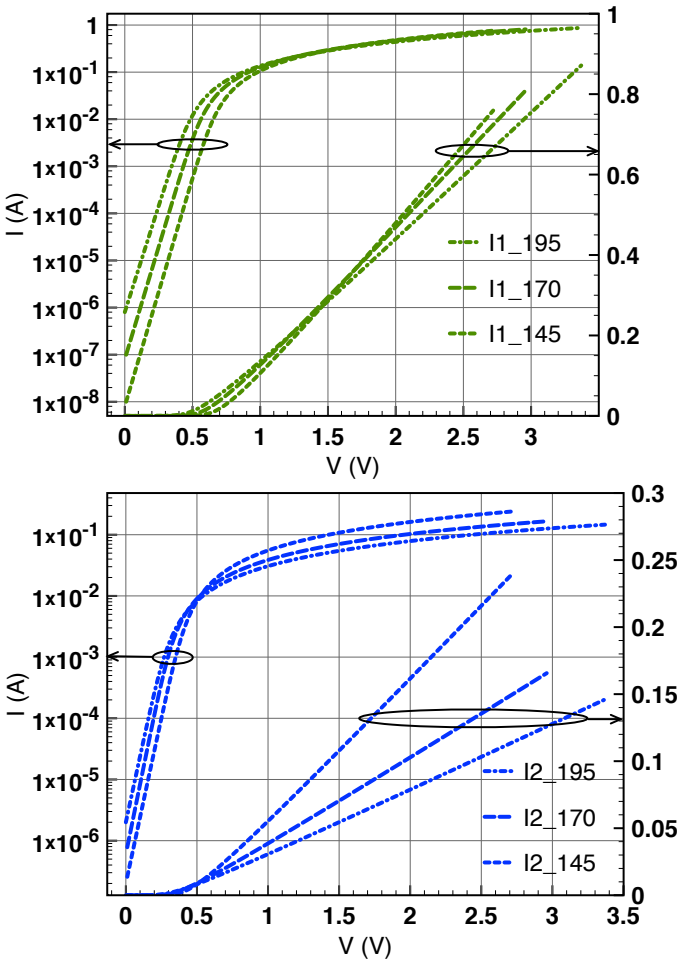

Fig. 8. Branches 1 (en vert) et 2 (en bleu) dissociées du modèle double branche d'un composant d'étude Schottky Ni/SiC à 195°C, 170°C et 145°C.

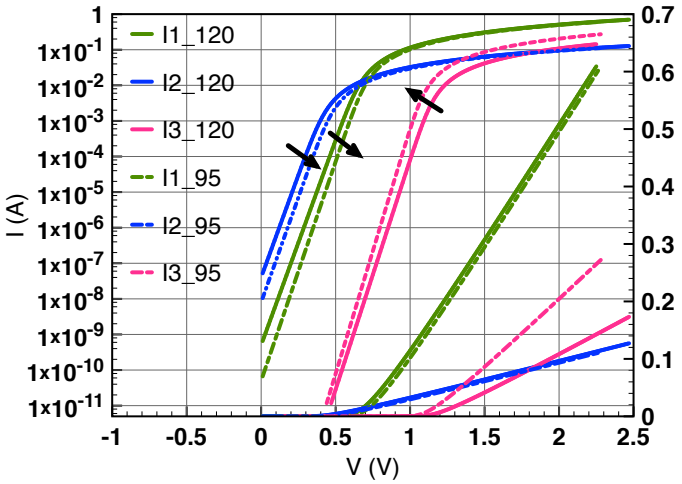

Fig. 9. Branches 1, 2 et 3 dissociées du modèle triple branche d'un composant d'étude Schottky Ni/SiC à 120°C et 95°C.

4.3. *Modèle en température du composant JBS d'étude*

Les résultats de caractérisation/modélisation en température pour le composant de type JBS sont donnés en Figure 11.

Le même type de comportement de la caractéristique IV en tem-

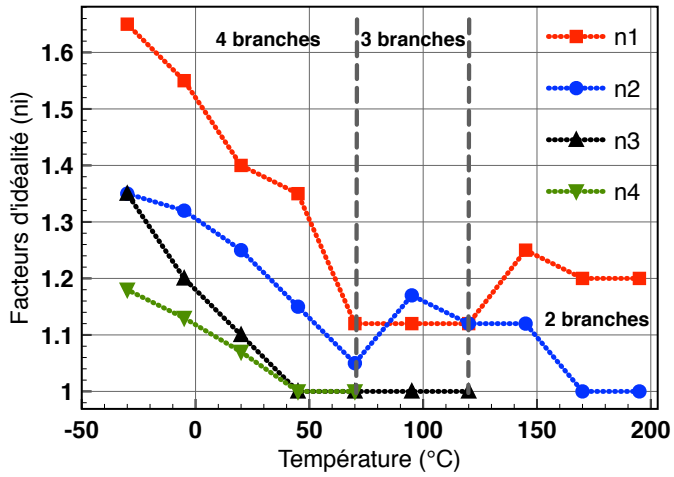

Fig. 10. Evolutions des facteurs d'idéalité des différentes branches du modèle de la diode Schottky d'étude en fonction de la température.

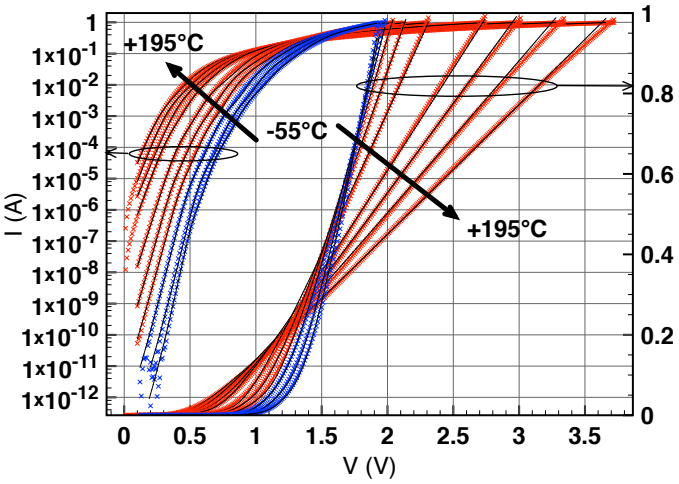

Fig. 11. Caractérisation et modélisation multi-branches en température du composant d'étude JBS Ni/SiC.

pérature est observé. Etant dans une configuration structurale comportant des jonctions pn, un effet bipolaire pourrait impliquer des courants de génération-recombinaison se traduisant sur des valeurs des facteurs d'idéalité.

Pour cette hypothèse, l'analyse de l'évolution du paramètre "facteur d'idéalité" peut ainsi se révéler pertinente. En Figure 12 est alors présentée l'évolution en température des facteurs d'idéalité des différentes branches.

A noter qu'il semble que dans le cas de diodes JBS, le facteur d'idéalité diminue également avec une élévation de la température.

La suite de l'analyse amène à observer les évolutions en température des différentes branches. Deux branches permettent une modélisation de 195 ˚C à 145 ˚C, puis s'y ajoute une troisième branche de 120 ˚C à 75 ˚C, et enfin pour les températures en dessous de 75 ˚C, une quatrième branche vient compléter le modèle. A -55 ˚C pour finir, une cinquième branche se révèle indispensable.

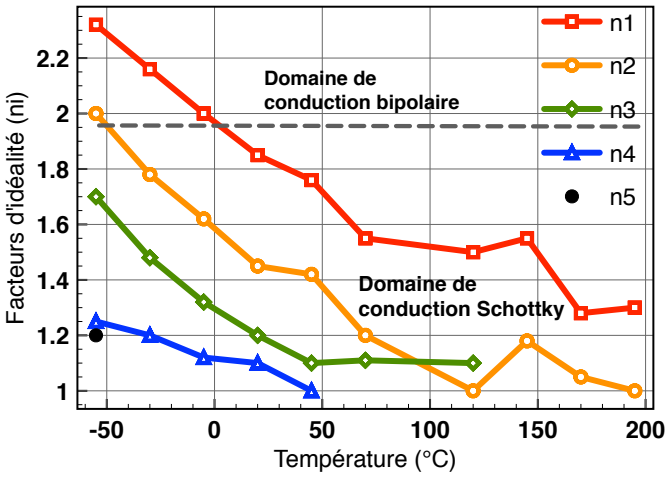

Fig. 12. Evolutions des facteurs d'idéalité des différentes branches du modèle de la diode JBS d'étude en fonction de la température.

L'analyse des évolutions des facteurs d'idéalité conduit à l'hypothèse d'une activation des courants de génération recombinaison à faibles températures au détriment de la conduction par effet thermoïonique si l'on considère les paramètres phénoménologiques comme physiques.

La prépondérance des différentes branches est illustrée pour deux cas extrêmes (195 ˚C et -30 ˚C) en échelle linéaire (Figure 13).

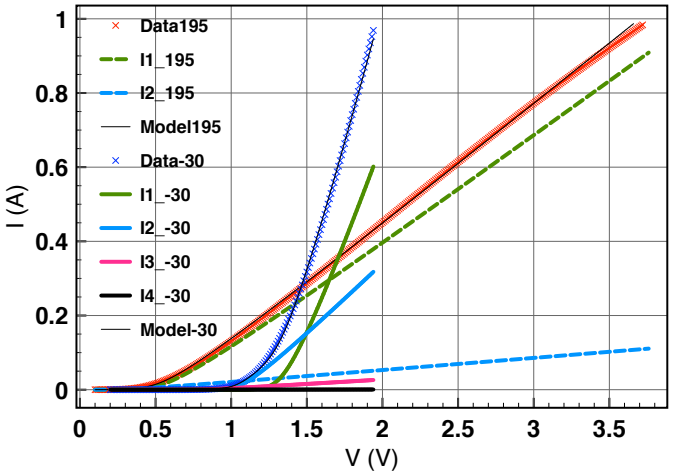

Fig. 13. Contributions des composantes à tension au dessus du seuil pour les températures de 195 ˚C et-30 ˚C.

Les chemins de conduction parallèle, particulièrement pour des tensions au dessus du seuil, se signalent par l'évolution de la résistance dynamique de chacune des branches. On constate un apport significatif de courant via la branche 2 au fur et à mesure que la température baisse (Figure 14).

Enfin, les évolutions des courants de saturation suivent une tendance linéaire dans le repère semi-logarithmique (Figure 15). Toutefois, n'ayant pas d'information sur les surfaces qui pourraient être concernées par un effet thermoïonique (hormis pour la branche 1), il n'est pas possible de déterminer d'autres hau-

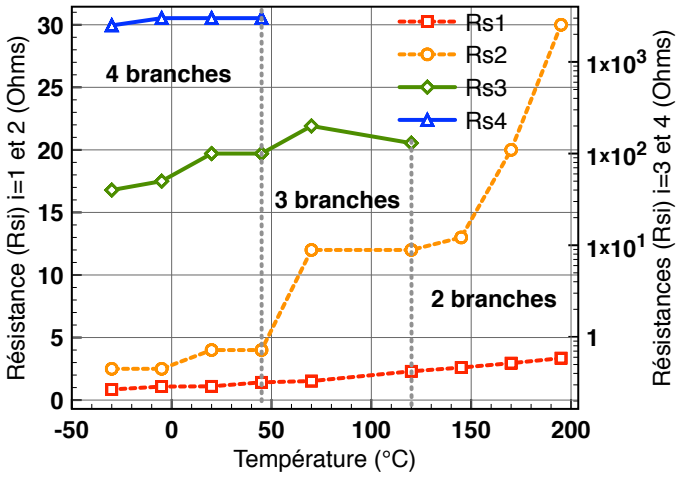

Fig. 14. Evolutions des résistances dynamiques des différentes branches du modèle en fonction de la température.

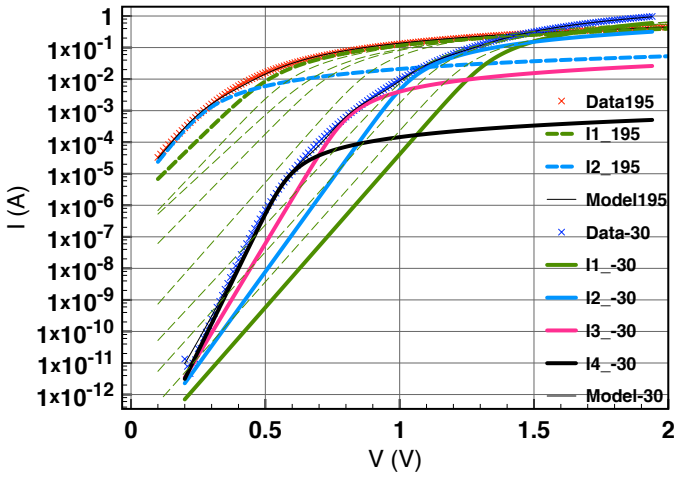

Fig. 16. Contributions des composantes à tension en dessous du seuil pour les températures de 195 ˚C et-30 ˚C.

teurs de barrière de potentiel métal/semiconducteur.

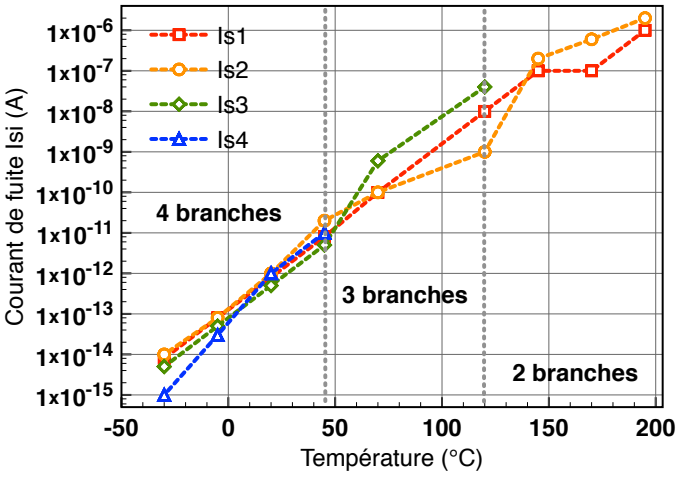

Fig. 15. Evolutions des courants de saturation des différentes branches du modèle en fonction de la température.

La Figure 16 donne le détail de la contribution de chaque branche pour les deux températures considérées. En trait discontinu vert a été représentée l'évolution de la seule branche 1 sur l'ensemble de la gamme de température de caractérisation/modélisation.

5. Conclusions

Une nouvelle méthode de modélisation, dite "phénoménologique", a été définie et mise en oeuvre sur un composant Schottky de technologie mature et sur deux composants Schottky et JBS en cours de développement dans notre laboratoire. Sur une large gamme de température, la modélisation de la caractéristique IV en direct est très satisfaisante, et engage une réflexion sur les mécanismes physiques en jeu par l'examen des valeurs des paramètres phénoménologiques. Le modèle multi-branches employé, basé sur l'équation de Shockley, et utilisant la fonction de Lambert, permet d'accéder aisément à un jeu de paramètres qui, soit produit des indicateurs de structure ou d'état, soit indique des modes de conduction physiques réels. Des mesures d'admittance ou encore de DLTS se dressent en perspectives de ces travaux pour dé-corréler les mécanismes de conduction et ainsi remonter avec des hypothèses robustes sur le lien entre paramètres phénoménologiques et paramètres physiques.

6. Remerciements

Les auteurs remercient la Direction Générale de l'Armement (DGA) pour son support financier dans le cadre du projet MADASiC. Nos remerciements s'adressent aussi à la société Ion Beam Services (IBS) pour la fabrication des diodes Schottky et JBS d'étude.

7. Références

[1] Jürgen H. Werner and Herbert H. Güttler, "Barrier inhomogeneities at Schottky contacts", Journal of Applied Physics 69, 1522 (1991).

[2] D. Donoval, A. Chvala, R. Sramaty, J. Kova, E. Morvan, Ch. Dua, M. A. DiForte-Poisson, and P. Kordos , "Transport properties and barrier height evaluation in Ni/InAlN/GaN Schottky diodes ", Journal of Applied Physics 109, 063711 (2011).

[3] Denise Lugo-Munoz, Juan Muci, Adelmo Ortiz-Conde, Francisco J. Garcia-Sanchez, Michelly de Souza, Marcelo A. Pavanello, " An explicit multi-exponential model for semiconductor junctions with series and shunt resistances", Microelectronics Reliability 51 (2011) 2044-2048.

[4] Nurhan Karaboga, Serdar Kockanat and Hulya Dogan, "The parameter extraction of the thermally annealed Schottky barrier diode using the modified artificial bee colony", Appl Intell (2013) 38 :279-288.

[5] D. Defives, O. Noblanc and al., "Electrical characterization of inhomogeneous Ti/4H-SiC Schottky contacts", Materials Science and Engineering B61-62 (1999) 395-401.

[6] Fanny Dahlquist, "Junction Barrier Schottky Rectifiers in Silicon Carbide", KTH, Royal Institute of Technology Department of Microelectronics and Information Technology Stockholm, 2002.

[7] S. Toumi, A. Ferhat-Hamida, L. Boussouar, A. Sellai, Z. Ouennoughi and H. Ryssel, "Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in tungsten/4H-SiC (000-1) Schottky diodes", Microelectronic Engineering 86 (2009) 303-309.

[8] P. Brosselard, N. Camara and al., "Bipolar conduction impact on electrical characteristics and reliability of 1.2kV and 3.5 kV 4H-SiC JBS diode", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.55, No8, August 2008.

[9] Moongyu Jang and Junghwan Lee, "Analysis of Schottky Barrier Height in

Small Contacts Using a Thermionic-Field Emission Model", ETRI Journal, Volume 24, Number 6, December 2002.

[10] Chen Feng-Ping, Zhang Yu-Ming and al. "Temperature-dependent characteristics of 4H-SiC junction barrier Schottky diodes", Chin. Phys. B Vol.21, No.3 (2012) 037304.

[11] Philippe Leturcq "Semi-conducteurs de puissance unipolaires et mixtes", Techniques de l'Ingénieur, D3108, Novembre 2001.

[12] R. McNutt, Allen R. Hefner Jr. and al. "Silicon Carbide PiN and Merged PiN Schottky power diode models implemented in the Saber circuit simulator", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.19,No.3, May 2004.

[13] Jay M. Shah, Y.L. Li and al. "Experimental analysis and theoretical model for anomalously high ideality factors (n»2.0) in AlGaN/GaN p-n junction diodes", Journal of Applied Physics, Vol.94,No.4, August 2003.

[14] V. Aubry and F. Meyer "Schottky diodes with high series resistance : Limitations of forward I-V methods", Journal of Applied Physics, Vol.76,No.12, December 1994.

[15] B.J. Skromme, E. Luckowski and al. "Electrical characteristics of Schottky barriers on 4H-SiC : The effects of barrier height nonuniformity ", Journal of Electronic Materials, Vol.29,No.3, 2000.

[16] Chen Feng-Ping, Zhang Yu-Ming and al. "Study of 4H-SiC junction barrier Schottky diode using field guard ring termination", Chin. Phys. B Vol.19, No.9 (2010).