

Réalisation d'une puce instrumentée adaptée à la mesure de température dans les modules de puissance

Ibrahima KA^{1,2}, Yvan AVENAS¹, Laurent DUPONT², Mickael PETIT²

¹ Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, France
CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

² SATIE (UMR 8029), IFSTTAR, CNRS, ENS Cachan, CNAM, Université Cergy-Pontoise, F-78000 Versailles, France

1. CONTEXTE DES TRAVAUX

La durée de vie des modules de puissance est fortement liée à leur usage et à leur environnement thermique à travers notamment l'amplitude des fluctuations de leur température. D'après une étude menée en 2008 [1], les composants à semi-conducteurs de puissance sont parmi les éléments les plus fragiles dans les convertisseurs (30% des pannes des convertisseurs seraient liées à ces composants). Cette étude montre également que la température serait la première cause de défaillance de ces derniers. Dans ce contexte, le suivi de la température permet de quantifier les performances thermiques et électriques, d'évaluer le niveau d'endommagement et, pourrait permettre à terme de définir une approche prédictive de la durée de vie des systèmes d'électronique de puissance. Plusieurs techniques d'acquisition sont mises en œuvre dans le but d'effectuer la mesure de la température au sein des convertisseurs.

Aujourd'hui, des modules de puissance instrumentés sont proposés par les industriels pour une estimation de la température des puces par intégration de capteurs sur le substrat, au plus proche des composants. L'utilisation de modèles thermiques permet ainsi d'évaluer la température des parties actives des puces pendant le fonctionnement des modules. Mais, la complexité de la modélisation thermique réside notamment dans l'évaluation précise des puissances dissipées dans les composants, la prise en compte des couplages physiques et l'effet de la dégradation progressive des performances thermiques et électriques des modules et du système de refroidissement associé [2]. Par conséquent, l'estimation de la température des parties actives à partir d'un modèle ne reflète pas toujours l'état réel du système d'autant plus que celui-ci est dégradé [3].

L'intégration de capteurs dans la structure de la partie semi-conductrice des modules est aussi proposée afin de mesurer la température des parties actives [4]. La mise en œuvre de cette solution engendre un surcoût et accroît la complexité de mise en œuvre des modules de puissance. Par ailleurs, le capteur intégré effectue une mesure locale de la température alors que la répartition globale au sein de la puce est fortement non uniforme [5]. A l'opposé, les paramètres électriques thermosensibles (PETS) permettent d'obtenir une valeur « moyenne » ou « globale » de la température des puces, ce qui rend leur utilisation attractive. Il faut noter aussi que la mesure de la température grâce aux PETS se fait sans modifier la structure des modules, contrairement à d'autres méthodes plus intrusives comme la mesure par caméra infrarouge.

Dans la littérature scientifique, les paramètres électriques thermosensibles sont généralement classifiés, suivant les approches méthodologiques utilisées pour la mesure, selon qu'elle est adaptée aux conditions de fonctionnement des convertisseurs (mesure on-line) ou bien, qu'elle nécessite de se placer en dehors de ces conditions (mesure off-line) [6][7].

Ainsi, la dépendance entre les paramètres électriques thermo-

sensibles et la température des parties actives des composants à semi-conducteurs de puissance est largement étudiée. Néanmoins, comme démontré dans [8], les résultats obtenus avec le PETS issu des caractéristiques statiques I(V) peuvent être erronés lorsque les conditions de calibration du PETS sont différentes des conditions réelles d'utilisation des convertisseurs. En outre, le vieillissement des modules de puissance peut avoir un impact sur la réponse des PETS [9]. Il est ainsi important d'évaluer dans un premier temps la représentativité et la robustesse des PETS dans les conditions de fonctionnement réelles des convertisseurs et pour différents niveaux d'endommagement.

2. MÉTHODOLOGIE

Diverses solutions sont aujourd'hui mises en œuvre pour la mesure indirecte de la température des modules de puissance. L'approche que nous proposons est originale dans la mesure où elle associe la mesure indirecte par des paramètres électriques thermosensibles avec celle effectuée par un capteur de température résistif intégré sur la métallisation supérieure d'une puce de puissance. L'objectif principal est d'évaluer la pertinence des mesures de température des parties actives réalisées avec les paramètres électriques thermosensibles par comparaison avec les données de mesure du capteur de température intégré.

Ainsi, la méthode mise en œuvre repose sur l'intégration d'un capteur « RTD » (Resistance Temperature Detector) sur la métallisation supérieure (anode) d'une diode de puissance (ABB fast recovery diode 5SLX 12M1711 1700V/200A, 13.56mmx13.56mm de 385 μ m d'épaisseur). La figure 1 montre la topologie de la couche de métal sur l'anode de la diode de puissance. La puce instrumentée est réalisée en salle blanche et le capteur de température en forme de serpentín est constitué d'une couche d'aluminium de 500nm d'épaisseur. Le choix de l'aluminium est notamment motivé par la linéarité de la variation de sa résistance en fonction de la température, le faible coût et la stabilité chimique. De plus, le TCR (Temperature Coefficient of Resistance) de l'aluminium (0.43%/°C) est suffisamment élevé pour permettre une mesure relativement précise de température sur la plage 20 – 200°C. Dans la configuration présentée sur la figure 1, où le serpentín couvre la majorité de la surface active, la température évaluée par le capteur est proche de la valeur moyenne de la température en surface de la diode de puissance.

Les différentes étapes d'intégration du capteur sont illustrées sur la figure 2. L'isolation du capteur par rapport à l'anode de la diode est assurée par une couche d'oxyde de 2 μ m, déposée par PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition). Une étape de lithographie avec de la résine négative (AZ2070) permet ensuite de reporter le motif du capteur, de faire un dépôt de métal (500nm Al) et un Lift-off (fig. 2b). La couche de métal ainsi déposée permet d'obtenir une résistance d'une valeur théorique de l'ordre de 425 Ω à 30 °C.

Une seconde couche de S_iO_2 de $2\mu m$ est déposée sur la couche de métal et une gravure RIE (Reactive Ion Etching) est réalisée afin d'atteindre la métallisation supérieure de la diode de puissance ainsi que les plots de contact du capteur (fig. 2d). Le dépôt d'une seconde couche de métal est enfin effectué afin d'optimiser le contact avec la surface des bondings et de minimiser la modification de la distribution du courant de puissance de la diode (fig. 2e).

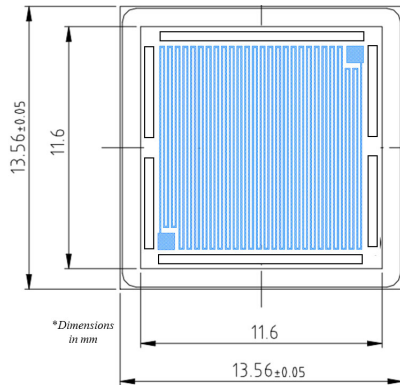


Fig. 1. Topologie du capteur intégré sur l'anode de la diode

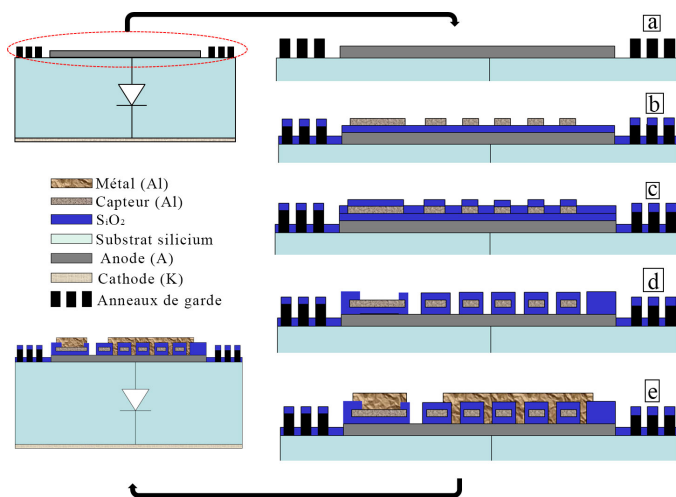


Fig. 2. Étapes de réalisation du capteur reporté sur l'anode de la diode

3. VALIDATION DE LA PUCE INSTRUMENTÉE

Dans un premier temps, une mesure sous pointes est réalisée pour déterminer la réponse en température du capteur par la méthode « Kelvin » (Figure 3). Un courant de mesure de $10mA$ est injecté dans le serpentin et l'évolution de la résistance en fonction de la température est déduite des variations de tension aux bornes du capteur. Cette campagne de calibration permet de valider le procédé technologique de réalisation de la puce instrumentée et de définir les paramètres associés pour son utilisation dans des conditions de fonctionnement. La figure 4 montre l'évolution de la résistance du capteur en fonction de la température ($R_{30^{\circ}C} = 417\Omega$ avec un TCR de $0.4\%/^{\circ}C$).

La puce instrumentée sera ensuite intégrée dans une cellule de commutation sur un substrat isolé pour valider son bon fonctionnement en dissipation statique et en présence de commutations. L'article final expliquera en détails les choix technologiques, les étapes de réalisation et présentera les résultats de validation de la puce instrumentée confrontés avec ceux obtenus avec un paramètre électrique thermosensible classique (tension directe sous

faible courant) et une mesure par caméra infrarouge. Les perspectives d'utilisation et d'évolution de la puce instrumentée seront aussi discutées.

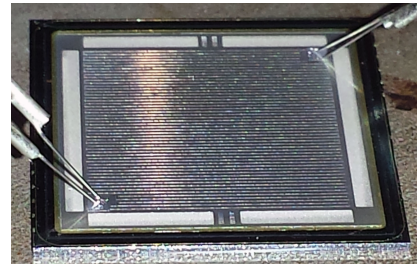


Fig. 3. Calibration sous pointes du capteur

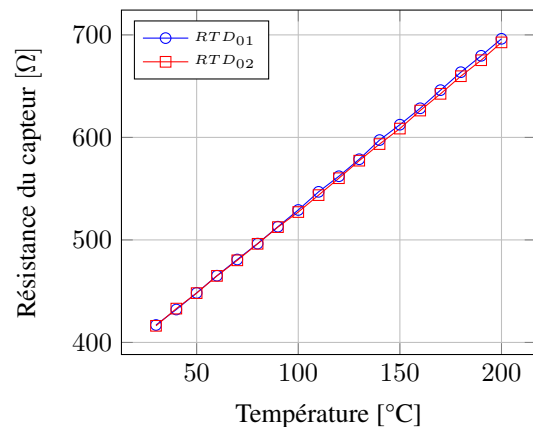


Fig. 4. Courbes de calibration de deux capteurs (RTD_{01} - RTD_{02})

4. RÉFÉRENCES

- [1] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, S. Member, D. Xiang, L. Ran, S. Member, P. Tavner, and S. Member, "An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters", IEEE Transactions on industry applications, vol. 47, no. 3, pp. 1441–1451, 2011.
- [2] T. Bruckner and S. Bernet, "Estimation and measurement of junction temperatures in a three-level voltage source converter", IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 1, pp. 3-12, Jan. 2007.
- [3] D.C. Katsis, J.D. Van Wyk, "Void-induced thermal impedance in power semiconductor modules : some transient temperature effects", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.39, no.5, pp. 1239- 1246, Sept/Oct 2003.
- [4] E-R. Motto, J-F. Donlon, "IGBT module with user accessible on-chip current and temperature sensors", 2012 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 1-6.
- [5] R. Schmidt, U. Scheuermann, "Using the chip as a temperature sensor - The influence of steep lateral temperature gradients on the $V_{ce}(T)$ -measurement", 13th Europ. Conf. on Power Electronics and App., 2009.
- [6] D.L. Blackburn, "A review of thermal characterization of power transistors," in Proc. 4th Annu. IEEE Semicond. Therm. Temp. Meas. Symp., San Diego, CA, Feb. 10–12, 1988, pp. 1–7.
- [7] N. Baker ; M. Liserre ; L. Dupont ; Y. Avenas, "Improved Reliability of Power Modules : A Review of Online Junction Temperature Measurement Methods," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol.8, no.3, pp.17,27, Sept. 2014.
- [8] X. Perpiñà, J.F. Serviere, J. Saiz, D. Barlini, M. Mermet-Guyennet, J. Millán, "Temperature measurement on series resistance and devices in power packs based on on-state voltage drop monitoring at high current", Microelectron. Reliabil., vol 46, pp. 1834-1839, 2006.
- [9] L. Dupont ; Y. Avenas, "Preliminary Evaluation of Thermo-Sensitive Electrical Parameters Based on the Forward Voltage for Online Chip Temperature Measurements of IGBT Devices," in Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.51, no.6, pp.4688-4698, Nov.-Dec. 2015.