

Caractérisation et modélisation d'un MOSFET 1200V – 100A - 4H-SiC à canal n

Dinh-Lam DANG, Sophie GUICHARD, Matthieu URBAIN, Stéphane RAËL
Laboratoire G.R.E.E.N – Université de Lorraine

RÉSUMÉ – Cet article propose de représenter un composant MOSFET à base de carbure de silicium (SiC) en fonctionnement statique sur la base de considérations physiques et de relevés expérimentaux. Le composant en question présente un calibre 1200V – 100A, il est fabriqué par CREE. Ledit modèle a été programmé en langage MAST et simulé sous le logiciel Saber afin de reproduire les caractéristiques statiques $I - V$ d'un MOSFET de polytype 4H-SiC obtenues expérimentalement sur une plage de températures échelonnées de 0°C à 150°C. L'influence de la géométrie (effet de canal court), la mobilité dans le canal d'inversion, la température ainsi que la tension de seuil ont été pris en considération dans les propriétés du composant. Les paramètres du modèle ont été extraits sur la base des données constructeurs et d'essais expérimentaux à l'état passant. Les résultats de simulations confirment la précision du modèle sur l'intégralité de la plage de températures envisagées.

Mots Clés—caractérisation, modèle analytique, modélisation, simulations, SiC, MOSFET

1. INTRODUCTION

Les composants de puissance MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) sont très répandus dans les cellules de commutation pour une large gamme de puissances. En tant que composant unipolaire, le MOSFET présente les qualités requises pour opérer à haute fréquence (jusqu'à 1MHz), cependant il reste exclu des applications haute tension. En raison d'une résistance croissante avec la tension de blocage, les pertes résultantes dégradent significativement l'efficacité de la conversion. Néanmoins les MOSFET de puissance affichent un rendement de qualité pour des tensions inférieures à 200V [1-3].

C'est dans ce contexte que l'émergence des MOSFET à base de carbure de silicium a suscité un vif intérêt pour les applications hautes puissance. Cependant la mobilité réduite et la relativement faible concentration en porteurs libres dans le canal d'inversion réduisent les performances [2, 4, 5]. Par conséquent il apparaît indispensable de disposer d'un modèle précis afin de prévoir le comportement électrique et thermique d'un tel composant dans un environnement d'électronique de puissance.

Pour modéliser de tels composants, la méthode s'appuie généralement sur des considérations physiques et y associe des adaptations empiriques. Néanmoins les modèles valables pour la technologie Si ne sont pas directement transposables aux composants SiC. Par exemple, la référence [7] fait état d'un

modèle où la résistance de drain $R_{DS(ON)}$ est décrite avec précision, elle intègre la mobilité des porteurs et les états d'interface. A l'inverse, un modèle analytique simple est accessible dans [8], il rend correctement compte des effets combinés de canal court, d'états d'interface et de résistance parasite mais sa description n'est pas explicite.

2. CARACTERISATION DU COMPOSANT

Les essais expérimentaux de caractérisation ont consisté à relever la résistance à l'état passant $R_{DS(ON)}$, la tension de seuil V_{GSth} ainsi que les caractéristiques de sortie ($I_D - V_{DS}$) et de transfert ($I_D - V_{GS}$) pour des températures régulièrement espacées entre 0°C et 150°C.

2.1. Tension de seuil V_{GSth}

La tension de seuil V_{GSth} est indispensable pour déterminer l'état passant ou ouvert du composant. Dans nos essais, celle-ci est arbitrairement définie comme étant la tension pour laquelle le courant de drain I_{DS} atteint 10 mA.

A l'instar de la technologie Si, la tension de seuil des composants SiC manifeste un coefficient en température négatif, (Fig. 1). La particularité réside dans une dépendance marquée vis-à-vis de la tension de drain V_{DS} . Ce comportement a été étudié.

2.2. Résistance à l'état passant $R_{DS(ON)}$

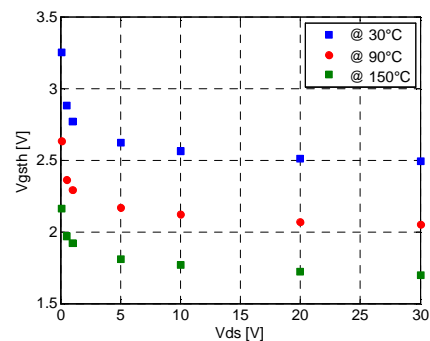


Fig.1 Tension de seuil vs.temérature et V_{DS}

La résistance à l'état passant $R_{DS(ON)}$, a été mesurée par spectroscopie ($f=100$ Hz et $\Delta V_{DS} = 100$ mV) à $I_D=0$ A, $V_{DS} = 100$ mV et pour différentes polarisations de grille V_{GS} échelonnées entre 6V et 20V. Contrairement à leurs homologues Si, la technologie SiC présente une résistance à l'état passant à coefficient thermique de signe variable selon la

tension de grille (Fig. 2). Cela laisse supposer l'existence d'instabilités latérales et rend la mise en parallèle délicate.

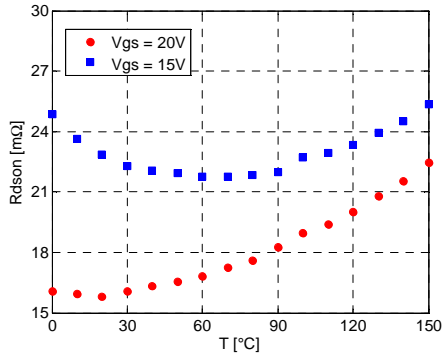


Fig.2 $R_{DS(on)}$ vs. température et V_{GS}

2.3. Caractéristiques de sortie et de transfert

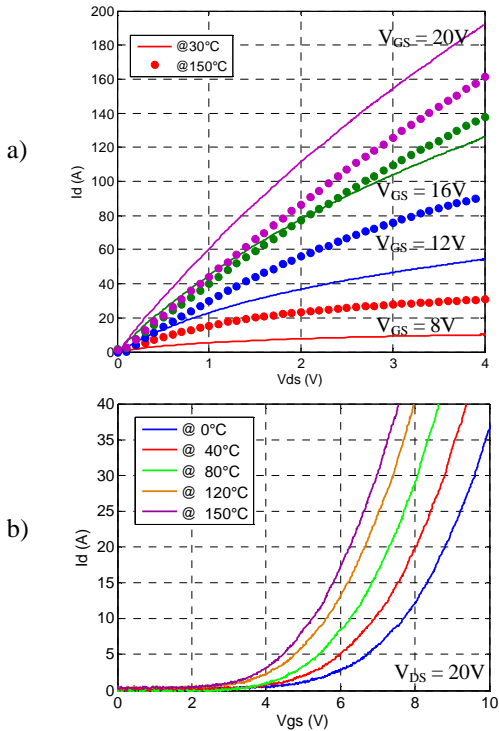


Fig.3 Caractéristiques de sortie (a) – Caractéristiques de transfert (b)

La figure 3a met en évidence que la transition entre régime ohmique et saturé est moins franche pour les composants SiC. En outre, on remarquera que le courant de drain I_{DS} est croissant avec la température pour des polarisations de grille $V_{GS}=8, 12$ et $16V$ mais que cette tendance disparaît pour $V_{GS}=20V$. Par ailleurs la tension de seuil est classiquement extraite des caractéristiques de transfert, (Fig. 3b), un tel procédé devient imprécis pour les composants SiC compte tenu de la faible pente des courbes. Ce phénomène sera abordé dans l'article final.

3. MODÈLE ANALYTIQUE PROPOSÉ

Il existe essentiellement deux types de modèles, ceux de nature physique et exigeant de nombreux paramètres (concentration en dopants, mobilité ...) et ceux de formulation mathématique faisant usage d'un outil automatique d'extraction des paramètres. Le présent modèle s'en distingue de par son origine physique, l'identification des paramètres par comparaison aux relevés expérimentaux avec le support du logiciel Saber, et le soin particulier de la cohérence avec les phénomènes physiques. Le jeu d'équations régissant le courant

de drain en fonction de la tension de grille et de la tension de drain est résumé ci-dessous. La signification de chaque terme sera développée dans la version finale de l'article.

$$\begin{cases} I_D = \frac{\mu_{no}(V_{GS})}{1 + \theta V_{ch}} \cdot \frac{W}{L} \cdot C_{ox} \cdot (V_{GS} - V_{GSth} - \alpha \frac{V_{ch}}{2}) \cdot V_{ch} \\ \text{si } V_{DS} \leq a \cdot (V_{GS} - V_{GSth}) \\ I_{Dsat} = \frac{W}{L} \cdot \mu_{no}(V_{GS}) \cdot C_{ox} \cdot (V_{GS} - V_{GSth})^2 \cdot (1 + \lambda V_{ch}) \\ \text{si } V_{DS} > a \cdot (V_{GS} - V_{GSth}) \\ V_{DS} = I_D \cdot R_D + V_{ch} \\ k = C_{ox}(V_{GS}) \cdot \mu_{no} \cdot \frac{W}{L} \\ \theta = \frac{1}{L \cdot E_c} \end{cases}$$

La figure 4 met en évidence la concordance du modèle avec le comportement expérimental. De plus amples comparaisons seront fournies dans l'article final.

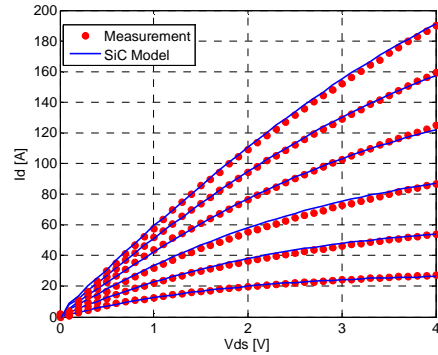


Fig.4 Modèle vs. Expérience à 30°C

4. CONCLUSIONS

Un modèle analytique a été développé pour représenter le comportement statique d'un composant MOSFET SiC. Les paramètres sont extraits grâce à une série d'essais. La tendance du modèle est conforme à l'expérience.

5. RÉFÉRENCES

- [1] B. J. Baliga, *Advanced Power MOSFET Concepts*: Springer, 2010.
- [2] J. A. C. Tsunenobu Kimoto, *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications*. Singapore: Wiley-IEEE Press, 2014.
- [3] M. Mudholkar, S. Ahmed, M. N. Ericson, S. S. Frank, C. L. Britton, and H. A. Mantooth, "Datasheet Driven Silicon Carbide Power MOSFET Model," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 2220-2228, 2014.
- [4] G. Y. Chung, C. C. Tin, J. R. Williams, K. McDonald, R. K. Chanana, R. A. Weller, *et al.*, "Improved inversion channel mobility for 4H-SiC MOSFETs following high temperature anneals in nitric oxide," *Electron Device Letters, IEEE*, vol. 22, pp. 176-178, 2001.
- [5] T. K. Peter Friedrichs, Lothar Ley, Gerhard Pensl, *Silicon Carbide: Volume 2: Power Devices and Sensors*: Wiley, 2009.
- [6] T. R. McNutt, A. R. Hefner, H. A. Mantooth, D. Berning, and R. Sei-Hyung, "Silicon Carbide Power MOSFET Model and Parameter Extraction Sequence," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 353-363, 2007.
- [7] M. G. Jaikumar, R. R. Rao, and S. Karmalkar, "On the simulation and analytical modeling of on-state DC characteristics of Silicon Carbide Double-implanted MOSFETs," *Solid-State Electronics*, vol. 114, pp. 49-54, 12/ 2015.
- [8] F. Ruiyun, A. Grekov, J. Hudgins, A. Mantooth, and E. Santi, "Power SiC DMOSFET Model Accounting for Nonuniform Current Distribution in JFET Region," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 181-190, 2012.