



**HAL**  
open science

## Développement d'un module de puissance pour tester la fiabilité d'un convertisseur haute température

Laurent Dupont, Stéphane Lefebvre, Zoubir Khatir, Serge Bontemps, Régis Meuret

### ► To cite this version:

Laurent Dupont, Stéphane Lefebvre, Zoubir Khatir, Serge Bontemps, Régis Meuret. Développement d'un module de puissance pour tester la fiabilité d'un convertisseur haute température. SAAEI-EPF 2004 - Annual seminar on automatic control, industrial electronics and instrumentation, Electronique de puissance du futur, Sep 2004, Toulouse, France. pp.3-6. hal-01702105

**HAL Id: hal-01702105**

**<https://hal.science/hal-01702105>**

Submitted on 6 Feb 2018

**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.

## **DEVELOPPEMENT D'UN MODULE DE PUISSANCE POUR TESTER LA FIABILITE D'UN CONVERTISSEUR HAUTE TEMPERATURE**

*L. Dupont (1, 2), S. Lefebvre (1), Z. Khatir (2), S. Bontemps (3), R. Meuret (4)*

- (1) SATIE, ENS de Cachan, 61 Avenue du Président Wilson, F94235 Cachan cedex
- (2) INRETS-LTN, 2 av. du Général Malleret - Joinville, F94114 Arcueil
- (3) APT Europe, Chemin de Magret, F33700 Mérignac
- (4) HISPANO- SUIZA, Rond point René Ravaut - Réau, F77550 Moissy-Cramayel

### **RESUME**

Ce papier présente la réalisation d'un véhicule de test (module de puissance) développé pour étudier la faisabilité d'un convertisseur dédié à des températures de fonctionnement élevées pour des applications avioniques. Le module, réalisé par la société APT Europe, sera présenté en détail. Le choix des matériaux d'assemblage ainsi que celui des composants actifs sont présentés et discutés. En particulier, l'utilisation de diodes Schottky SiC et transistors CoolMOS est justifiée à travers les caractérisations électriques et leurs comportements jusqu'à des températures de 200°C.

### **1. INTRODUCTION**

Le développement d'une électronique de puissance dans le domaine avionique peut imposer des conditions d'utilisation extrêmement sévères pour les composants à semi-conducteur. Pour certaines applications notamment, le module de puissance peut être monté sur le réacteur, ce qui impose des contraintes thermiques très sévères. Ainsi, la température ambiante de fonctionnement peut atteindre 200 °C et conduit à une température de jonction supérieure à cette valeur.

Pour les composants semi-conducteurs, la limite extrême en température de fonctionnement peut être déterminée lorsque la concentration intrinsèque des porteurs ( $n_i$ ) est de l'ordre de grandeur de celle du dopage de la région de base assurant la tenue en tension. Pour une température donnée,  $n_i$  est fonction de l'énergie de gap du matériau semi-conducteur [5]. Ce point explique la raison pour laquelle les composants SiC sont mieux adaptés pour des applications à hautes températures que ceux en silicium. Les diodes SiC sont commercialisées par différents fabricants (Infineon, Cree). Le papier montrera l'aptitude de ces diodes Schottky à être utilisées à des températures de fonctionnement élevées. Si le potentiel des transistors JFET et MOSFET SiC a été démontré [1,2,3,4], ceux-ci ne sont pas encore couramment commercialisés. Des

transistors JFET et JFET cascades sont toutefois disponibles en 2004 sous forme d'échantillons qui devront être testés ultérieurement.

Lorsque la densité de porteurs intrinsèques approche le niveau de dopage du matériau utilisé, les paramètres électriques sont susceptibles de changer de façon considérable. Ainsi, la température maximale de jonction admissible dépend de la tension de claquage des composants. Ce point justifie la prédisposition des composants basse tension pour des applications hautes températures. Pour les composants silicium, la limite en température de fonctionnement est ainsi voisine de 150 °C pour des composants 1000 V et de 250 °C pour des composants spécifiés pour une tension de claquage inférieure à 100 V [5].

Les composants MOSFET à super jonction sont développés depuis quelques années [6, 7]. Ils présentent la particularité d'avoir un niveau de dopage de la région de base considérablement plus élevé que celui de tout autre transistor à jonction (MOSFET, IGBT...). Dans ces conditions, un fonctionnement à des températures maximales d'utilisation plus élevées semble être envisageable. Le papier discutera donc également de l'aptitude des transistors CoolMOS à être employés à des températures de fonctionnement élevées.

Enfin, un module intégré de puissance dédié à des applications à haute température a été développé par la société APT Europe et sera présenté dans cet article. Ce module servira de véhicule de test pour la caractérisation des puces dans un boîtier adapté et surtout pour éprouver la fiabilité de l'assemblage vis-à-vis de cyclages passifs en température. Cette étude se focalise sur le comportement du semi-conducteur, mais il est convenu de poursuivre l'étude sur le comportement de l'assemblage qui reste le point faible vis-à-vis de la tenue à des températures élevées ainsi que vis-à-vis du cyclage avec des variations de températures de grandes amplitudes.

## 2. CARACTERISATION DES COMPOSANTS

En général, la fonctionnalité à haute température d'un composant à semi-conducteur de puissance est limitée par l'augmentation du courant de fuite avec la température. Des caractérisations ont été préalablement effectuées sur des puces assemblées dans des boîtiers en résine époxy (type TO247 et TO220). Ces boîtiers ne sont pas adaptés à un fonctionnement à haute température, pour cette raison, la température est limitée à 200°C.

Cette phase de caractérisation est toutefois indispensable avant d'envisager la réalisation d'un véhicule de test devant être amené à fonctionner à haute température.

### 2.1 Les bancs de caractérisation

Les caractérisations électriques des composants en boîtier TO220 et TO247 ont été effectués pour des températures au niveau de la puce comprises entre 25 °C et 200 °C. La température de la puce est imposée par la mise en contact du boîtier avec deux plaques en cuivre maintenues à une même température de consigne à ±1,7% (voir Figure 1).

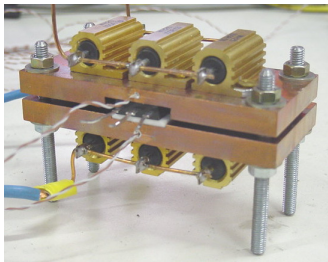


Figure 1 : Banc de contrainte thermique pour les composants en boîtier TO247 et TO220

Les courants de fuite sont mesurés avec un SMU (Keithley 6430) pour des températures comprises entre 25 °C et 200 °C et également sous différentes tensions de polarisation. Les mesure de courant de fuite Drain – Source des CoolMOS sont réalisées à  $V_{GS}$  nul.

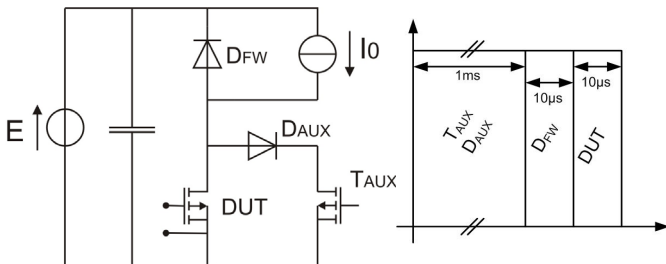


Figure 2 : Circuit des caractérisations électriques (commutation et chute de tension directe), et ordres de commande associés.

Afin de limiter l'auto échauffement lors des caractérisations statiques (mesure de  $V_{ON}$ ) et dynamiques (vitesse de commutation), ces caractérisations ont été effectuées en mono coup. Le schéma de principe est présenté Figure 2 pour les deux types de caractérisations précédemment décrites.

### 2.2 Les diodes Schottky SiC

Différentes diodes Schottky SiC ont été testées à l'état bloqué. Le courant de fuite est mesuré pour différentes tensions inverses et différentes températures de jonction comprises entre 25 °C et 200 °C. Les résultats ci-dessous montrent l'évolution de la densité surfacique de courant de fuite (en  $A/cm^2$ ) avec la température.

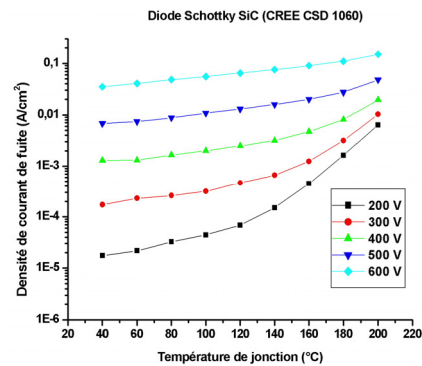


Figure 3 : Courant de fuite d'une diode Schottky SiC 600V.

La structure même des diodes Schottky (contact métal / SC) induit une forte dépendance du courant de fuite en fonction de la température. Mais, grâce au SiC, les courants de fuite restent extrêmement faibles à haute température même sous la tension de claquage ( $V_{BR}$ ). A titre indicatif, la Figure 4 compare le comportement d'une diode Schottky SiC avec une diode PIN Si spécifiée pour  $T_{Jmax} = 175$  °C et de même tension de claquage.

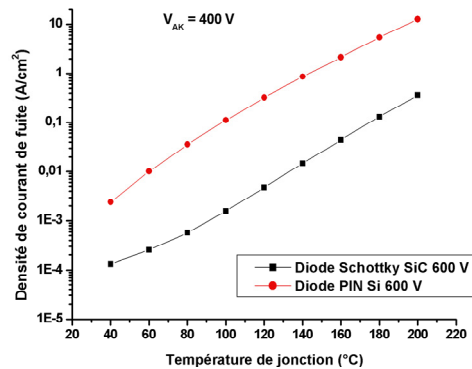


Figure 4 : Comparaison du courant de fuite d'une diode Schottky SiC avec une diode PIN Si.

La Figure 5 suivante présente les caractérisations en conduction de la diode Schottky SiC CREE pour des températures comprises entre 25 °C et 200°C.

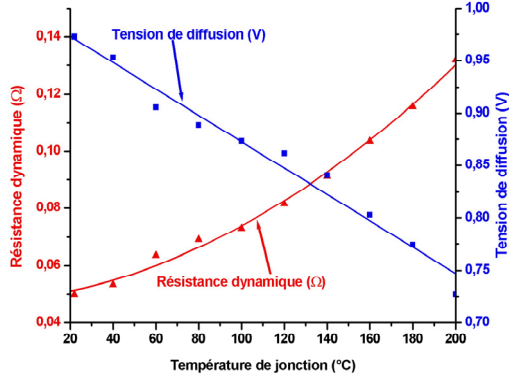


Figure 5 : Caractérisation en conduction diode SiC CREE CSD1060 (résistance dynamique et tension de diffusion)

### 2.3 Transistors CoolMOS

Des transistors CoolMOS 600V ont été caractérisés à l'état bloqué comme précédemment et les résultats comparés avec un IGBT NPT 600V. Les résultats (densité surfacique de courant de fuite en A/cm<sup>2</sup>) sont présentés Figure 6 pour une tension appliquée de 400V. Par un niveau de courant de fuite beaucoup plus faible, l'intérêt du transistor CoolMOS apparaît ainsi clairement.

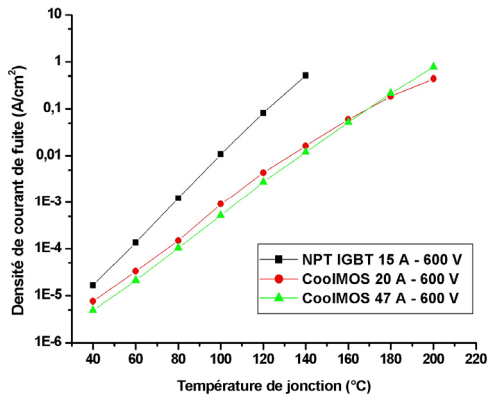


Figure 6 : Densité de courant de fuite pour un IGBT 600V NPT et des CoolMOS 600V (IGBT NPT Infineon SPW15N60, CoolMOS Infineon SPW20N60C2, CoolMOS APT 47 A APT47N60BC3).

Pour compléter cette étude, la Figure 7 compare un transistor CoolMOS ( $V_{BR} = 600 \text{ V}$ ) à un transistor MOS basse tension ( $V_{BR} = 200 \text{ V}$ ) spécifié pour des applications à 175°C. Les résultats sont présentés lorsque chacun des deux composants supporte sa tension de claquage, 200 V pour le transistor MOS et 600 V pour le CoolMOS.

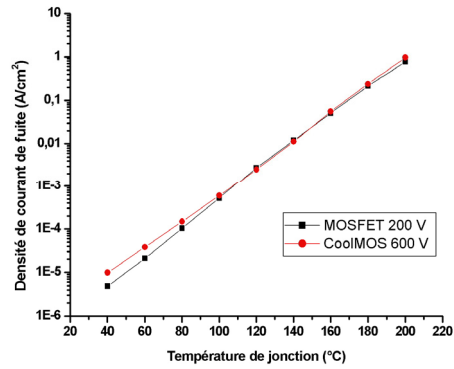


Figure 7 : Densité de courant de fuite pour un MOSFET 200V (IR IRFB23N20D) et un CoolMOS 600V (Infineon SPW20N60C2).

La Figure 8 suivante présente les caractérisations en conduction du transistor CoolMOS APT47N60BC3 pour des températures comprises entre 25 °C et 200°C.

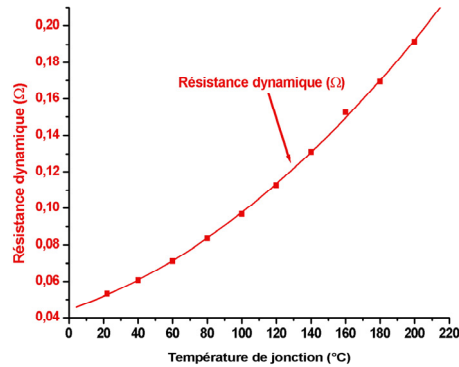


Figure 8 : Caractérisation en conduction CoolMOS APT47N60BC3

La Figure 9 présente l'influence de la température sur la commutation à la fermeture pour des températures de 25 °C (ligne en bleu) et à 200 °C (courbe en noir). Les résultats laissent paraître que la température de jonction n'influence pas les caractéristiques transitoires (les conclusions sont similaires lors des commutations à l'ouverture).

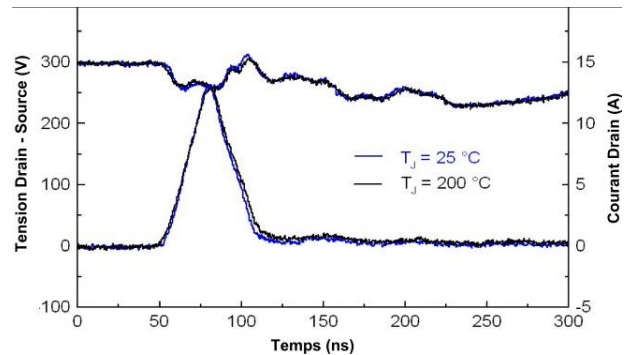


Figure 9 : Les courbes de commutation à la fermeture d'un CoolMOS (SPW20N60C2 Infineon) avec une Diode Schottky SiC (SDT12S60 Infineon) à 25 °C et 200 °C.

### 3. VEHICULE DE TEST DEDIE AUX APPLICATIONS HAUTE TEMPERATURE

Le véhicule de test décrit ci-dessus est employé comme véhicule de test. Il offre un boîtier adapté pour des caractérisations électriques à haute température (jusqu'à 220 °C), et doit permettre de tester la fiabilité de l'assemblage et des puces sur de longues durées de fonctionnement à haute température (Cf. Figure 10).



Figure 10: Module intégré de puissance prototypé pour des applications hautes températures (puce CoolMOS Si – 2 puces Diode Schottky SiC).

Le module réalisé intègre un hacheur et un bras onduleur. Les puces sélectionnées, à partir des caractérisations en température précédemment décrites, sont d'une part les CoolMOS APT Si 47 A / 600 V (APT47N60BC3) et les diodes Schottky CREE SiC 10 A / 600 V (CSD10060). Comme présenté dans la Figure 11, deux puces diodes Schottky SiC 10 A / 600 V sont connectées en parallèle pour réaliser la fonction diode.

D'autre part, la diode de structure du CoolMOS étant de très mauvaise qualité, elle doit être impérativement inhibée. Or, ajouter des diodes SiC en antiparallèle sur le transistor aurait été insuffisant (A température élevée, la chute de tension de la diode de structure du CoolMOS peut être considérablement plus faible que celle des diodes Schottky SiC). Pour ces raisons, il a fallu rajouter des diodes Schottky en série avec les transistors du bras onduleur.

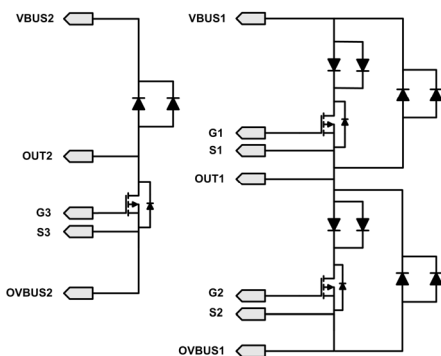


Figure 11 : Circuit électrique du module intégré de puissance développé par la société APT Europe

Les matériaux du module ont été choisis afin de satisfaire à la contrainte de fonctionnement à haute température. La sélection des matériaux ne s'est pas faite sur la seule optimisation de la résistance thermique entre la puce et la semelle, mais aussi sur l'homogénéisation des coefficients d'expansion thermique afin de minimiser les contraintes thermomécaniques, et ainsi optimiser la fiabilité de l'assemblage : Le substrat DCB en AlN, la semelle en AlSiC et des brasures, composées d'alliages, adaptées à la haute température.

Afin de qualifier l'état de l'assemblage du module avant le lancement d'essais de cyclages thermiques, des analyses non destructives furent entreprises. Elles s'appuient principalement sur des analyses acoustiques, réalisée à l'INRETS, qui rendent compte de l'état des brasures de l'assemblage (Voir Figure 12).

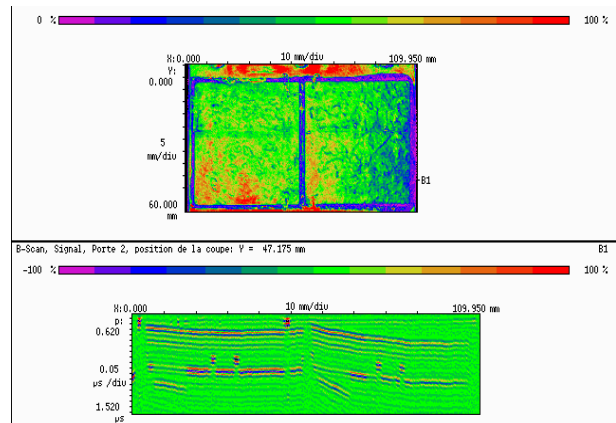


Figure 12 : Analyse acoustique d'un module APT avant cyclage.

Cette analyse devra être reconduite tout au long du test de vieillissement, lors de cycles thermiques de 90 mn entre -25°C et +200°C @ ± 10°C/mn, afin d'évaluer le taux de dégradation des brasures, indicateur de la dégradation de la résistance thermique de l'assemblage.

### 4. REFERENCES

- [1] A.K. Agarwal & al. "Large area 1.3 kV, 17 A Bipolar junction transistor in 4H-SiC, ISPSD'03
- [2] H.R. Chang & al. "Development and demonstration of silicon carbide inverter module in motor drive", ISPSD'03
- [3] C. Reberreh, H. Schierling, M. Braun, "First inverter using silicon carbide switches only", EPE'03
- [4] D. Peters, "State of the art and technological challenges of SiC power MOSFETs designed for high blocking voltages", EPE'03
- [5] W. Wondrak. "Physical limits and lifetime limitations of semiconductor devices at high temperatures", Microelectronics Reliability N° 39, 1999, pp 1113-1120
- [6] L. Lorenz, "CoolMOS – A new approach toward an idealized power switch", EPE'99, Lausanne
- [7] G. Deboy, D. Ahlers, E. Griehl, L. Lorenz, "CoolMOS C3 - a further step towards the ideal switch", PCIM'01