



HAL
open science

Traction électrique automobile : convertisseur BOOST à base de composants silicium IGBT et CoolMOSTM fonctionnant à 200°C

Raphaël Roder, Stephane Azzopardi, Olivier Briat, Francois Le Henaff, Jean-Michel Vinassa, Serge Bontemps

► To cite this version:

Raphaël Roder, Stephane Azzopardi, Olivier Briat, Francois Le Henaff, Jean-Michel Vinassa, et al.. Traction électrique automobile : convertisseur BOOST à base de composants silicium IGBT et CoolMOSTM fonctionnant à 200°C. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065380

HAL Id: hal-01065380

<https://hal.science/hal-01065380v1>

Submitted on 18 Sep 2014

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.

Traction électrique automobile : convertisseur BOOST à base de composants silicium IGBT et CoolMOS™ fonctionnant à 200°C

Raphaël RODER¹, Stéphane AZZOPARDI¹, Olivier BRIAT¹, François LE HENAFF¹,
Jean-Michel VINASSA¹, Serge BONTEMPS²

¹ Laboratoire IMS, Université de Bordeaux, 351 Cours de la Libération, 33405 Talence Cedex

² Microsemi, 26 Rue de Campilleau, 33520 Bruges

RESUME – Ce papier présente une étude de faisabilité concernant l'utilisation des composants à semi-conducteurs de puissance en silicium (Si-IGBT, Si-CoolMOS™) à une température de jonction élevée dans un convertisseur BOOST (200V → 450V) pour l'application de traction électrique automobile. Le frittage par pâte d'argent a été utilisé pour le processus de report des puces sur des substrats DBC afin de garantir la meilleure conduction thermique entre la puce et le substrat. Les caractéristiques électriques en régime statique (tests de claquage, courant de fuite, tension de seuil et chute de tension à l'état passant) et les caractéristiques dynamiques (temps de commutation à l'ouverture, temps de commutation à la fermeture et les pertes en commutation) de chaque module sont étudiées sur une large gamme de température (-50°C jusqu'à 200°C). Dans chaque cas, une comparaison est faite avec un composant SiC-MOSFET, pris comme composant de référence pour les hautes températures. Chaque composant est testé dans un convertisseur BOOST 200V-450V@200W pour évaluer le rendement du convertisseur pour une température de jonction de 200°C.

MOTS-CLES – Frittage de pâte d'argent, application haute température, Si-IGBT, Si-CoolMOS™, SiC-MOSFET, convertisseur BOOST, traction électrique automobile

1. Introduction

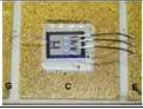

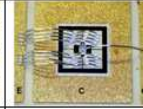
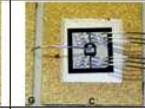
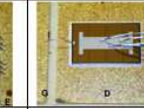
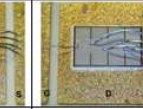
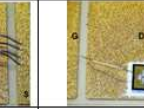
Plusieurs applications dans l'aéronautique, l'automobile et les transports ferroviaires poussent les composants à semi-conducteurs de puissance à être utilisés à haute température. Cependant, les Si-IGBT et Si-CoolMOS™ actuellement commercialisés ont une température de jonction spécifiée et estimée à 150°C et quelque fois à 175°C [1]. L'une des faiblesses des convertisseurs provient de la réduction du rendement avec l'augmentation de la température de jonction des composants à semi-conducteur de puissance qui peut conduire à leur destruction. La solution serait d'utiliser des composants grand-gap (SiC, GaN), qui autorisent un fonctionnement à une température de jonction plus élevée ; mais ces technologies en plein essor ont un coût relativement élevé. Une solution alternative serait de faire fonctionner des composants en silicium à une température de jonction voisine de 200°C [2-7] afin de conserver l'un des principaux intérêts du silicium en termes de coût. Dans tous les cas, il est nécessaire d'optimiser la mise en boîtier et donc le transfert de chaleur en utilisant des procédés de report optimum tel que le frittage par pâte d'argent [8-10].

Ce papier propose une étude non exhaustive, vis-à-vis de la température, de différents types d'interrupteurs contrôlés à base de semi-conducteurs de puissance en s'appuyant sur plusieurs caractérisations électriques. Chaque puce est reportée sur un substrat avec finition or en utilisant le procédé de frittage par pâte d'argent constituant ainsi un assemblage présentant une très faible résistance thermique. Les caractéristiques statiques représentées par les tests de claquage, de courant de fuite, de tension de seuil et de conduction, ainsi que les tests dynamiques mono-impulsion présentant le temps de commutation à l'ouverture, le temps de commutation à la fermeture et les pertes en commutation, sont étudiés en détail. Par la suite et pour éviter la destruction des composants testés, chaque composant est testé dans un convertisseur BOOST à échelle de puissance réduite (200V-450V@200W) dédié à la traction électrique automobile. La comparaison avec un SiC-MOSFET est faite pour pouvoir choisir le transistor silicium le plus approprié à ce type d'application et sous ces conditions.

2. Choix des composants

Le tableau 1 montre les puces semi-conductrices utilisées dans cette étude. Une sélection d'IGBT silicium utilisant la technologie *Trench Field Stop* (sauf pour l'IRGCC30 qui est un IGBT *planar Punch Through*) et de CoolMOS™ silicium haute tension permet de couvrir une large gamme de technologie. Une comparaison est aussi faite avec un composant grand gap (MOSFET SiC haute tension) utilisé comme composant de référence. Les interconnexions filaires des puces sont réalisées avec des fils aluminium de 125µm de diamètre.

Table 1 - Si-IGBT, Si-CoolMOS™ et SiC MOSFET utilisés dans cette étude

Type de puce	Si-IGBT				Si-CoolMOS		SiC MOSFET
Référence	IRGCC40	SIGC54T60R3	SIGC57T120R3	IGC50T120T6RL	IPC90R120C3	IPC60R045CP	CPMF1200S080B
Image de l'assemblage (avant dépôt gel)							
Tension nominale	600 V	600 V	1200 V	1200 V	900 V	600 V	1200 V
Chute de tension ou $R_{DS(ON)}$	2,7 V	1,85 V	2,1 V	2,1 V	0,096 Ω	0,046 Ω	0,08 Ω

3. Banc de test électrothermique

Un protocole de mesure électrique sous température contrôlée a été mis en place afin d'assurer une température de jonction du composant testé uniforme pour les tests statiques, dynamiques et pour le test utilisant le convertisseur BOOST. Une calibration initiale des paramètres thermosensibles de chaque composant [11-12] permet d'obtenir une valeur précise de la température de jonction. Plus de détails seront donnés dans la version finale du papier.

4. Caractéristiques statiques

Les caractéristiques ont été obtenues en utilisant le traceur de caractéristiques TEKTRONICS 371A et le conditionneur thermique TEMPTRONIC TP04310A. Seuls les tests sur le courant de fuite sont présentés ici, les autres tests seront présentés dans le papier final. Comme on peut le voir sur les figures 1a et 1b, pour les Si-IGBTs, nous pouvons observer que tous les transistors ont un fort courant de fuite pour une température de 200°C. Les tests ont dû être arrêtés à 175°C pour l'IGC50T120RL afin d'éviter sa destruction. Du côté des Si-CoolMOS™, incluant le SiC-MOSFET, les tests à 200°C ont pu tous être effectués. Il apparaît que le courant de fuite reste relativement bas (7mA comparé à 30mA pour le Si-IGBT) ; précisons que le courant de fuite du SiC-MOSFET est inférieur à 10µA à 200°C.

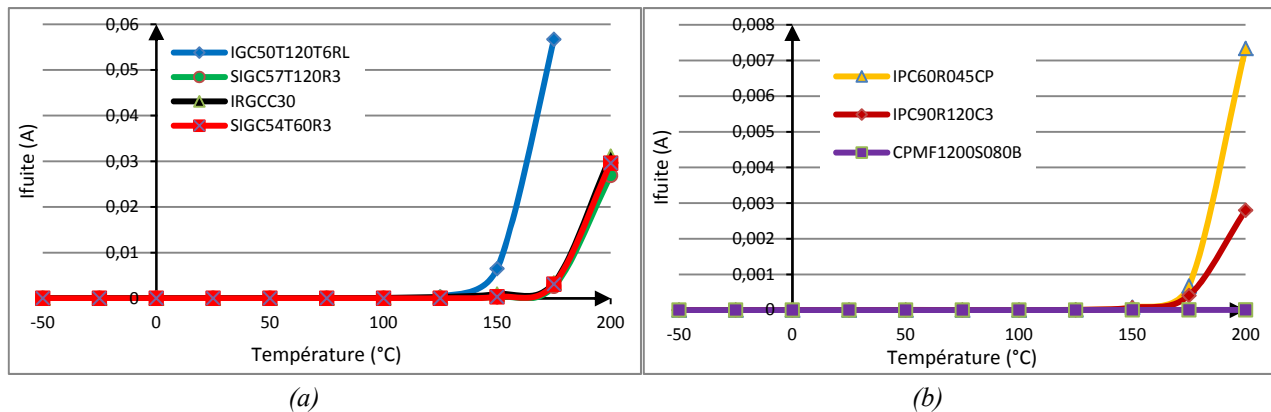


Figure 1 - Courant de fuite en fonction de la température (a) Si-IGBTs et (b) Si-CoolMOS™ + SiC MOSFET

5. Caractéristiques dynamiques

Un circuit mono-impulsion dédié est utilisé pour analyser la commutation propre des transistors sur charge inductive en relevant les pertes en commutation et les temps à l'ouverture et à la fermeture sans aucune influence de recouvrement inverse. Les conditions de test permettent de faire commuter les composants sous 220 V @ 2A pour une gamme de température de jonction fixée et imposée successivement à 25 °C, 100°C, 150°C, 175°C et 200°C. Un faible courant direct a été choisi afin d'assurer un fonctionnement non destructif du transistor à haute température. Pour le résumé et parmi tous les composants testés, seul un Si-IGBT et un Si-CoolMOS™ sont sélectionnés. Cette sélection est basée sur le courant de fuite qui doit être le plus faible possible et qui est comparé à celui du transistor SiC-MOSFET. Les figures 2a et 2b montrent les formes d'onde du courant et de la tension lors de l'ouverture du composant. Alors que le transistor Si-IGBT présente une trainée en courant importante à 25°C, typique de ce composant [13], et qui augmente considérablement à 200°C (figure 2a), le temps d'ouverture du composant IPC90R120C3 (CoolMOS™) est relativement faible comparé au SI-IGBT mais est plus grand que le composant SiC-MOSFET (figure 2b). Les oscillations observées sur les courbes du Si-CoolMOS™ et du SiC-MOSFET sont dues d'une part à la valeur élevée de leurs capacités inter-électrodes et d'autre part au fort dv/dt autorisé par ces composants comparés au Si-IGBT. Plus de détails sur le temps de commutation à la fermeture et à l'ouverture des composants seront donnés dans la version finale du papier.

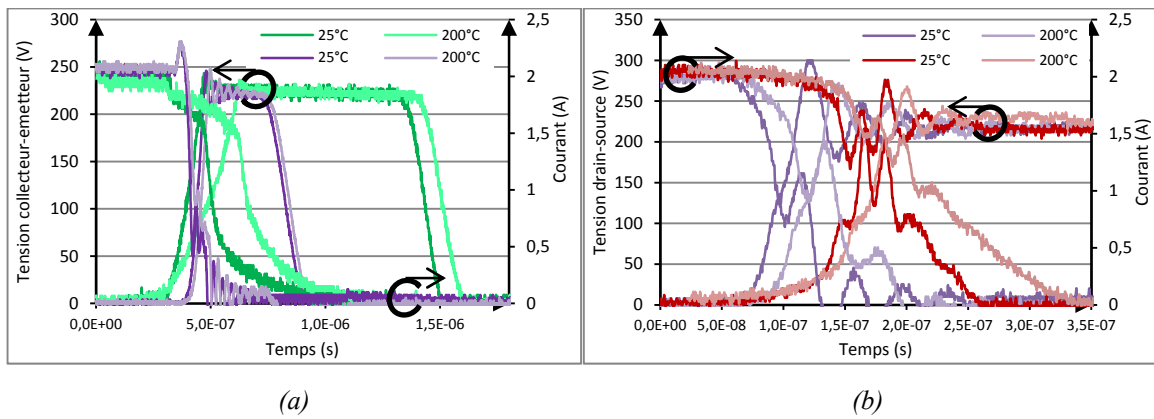


Figure 2 - Commutation à l'ouverture du (a) Si-IGBT SIGC57T120R3 (b) et Si-CoolMOSTM IPC90R120C3 à 25°C et 200°C comparé au SiC-MOSFET (courbe violette)

En considérant les pertes en commutation (figures 3a et 3b), il peut être noté que les pertes du Si-CoolMOSTM restent relativement faibles (dans le pire des cas, 7 fois supérieures au Si-IGBT à 200°C). Ceci nous permet de confirmer de nouveau le comportement acceptable du Si-CoolMOSTM à haute température qui se justifie par le fort niveau de dopage de la région de base du Si-CoolMOSTM qui autorise une température de fonctionnement plus élevée que celle des transistors silicium conventionnels avec la même tension de claquage.

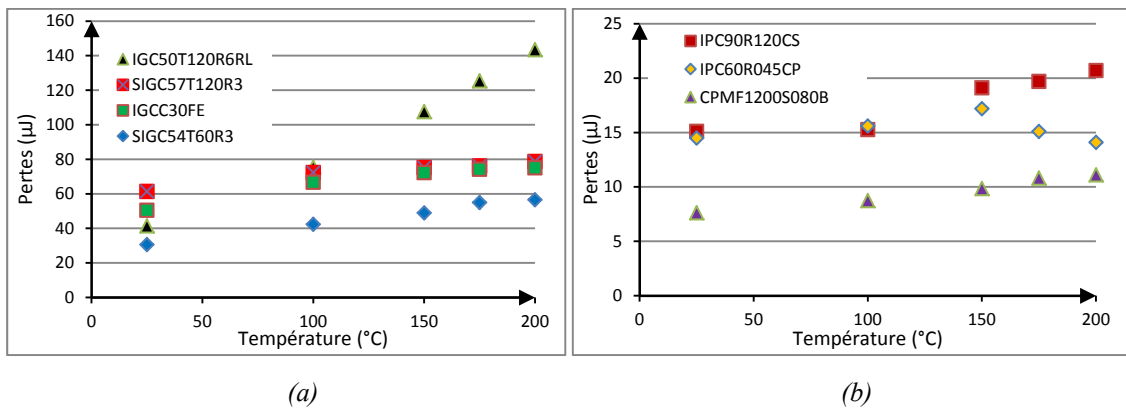


Figure 3- Pertes en commutation lors de l'ouverture des (a) Si-IGBT et des (b) Si-CoolMOSTM + SiC-MOSFET en fonction de la température

6. Comparaison entre les modules dans un convertisseur BOOST à 200°C

Le convertisseur BOOST (figure 4) produit une tension de sortie plus grande que la tension d'entrée. Durant la phase 1 (le signal MLI est à l'état haut de 0 à αT , avec $0 < \alpha < 1$, α : rapport cyclique), l'interrupteur de puissance T se ferme ce qui conduit à une augmentation linéaire du courant dans l'inductance L. Durant cette phase, l'énergie est stockée dans l'inductance et la tension aux bornes de cette dernière est égale à la tension d'entrée V_E . Durant la phase 2 (le signal MLI est à l'état bas de αT à T), l'interrupteur de puissance est ouvert et l'énergie stockée dans l'inductance est transférée à la charge R et au condensateur de sortie C_s par conduction spontanée de la diode D. En mode de conduction continue (le courant ne s'annulant jamais dans l'inductance), il peut être démontré que le rapport entre la tension de sortie et la tension ne dépend uniquement que du rapport cyclique : $V_S / V_E = 1 / (1 - \alpha)$.

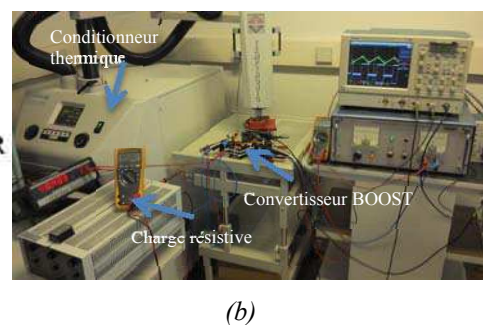
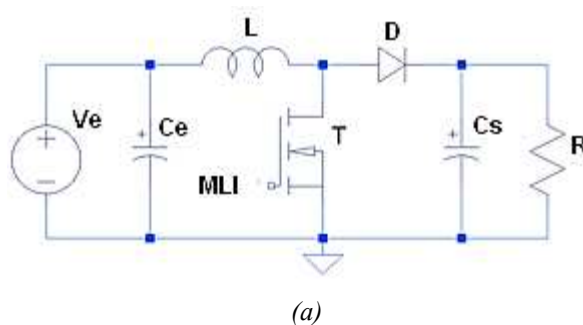


Figure 4 – (a) Schéma du convertisseur BOOST et (b) photographie du banc de test à haute température

La figure 5 montre les oscillogrammes du courant et de la tension du convertisseur BOOST avec une tension d'entrée de 200V et une tension de sortie de 450V. Le courant de sortie a été limité à 400mA. Précisons que les formes

d'onde du Si-IGBT n'ont pas pu être enregistrées à 200°C (destruction du composant et la température de jonction maximale retenue est $T_{Jmax} = 175^{\circ}C$). De plus, le Si-CoolMOSTM et le SiC-MOSFET montrent une similitude dans leurs formes d'onde, ce qui prouve une fois de plus l'excellent comportement du Si-CoolMOSTM vis-a-vis de la température comme cela est illustré au travers du calcul du rendement à 200°C. Plus de détails seront donnés dans la version finale du papier.

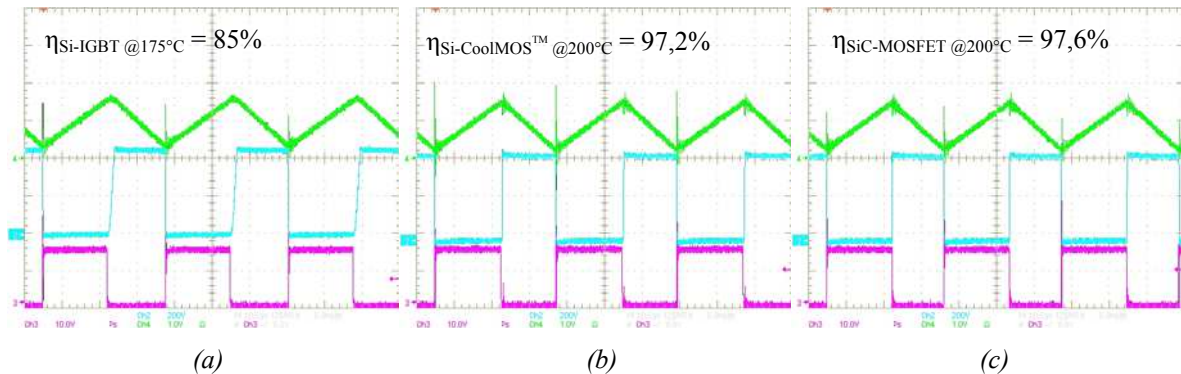


Figure 5 - Courant dans l'inductance (en vert), tension aux bornes du transistor (bleu), tension de grille (en violet) pour le (a) Si-IGBT @175°C, (b) Si-CoolMOSTM @200°C et (c) SiC-MOSFET @200°C ($f = 30kHz$)

7. Conclusion et Futurs travaux

Cette étude a prouvé la possibilité d'utiliser des puces en silicium, reportées par frittage de pâte d'argent sur un substrat céramique métallisé, fonctionnant à 200°C dans un convertisseur BOOST 200 – 450V dédié aux applications traction électrique automobile. Cependant, il a été montré que, dues aux fortes pertes en commutation et à l'augmentation du courant de fuite à 200°C, les IGBT 600V et 1200V ont des comportements fortement pénalisants dans de telles conditions alors que les Si-CoolMOSTM 600V et 900V s'illustrent et leurs comportements peuvent être comparés à celui du transistor SiC-MOSFET 1200V pris en référence. Le travail en cours consiste d'une part à caractériser ces transistors de puissance à haute température sous des conditions de commutation extrêmes et de définir leur aire de sécurité de fonctionnement et d'autre part de dimensionner un convertisseur BOOST fonctionnant à 200°C de plus forte puissance.

8. Référence

- [1] C. Corvasce et al., *New 1700V SPT+ IGBT and diode chip set with 175°C operating junction temperature*, 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 2011, pp.1-10
- [2] C. Buttay et al., *State of the Art of High Temperature Power Electronics*, International Conference MicroTherm - "Microtechnology and Thermal Problems in Electronics, 2009, pp. 1–10.
- [3] Z. Xu et al., *Si IGBT Phase-Leg Module Packaging and Cooling Design for Operation at 200°C in hybrid electrical Vehicle Applications*, 27th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2012, pp. 483-490.
- [4] R. Singh et al., *1200 V SiC Superjunction Transistors operating at 250°C with extremely low energy losses for power conversion applications*, 27th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2012, pp. 2516-2520.
- [5] B. Ray et al., *High Temperature Design and Testing of a DC-DC Power Converter with Si and SiC Devices*, in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2012, pp. 1261-1266.
- [6] Z. Xu et al., *Investigation of Si IGBT operation at 200 °C for traction application*, 2nd IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2011, pp.2397-2404
- [7] U. Schlapbach et al., *1200V IGBTs operating at 200°C? An investigation on the potentials and the design constraints*, 25th IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs.
- [8] G. Bai, *Low-temperature sintering of nano scale silver paste for semiconductor device interconnection*, PhD thesis, 2005, Virginia Polytechnic Institute (USA).
- [9] U. Scheuermann, *The road to the next generation power module: a 100% solder free design*, Conference on Integrated Power System (CIPS), 2008, Nuremberg (Germany).
- [10] F. Le Henaff et al., *A preliminary study on the thermal and mechanical performances of sintered nano-scale silver die-attach technology depending on the substrate metallization*, Microelectronics Reliability, vol. 52, pp. 2321-2325, 2012.
- [11] J. W. Sofia, *Electrical Temperature Measurement Using Semiconductors*, *Electronics Cooling*, vol. 3, no. 1, pp. 22-25, Jan. 1997
- [12] D. Blackburn, *Temperature measurements of semiconductor devices - a review*, IEEE 20th Annual Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2004, pp.70-80
- [13] B.J. Baliga, *Power Semiconductor Devices*, PWS Publishing Company, 1996.