

# Méthodes d'Extraction des Paramètres des Caractéristiques I-V de Diodes Bipolaires de Puissance en 6H-SiC à Structure JTE

S. Kerai\*, K. Ghaffour et N.E. Chabane-Sari

**Résumé--** Nous avons utilisé l'algorithme des moindres carrés pour extraire les valeurs du courant de saturation  $I_s$ , du facteur d'idéalité  $n$  et de la résistance série  $R_s$  des caractéristiques expérimentales I-V de diodes bipolaires. Ces paramètres sont définis à partir de trois méthodes basées sur trois modèles différents. Le premier est celui d'une diode sans résistance série ( $I_s$  et  $n$ ), le deuxième est celui d'une barrière de potentiel en série avec  $R_s$ . Le troisième prend en considération tous les paramètres évalués à partir d'une fonction auxiliaire qui dépend de la caractéristique expérimentale I-V et d'une tension arbitraire  $V_a$ . Ces méthodes sont appliquées sur cinq diodes bipolaires en 6H-SiC à structure JTE. Les valeurs obtenues par la troisième méthode sont en bon accord avec le modèle réel de la diode bipolaire dans la mesure où le taux d'ajustement entre la caractéristique expérimentale I-V et celle calculée par le modèle théorique est élevé et ceci quelque soit les taux d'ajustement obtenus par les deux autres méthodes.

**Mots clés—**Caractéristique I-V,  $I_s$ ,  $n$ ,  $R_s$ , LMS, Diode, 6H-SiC.

## I. INTRODUCTION

Le carbure de silicium (SiC) est un matériau bien connu pour ses qualités électriques, optiques, chimiques et mécaniques. Il présente un grand intérêt dans les domaines de l'électronique de puissance et des télécommunications. Ceci provient de la largeur importante de sa bande d'énergie interdite (2.2 à 2.9 eV), sa grande mobilité d'électrons et sa grande vitesse de saturation des électrons. Des composants à semiconducteurs fonctionnant à haute température et à des fréquences élevées ont pu être réalisés (Diodes PN et Schottky, JFET, MESFET, MOSFET, IGBT, HBT, capteur de pression et capteur de température) [1]. Le fonctionnement de ces composants est décrit généralement par un ensemble de caractéristiques courant-tension (I-V) dont l'analyse permet d'obtenir des informations sur les mécanismes de transport électriques et sur les imperfections des étapes technologiques utilisées pour l'obtention du dispositif semiconducteur. Chacune de ces opérations, si elle n'est pas convenablement menée, peut conduire en bout de chaîne à un produit non fiable. Pour une diode de puissance bipolaire, il est nécessaire d'avoir un fort courant en direct avec une faible chute de tension et une de tension de claquage élevée avec un courant inverse faible. Le modèle utilisé pratiquement pour décrire la

relation entre le courant et la tension de polarisation dans les diodes à jonction pn, est donné par l'équation [2] :

$$I = I_s \left\{ \exp \left( q \frac{V - R_s I}{nkT} \right) - 1 \right\} \quad (1)$$

$I_s$  est le courant de saturation ou de fuite circulant dans la jonction quelque soit le type de polarisation. Il est dû au phénomène de diffusion des porteurs minoritaires vers les régions neutres (les trous vers la région de type p et les électrons vers la région de type n) et au phénomène de génération de porteurs libres dans la zone de charge d'espace.

$n$  est le facteur d'idéalité ou de qualité qui dépend de la tension de polarisation, il nous renseigne sur l'origine des courants circulant dans la jonction. Il prend la valeur 1 s'il s'agit d'un mécanisme de diffusion. Pour le mécanisme de recombinaison il prend la valeur 2. Lorsque les deux courants sont comparables, le facteur  $n$  a une valeur comprise entre 1 et 2. S'il prend d'autres valeurs, cela signifie que d'autres mécanismes interviennent pour le transport du courant.

$R_s$  est la résistance série, c'est un paramètre d'intérêt majeur, plus sa valeur est grande, plus la diode s'éloigne du modèle idéal. Elle est due à la résistance des régions neutres du matériau semi-conducteur et aux prises de contacts ohmiques métal semi-conducteur qui peuvent être réduites en surdopant la région superficielle du semi-conducteur là où on veut établir le contact ohmique.

Notre travail consiste à extraire numériquement les valeurs de  $I_s$ ,  $n$  et  $R_s$  de la courbe théorique de l'équation (1) modélisant la caractéristique expérimentale I-V et ceci en appliquant la méthode des moindres carrés. Trois méthodes seront présentées et appliquées sur des caractéristiques I-V des diodes bipolaires à base de 6H-SiC à structure JTE (Junction Termination Extension).

## II. METHODES DE CALCUL

### A. Principe

La méthode des moindres carrés (Least Mean Square : LMS) est l'une des méthodes les plus utilisées pour modéliser des mesures expérimentales par une fonction analytique prédéterminée [3]. Cette méthode consiste à minimiser l'écart moyen absolu ou relatif entre l'ensemble de  $N$  mesures  $I_m(V_i)$  et l'ensemble des résultats  $I_c(V_i)$  calculés par le modèle de l'équation (1). En d'autre terme, il s'agit de minimiser la fonction suivante :

Adresse : Laboratoire Matériaux et Energies Renouvelables, Département d'Electronique, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Abou Bakr Belkaid, B.P. 230, Pôle Chetouane, 13000, ALGERIE

\*Corresponding author : kerai\_s@yahoo.fr

$$Qlms = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\ln(I_c(V_i)) - \ln(I_m(V_i))}{\ln(I_m(V_i))} \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$Qlms$  : écart moyen relatif.

$V_i$  : tension de polarisation.

Le modèle donné par l'équation (1) montre que le courant  $I$  est une fonction implicite de la tension  $V$  ce qui ne permet pas d'appliquer la méthode LMS qui exige l'utilisation d'une fonction explicite.

Si on ne tient pas compte de l'effet de la résistance de fuite due au courant de saturation  $I_s$ , ce dernier est négligé devant le courant total  $I$ . Ceci est possible dans la mesure où  $V > 3 kT/q$ . Par conséquent l'équation (1) devient :

$$I = I_s \exp\left(q \frac{V - R_s I}{nkT}\right) \quad (3)$$

### B. Détermination des Paramètres $I_s$ et $n$ (Méthode 1)

Pour les faibles tensions de polarisation, la tension  $R_s I$  est négligée devant  $V$ . Par conséquent, les valeurs de  $I_s$  et  $n$  peuvent être calculées par la méthode des moindres carrées.

A partir de l'équation (3), et comme  $R_s I \approx 0$ , nous pouvons écrire

$$\ln I = \ln I_s + \frac{q}{nkT} V \quad (4)$$

La valeur de l'extrapolation du courant à  $V = 0$  de la droite représentée par l'équation (4) correspond à  $I_s$ . Quant à la valeur du facteur d'idéalité  $n$ , elle est proportionnelle à la pente de la même droite.

Le minimum de  $Qlms$  correspond aux solutions des équations canoniques :

$$\frac{\partial Qlms}{\partial I_s} = 0 ; \quad \frac{\partial Qlms}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

Ces deux équations forment un système linéaire dont la résolution donne directement les valeurs de  $I_s$  et  $n$ .

### C. Détermination de $R_s$ (Méthode 2)

Le calcul de  $R_s$  est effectué dans la partie non linéaire de la caractéristique  $\ln(I)=f(V)$  correspondant aux fortes tensions de polarisation directe. Dans cette partie, le modèle (1) n'est plus respecté. On fait introduire dans l'expression du courant  $I$  le potentiel interne de diffusion  $V_{bi}$ . la différence de potentiel  $V - R_s I$  n'est autre que  $V_{bi}$ . Alors, la variation de  $I$  est modélisée par l'équation représentant la droite [4]:

$$I = \frac{V - V_{bi}}{R_s} \quad (6)$$

Les valeurs de  $V_{bi}$  et  $R_s$  sont calculées en appliquant la méthode LMS similaire à celle appliquée pour  $I_s$  et  $n$ .

### D. Méthode Systématique de Détermination de $I_s$ , $n$ et $R_s$ (Méthode 3)

Les hypothèses  $R_s I=0$  et  $V=R_s I+V_{bi}$  entraînent des imprécisions numériques des valeurs des paramètres  $I_s$ ,  $n$  et  $R_s$ .

De ce fait, nous avons appliqué une méthode systématique [5] pour la détermination de ces paramètres caractérisant le modèle de l'équation (3) qui tient compte de l'existence des résistances séries  $R_s$ .

La méthode consiste à définir, à partir des mesures I-V et une tension arbitraire  $V_a$  une fonction auxiliaire  $F_0(V)$  :

$$F_0(V) = V - V_a \ln I \quad (7)$$

$$V = V(I)$$

La loi de composition des deux fonctions du système (7) génère une nouvelle fonction :

$$F(I) = V(I) - V_a \ln I \quad (8)$$

A partir de l'équation (3), nous pouvons écrire :

$$V = IR_s + \frac{nkT}{q} (\ln I - \ln I_s) \quad (9)$$

La fonction  $F(I)$  sera donc donnée par :

$$\begin{cases} F(I) = aI + b \ln I + c \\ a = R_s \\ b = \frac{nkT}{q} - V_a \\ c = \frac{nkT}{q} \ln I_s \end{cases} \quad (10)$$

L'équation  $F(I)$  possède un minimum correspondant à une valeur de courant  $I_{min}$  :

$$\frac{dF}{dI} = a + \frac{b}{I} = 0 \Rightarrow$$

$$I_{min} = -b/a = I_{min} = \frac{I}{R_s} V_a - \frac{nkT}{qR_s} \quad (11)$$

Les paramètres  $I_s$ ,  $n$  et  $R_s$  sont constants à une température donnée  $T$ . Par conséquent, l'équation (11) représente une droite qui lie le courant  $I_{min}$  à la tension  $V_a$ .  $R_s$  et  $n$  sont calculés par la méthode LMS pour plusieurs valeurs de  $V_a$ . Quant au courant de saturation  $I_s$ , il est déterminé à partir de la valeur de  $c$  :

$$I_s = \exp \frac{cq}{nkT}$$

## III. EXPERIMENTATION

Les mesures I-V sont effectuées sur un lot de cinq diodes bipolaires de puissances  $p^+n$  circulaires, à structure JTE (fig. 1), réalisées sur un substrat de 6H-SiC de type  $n^+$  et de concentration de  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  fabriqué par le CREE research Inc. La couche  $n$  est d'épaisseur  $10 \mu\text{m}$  et de concentration  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . La couche  $p^+$  d'épaisseur  $0.4 \mu\text{m}$  est obtenue par implantation de l'aluminium avec une concentration de  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Des poches d'épaisseur  $0.7 \mu\text{m}$  et de type  $p$  ont été créés sur la couche  $n$  et autour de la couche  $p^+$ . Elles ont été obtenues par implantation du bore avec une concentration de  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Ces poches constituent des extensions latérales qui servent à supporter les lignes de champ électrique dans la jonction  $p^+n$ . Les métallisations sont assurées par évaporation de d'aluminium/titane sur la couche  $p^+$  et du nickel sur le substrat. Les valeurs des diamètres  $d$  des différentes diodes et des diamètres  $d'$  des couches  $p^+$  sont citées dans le tableau 1.

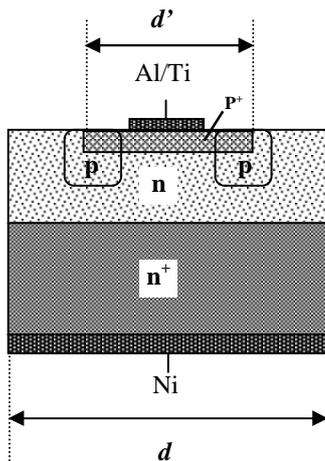


Fig. 1. Structure des diode de puissance JTE en 6H-SiC.

TABLEAU I  
VALEURS DES DIAMETRES  $d$  ET  $d'$ 

	D1	D2	D3	D4	D5
$d / \mu m$	160	380	380	470	240
$d' / \mu m$	160	160	160	250	160

L'acquisition des données I-V était assurée par un banc de mesure Keithley 238 permettant de générer des tensions de polarisation programmables croissantes avec un pas constant et de mesurer l'intensité du courant correspondant. Ce bloc est piloté par un PC doté de l'interface GPIB. Un programme basé sur les méthodes décrites dans la section II permet d'extraire les paramètres de la caractéristique I-V.

#### IV. RESULTATS ET DISCUSSION

La figure 2 représente les caractéristiques I-V des diodes D1 à D5, prélevées à température ambiante. Chaque caractéristique est divisée en quatre zones dont chacune est caractérisée par un mécanisme de courant approprié.

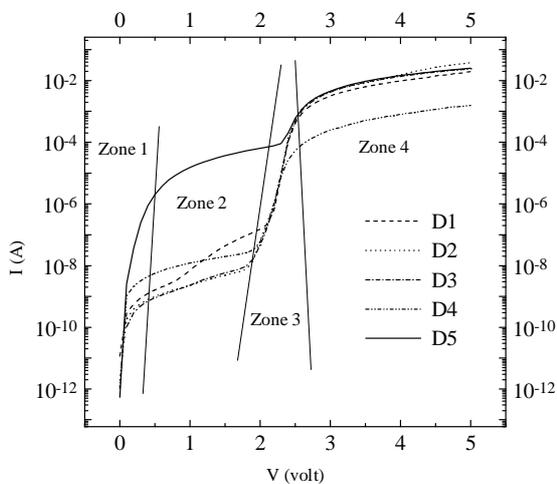


Fig. 2. Caractéristiques expérimentales I-V des diodes de D1 à D5.

Dans la zone 4 où les tensions sont supérieures à 3.5 V, on observe l'effet de la résistance série. Nous avons appliqué les méthodes d'extraction des paramètres sur les zones 3 et 4 où  $I_s$ ,  $n$  et  $R_s$  se présentent. Les figures 3 à 7 représentent les caractéristiques I-V expérimentales et théoriques obtenues par les trois méthodes. Dans les tableaux 2 à 6, sont rapportées toutes les valeurs des paramètres  $I_s$ ,  $n$  et  $R_s$  ainsi l'écart relatif Qlms entre les caractéristiques expérimentales et théoriques.

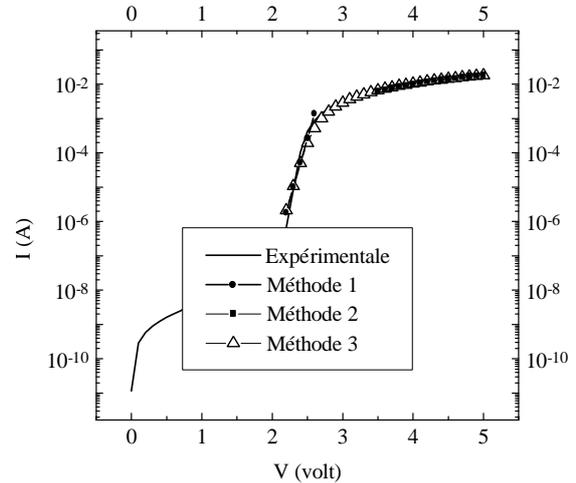


Fig. 3. Caractéristiques I-V expérimentales et théoriques I-V relatives à D1.

TABLEAU 2  
RESULTATS DE CALCUL POUR D1

	Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3
$I_s / A$	$2.54 \times 10^{-22}$	--	$5.36 \times 10^{-22}$
$n$	2.33	--	2.36
$R_s / \Omega$	--	123.83	123.78
Qlms/%	1.48	0.89	8.68

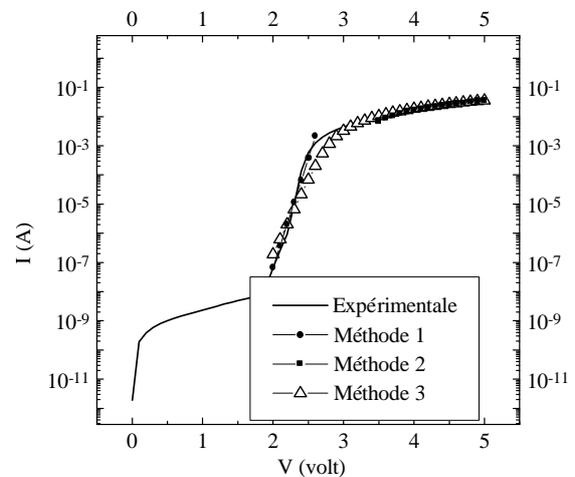


Fig. 4. Caractéristiques I-V expérimentales et théoriques I-V relatives à D2.

TABLEAU 3  
RESULTATS DE CALCUL POUR D2

	Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3
$I_s/A$	$6.04 \times 10^{-23}$	--	$8.75 \times 10^{-18}$
$n$	2.23	--	3.25
$R_s/\Omega$	--	52.85	56.27
Qlms /%	0.01	1.64	10.62

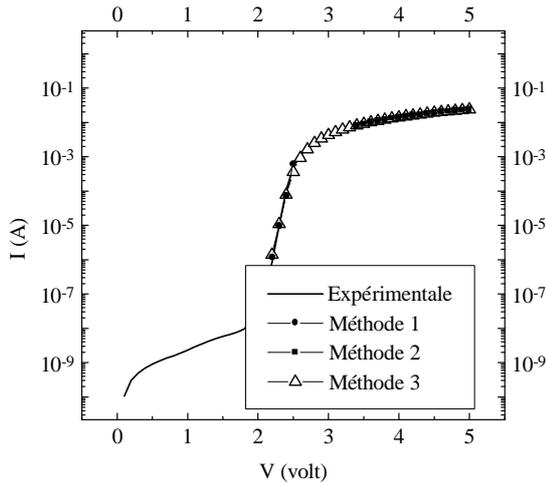


Fig. 5. Caractéristiques I-V expérimentales et théoriques I-V relatives à D3.

TABLEAU 4  
RESULTATS DE CALCUL POUR D3

	Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3
$I_s/A$	$1.78 \times 10^{-26}$	--	$1.71 \times 10^{-26}$
$n$	1.86	--	1.85
$R_s/\Omega$	--	99.29	97.91
Qlms /%	0.61	0.16	2.80

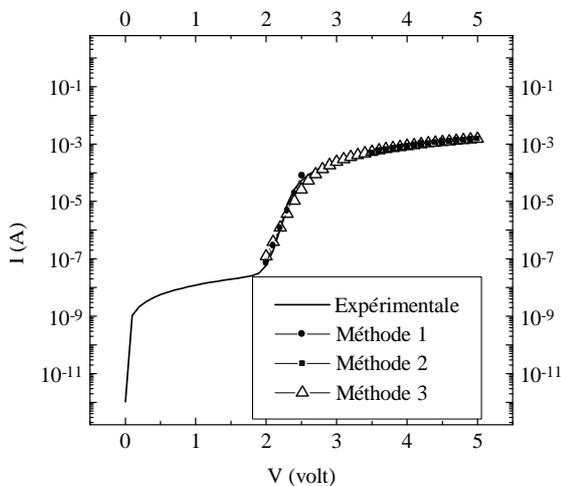


Fig. 6. Caractéristiques I-V expérimentales et théoriques I-V relatives à D4.

TABLEAU 5  
RESULTATS DE CALCUL POUR D4

	Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3
$I_s/A$	$4.08 \times 10^{-20}$	--	$1.19 \times 10^{-17}$
$n$	2.74	--	3.35
$R_s/\Omega$	--	1451.65	1451.89
Qlms /%	0.18	0.79	5.97

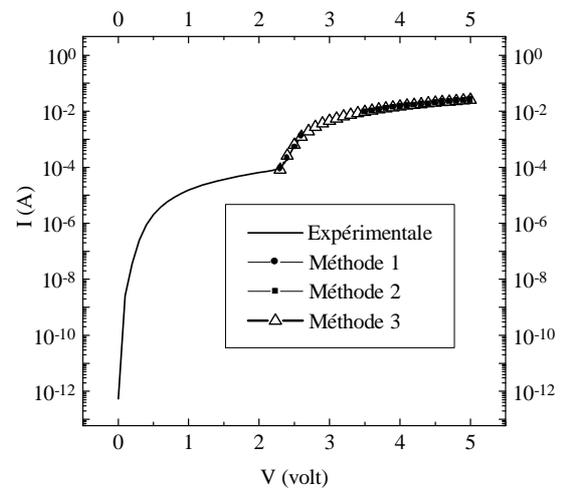


Fig. 7. Caractéristiques I-V expérimentales et théoriques I-V relatives à D5.

TABLEAU 6  
RESULTATS DE CALCUL POUR D5

	Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3
$I_s/A$	$1.30 \times 10^{-13}$	--	$2.53 \times 10^{-18}$
$n$	4.36	--	2.85
$R_s/\Omega$	--	94.99	90.84
Qlms /%	0.05	0.12	1.14

L'application de la méthode 1 nous a permis d'obtenir les plus faibles valeurs de Qlms (0.01% à 0.61%). Ceci est dû au nombre faible de points de mesure dans la zone 3 (4 points) et à la linéarité de la caractéristique expérimentale I-V dans cette zone. Dans la zone 4, l'application de la méthode 2 nous a permis d'avoir des valeurs de Qlms qui varient entre 0.12% et 1.64%. La plus grande valeur de Qlms est obtenue par la méthode 3, égale à 10.62% et relative à D2. Sur les figures 3 et 5 relatives à D2 et D4, on observe clairement la divergence entre des méthodes 1 et 3 et la convergence des méthodes 2 et 3. Ceci est traduit par les valeurs approchées de  $R_s$ , la différence entre les valeurs de  $n$  et la grande différence d'ordre entre les valeurs de  $I_s$  (tableaux 3 et 5). Les meilleures convergences graphique et numérique des méthode 1 et 3 sont

obtenues à partir de D1 et D3 (figures 3 et 5 et tableaux 2 et 4). Pour D5, en comparant les deux méthodes 1 et 3, nous remarquons sur la figure 6 une convergence graphique et sur le tableau 6 une différence entre les valeurs de  $n$  et  $I_s$  malgré que, par ces deux méthodes (1 et 3), nous avons obtenu pour D5 des faibles valeurs de  $Q_{lms}$  (tableau 6). Pour l'ensemble des diodes, les caractéristiques théoriques des méthodes 2 et 3 coïncident avec la caractéristique expérimentale.

## V. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons appliqué trois méthodes d'optimisation basées sur l'algorithme des moindres carrées afin de déterminer les valeurs du courant de saturation  $I_s$ , du facteur d'idéalité  $n$  et la résistance série  $R_s$  des caractéristiques expérimentales I-V de cinq diodes bipolaires en 6H-SiC à structure JTE. Nous avons obtenu des taux d'ajustement élevés (i.e.  $Q_{lms}$  faibles) entre ces caractéristiques et celles calculées avec les méthodes proposées. Les méthodes 2 et 3 donnent des valeurs voisines de  $R_s$ . Les méthodes 1 et 3 peuvent donner des valeurs différentes de  $I_s$  et  $n$  et même avec des taux d'ajustement élevés. Dans le cas où  $Q_{lms}$  de la méthode 3 est grand, nous suggérons que les valeurs des paramètres  $n$ ,  $I_s$  et  $R_s$  soient calculées par les méthodes classiques 1 et 2 présentant des faibles valeurs de  $Q_{lms}$ .

## REFERENCES

- [1] G. L. Harris, "Properties of Silicon Carbide," Ed. G. L. Harris, INSPEC, London, 1995.
- [2] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices," Ed. JOHN WILEY & SONS, New York, 1981.
- [3] K. Arbenz et O. Bachmann, "Éléments d'Analyse Numérique et Appliquée," Presse polytechniques et universitaires romandes, 1992.
- [4] H. Mathieu "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques," Edition MASSON, 1996.
- [5] T. C. Lee et al. "A Systematic Approach to the Measurement of Ideality Factor, Series resistance, and Barrier Height for Shottky Diodes," J. App. Phys., vol. 72, n°10, p. 4739-4742. 1992