HAL
open science

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

Ibrahima Ka, Yvan Avenas, Laurent Dupont, Mickael Petit

To cite this version:

Ibrahima Ka, Yvan Avenas, Laurent Dupont, Mickael Petit. Développement d'une puce instrumentée adaptée à la mesure de température dans les modules de puissance. 2ème Symposium de Génie Electrique (SGE 2016), Jun 2016, Grenoble, France. hal-01466194v2

HAL Id: hal-01466194

https://hal.science/hal-01466194v2

Submitted on 13 Feb 2017

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.

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

Ibrahima KA[1, 2], Yvan AVENAS[1], Laurent DUPONT[2], Mickael PETIT[3]

[1] Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, France
CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, France
[2] SATIE, IFSTTAR, 25 allée des Marronniers, F-78000 Versailles, France.
[3] SATIE, ENS Cachan - CNAM - Université de Cergy Pontoise - CNRS UMR 8029, F-94230 Cachan, France.

RESUME – La mesure de la température des composants semi-conducteurs de puissance est primordiale, notamment pour l'évaluation des performances et dans la perspective de proposer le suivi de l'état de santé des modules à composants semi-conducteur de puissance. Aujourd'hui, les paramètres électriques thermosensibles (PETS) sont largement utilisés pour estimer une température représentative de celle de ces composants, souvent dans des conditions de fonctionnement différentes de l'environnement réel de ces derniers (mesures off-line). Il existe néanmoins plusieurs PETS dédiés à la mesure de température dans des conditions de fonctionnement réel des composants (mesures on-line). La principale difficulté réside cependant dans l'évaluation de la précision des mesures obtenues avec ces PETS. Cet article présente un moyen permettant d'estimer la température grâce à une puce instrumentée adaptée à une utilisation dans les modules de puissance. L'objectif est de fournir un outil robuste et fiable pour la mesure de la température dans les modules de puissance sous les contraintes fonctionnelles. Les résultats préliminaires présentés dans cet article portent sur les procédés de réalisation du capteur et démontrent le bon fonctionnement de cette puce instrumentée en régime de dissipation continue.

Mots-clés—Paramétres Electriques Thermosensibles (PETS), capteur de température, puce instrumentée, monitorage, module de puissance.

1. INTRODUCTION

La durée de vie des modules de puissance est fortement liée à leur environnement thermique, à travers notamment l'amplitude des fluctuations de température auxquelles ils sont soumis [1][2]. D'après une étude publiée en 2011 [3], les composants à semi-conducteurs de puissance sont parmi les éléments les plus défaillants dans les convertisseurs statiques avec une estimation que 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, la connaissance de la température, nécessaire pour quantifier les performances thermiques et électriques, permet d'évaluer le niveau d'endommagement et, par conséquent, ouvre la perspective de définir une approche basée sur les outils de diagnostic venant compléter les besoins d'une évaluation 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, les industriels proposent des modules de puissance instrumentés permettant une estimation de la température des puces de par l'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 dans la prise en compte de la dégradation progressive avec le temps des performances thermiques et électriques des modules et du système de refroidissement associé. Par conséquent, l'estimation de la température des parties actives à partir d'un modèle ne reflète pas toujours l'état réel du système [2].

L'intégration de capteurs dans la structure de la partie semi-conductrice des modules est aussi proposée afin de mesurer directement la température des parties actives [5]. La mise en œuvre de cette solution engendre des surcoûts significatifs et une complexité croissante des modules de puissance. De plus, le capteur intégré effectue une mesure locale alors que la répartition globale de la température au sein de la puce est fortement non uniforme [4-6]. 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 comme la mesure par caméra infrarouge.

Dans la littérature scientifique telle que détaillé dans [7], les paramètres électriques thermosensibles sont classés suivant trois approches selon que la mesure indirecte de température est faite pendant le fonctionnement (mesure on-line) ou à l'arrêt (mesure off-line) des convertisseurs : PETS classiques (off-line), caractéristiques statiques, caractéristiques dynamiques. Par ailleurs, plusieurs auteurs se sont penchés sur l'utilisation de la résistance interne de la grille isolée des transistors comme PETS, la variation de cette résistance permettant d'estimer la température de jonction des IGBTs [9][10].

La dépendance entre les paramètres électriques thermosensibles et la température des parties actives des composants à semi-conducteurs de puissance est largement définie dans la littérature scientifique [8]. Un grand nombre de PETS est présenté comme représentatif de la température des puces. Néanmoins, les conditions de mise en œuvre des PETS et la validité des mesures effectuées dans les conditions de fonctionnement des modules ne sont généralement pas vérifiées. Comme démontré dans [8], les résultats obtenus à travers les caractéristiques statiques I(V) peuvent être erronés car les conditions de calibration du PETS sont différentes des conditions réelles d'utilisation. En outre, le vieillissement des modules de puissance peut avoir un impact sur la courbe de calibration des PETS. Il est ainsi important d'évaluer la robustesse et la représentativité des PETS dans les conditions de fonctionnement réelles des convertisseurs et pour différents modes d'endommagement.

L'objectif principal est d'évaluer la pertinence des mesures de température des parties actives réalisées avec les paramètres électriques thermosensibles adaptés aux conditions d'usage des convertisseurs par comparaison avec les données de mesure du capteur de température intégré. Diverses solutions sont aujourd'hui mises en œuvre pour la mesure indirecte de la température des modules de puissance. Dans cet article, nous proposons une approche originale associant la mesure indirecte par des paramètres électriques thermosensibles avec celle effectuée par un capteur de température résistif intégré dans une puce de puissance.

La première partie de cet article présente les choix technologiques et les étapes de réalisation de la puce instrumentée. Après une description détaillée du dispositif expérimental mis en œuvre, la seconde partie montre les résultats de validation du capteur de température ainsi que l'utilisation de la puce instrumentée dans des conditions de dissipation. Les perspectives d'utilisation de la puce instrumentée dans un module de puissance sont abordées dans la dernière partie de l'article.

2. Choix technologiques de conception du capteur

2.1. Concepts et structure de la puce instrumentée

2.1.1. Approche technologique

Le principe de base repose sur l'intégration d'un capteur de température sur la surface d'une diode de puissance [10]. Le capteur de température utilise le principe de variation de la résistivité électrique de certains matériaux (métaux, semi-conducteurs ou alliages) en fonction de la température. Selon l'équation 1, la résistivité de ces matériaux varie de manière quasi linéaire en fonction de la température avec une constante α_{Al} en %/°C appelée TCR (« Temperature coefficient of resistance »). ΔR est la variation de résistance du capteur, R_0 la résistance du capteur à une température de référence T_0 et ΔT, l'écart de température par rapport à T_0.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \alpha_{Al}\,\Delta T \quad [\%] \qquad \textbf{(1)}$$

Le choix du matériau utilisé pour concevoir le capteur est mené à travers l'analyse de plusieurs critères dont, notamment, la sensibilité intrinsèquement liée à la valeur du TCR α, la linéarité, la simplicité de mise en œuvre technologique et le coût de fabrication. A la lumière de cette étude, l'aluminium présente des caractéristiques intéressantes avec un TCR théorique de 0.43%/°C, un faible coût, une bonne stabilité chimique et une compatibilité avec la technologie de bonding classique pour le report de la connectique du capteur.

2.1.2. Structure de la puce instrumentée

L'intégration du capteur de température a été effectuée sur la surface de la métallisation d'une diode de puissance du commerce (ABB fast recovery diode 5SLX 12M1711 1700V/200A, 13.56mmx13.56mm de 385µm d'épaisseur).

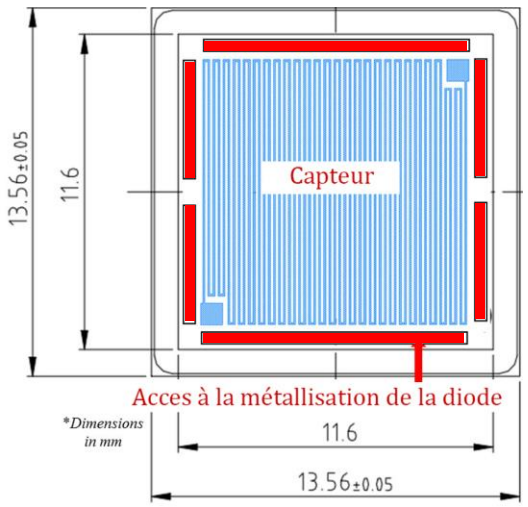

Figure 1:Topologie du capteur intégré sur l'anode de la diode

La topologie du capteur sur la surface de la diode de puissance (Figure 1) est définie de manière à couvrir la métallisation (anode) de la puce et, ainsi, de mesurer une grandeur représentative de sa température moyenne. Les ouvertures sur la bordure de la puce permettent de connecter les bondings de puissance sur la métallisation en aluminium de l'anode de la diode pour assurer la reprise de la connectique électrique vers l'extérieur. Notons que le choix d'avoir des ouvertures sur les côtés n'assure pas une distribution optimale du courant dans la puce mais permettra toutefois de réaliser des mesures aisées à la caméra infrarouge pour la validation expérimentale de la puce.

L'évolution de la chute de tension aux bornes du capteur est intrinsèquement liée à la variation de la résistance et au courant de mesure injecté dans le capteur. La valeur théorique de la résistance du capteur à 25°C est évaluée à $400\,\Omega$ selon l'équation 2 avec les paramètres donnés dans le Tableau 1. Pour un courant de mesure de 1 mA, la limite basse de la chute de tension mesurée est alors de $400\,mV$ à 25°C, ce qui offre une précision de mesure suffisante pour les températures supérieures.

$$R_{capteur} = \frac{\rho_{Al} * L}{e * h_{Al}} \qquad \textbf{(2)}$$

Tableau 1. Paramètres du capteur

Résistivité de l'aluminium $\boldsymbol{\rho_{Al}}$ (@25°C)	$2{,}8\ 10^{-8}\ \Omega.m$
Epaisseur du motif $\boldsymbol{e}$	$70\ \mu m$
Epaisseur de l'aluminium $\boldsymbol{h_{Al}}$	$500\ nm$
Longueur moyenne du motif $\boldsymbol{L}$	$0.5\ m$

2.2. Etapes de réalisation de la puce instrumentée

La puce instrumentée est réalisée dans un environnement contrôlé en salle blanche (Plateforme Technologique Amont de Grenoble). Les différentes étapes de réalisation sont illustrées sur la figure 2.

En premier lieu, les diodes du commerce sont livrées sans passivation (polyimide) et sont spécialement fournies avant les tests finaux de contrôle habituellement effectués par le fabricant. Cela permet de préserver la surface de la métallisation (anode) de la puce de toute dégradation généralement due à l'utilisation des pointes de test. Les puces sont d'abord nettoyées chimiquement avec une solution à base d'acétone et d'isopropanol pour éviter une éventuelle contamination de la surface et enlever les particules de poussière.

L'étape 1 consiste en un dépôt d'une couche isolante d'oxyde de silicium (S_iO_2) de 2µm d'épaisseur. Le dépôt est effectué par PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition). En dehors de l'isolation électrique, le choix de l'épaisseur de la couche d'oxyde est lié d'une part à la nécessité d'amoindrir la barrière thermique entre la puce et le capteur de température et, d'autre part, au besoin d'assurer la tenue mécanique par rapport aux tests sous pointes et à la réalisation des bondings sur les plots du capteur. Initialement de 400nm, la couche de S_iO_2 a été endommagée par les premiers tests de calibration du capteur, ce qui a engendré un court-circuit entre les plots de ce dernier. Des calculs analytiques ont ensuite permis d'étudier l'impact de l'épaisseur de la couche d'oxyde sur la différence de température entre le capteur et l'anode de la diode. Il en découle une augmentation de l'épaisseur d'oxyde jusqu'à 2µm, ce qui correspond à la limite technologique imposée par l'équipement de dépôt de la salle blanche.

Puis, un dépôt d'aluminium de 500nm d'épaisseur est réalisé à l'étape 2 par évaporation sous vide sur toute la surface supérieure de la puce. L'épaisseur de métal est un paramètre déterminant de la valeur de la résistance du capteur et, par conséquent, de la plage de tension mesurable à ses bornes vis-à-vis du calibre et de la précision des appareils de mesure. L'épaisseur de 500nm constitue également une limite haute imposée par le procédé de la salle blanche.

Le motif du capteur est ensuite dessiné par lithographie avec de la résine positive AZ1512HS (étape 3) et une gravure chimique permet d'éliminer le métal restant. La résine de protection est ensuite éliminée par lift-off à l'étape 4. A ce stade du procédé, le capteur est entièrement défini et intégré sur l'anode de la diode de puissance.

Il est ensuite nécessaire de définir les zones d'accès à la métallisation supérieure de la puce pour pouvoir faire les bondings de puissance. Une gravure RIE (Reactive Ion Etching) permet d'éliminer l'oxyde thermique aux emplacements reportés sur de la résine négative nLof2070 par lithographie optique (étapes 5 et 6).

Enfin, une seconde couche de protection est réalisée avec de la résine négative SU8 déposée par spincoating, recuit à 180°C avec un motif intégré par lithographie optique. Le masque de lithographie permet d'accéder aux plots de contact du capteur de température et à la métallisation de la diode. Cette dernière couche de résine sert de protection pour le capteur.

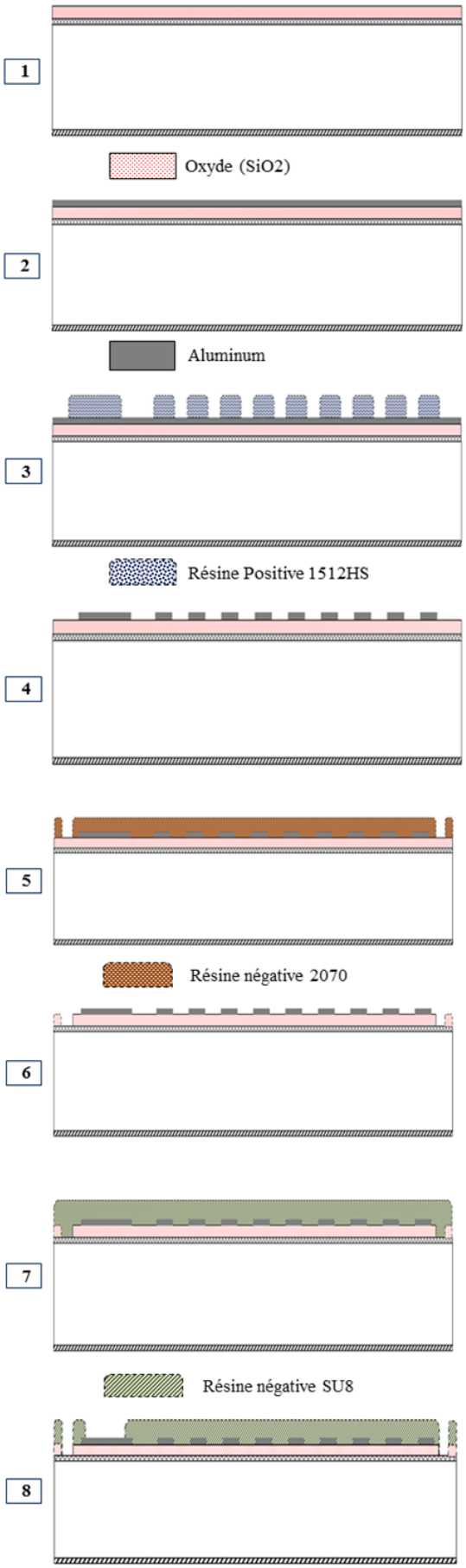

Figure 2 : Illustration des différentes étapes d'intégration du capteur sur la métallisation de la diode de puissance

3. VALIDATION EXPERIMENTALE DE LA PUCE INSTRUMENTEE

3.1. Calibration du capteur de température et d'un PETS de la diode

3.1.1. Calibration sous pointes du capteur

La calibration sous pointes des capteurs (Figure 3) est la première étape de l'évaluation de la résistance à la fin du procédé de réalisation en salle blanche. La mesure est faite par l'injection d'un courant de 1mA à travers le capteur et par la mesure « Kelvin » de la chute de tension aux bornes du capteur. La mesure « Kelvin » permet de s'affranchir de l'influence de la connectique sur la mesure de la tension du capteur et, ainsi, d'évaluer avec plus de précision la résistance des capteurs en fonction de la température.

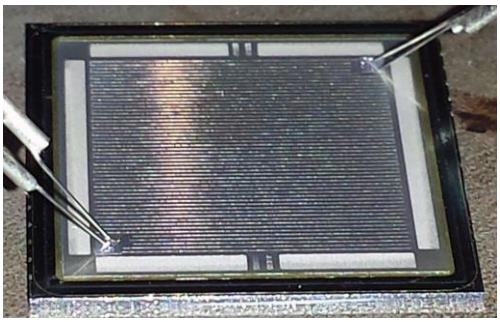

Figure 3: Calibration sous pointes des capteurs

L'injection de courant et la mesure « Kelvin » sont effectuées avec l'aide d'une unité de source et mesure (SMU) Keithley 2602B qui offre une précision relative d'injection de courant de 0.03% pour un courant de mesure de 1mA. La précision relative de la mesure de la tension est de 0.015% pour un calibre de 1V. La température de la puce instrumentée est imposée par une plaque chauffante (Lab Mix 35) avec une précision de régulation de +/-5K. Pour ces tests préliminaires, la précision sur la mesure n'est pas utile puisque nous cherchons seulement à valider le fonctionnement des capteurs.

L'évolution de la résistance des capteurs en fonction de la température est approchée par une équation linéaire de la forme :

$$\boldsymbol{R_{rtd}} = \boldsymbol{aT_{capteur}} + \boldsymbol{b} \quad [\Omega] \qquad \textbf{(3)}$$

Le coefficient de température (TCR) des capteurs est défini de manière expérimentale à partir de l'équation 4.

$$\frac{\Delta \boldsymbol{R}}{\boldsymbol{R_0}} = \boldsymbol{\alpha}\,\Delta \boldsymbol{T} \;\; + \boldsymbol{\beta} \quad [\%] \qquad \textbf{(4)}$$

Tableau 2. Paramètres de calibration des capteurs

Capteurs	$\boldsymbol{a}$	$\boldsymbol{b}$	$\boldsymbol{\alpha}$	$\boldsymbol{\beta}$
RTD01	1.6	395.2	0.4	-0.7
RTD02	1.6	389.6	0.4	0.0
RTD03	1.6	386.2	0.4	-0.4

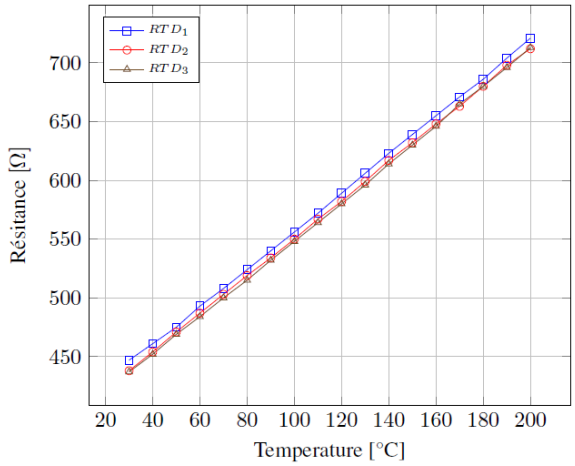

Figure 4: Courbe de calibration de trois capteurs (RTD01, RTD02, RTD03)

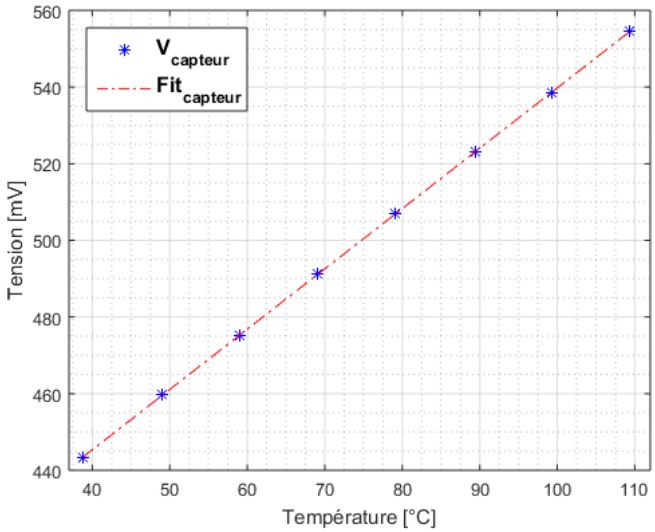

Figure 5: Courbe de calibration du capteur de température

3.1.2. Calibration sur substrats DBC

Les puces instrumentées sont ensuite reportées par brasage sur un substrat DBC dans une configuration permettant de définir une cellule de commutation (Figure 9). La calibration effectuée concerne à la fois le paramètre thermosensible de la chute de tension directe Vf de la diode sous l'injection d'un faible niveau de courant (50mA) et le capteur de température intégré par report en surface de celle-ci (courant de 1 mA).

Le substrat est placé dans une enceinte thermorégulée de manière à imposer une température homogène à tout le dispositif. La température du substrat est estimée par un thermocouple de type K classe 2, placé au plus près sur la semelle. Les courants de mesure sont injectés par le SMU Keithley 2602B pour le capteur (1mA) et par une carte de courant dédiée pour la mesure du PETS de la diode (50mA). Une mesure « Kelvin » est utilisée pour s'affranchir de la chute de tension due à la connectique. La mesure est effectuée par une centrale d'acquisition HBM GEN3i (2MEch./s, 18bits). La configuration de mesure est présentée sur la figure 7.

La variation de la résistance du capteur de température est évaluée en fonction de la température et permet d'obtenir les données de calibration : sensibilité $\boldsymbol{S}_{\text{capteur}} = 1.57\ mV/°C$ et TCR $\boldsymbol{\alpha}_{\text{capteur}} = 0.35\ \%/°C$.

La courbe de calibration du PETS Vf_Ict indique une sensibilité de $-2.3\ mV/°C$.

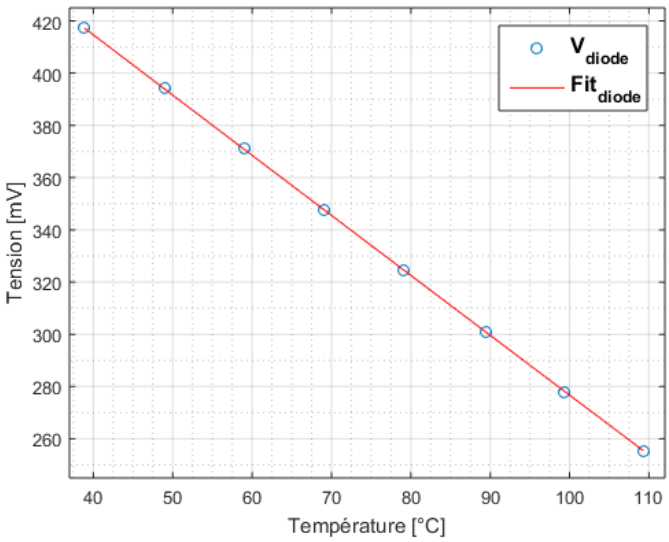

Figure 6: Courbe de calibration du PETS Vf_Ict de la diode

3.2. *Mesures de la température en dissipation*

3.2.1. *Principe de mesure avec le paramètre électrique thermosensible (PETS) Vf_Ict*

Le PETS Vf_Ict de la diode de puissance est utilisé afin de mesurer indirectement la température de jonction de la diode de puissance en silicium. En injectant un faible courant de l'ordre de quelques dizaines de mA, on observe une variation linéaire de la chute de tension aux bornes de la jonction PN avec une sensibilité de l'ordre de -2mV/°C (Figure 6). Il est montré que la température estimée avec ce PETS correspond à une valeur proche de la température moyenne de la température de jonction de la puce [11].

Dans les conditions de mesure en dissipation (Figure 7), un courant de puissance est injecté dans la diode jusqu'à l'établissement du régime stationnaire. Le courant de puissance est ensuite est remplacé par le courant de mesure utilisé pour la calibration (50mA). L'évolution de la chute de tension aux bornes de la diode parcourue par le courant de mesure permet d'observer la courbe de refroidissement de la puce instrumentée. La température à l'instant de la coupure du courant est obtenue par extrapolation de la partie linéaire des mesures enregistrées, après la fin de l'injection du courant de puissance, en fonction de la racine carrée du temps. Ce procédé permet de s'affranchir des effets transitoires qui apparaissent au moment de la coupure du courant de puissance sur une durée de l'ordre de quelques centaines de µs [11].

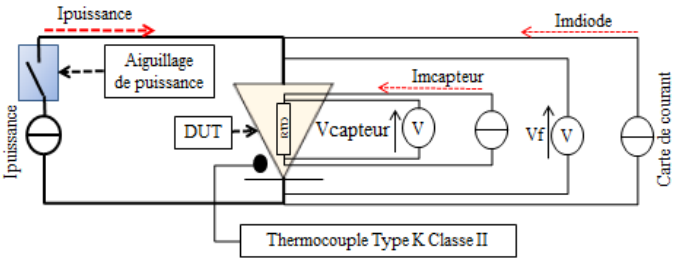

Figure 7: Schéma de principe du dispositif expérimental

3.2.2. *Circuit d'injection du courant de puissance*

Le dispositif expérimental utilisé pour l'injection du courant de puissance a été développé dans le cadre des travaux de Thollin et coll. [13]. La puce instrumentée correspond au DUT (Device Under Test) de la figure 8. Les interrupteurs T1 et T2 permettent d'aiguiller le courant de puissance. Le shunt aselfique (LEMSYS 1mΩ) permet de mesurer le courant de puissance injecté dans la diode avec précision et avec une bande passante élevée (2 MHz).

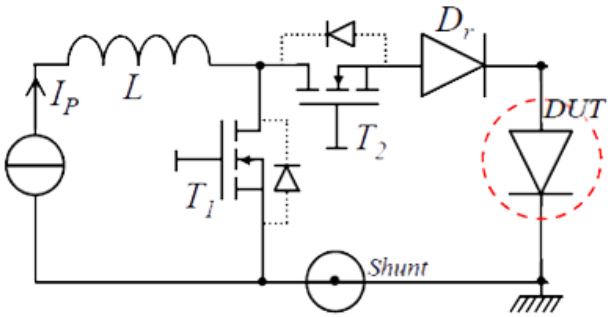

Figure 8: Schéma de l'aiguillage de puissance [13]

3.2.3. *Procédures de mesure*

Le substrat DBC sur lequel est reportée la diode instrumentée est fixé sur une plaque à eau dont la température est contrôlée par un thermostat à circulation (Julabo MC-26) avec une température de consigne de 30°C. La température de la semelle est contrôlée à l'aide d'un thermocouple de type K inséré au centre de la plaque, juste en dessous du substrat. Le banc de mesure est présenté sur la Figure 9.

Le courant de puissance Ip, limité à 50A, est injecté dans la diode pendant environ une minute pour atteindre le régime stationnaire. La commande de l'interrupteur T1 arrête l'injection de puissance et déclenche l'enregistrement de la tension du capteur et celle du PETS par la centrale d'acquisition HBM pour une durée t=1ms (dont 200µs des données avant la coupure du courant de puissance).

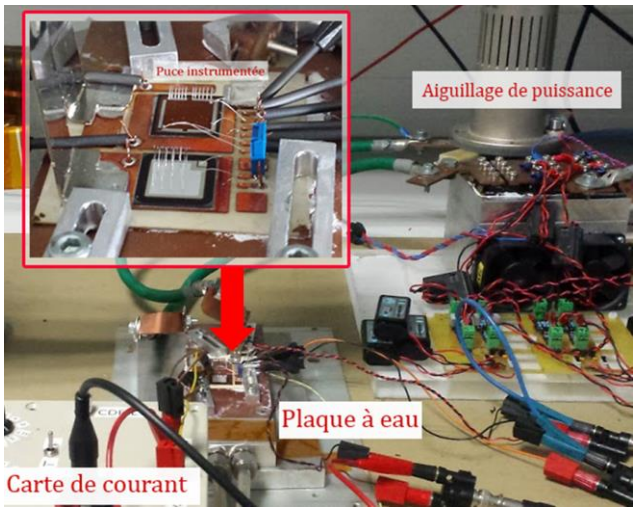

Figure 9: Banc de mesure

La coupure du courant de puissance entraîne une perturbation des signaux mesurés sur une durée maximale de 20µs. Il est important d'enlever les données enregistrées sur cette plage où les perturbations sont importantes. Chaque mesure est répétée dix fois afin de s'assurer de la répétabilité et

les valeurs moyennes des grandeurs caractéristiques sont calculées pour chaque niveau de courant.

3.2.4. Traitement des données du capteur

Le traitement des données du capteur permet de calculer la température juste avant l'arrêt de l'injection du courant de puissance. Afin de s'affranchir des effets transitoires dus à la coupure de l'injection, le calcul est fait avec les échantillons enregistrés entre 200µs et 20µs avant la coupure du courant de puissance.

La valeur moyenne sur les points de mesure (360 échantillons) est ensuite utilisée pour calculer la température du capteur avec l'équation de calibration.

3.2.5. Traitement des données du PETS de la diode

Pour chaque de niveau du courant de puissance, le traitement du PETS de la diode permet de retrouver la température initiale T_{j0}. Il s'agit ici d'utiliser l'équation d'extrapolation linéaire en racine carrée du temps (Figure 10) pour évaluer la tension V_{f0} avant de remonter à la température via l'équation de calibration de la diode.

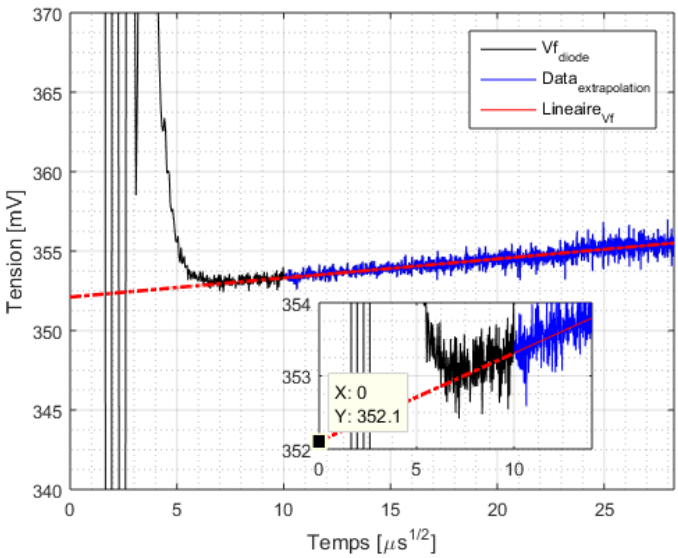

Figure 10: Extrapolation en racine carrée du temps de l'évolution du PETS

3.2.6. Mesures avec une caméra thermique

Une mesure complémentaire est faite avec une caméra infrarouge (Testo 875-2i). Le dispositif est peint en noir avec de la peinture haute température (Motip 0431) pour améliorer l'émissivité de la surface de la puce instrumentée à une valeur moyenne $\varepsilon_{moy} = 0.95$. Le substrat est ensuite recuit à 160°C pendant 60 minutes à l'aide d'une plaque chauffante. Une calibration de la caméra infrarouge sur le même banc de mesure est effectuée entre 30°C et 70°C après avoir peint le substrat et sans injection de courant de puissance. La température de calibration est limitée à 70°C par le thermostat à circulation (Julabo MC-26).

Pendant les phases de dissipation, deux températures moyennes sont calculées avec la caméra thermique (Figure 11). D'abord, la température du capteur est évaluée en considérant la moyenne sur la zone au centre de la puce (zone capteur, Figure 11), correspondant à l'emplacement du capteur. Ensuite, la température de la partie active de la diode est calculée sur une surface correspondant à la métallisation supérieure de la diode (zone puce, Figure 11).

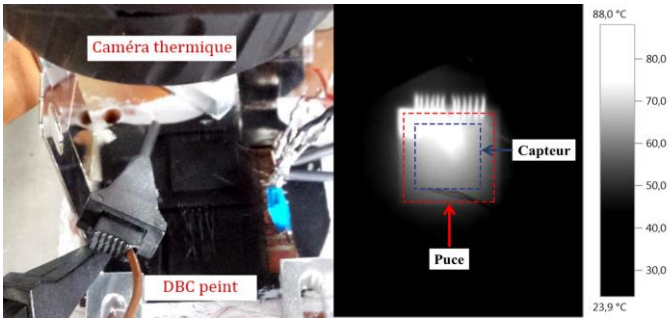

Figure 11 : Mesures avec caméra thermique (Ip=50A)

Les résultats des mesures avec la caméra thermique consolident les mesures avec le capteur et le PETS Vf_Ict au vu des écarts de température. La différence de température maximale entre ces mesures et ceux du capteur et du PETS est inférieure à 0.6°C sur toute la gamme des courants de puissance utilisée.

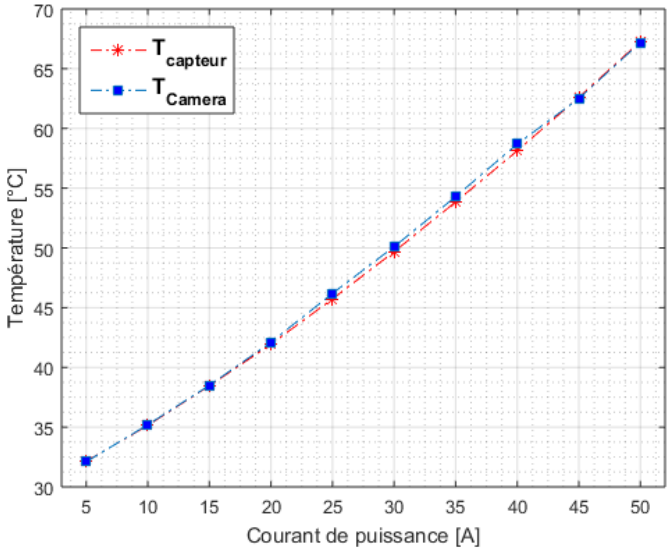

Figure 12: Températures du capteur et de la caméra thermique

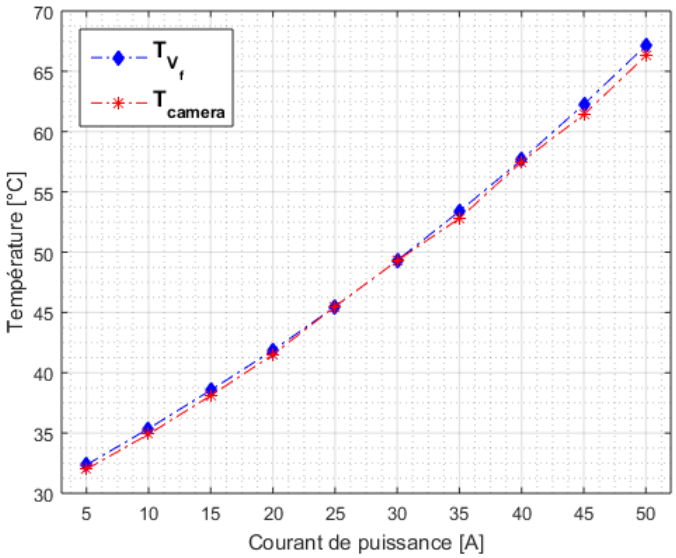

Figure 13 : Températures du PETS Vf_Ict et de la caméra thermique

3.2.7. *Comparaison des résultats expérimentaux*

Pour des niveaux de courant de puissance supérieurs à 15A, la température mesurée par le capteur est supérieure à celle effectuée par le PETS Vf_Ict de la diode de puissance avec un écart maximal de température constaté de 0.5°C (Figure 14).

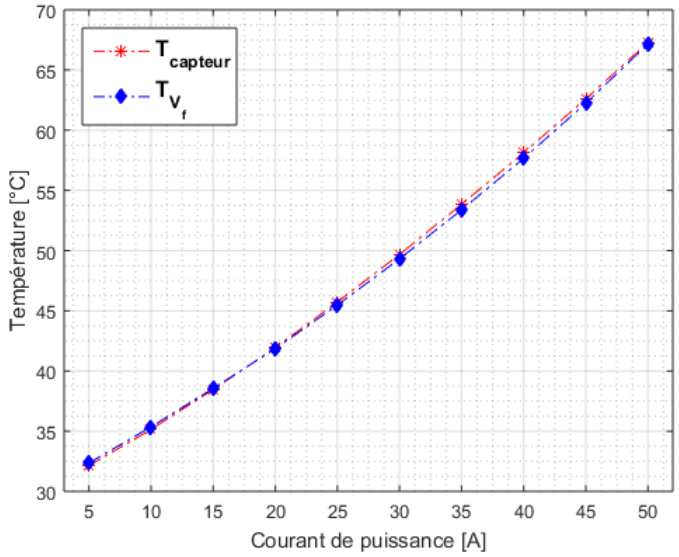

Figure 14: Températures estimées par le capteur et par le PETS

Le capteur de température couvre 83% de la surface de la métallisation qui correspond à la partie active de la diode de puissance. La valeur moyenne de la température de cette partie active, évaluée par le PETS Vf_Ict est plus faible, notamment parce que la température est plus chaude au centre de la puce que sur les bords. La figure 14 illustre cette répartition de température pour un courant de puissance de 50A. Sur cette figure, nous traçons la température le long d'une diagonale de la puce. Nous observons bien que les bords de la puce sont sensiblement plus froids, comparés à la zone occupée par le capteur de température au centre de la puce. Par conséquent, la valeur moyenne de la température du capteur calculée sur cette zone est plus élevée que celle calculée pour le PETS (Figure 15).

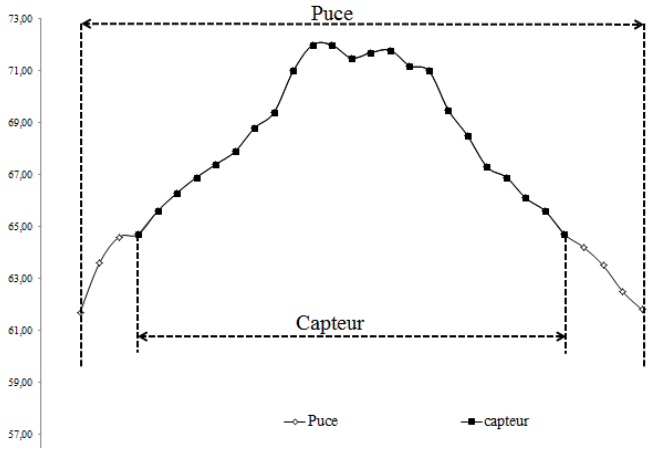

Figure 15 : Répartition de la température sur la surface puce instrumentée

Les écarts-types maximums pour chaque point de mesure sont de l'ordre de 0.2°C, ce qui montre une faible divergence des points de mesure autour de la valeur moyenne de la température pour chaque niveau de courant de puissance injectée et donc une bonne répétabilité des mesures.

4. Conclusions

A l'issue de cette étude, les recherches axées sur l'intégration d'un capteur de température dans une diode de puissance ont permis de valider les étapes de réalisation technologique. En effet, des capteurs fonctionnels ont été intégrés sur des puces du commerce grâce à un procédé microélectronique simple et économique.

Le report de la puce instrumentée sur un substrat DBC a permis ensuite de comparer les données du capteur avec ceux obtenus avec un paramètre électrique thermosensible robuste et largement utilisé dans l'industrie ou le monde académique (chute de tension directe de la diode de puissance sous un faible courant Vf_Ict) et avec une caméra thermique. Dans la configuration de dissipation thermique en régime stationnaire, les écarts de températures entre la température du capteur et celle évaluée par le PETS d'une part, et entre la température du capteur et celle estimée par la caméra thermique d'autre part sont inférieurs à 0.5°C.

Pour la suite, le capteur de température sera évalué en régime de commutation grâce au substrat présenté plus haut afin de confirmer les résultats de la mesure de température obtenus en dissipation statique. Il s'agira de valider le bon fonctionnement du capteur en présence de commutations en vue d'une utilisation de la puce dans des conditions fonctionnelles. Des études dans ce sens sont en cours.

L'évaluation expérimentale du fonctionnement du capteur de température sera complétée par une simulation numérique permettant d'évaluer l'influence de l'intégration du capteur sur le comportement électrothermique de la puce instrumentée.

Enfin, la mise en œuvre de la mesure de la température par intégration dans une diode de puissance étant une première étape de validation de cette approche, le procédé technologique ainsi validé permettra de passer à l'intégration de nouvelles versions du capteur pour les transistors IGBTs silicium. Nous pourrons ainsi réaliser des modules de puissance dont toutes les puces sont instrumentées. Nous aurons ainsi à disposition un outil nous permettant de valider les PETS des IGBT et des diodes en conditions fonctionnelles.

5. Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR (projet MEMPHIS ANR-13-PRGE-0005-01 PROGELEC) pour le soutien financier apporté pour ces recherches. Ces travaux ont également été en partie soutenus par le réseau français RENATECH pour la réalisation des puces instrumentées à la Plateforme Technologique Amont (PTA) de Grenoble.

Les auteurs remercient également Jean-Christophe Crebier, Raha Vafaei et Benoit Thollin pour leur aide sur le design de la puce, Cyril Buttay, Vincent Bley et la société DeepConcept pour leur aide concernant la réalisation technologique du packaging, et Florian Dumas pour les réalisations mécaniques.

6. References

[1] E. Wolfgang, "Examples for failures in power electronics systems, "presented at ECPE Tutorial 'Rel. Power Electron. Syst.', Nuremberg, Germany, Apr. 2007.

[2] Automotive Electronic Systems Reliability Standards, "Handbook for robustness validation of automotive electrical/electronic modules", SAE International, J1211_201211, Jun.2012.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] R. Schmidt, U. Scheuermann, "Using the chip as a temperature sensor - The influence of steep lateral temperature gradients on the Vce(T)-measurement", 13th Europ. Conf. on Power Electronics and App., 2009.

[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, 2014.

[8] N. Baker, M. Liserre, L. Dupont and Y. Avenas, "Junction temperature measurements via thermo-sensitive electrical parameters and their application to condition monitoring and active thermal control of power converters", *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*, Vienna, 2013, pp. 942-948.

[9] M. Denk, M-M. Bakran, "An IGBT Driver Concept with Integrated Real-Time Junction Temperature Measurement," Proceedings of PCIM Europe 2014, pp.1,8, 20-22 May 2014.

[10] N. Baker, S. Munk-Nielsen, M. Liserre, F. Iannuzzo, "Online junction temperature measurement via internal gate resistance during turn-on", 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), pp.1-10, 26-28 Aug. 2014.

[11] 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.

[12] X. Jorda, X. Perpina, M. Vellvehi, F. Madrid, D. Flores, et al..”Low-cost and versatile thermal test chip for power assemblies assessment and thermometric calibration purposes”. Applied Thermal Engineering, Elsevier, 2011, 31 (10), pp.1664.

[13] B. Thollin, L. Dupont, Z. Khatir, Y. Avenas, J. C. Crebier and P. O. Jeannin, "Partial thermal impedance measurement for die interconnection characterization by a microsecond “pulsed heating curve technique”," Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on, Lille, 2013, pp. 1-10.

[14] D. L. Blackburn and F. F. Oettinger, "Transient Thermal Response Measurements of Power Transistors," in IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, vol. IECI-22, no. 2, pp. 134-141, May 1975.