

Etude sur les transistors MOSFETs en Carbure de Silicium – Potentiel d'utilisation dans les Applications Hautes Températures

Rémy OUAIDA ^{1,2}, Maxime BERTHOU ², Pierre BROSELARD ², Sebastien OGE ¹, Pascal BEVILACQUA ², Charles JOUBERT ²

¹ THALES Microelectronics SAS, CAP BRETAGNE Z.A. Le Piquet 35370 ETRELLES / France

² Laboratoire AMPERE UMR CNRS 5005, 21 Avenue Jean Capelle 69621 Villeurbanne Cedex

RESUME - Ce papier présente les performances des MOSFETs en carbure de silicium pour des applications haute température. Les caractérisations statiques et dynamiques ont été réalisées avec un packaging adéquat pour des températures variant de 25°C à 250°C. Un banc de test de vieillissement a été conçu pour évaluer la durée de vie des composants en commutation sur une charge résistive avec $T > 250^\circ\text{C}$.

Mots-clés — *Electronique de Puissance, MOSFET de puissance, Carbure de Silicium, Haute Température, Vieillessement*

1. INTRODUCTION

Depuis un demi-siècle, l'électronique utilise des composants en Silicium. Bien que des améliorations continuent à être effectuées, la technologie Silicium atteint aujourd'hui une asymptote et les progrès sur la tenue en tension et les performances en commutation sont limités [1]. C'est pourquoi les industriels se sont tournés vers de nouveaux matériaux « grand gap » tel que le Carbure de Silicium (SiC) qui permet de repousser les limites des convertisseurs dans trois directions : haute tenue en tension, forte vitesse de commutation et haute température de fonctionnement [2-4]. Grâce à sa simplicité de commande et l'avantage d'être normalement bloqué, le MOSFET en carbure de silicium est devenu l'un des plus sérieux candidats grand gap pour substituer les conventionnels MOSFETs ou IGBT en silicium [5]. En plus de sa disponibilité sur le marché, de récentes études ont montré que l'oxyde de grille était fiable jusqu'à 200°C [6], [7]. La problématique de l'oxyde est une des barrières majeures du MOSFET par rapport aux structures JFET et BJT.

Diverses applications ont besoin d'électronique pour des applications hautes températures. C'est le cas des outils d'exploration pétrolière opérant en grande profondeur ou des actionneurs électromécaniques situés à côté des turbines du moteur de l'avion plus électrique. Pour toutes ces applications, les industriels se tournent vers les composants en carbure de silicium qui doivent assurer un grand rendement, une forte intégration et une fiabilité suffisante pour l'application [8].

L'objectif de cet article est de présenter les performances des MOSFETs en SiC pour la haute température et le potentiel de ces transistors grand gap dans une application industrielle. Pour cela les caractérisations statiques dynamiques ont été réalisées jusqu'à 250°C ainsi qu'un test de vieillissement dans les conditions aéronautiques. Ceci permet d'estimer les performances (rendement, durée de vie) qui peuvent être atteintes au niveau de l'ondeur.

2. DESCRIPTION DES VEHICULES DE TEST

Les MOSFETs en carbure de silicium utilisés dans cet article sont des puces de chez CREE 1200V/ 80 mΩ/ 16 mm². Afin de réaliser les caractérisations jusqu'à 250°C, les puces ont été assemblé avec un packaging approprié : un substrat en AMB Si₃N₄ avec brasure à haut point de fusion (280°C), boîtier To 254 métallique et sellé hermétiquement sous azote N₂.

Cet assemblage est réalisé en collaboration avec l'entreprise Thales Microelectronics. Une image RX est systématiquement réalisée afin de vérifier l'absence de vide dans la brasure d'attache de puce. Cela évite les disparités entre les différentes puces au niveau de la résistance thermique semelle-puce permettant ainsi d'avoir des composants stressés identiquement sous la même condition électrique. La figure 1 montre l'assemblage d'une puce MOSFET avec l'image RX ainsi que la simulation thermique.

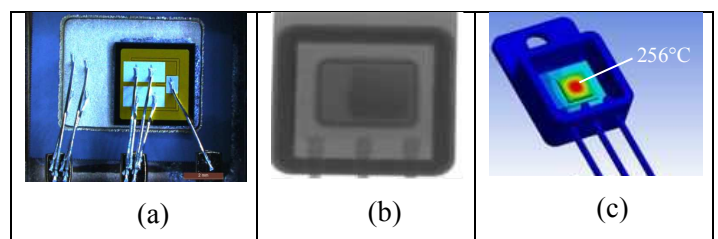


Figure 1 : Photo des puces MOSFET sur le AMB substrat (a), image RX (b), simulation thermique ANSYS (c)

3. CARACTERISATIONS ELECTRIQUES

3.1. Caractérisations électriques statiques

Les caractérisations complètes sur 10 véhicules de test ont été réalisées incluant les courbes de conduction directes et inverses pour différents niveaux de tension de grille. La transconductance, le courant de fuite jusqu'à 1200V et les capacités complètent ces caractérisations. Tous ces paramètres ont été tracés en fonction de la température de 25°C à 250°C utilisant un traceur Curve AGILENT B1505A et un four convectif Thermonix T2500. La figure 2 montre le traceur, le four convectif ainsi que le banc d'essai approprié à la haute température.

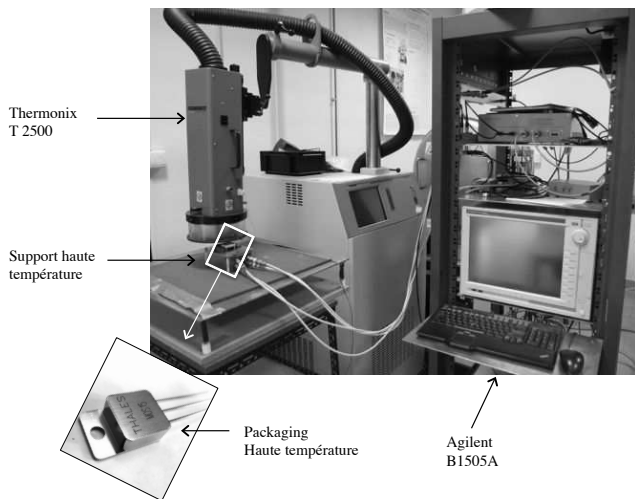


Figure 2 : Photo du banc de caractérisations haute température

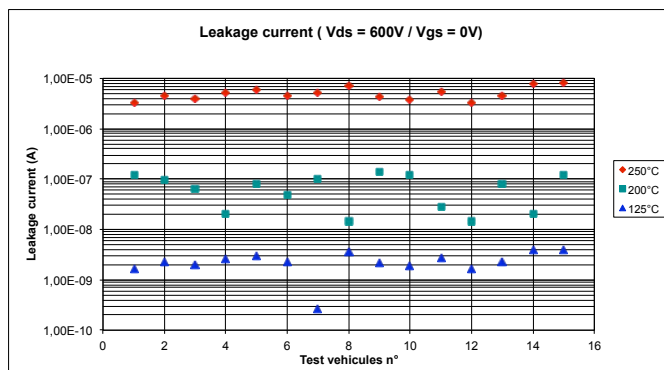


Figure 3 : Courant de fuite Drain-Source pour $V_{GS}=0V$ et $V_{DS}=600V$

Ces caractérisations permettent d'extraire des informations qui sont résumés par la valeur moyenne sur les 10 véhicules de test dans le tableau 1 tel que la résistance à l'état passant, la tension de seuil, le courant de fuite (figure 3) et la capacité d'entrée. Ces paramètres sont les éléments clés qui définissent les pertes en conduction et à l'état bloqué.

A partir des caractérisations statiques, les observations suivantes ont été extraites :

- Le courant fuite augmente avec la température mais reste inférieur à $10\mu A$ pour une tension $V_{DS}=600V$ et $V_{GS}=0V$ à $250^\circ C$.

- La résistance et la tension de seuil dépendent aussi de la température. Au sein de la population de tests on observe une très faible disparité des mesures (erreur $<10m\Omega$ à $250^\circ C$).

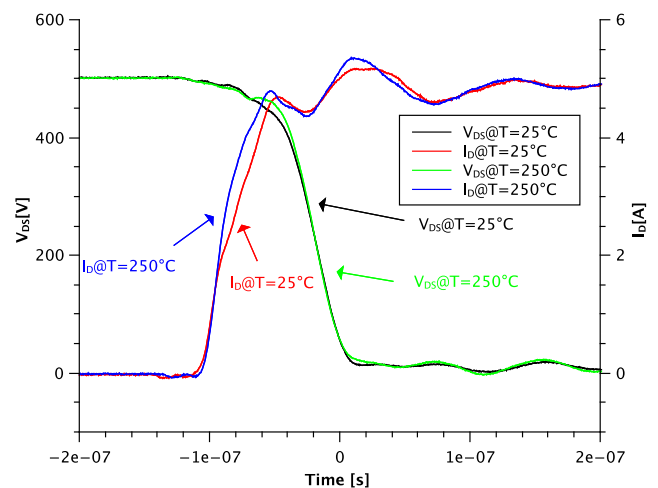
- Tous les véhicules de test ont gardé leur propriété de normalement bloqué jusqu'à $250^\circ C$ (tension de seuil $> 0V$).

Paramètres	25°C	250°C
Résistance à l'état passant	80 mΩ	148 mΩ
Tension de seuil	2,37 V	1,1 V
Courant fuite@ $V_{DS}=600V$	10 nA	2700 nA
Capacité d'entrée C_{ISS}	1920 pF	2012 pF

Tableau 1 : Résumé des caractérisations statiques

3.2. Caractérisations électriques dynamiques

Les caractérisations en commutation du MOSFET en carbure de silicium ont été mesurées sous des températures variant entre $25^\circ C$ et $250^\circ C$. Le test est réalisé avec une tension de bus de 500 V et un courant dans la charge résistive de 5A. Pour la commande, la tension de grille appliquée sur le MOSFET vaut $-5V/20V$. Cette tension est fournie par un driver IXDD60PI avec une fréquence de commutation de 10 kHz et une résistance de grille de 10Ω . La disposition du circuit a été conçue afin de minimiser les éléments parasites. Les formes d'ondes ainsi obtenues apportent des informations sur le comportement du transistor. Cependant la mesure exacte des pertes en commutations reste très compliquée à réaliser à cause des capacités parasites, du déphasage des sondes... [9]. Dans notre étude la mesure en commutation a été réalisée dans les mêmes conditions pour les différentes températures afin d'observer une évolution des pertes. La haute température est imposée par une plaque chauffante régulée sur la température de jonction de la puce. Cette température est systématiquement contrôlée par des paramètres électriques thermosensibles qu'on a obtenus grâce aux caractérisations statiques tel que la résistance à l'état passant. La figure 5 montre les formes d'ondes obtenues de la mise à l'état passant et bloqué pour $25^\circ C$ et $250^\circ C$.



(a)

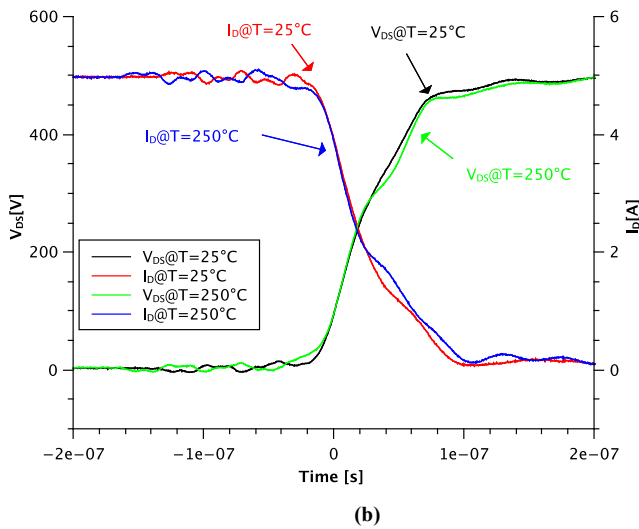


Figure 5 : Forme d'onde de la mise à l'état passant (a) et à l'état bloqué (b) en fonction de la température

On voit sur les courbes que la température a très peu d'influence sur les fronts montant ou descendant.

Les caractérisations électriques jusqu'à 250°C ont montré une dépendance en température pour les paramètres statiques tels que la résistance, les courants de fuite et la tension de seuil tandis que comme le montre le faible changement de la capacité d'entrée, les paramètres en commutation sont plus stables. A partir de ces caractéristiques, il est possible de faire une évaluation théorique du rendement d'un onduleur utilisant des MOSFETs à haute température. Dans [10], l'auteur utilise les mêmes MOSFETs dans une application onduleur 3 phases PWM pour un moteur DC Brushless. Le calcul du rendement théorique utilisant les caractérisations statiques et dynamiques vaut 98% pour une température d'utilisation de 250°C. Cependant ces valeurs ne prennent pas en compte la notion de vieillissement et de fiabilité. C'est l'objectif de la prochaine section.

4. VIEILLISSEMENT

Les caractérisations précédentes ont montré le potentiel électrique qui peut être obtenue lorsqu'on utilise des MOSFETs en carbure de silicium pour des applications haute température. Actuellement les industriels tentent d'améliorer la procédure de fabrication du MOSFET afin d'augmenter la fiabilité du composant notamment sur l'oxyde de grille. Il est possible de trouver des études avec des opinions contradictoires sur la fiabilité des MOSFETs. Dans [11] et [12], les auteurs montrent une dégradation de la tension de seuil alors que plus récemment [13] et [14] les auteurs démontrent une bonne durée de vie avec des caractéristiques stables. Afin d'apporter une réponse sur la possibilité d'utiliser des MOSFETs pour des applications haute température, plusieurs tests de vieillissement ont été réalisés. Les mécanismes de dégradation liés aux packaging (fatigue d'attache de puce, craquelure des fils de bonding...) sont déjà décrits dans la littérature [15][16]. Nous porterons notre étude sur l'évolution des paramètres électriques intrinsèques à la puce. La fiabilité de l'interface de l'oxyde SiO₂-SiC est le point limitant du MOSFET.

Notre étude sur le vieillissement se partage en trois parties avec en premier lieu un vieillissement accéléré avec tension de grille fixe **High Temperature Gate Bias** (HTGB) puis une tension de grille commutée **Bias Instability** pour finir avec un **Time-To-Failure** sur une application industrielle afin d'étudier la durée de vie des composants.

4.1. Tension de grille continue (HTGB)

Le premier test de fiabilité réalisé est le test de polarisation continue de grille. Il consiste à appliquer une tension constante sur la grille avec le drain et la source à la masse. Chaque MOSFET est stressé pendant 48 heures à différentes températures qui auront un impact accélérant sur la dégradation. Après le stress, une mesure de la tension de seuil est effectuée à 25°C. La tension de seuil est déterminée comme étant la tension de grille qui permet d'atteindre un courant de drain de 100µA sous une tension V_{DS}= 50 mV. Les niveaux de tension appliqués sur la grille sont ceux fournis par le constructeur +20V et -5V.

L'évolution de la tension de seuil par rapport à la température du stress appliquée sur le composant est représentée sur la figure 6.

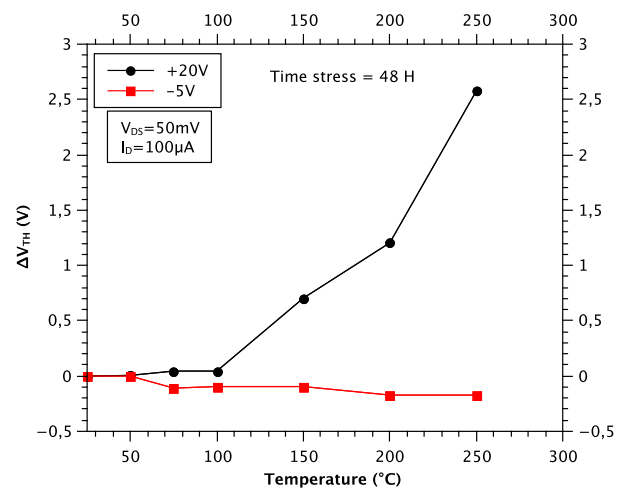


Figure 6 : Evolution de la tension de seuil pour les MOSFETs stressés à +20V et -5V par rapport à la température

Les valeurs représentées montrent le ΔV_{TH} obtenu par la relation suivante $\Delta V_{TH} = V_T - V_{T0}$ avec V_T la tension de seuil après le stress à la température et V_{T0} la tension de seuil à 25°C. Sur la courbe, le décalage pour le V_T positif à 250°C est plus important (+2,5V) que pour le V_T négatif (-0,15V). Le décalage positif est dû à l'injection d'électrons dans l'oxyde de grille et à l'interface SiO₂-SiC. Le décalage négatif est dû à l'injection de trou dans le P-well à proximité de l'oxyde. Le décalage plus important pour le stress de grille positif est lié à l'intensité plus importante du champ électrique sous +20V par rapport au -5V. Ce décalage est représentatif de la qualité de fabrication de l'oxyde. En effet lorsque le semi-conducteur est oxydé pour former la grille, une haute densité d'éléments perturbateurs est présente au niveau de l'interface. Ces éléments sont des pièges au niveau de l'oxyde et des défauts à l'interface SiO₂-SiC. Les électrons qui se piègent dans ces défauts vont influencer la valeur de la tension de seuil.

Dans une application industrielle les composants sont utilisés en commutation avec une tension de grille positive et négative. Le prochain test de vieillissement consiste à appliquer une commutation sur la grille et d'observer la dérive de la tension de seuil.

4.2. Tension de grille commutée

Le test précédent a montré une dérive de la tension de seuil plus importante pour une tension positive appliquée sur la grille. Le test qui suit consiste cette fois ci appliquer une tension sur la grille qui commute entre positif et négatif sans puissance entre drain et source le tout à 250°C. Le principe de la mesure est réalisé comme le montre la figure 7.

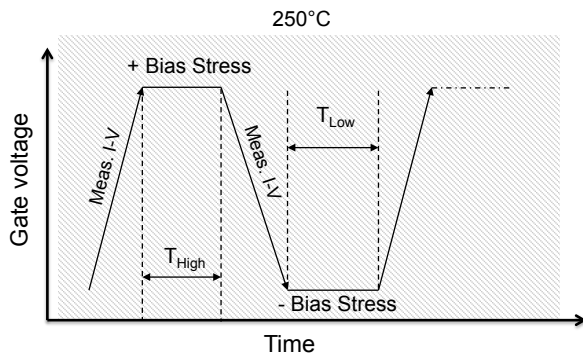


Figure 7 : Principe du test avec commutation sur la grille pour un cycle.

Initialement, la tension de grille passe de sa valeur négative à sa valeur positive (ramp-up) avec une tension de drain-source de 50 mV afin d'effectuer une mesure de tension de seuil (mesure réalisée comme dans le test précédant avec un courant de drain de 100µA). Ensuite une tension positive est appliquée sur la grille pendant un temps que l'on définit. La tension de grille passe de sa valeur positive à négative (ramp-down) puis une tension négative est appliquée pendant le même temps que pour le stress positif. Les niveaux de tension sont les mêmes que précédemment +20V/-5V. Ce test de vieillissement a été réalisé pour 10 cycles avec un temps de stress de 1000s et 4000s. La figure 8 montre un cycle de vieillissement en représentant le courant de drain par rapport à la tension de grille.

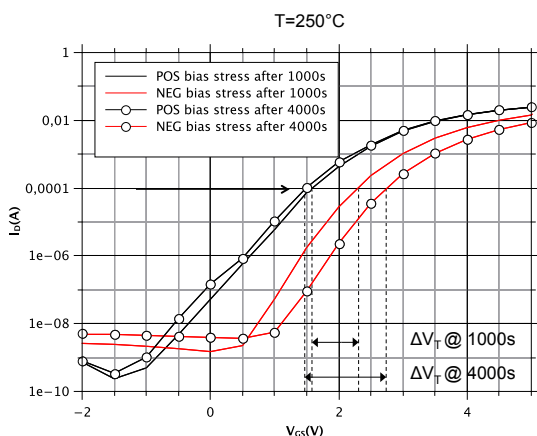


Figure 8 : Courbe de I_D - V_{GS} pour un cycle après le stress positif et négatif d'une durée de 1000s et 4000s.

Comme précédemment, le stress positif entraîne une dérive positive de la tension de seuil et inversement pour le stress négatif. ΔV_T représente l'instabilité de la tension de seuil. Nous la calculons comme étant la différence entre la tension de seuil lors du ramp-down et la tension de seuil lors du ramp-up. ΔV_T est égale à 0,7V pour un stress de 1000s et 1,3V pour un stress de 4000s. La période du stress à l'état haut et bas a donc une importance sur l'instabilité de la tension de seuil.

Maintenant chaque cycle décrit précédemment est répété 10 fois afin de réaliser un vieillissement et l'évolution de la tension de seuil lors du ramp-up et ramp-down est présenté figure 9.

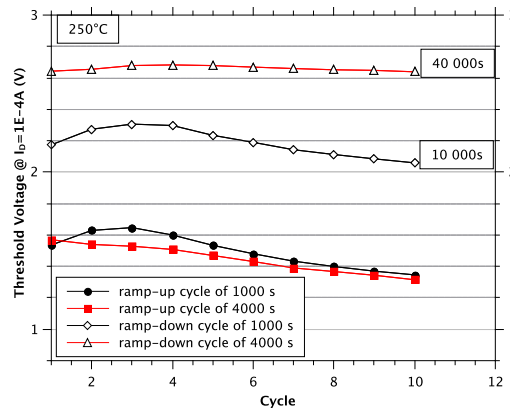


Figure 9 : Evolution de la tension de seuil lors du ramp-up et ramp-down dans le temps pour des stress de 1000s et 4000s.

Cette figure nous montre qu'il n'y a quasiment pas d'augmentation de l'instabilité (ΔV_T) pour le test de vieillissement avec des stress de durée de 1000s. Le changement de l'instabilité est dû aux électrons qui rentrent et qui sortent dans les pièges présents dans l'oxyde et à l'interface. Avec le vieillissement le nombre de piège augmente et cela se traduit par une augmentation de l'instabilité car les tensions de seuil dérivent d'autant plus que la présence de piège est importante. Dans le cas de la durée de 1000s, le nombre de pièges reste stable. L'oxyde de grille n'a donc pas beaucoup vieilli. Néanmoins pour le stress de durée de 4000s, il y a une augmentation de l'instabilité liée à la diminution de la tension de seuil pour le ramp-up. L'instabilité finale est de 1,32V pour une valeur initiale de 1,07V (augmentation de 23%). Le nombre de piège a donc augmenté et ce phénomène est irréversible. Le principal problème de fiabilité rencontré par le MOSFET est la qualité de l'oxyde. Dans le papier [13], des tests de vieillissement sur des durées plus longues montre une instabilité stable après 150 heures. Mais le papier conclut sur la nécessité de réaliser des tests de vieillissement dans des conditions réalistes qui reste un challenge difficile méritant des travaux plus approfondis. C'est l'objectif de la dernière partie du vieillissement.

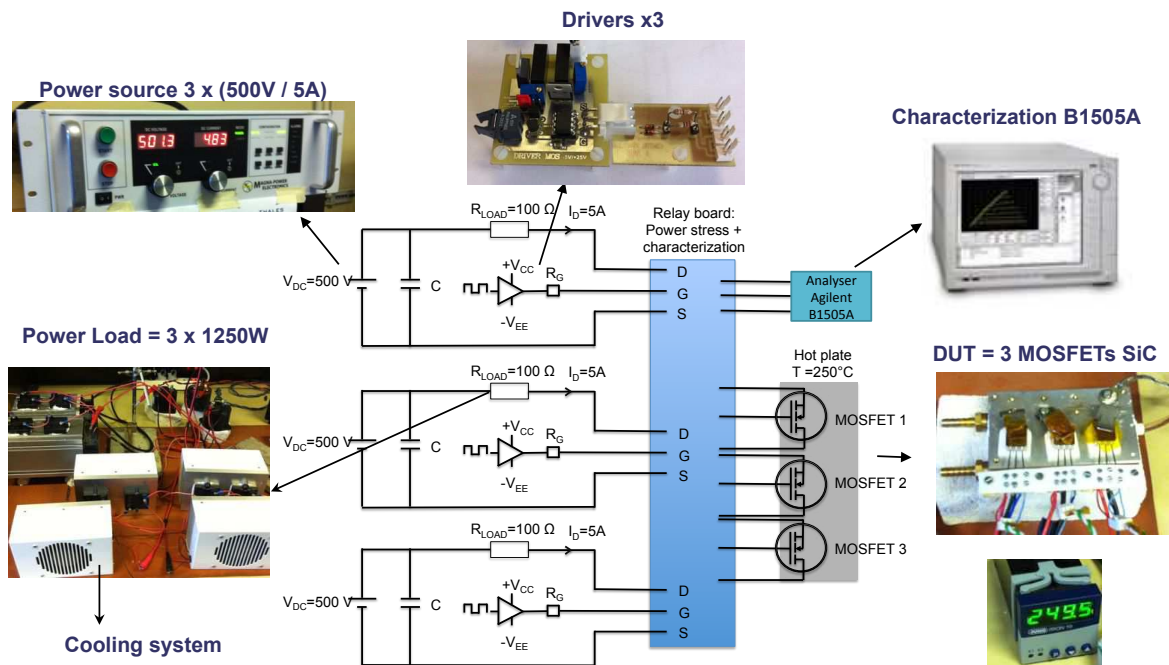


Figure 10 : Banc de vieillissement haute température

4.3. Durée de vie dans des conditions réalistes

4.3.1. Banc de test

Les précédentes parties ont montré le potentiel électrique du MOSFET pour des applications haute température. L'étape suivante consiste à évaluer la fiabilité du composant à haute température dans le temps. Pour cela, un banc de test de vieillissement a été mis en place pour déterminer la durée de vie des puces dans des conditions de commutation avec une température supérieure à 250°C. Trois véhicules de test comportant des MOSFETs ont été placés sur un bloc chauffant maintenu à 250°C. Chaque composant commute un courant de 5 A avec une fréquence de 10 kHz sous une tension de 540 V ce qui correspond à une application aéronautique. Sur la figure 10 on peut voir le montage du banc de test. Une carte relai est utilisée dans le but d'interrompre les commutations et de procéder aux caractérisations afin de connaître le niveau de santé du composant tout en maintenant la haute température. Cela permet de surveiller les indicateurs de vieillissement du MOSFET à intervalle de temps régulier. La fin du test de vieillissement a lieu lorsque le composant n'est plus apte à commuter. Pour réaliser un test de vieillissement, il est nécessaire de connaître la température de la puce parcourue par le courant de charge. En utilisant les caractérisations précédentes, les pertes dans chaque puce sont estimées à 4,1W pour nos conditions de test. La résistance thermique jonction-boîtier a été simulée à 1,45°C/W grâce au logiciel Ansys NLT Pro. La figure 1-(c) montre la simulation thermique sur le véhicule de test. La température de la puce à la jonction est de 256°C dans nos conditions de test.

4.3.2. Résultats avec une température du bloc de 250°C

Les indicateurs de vieillissement qui ont été mesurés sont la tension de seuil (évalué comme dans les parties précédentes), le courant de fuite de grille (pour une tension de grille de 5V), la

résistance à l'état passant ($V_{GS}=20V$ et $I_D=5A$) et le courant de fuite de drain ($V_{GS}=0V$ et $V_{DS}=600V$). La figure 11 montre l'évolution de ces paramètres pour une température du bloc de 250°C. L'analyse de ces paramètres nous permet de savoir si ces indicateurs reflètent l'état de santé du composant. Concernant la tension de seuil, il y a une diminution pour deux MOSFETs avant la casse cependant la tension reste stable pour le troisième. Ce paramètre n'est pas un indicateur de l'état de santé du composant. Il en est de même avec la résistance à l'état passant. Par contre pour le courant de fuite de grille et de drain source on voit une augmentation juste avant la casse pour les trois composants. Le courant de grille passe de 1 μA à 500 μA ce qui montre un défaut d'oxyde de grille vis à vis de ses propriétés isolantes. Ce paramètre reflète l'état de santé du MOSFET.

Les trois composants ont tenu environ 1000 heures avec un bloc chauffant de 250°C. La stabilité des paramètres mesurés avant l'emballage électrique entraînant la casse, montre une certaine maturité du procédé de fabrication des MOSFETs et avec l'amélioration des oxydes de grille, il est possible d'observer des composants plus fiables.

4.3.3. Loi de vieillissement

Le test de vieillissement a été effectué pour plusieurs températures afin de réaliser une loi de vieillissement (température du bloc à 260°C et 300°C). Les durées de vie sont représentées sur la figure 12. Le temps obtenu pour une température de 260°C est d'environ 900 heures et de 250 heures pour une température de 300°C. Sur cette figure on peut voir clairement que la température est un facteur accélérant sur la durée de vie. Concernant les indicateurs mesurés pendant le test de vieillissement, on retrouve que le courant de fuite sur la grille s'emballe juste avant la casse. Il est donc possible d'utiliser le courant statique de grille comme indicateur de vieillissement afin de réaliser une protection du circuit juste avant le défaut.

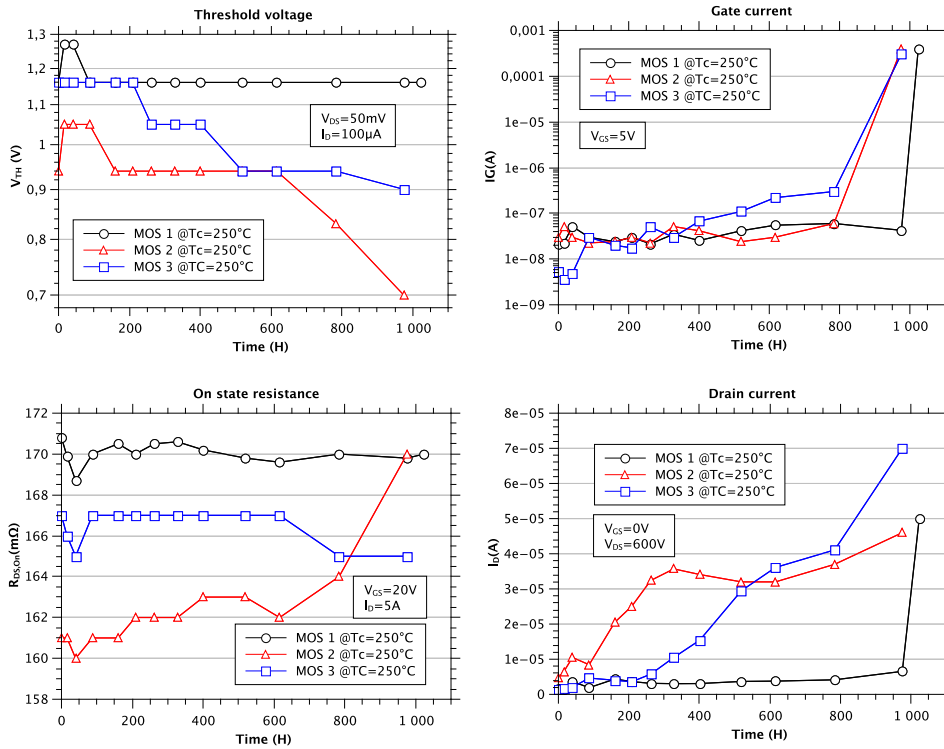


Figure 11 : Evolution des paramètres électriques durant le test de vieillissement à 250°C

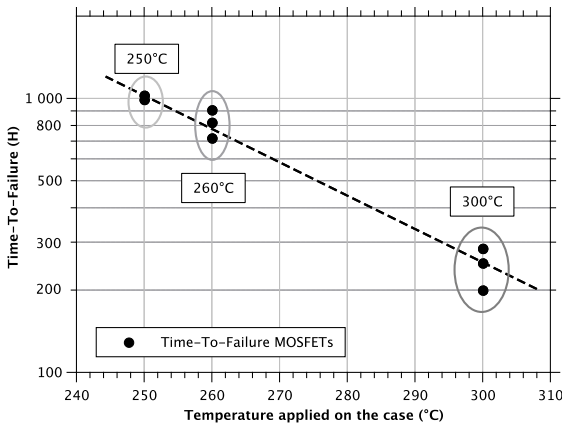


Figure 12 : Durée de vie des MOSFETs en fonction de la température du bloc chauffant.

5. DISCUSSION

Depuis le début de ces tests, de nombreux composants MOSFETs en carbure de silicium ont fait leur apparition comme les MOSFETs de chez Rohm et la nouvelle génération de MOSFET de chez CREE [17]. Nous avons réalisé des mesures pour comparer la fiabilité des puces notamment sur l'aspect oxyde de grille. La figure 13 présente les résultats du test d'instabilité réalisés sur les trois types de MOSFETs.

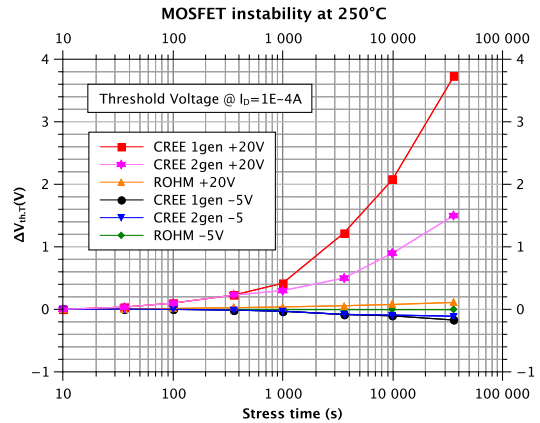


Figure 13 : Durée de vie des MOSFETs en fonction de la température du bloc chauffant.

Sur cette figure, on peut voir une diminution de l'instabilité sur la nouvelle génération de CREE, ce qui prouve que l'industriel a progressé dans la fabrication de l'oxyde de grille. Concernant les MOSFETs de chez Rohm, on voit qu'il n'y a pratiquement pas d'augmentation de l'instabilité. La qualité de la grille est nettement supérieure pour ces composants. Cependant la conclusion sur la fiabilité des MOSFETs ne peut être définitive qu'après le test de vieillissement pour l'application industrielle haute température. Des tests de vieillissement sont en cours et les résultats seront présentés dans des études futures.

6. CONCLUSIONS

Ce papier présente le potentiel des performances du MOSFET pour des applications haute température. Les caractérisations des puces en température ont montré que les transistors gardent leur propriété de normalement bloqué jusqu'à 250°C. Plusieurs tests de fiabilité et de vieillissement ont été réalisés afin de connaître la durée de vie des composants dans des applications haute température. L'un des problèmes prépondérant en terme de fiabilité du MOSFET reste l'oxyde de grille. Les niveaux de tension de grille, le temps et la température sont des éléments qui vont détériorer la qualité de l'interface SiO₂-SiC. La fiabilité de l'oxyde nous est donnée par le test d'instabilité. Afin de conclure sur la possibilité d'utiliser les MOSFETs dans des applications haute température, un banc de test a été réalisé dans les conditions proche de la réalité. La durée de vie des composants en fonction de la température a été établie. Nous avons observé que le courant de grille reflète l'état de santé lors du vieillissement et des solutions de health monitoring peuvent être envisagées. Pour finir, une brève comparaison des différentes technologies de MOSFETs a été réalisée et sera poursuivie dans de prochains travaux.

7. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés en partenariat avec l'entreprise THALES Microelectronic et le laboratoire AMPERE.

8. REFERENCES

- [1] T. Zhao, J. Wang, A. Huang, and A. Agarwal, "Comparisons of SiC MOSFET and Si IGBT based motor drive systems," in Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE, 2007, pp. 331–335.
- [2] John S. Glaser, Jeffrey J. Nasadoski, Peter A. Losee, Avinash S. Kashyap, Kevin S. Matocha, Jerome L. Garret, Ljubisa D. Stevanovic, "Direct Comparison of Silicon and Silicon Carbide Power Transistors in High-Frequency Hard-Switched Applications," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2012. APEC 2012. *Twenty-Sixth Annual IEEE*
- [3] S. Tiwari, T. Undeland, S. Basu, and W. Robbins, "Silicon carbide power transistors, characterization for smart grid applications," in Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International, 2012, pp. LS6d.2–1–LS6d.2–8.
- [4] R. Kaplar, M. J. Marinella, S. DasGupta, M. A. Smith, S. Atcitty, M. Sun, and T. Palacios, "Characterization and reliability of SiC- and GaN-based power transistors for renewable energy applications," in Energytech, 2012 IEEE, 2012, pp. 1–6
- [5] A. Lemmon, M. Mazzola, J. Gafford, and K. Speer, "Comparative analysis of commercially available silicon carbide transistors," in Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE, 2012, pp. 2509–2515
- [6] L. Yu, G. Dunne, K. Matocha, K. Cheung, J. Suehle, and K. Sheng, "Reliability issues of SiC MOSFETs: A technology for high-temperature environments," *Device and Materials Reliability, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 4, pp. 418–426, 2010.
- [7] K. Matocha, G. Dunne, S. Soloviev, and R. Beaupre, "Time-dependent dielectric breakdown of 4H-SiC MOS capacitors and DMOSFETs," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 8, pp. 1830–1834, 2008.
- [8] D. Bergogne, H. Morel, D. Planson, D. Tournier, P. Bevilacqua, B. Allard, R. Meuret, S. Vieillard, S. Raël, F. Meibody-Tabar, "Towards an airborne high temperature SiC inverter," *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*, vol., no., pp.3178,3183, 15-19 June 2008.
- [9] Cougo, B., Schneider, H., & Meynard, T. (2013, September). Accurate switching energy estimation of wide bandgap devices used in converters for aircraft applications. In *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on* (pp. 1-10). IEEE.
- [10] Oge, S., Ouaida, R., Brosselard, P., & Peyresoubes, G. (2014, April). SiC MOSFET for high temperature motor driving. In *PCIM Europe, 2013*.
- [11] Kaplar, R. J., DasGupta, S., Marinella, M. J., Sheffield, B., Brock, R., Smith, M. A., & Atcitty, S. (2012). Degradation mechanisms and characterization techniques in silicon carbide MOSFETs at high temperature operation. *Proc. Electrical Energy Storage Applications and Technologies*, 121-124.
- [12] DasGupta, S., Brock, R., Kaplar, R., Marinella, M., Smith, M., & Atcitty, S. (2011). Extraction of trapped charge in 4H-SiC metal oxide semiconductor field effect transistors from subthreshold characteristics. *Applied Physics Letters*, 99(2), 023503.
- [13] R. Kaplar, D. Hughart, S. Atcitty, J. Flicker, S. DasGupta, and M. J. Marinella, "Performance and reliability characterization of 1200 v silicon carbide power mosfets at high temperatures," in *IMAPS Conference and Exhibition on High Temperature Electronics Network (HiTEN)*, 2013, pp. 1–6.
- [14] Das, M. K., Haney, S. K., Richmond, J., Olmedo, A., Zhang, Q. J., & Ring, Z. (2012, June). SiC MOSFET reliability update. In *Materials Science Forum* (Vol. 717, pp. 1073-1076).
- [15] L. Yang, P. Agyakwa, and C. Johnson, "Physics-of-failure lifetime prediction models for wire bond interconnects in power electronic modules," 2013.
- [16] M. Ciappa, "Selected failure mechanisms of modern power modules," *Microelectronics reliability*, vol. 42, no. 4, pp. 653–667, 2002.
- [17] Ouaida, R., Calvez, C., Podlejski, A. S., & Brosselard, P. (2014, February). Evolution of Electrical Performance in New Generation of SiC MOSFET for High Temperature Applications. In *Integrated Power Systems (CIPS), 2014 8th International Conference on* (pp. 1-5). VDE.