

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

Patrick DENIS, Besar ASLLANI, Shiqin NIU, Dominique TOURNIER, Pierre BROSELARD

Université de Lyon, INSA de Lyon, Laboratoire Ampère, CNRS UMR 5005, 21 av. Jean Capelle
F69621 Villeurbanne, France

RESUME – Ce travail de recherche présente une méthodologie de modélisation phénoménologique de la caractéristique en direct de diodes Schottky/JBS en carbure de silicium en employant la fonction de Lambert. L'intérêt est de déterminer des paramètres en rapport avec la structure et les mécanismes de conduction sans toutefois être directement reliés à ces derniers. Cette première étape a pour objectif d'identifier et de révéler par des indicateurs phénoménologiques une configuration particulière de structure, mais aussi d'état (présence de défauts). La seconde étape, et perspective de ces investigations, amènerait à décomposer et à corrélérer certains des paramètres phénoménologiques à des états d'interface, des distributions et des types de défauts en considérant des mécanismes de conceptions réels.

MOTS-CLES – Modélisation, fonction de Lambert, conduction phénoménologique, extraction, structures Schottky JBS.

1. Introduction

Des diodes Schottky JBS 4H-SiC 3,5kV ont été conçues au Laboratoire Ampère et fabriquées en externe. Trois types de structures ont été élaborées sur les modèles Schottky et JBS [1] afin d'optimiser la tenue en tension en inverse et la réduction des courants de fuite. Il est alors d'un intérêt majeur de produire des indicateurs de performance ou d'état de la structure relatifs au design particulier et au procédé de fabrication. Un critère important à satisfaire également réside dans la simplicité de modélisation/extraction des paramètres phénoménologiques afin de dégager une information globale de première approche rapidement accessible.

L'extraction de paramètres pour de tels composants fait appel à de nombreuses méthodes qui se retrouvent très limitées [2] pour le traitement de données faisant apparaître des phénomènes complexes tels que l'inhomogénéité de hauteur de barrières, de défauts structuraux, ou encore de particularités des structures mixtes (Schottky et bipolaire) [3]. La fonction de Lambert [4] se révèle alors être un outil mathématique puissant pour s'affranchir de la difficulté majeure de la nature implicite de l'équation I-V, en considérant un modèle multi-branches parallèles [5].

De multiples extractions de données ont été réalisées sur des composants Schottky, JBS 3-4 et 3-8 (« 3 » représentant la largeur des caissons et « 8 » la largeur d'espacement entre eux). Une méthodologie algorithmique a été déployée afin d'ajuster au plus près le modèle aux données expérimentales. Le détail de cette méthode représente l'originalité de ces travaux.

Il en résulte un modèle mathématique et électrique très satisfaisant pour ces objectifs, mais dont la corrélation aux mécanismes de conduction réels constituera un défi important en perspective.

2. Composants d'étude

Les diodes JBS 3-4, JBS 3-8 et Schottky retenues présentent des tensions de claquage de 3750V, 3250V et 2750V respectivement, en considérant un critère de courant de fuite en inverse maximum de 200 μ A [6]. Le relevé de la Figure 1 illustre ces résultats mettant en valeur l'intérêt des structures JBS en inverse. La structure JBS 3-4 est la plus performante en ce qui concerne la réduction des courants de fuite en inverse, mais cette dernière présente également l'inconvénient de réduire fortement (voire de bloquer) le canal de conduction en direct, ce qui se traduit par une augmentation importante de la résistance à l'état passant [3].

La structure transversale des deux premiers modèles est illustrée en Figure 2. Une modulation des paramètres de largeur de caissons P+ et d'espacement entre eux constitue le levier d'optimisation. La seconde structure étudiée est une diode Schottky quasi-pure étant donné qu'un anneau P+ a été intégré en périphérie de la structure. Le détail des caractéristiques est donné Table 1. La structure active de toutes les diodes est de 3,9mm².

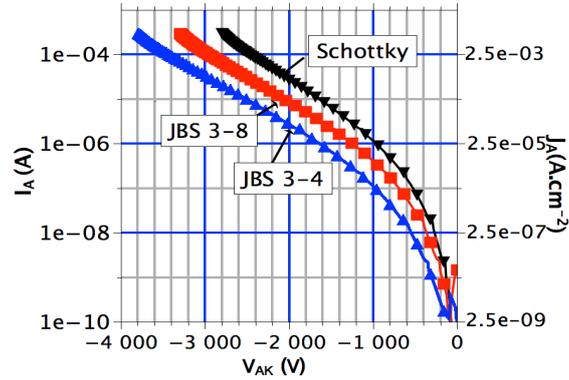


Figure 1 : Courants de fuite en inverse pour les différentes structures JBS et Schottky étudiées

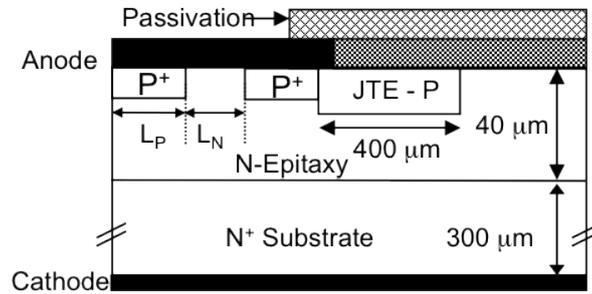


Figure 2 : Représentation de l'architecture transversale d'une diode JBS

Tableau 1. Paramètres géométriques des diodes Schottky/JBS étudiées

Identification	L _P (µm)	L _N (µm)	Surface Schottky effective (mm ²)
JBS3-4	3	4	1,23 (32%)
JBS3-8	3	8	1,98 (51%)
Schottky	-	-	3,90

3. Méthodologie algorithmique

3.1 Modèle phénoménologique

Un modèle multi-branches sur la base de l'équation de Shockley (Equation 1) seule est mis en œuvre. La stratégie de modélisation et d'ajustement consiste à assigner à chaque branche des valeurs de paramètres R_{si} , n_i et I_{si} de manière à apporter une contribution supplémentaire pour compléter la courbe reconstruite.

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

Le terme (-1) est négligé comme hypothèse simplificatrice.

La première étape consiste à extraire les paramètres I_{s1} , R_{s1} , n_1 et V_T par les fonctions linéaires usuelles. Ce point de départ permet de fixer des paramètres initiaux, et comme le démontre la Figure 3 – Modèle 1, leur remplacement dans la fonction explicite de $I=f(V)$ – Equation 2, donne un résultat inacceptable.

$$I = \frac{n_1 k T}{R_{s1} q} W_0 \left[I_{s1} * \exp\left(\frac{qV}{n_1 k T}\right) R_{s1} \frac{q}{n_1 k T} \right] \quad (2)$$

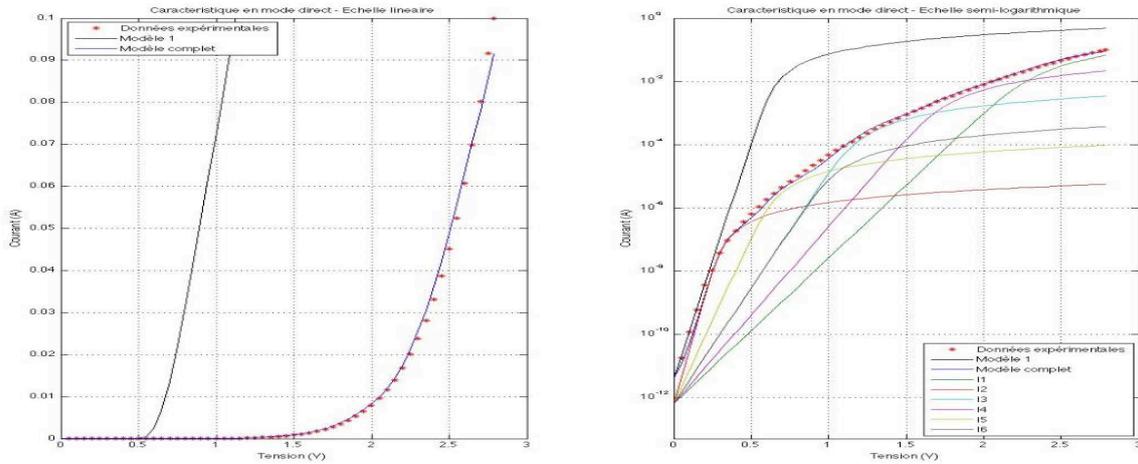


Figure 3 : Modélisation 6 branches d'une diode JBS 3-4

L'ajout de branches supplémentaire dans un ordre donné, définissant la fonction de sensibilité telle que I1 prépondérant dans le modèle sur I2, I2 sur I3, etc. ..., permet d'aboutir un ajustement très satisfaisant. Des paramètres phénoménologiques sont alors extraits et caractérisent la structure et ses caractéristiques générales. La méthode consiste à poser des hypothèses sur les courants de saturation (égaux), sur des résistances fictives (établissant des contributions par décade), et d'ajustements par parties (basées sur la valeur de la tension de seuil).

3.2 Modèle physique

Il est également très intéressant d'appliquer la méthode à des relevés en température, notamment très basse, permettant de dé-corréler les différents mécanismes de conduction [7]. Sachant aussi la valeur de certains paramètres comme $n=1$ pour un contact Schottky, $n=2$ pour une jonction pn et $n=3$ pour des défauts [8], il est certainement possible de poser de nouvelles hypothèses pour rapprocher les différentes branches phénoménologiques à des branches physiques. D'autre part, il peut être supposé des phénomènes de conduction physiques dont les expressions [9] s'accordent avec le modèle multi-branches choisi. Ainsi, le courant total pourrait se relier physiquement à des contributions de courants thermoïonique (TE), de génération/recombinaison (GR), par effet Tunnel (Tu) et de fuite (RL) comme le résumant les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 I_{tot} &= I_{TE} + I_{GR} + I_{TU} + I_{RL} \\
 I_{TE} &= I_{TE}(0) \left\{ \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right] - 1 \right\} \\
 I_{GR} &= I_{GR}(0) \left\{ \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{2kT}\right] - 1 \right\} \\
 I_{TU} &= I_{TU}(0) \left\{ \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{E_t}\right] - 1 \right\} \\
 I_{RL} &= \frac{q(V - IR_s)}{R_L}
 \end{aligned} \quad (3)$$

4. Conclusion et perspectives

Les diodes JBS 3-4, JBS 3-8 et Schottky élaborées et fabriquées font l'objet d'une modélisation phénoménologique afin d'accéder finement et rapidement à l'impact des structures particulières et des procédés de fabrication. Des indicateurs sont ainsi extraits sur la base d'une stratégie algorithmique originale aboutissant à un modèle très fidèle aux données expérimentales. Une voie est néanmoins ouverte vers la détermination des mécanismes de conduction physiques en jeu, rendant compte des phénomènes réels responsables de la réponse électrique des composants. Des

mesures à très faible température (100K) et d'admittance [10] se dressent en perspective pour de nouvelles modélisations phénoménologiques, à la lumière de mécanismes de conduction réels dé-corréler permettant ainsi des hypothèses nouvelles.

5. Remerciements

Des remerciements de partenaires figureront dans la version finale.

6. Références

- [1] B. Jayant Baliga, Fundamentals of power semiconductor devices, Springer, 2008.
- [2] Ortiz-Conde and al., «Direct extraction of semiconductor device parameters using lateral optimization method », *Solid-State Electronics* 43 (1999) 845-848.
- [3] Chen Feng-Ping and al., «Study of 4H-SiC junction barrier Schottky diode using field guard ring termination», *Chin. Phys. B* Vol. 19, No. 9 (2010) 097107
- [4] Corless R, Gonnet G, Hare D, Jeffrey D, and Knuth D., « On the Lambert W function », *Adv Comput Math* 1996;5:329–59
- [5] Denise Lugo-Muñoz and al., «An explicit multi-exponential model for semiconductor junctions with series and shunt resistances », *Microelectronics Reliability* 51 (2011) 2044–2048
- [6] Pierre Brosselard and al., « Impact of design on electrical characteristics of 3,5kV 4H-SiC JBS diodes », *IEEE Transactions on Electron Devices* 55, 8 (2008) 1847 – 1856
- [7] Denise Lugo-Muñoz and al., «Characterization of Thin-Film SOI PIN Diodes from Cryogenic to Above Room Temperatures Using an Explicit I-V Multi-Branch Model », *ECS Transactions*, « 9 (1) 171-178 (2011)
- [8] Jay M. Shah and al., « Experimental analysis and theoretical model for anomalously high ideality factors ($n \gg 2.0$) in AlGaIn/GaN p-n junction diodes », *Journal of applied physics*, Volume 94, Number 4 (2003)
- [9] D. Donoval and al., « Transport properties and barrier height evaluation in Ni/InAlN/GaN Schottky diodes », *Journal of applied physics* 109, 063711 (2011)
- [10] C. Raynaud and al., « Characterization of 4H-SiC Junction Barrier Schottky Diodes by Admittances vs Temperature Analyses », *Materials Science Forum* Vols. 615-617 (2009)