

Etude et caractérisation d'une fonction hacheur intégrée par thermographie infrarouge

Marion HAUSSENER¹, Noëlle VIVIÈS¹,
Baptiste TRAJIN², Paul-Etienne VIDAL², Hélène WELEMANE²

¹Université de Toulouse; INP; ENI de Tarbes, 47 avenue d'Azereix, BP1629, 65019 Tarbes Cedex

²Université de Toulouse; INP; ENI de Tarbes, LGP, 47 avenue d'Azereix, BP1629, 65019 Tarbes Cedex

RESUME – Cet article présente une méthode d'étude et de caractérisation des fonctions d'électronique de puissance basée sur la thermographie infrarouge. Cette dernière permet d'accéder à l'évolution temporelle du champ surfacique de température de la structure fonctionnelle, basée sur un IGBT Silicium et une diode SiC. Cette étude apparaît comme essentielle dans le cadre de l'intégration de puissance, pour la réduction de volume des fonctions d'électronique de puissance et des systèmes de refroidissement. L'étude de la fonction hacheur est menée pour différents points de fonctionnement afin de valider l'approche proposée. Par la suite, les sollicitations thermiques auxquelles sont soumis les éléments de la fonction sont comparées et discutées.

MOTS-CLES – Thermographie infrarouge, Hacheur, IGBT Silicium, Diode SiC, Dissipation thermique.

1 Introduction

L'arrivée sur le marché de composants grand-gap permet d'envisager la fabrication de modules d'électroniques de puissance à haute compacité ou à forte densité de puissance. Effectivement, le niveau de maturité de composants tels que ceux réalisés en carbure de Silicium (SiC) ou nitrure de Gallium (GaN) a considérablement augmenté, rendant possible une production industrielle. Afin de maximiser cette intégration, il est parfois envisagé un fonctionnement à des températures beaucoup plus élevées que dans le cas des composants conventionnels en Silicium (Si) [1]. Ainsi, les nouvelles solutions technologiques, retenues pour permettre le fonctionnement sous environnement contraint, deviennent les facteurs critiques de tels assemblages. Un certain nombre d'études visent à identifier les modes de défaillance ou les interfaces critiques [2] [3]. Dans ce domaine, les caractérisations expérimentales non destructives présentent un avantage majeur avec la possibilité d'étudier les mécanismes de dégradation sans perturbation liée à la mesure en elle-même (par exemple microscopie optique, microscopie acoustique, microscopie à rayon-X, thermographie infrarouge). Parmi ces techniques la thermographie infrarouge constitue un moyen pratique et efficace pour l'investigation des systèmes, y compris lorsque l'équipement est en fonctionnement. Cette technique d'analyse a fait ces preuves dans le cas de détection de défauts de fabrication et de suivi d'endommagement au sein de matériaux composites [4], et nous semble être une technique à explorer dans le cas des assemblages d'électronique de puissance.

Compte tenu des difficultés liées à l'obtention de composant commandable à l'amorçage et au blocage en SiC à des prix concurrentiels, cette technologie semble promise à la très haute tension. Il est intéressant de constater qu'au contraire, les composants spontanés sont facilement accessibles et permettent d'ores et déjà de créer des fonctions de conversion aux performances optimisées [5]. Dans le cas de l'utilisation conjointe d'un interrupteur commandable en technologie Si et d'un interrupteur spontané en technologie SiC, nous pouvons nous interroger sur les disparités, notamment thermiques, qui seraient induites au sein de ces assemblages hybrides.

Cet article propose d'étudier une fonction hacheur intégrée basée sur un IGBT Silicium et une diode SiC au moyen de la thermographie infrarouge. Le système d'étude et les outils de thermographie infrarouge sont

présentés dans le paragraphe 2. Le paragraphe 3 présente une analyse thermique théorique de l'ensemble fonctionnel avec une évaluation des pertes par effet Joule dans les différents éléments constitutifs de l'assemblage. Enfin, à travers des résultats expérimentaux, l'analyse thermique proposée est validée dans le paragraphe 4.

2 Présentation du système et du dispositif expérimental

2.1 Système d'étude électrique

La fonction hacheur buck considérée possède un interrupteur commandé IGBT Silicium complété par une diode SiC. La fonction intégrée ne tient pas compte de la commande rapprochée de l'IGBT qui est réalisée par un circuit de micro-électronique annexe. Le hacheur débite sur une charge R-L qui sera considérée comme une source de courant parfaite. La figure 1(a) présente le schéma théorique du hacheur buck et la figure 1(b) présente la réalisation fonctionnelle associée.

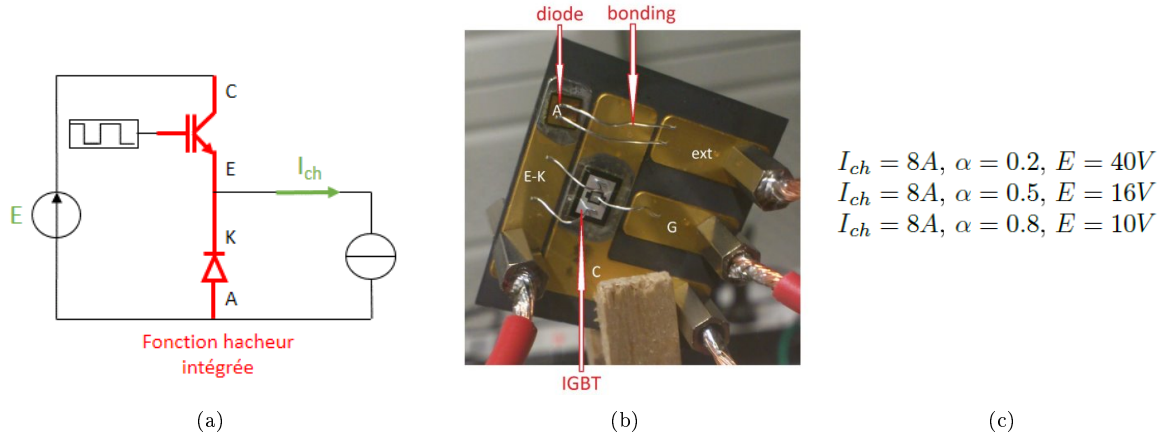


FIGURE 1 – Fonction hacheur intégrée et points de fonctionnement considérés

Le point de fonctionnement de la charge est défini par le courant de charge qui vaut 8A. La résistance de charge est fixée à 1Ω et l'inductance à 30mH. La plage de variation du rapport cyclique est choisie de manière à fonctionner en conduction continue. La tension de la source de puissance est adaptée au rapport cyclique de manière à respecter le point de fonctionnement choisi pour la charge. Le tableau en figure 1(c) donne les points de fonctionnement choisis pour le système, avec α le rapport cyclique de la commande de l'IGBT et E la tension de la source d'entrée.

2.2 Thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est une technique de mesure optique du champ thermique surfacique d'une structure [6]. Le dispositif employé est ici une caméra FLIR SC 7000 rétrofitée Titanium à capteurs InSb, plan focal de 320*256 pixels et résolution thermique de 20 mK à 30 °C. Le contrôle de la caméra et l'enregistrement sont gérés par le logiciel Altair, l'opération de calibration étant automatique. Les tests ont été réalisés dans un laboratoire à température ambiante; en première approche, une émissivité homogène s'approchant au mieux de celle de l'or dont sont recouvertes les pistes de puissance ($\epsilon = 0.1$) a été considérée pour le système. De façon à éliminer au maximum les effets perturbants de l'environnement et mettre en évidence les modifications thermiques, nous avons opté pour une analyse en relatif des données en soustrayant à chaque instant l'image thermique du début de l'essai.

3 Analyse thermique d'une fonction hacheur intégrée

3.1 Evaluation des pertes thermiques dans les composants de puissance

En première approximation, les pertes par commutation dans les semi-conducteurs de puissance seront négligées. De plus, si on considère, le courant dans la charge électrique comme constant $\forall t, i(t) = I_{ch}$, les pertes Joule par conduction dans les semi-conducteurs sont obtenues à partir des courants efficaces et de leurs résistances à l'état passant R_{on} (1). Il apparaît clairement que les pertes Joule dans les composants de puissance sont proportionnelles au rapport cyclique et donc au point de fonctionnement de la fonction hacheur.

$$\begin{aligned}
P_{J,IGBT} &= R_{on,IGBT}\alpha I_{ch}^2 \\
P_{J,diode} &= R_{on,diode}(1 - \alpha)I_{ch}^2
\end{aligned}
\tag{1}$$

3.2 Evaluation des pertes thermiques dans les fils de bonding

Dans les études portant sur la robustesse des assemblages de puissance lors de cycles de sollicitations, les conclusions pointent souvent la connectique et plus particulièrement les fils de bonding comme le maillon critique de la chaîne de conversion [3]. Pour ces éléments de connexion, l'optimisation de leur placement [7], les matériaux ou les techniques de soudure [8], sont des facteurs clés lorsque l'amélioration de la performance d'un assemblage est visée.

Les connexions de puissances au sein de la fonction hacheur sont réalisés au moyen de fils de bonding en Aluminium de $300\mu m$ de diamètre. Pour les connexions entre l'émetteur de l'IGBT et la cathode de la diode et entre l'anode de la diode et la connectique externe, les fils de bonding sont doublés. A partir des données géométriques des fils de bonding et des propriétés de l'Aluminium, leur résistance est évaluée à $R_{bond} = 5m\Omega$. Les pertes Joule dans les fils de bonding s'expriment alors selon (2) avec $P_{J,A-ext}$ les pertes dans un fil de bonding entre l'anode de la diode et la connectique externe et $P_{J,E-K}$ les pertes Joule dans un fil de bonding entre l'émetteur de l'IGBT et la Cathode de la diode. Là encore, il apparaît que les pertes par effet Joule dans les fils de bonding sont proportionnelles au rapport cyclique de la commande de l'IGBT.

$$\begin{aligned}
P_{J,A-ext} &= R_{bond} \frac{(1 - \alpha)I_{ch}^2}{2} \\
P_{J,E-K} &= R_{bond} \frac{\alpha I_{ch}^2}{2}
\end{aligned}
\tag{2}$$

4 Résultats expérimentaux

4.1 Température de fonctionnement des semi-conducteurs de puissance

La figure 2(a) résume les élévations de températures mesurées en surface de la diode et de l'IGBT pour différents rapports cycliques. On constate clairement que les modifications thermiques mesurées dans l'IGBT et dans la diode corroborent l'analyse effectuée dans le paragraphe 3. La variation de température de surface de l'IGBT augmente linéairement avec le rapport cyclique alors que celle de la diode décroît. Il est donc possible, par cette méthode de caractériser l'échauffement des composants pris isolément afin de dimensionner au mieux le système de refroidissement associé.

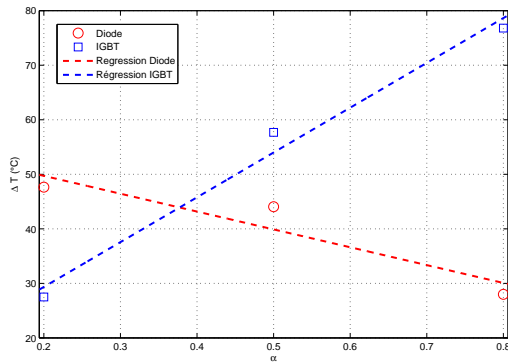
Par ailleurs, on constate que l'accroissement de température de la diode est inférieur à celui de l'IGBT, ce qui est cohérent avec leur différence de technologie. En effet, les composants SiC ont une résistance à l'état passant inférieure à celle des composants Si [9], réduisant alors les pertes par conduction. Ainsi, dans le cadre de modules de puissance fortement intégrés, il est préférable de choisir des composants grand-gap de type SiC pour réduire le volume des systèmes de refroidissement.

4.2 Température dans les fils de bonding

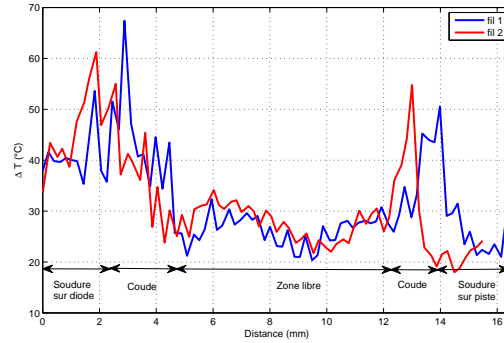
Dans la configuration retenue pour cette analyse, l'accroissement de température au niveau de la diode est de $7.5^\circ C$ alors que celui des fils est supérieur (voir figure 2(b)). La diode ne peut pas être considérée comme une source chaude pour les fils de bonding. L'échauffement des fils est donc dû majoritairement au passage du courant électrique. Par ailleurs, la distribution spatiale du champ thermique montre clairement une hétérogénéité le long des fils. Or, l'augmentation de la température du fil est nettement plus élevée au niveau de la soudure avec la diode et au niveau des courbures importantes des fils. A l'inverse, lorsque les fils sont éloignés du substrat, avec une courbure faible, la dissipation par convection est maximale et l'impact thermique plus faible. La thermographie permet donc de montrer que le seul dimensionnement des fils de bonding par perte Joule (2) n'est pas suffisant car des phénomènes non linéaires et localisés apparaissent aux interfaces, pouvant conduire à une détérioration des fils et des chemins de conduction en cas de mauvais refroidissement.

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons montré, au moyen de l'analyse par thermographie infrarouge, l'intérêt d'un assemblage hybride entre un composant commandable Si et un composant spontané SiC au sein d'une fonction hacheur. En effet, l'analyse par thermographie a permis de caractériser la répartition thermique surfacique de l'assemblage. L'utilisation d'une diode SiC conduit à une diminution des pertes Joule dans l'assemblage,



(a) Elévation thermique des semi-conducteurs



(b) Elévation thermique le long des fils de bonding A-ext

FIGURE 2 – Elévations thermiques mesurées sur le système expérimental

induisant un gain au niveau du dimensionnement des éléments de dissipation thermique.

De plus, dans le cadre des fils de bonding, la méthode proposée montre clairement des points chauds aux limites qui doivent être pris en compte lors du dimensionnement des fils et des systèmes de refroidissement.

6 Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Philippe LASSERRE, responsable des opérations de la plateforme PRIMES de Tarbes [10] qui a permis la réalisation pratique de la fonction hacheur intégrée.

Références

- [1] T. Funaki, J-C. Balda, J. Junghans, A-S. Kashyap, H-A. Mantooth, F. Barlow, T. Kimoto, and T. Hikihara, *Power Conversion With SiC Devices at Extremely High Ambient Temperatures*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, n. 4, pp. 1321-1329, July 2007.
- [2] H. Ye, M. Lin, C. Basaran, *Failure modes and FEM analysis of power electronic packaging*, Finite Elements in Analysis and Design, n. 38, pp. 601-612, 2002.
- [3] V. Smet, F. Forest, J-J. Huselstein, F. Richardeau, Z. Khatir, S. Lefebvre, and M. Berkani, *Ageing and Failure Modes of IGBT Modules in High-Temperature Power Cycling*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, n. 10, pp. 4931-4941, Oct. 2011.
- [4] C. Goidescu, H. Weleman, C. Garnier, M. Fazzini, R. Brault, E. Péronnet, S. Mistou, *Damage investigation in CFRP composites using full-field measurement techniques : combination of digital image stereo-correlation, infrared thermography and X-ray tomography*, Composites Part B : Engineering, vol. 48, pp. 95-105, 2013.
- [5] D. Ouwerkerk, T. Han, and J. Preston, *Efficiency Improvement Using a Hybrid Power Module in 6.6 kW Non-Isolated On-Vehicle Charger*, 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Oct. 9-12, 2012, Seoul, Korea
- [6] X. P. V. Maldague, *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*, Wiley-Interscience, 2001.
- [7] M. Ishiko, M. Usui, T. Ohuchi, M. Shirai, *Design concept for wire-bonding reliability improvement by optimizing position in power devices*, Microelectronics Journal, vol. 37, pp. 262-268, 2006.
- [8] A. Hamidi, N. Beck, K. Thomas, and E. Herr, *Reliability and lifetime evaluation of different wire bonding technologies for high power IGBT modules*, Microelectronics Reliability, vol. 39, pp. 1153-1158, 1999.
- [9] D. Risaletto, *Caractérisation électrique en commutation de diodes haute tension en carbure de silicium*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, Mai 2007.
- [10] <http://www.primes-innovation.com>