



HAL
open science

Analyse du vieillissement de la métallisation d'un MOSFET par la distribution du potentiel de source

Roberta Ruffilli, Mounira Berkani, Gilles Rostaing, Marc Legros, Stéphane Lefebvre, Philippe Dupuy

► To cite this version:

Roberta Ruffilli, Mounira Berkani, Gilles Rostaing, Marc Legros, Stéphane Lefebvre, et al.. Analyse du vieillissement de la métallisation d'un MOSFET par la distribution du potentiel de source. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361625

HAL Id: hal-01361625

<https://hal.science/hal-01361625>

Submitted on 7 Sep 2016

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.

Analyse électrique de la métallisation de puce MOSFET par mesure de potentiel de source

Roberta RUFFELLI⁽³⁾, Mounira BERKANI⁽²⁾, Gilles ROSTAING⁽¹⁾, Marc LEGROS⁽³⁾, Stéphane LEFBVRE⁽¹⁾,
Philippe DUPUY⁽⁴⁾

⁽¹⁾SATIE, CNAM, 61, avenue du Président Wilson, F94235 Cachan,

⁽²⁾SATIE, UPEC, rue Jean Macé, 94000 Bonneuil

⁽³⁾CEMES-CNRS, 29 rue J. Marvig, Université de Toulouse, 31055 Toulouse, France

⁽⁴⁾NXP France SAS, 24 Avenue du Président Eisenhower, 31000, Toulouse, France

RESUME -La reconstruction de la couche de métallisation est l'un des mécanismes de dégradation le plus observé dans les composants électroniques de puissance de type smart power soumis à des contraintes thermiques sévères telle que les courts-circuits répétitifs en raison des contraintes thermomécaniques imposées : variation et niveaux de température élevés. Pour évaluer le niveau de dégradation de la métallisation, le principal indicateur de vieillissement est la mesure de la résistance à l'état passant $R_{DS(on)}$ qui est systématiquement associée à l'évolution de la résistance du métal. L'étude présentée dans cet article apporte des éléments de compréhension sur l'effet de la reconstruction de la métallisation sur le vieillissement et la défaillance du composant de puissance à travers une large analyse expérimentale axée sur la mesure de la cartographie du potentiel de source au cours du vieillissement.

Mots-clés—MOSFET, Métallisation, potentiel.

1. INTRODUCTION

L'électronique de puissance est devenue essentielle dans les applications de transport, son utilisation permet de réduire la consommation, le poids et l'émission de gaz CO₂ et d'apporter aussi un meilleur contrôle des fonctions. Cela s'est fait progressivement dans le domaine de l'automobile, par l'intégration de nouvelles fonctions et par le remplacement de fonctions autrefois électromécaniques. L'émergence des véhicules hybrides et mild-hybrides vient amplifier ce phénomène. La même tendance se produit dans le domaine du transport routier (camions, autobus). Les EEM (Electric/Electronic Modules) sont souvent associés aux ECU (Unités de Commande Electroniques) pour assurer de nombreuses fonctions auxiliaires critiques, telles que l'éclairage, le contrôle de la direction ou secondaires telles que le dégivrage ou l'actionnement des vitres.

Pour des raisons de sécurité, mais aussi d'image, l'utilisation de l'électronique de puissance dans le domaine des transports routier doit satisfaire aux exigences de fiabilité et de sûreté de fonctionnement. Les fournisseurs de composants et les équipementiers concepteurs doivent veiller à garantir la disponibilité des fonctions critiques tout en garantissant la

sécurité des personnes et des biens. Les dispositifs embarqués dans un véhicules sont soumis à des contraintes environnementales liées à leur mission (variations de température, vibrations, charges contraignantes) mais aussi à des situations de défaut (défauts d'isolement des câblages, modification des caractéristiques des charges). Les profils de mission dépendent du type de véhicule mais sont principalement liés à l'usage, c'est-à-dire la zone géographique d'utilisation du véhicule et le profil de l'utilisateur. Les contraintes pesant sur les dispositifs d'électronique de puissance appliquées au domaine automobile sont donc difficiles à définir. Néanmoins, une bonne connaissance des composants et de leur mode de vieillissement permet de déterminer les modes de fonctionnement les plus contraignants et donc d'en étudier la durée de vie. Dans cette étude, nous nous intéressons plus particulièrement à un interrupteur statique de type MOSFET smart power destiné à remplacer un relais électromagnétique dans la commutation de charges d'éclairage par exemple. Ces composants sont dits "smart" car ils intègrent des fonctions d'auto protection (capteurs et logique de protection) contre les éventuelles surtensions, températures excessives ou courants excessifs. Ces fonctionnalités, dites d'auto diagnostic, protègent la puce de puissance et permettent d'assurer une grande robustesse aux perturbations et augmentent la fiabilité de la fonction. Néanmoins, les contraintes thermiques et électriques « normales » subies par ces interrupteurs lors de leur mission participent au vieillissement de l'interrupteur et peuvent conduire à sa défaillance, c'est-à-dire à la perte de la fonction. Pour répondre aux besoins de sûreté de fonctionnement du domaine automobile, il est nécessaire d'évaluer la capacité de ces « smart power », en situation réelle, à assurer leur fonction. Pour cela, nous souhaitons estimer, pour chaque composant critique, son état afin de prévenir sa défaillance.

Pour atteindre cet objectif, la compréhension des mécanismes de dégradation des composants étudiés, associés à des types de contraintes bien identifiées est une étape cruciale. L'étude nécessite donc, pour un composant donné et une fonction donnée, de déterminer les contraintes d'usage ayant un impact sur sa durée de vie, puis de bien comprendre les mécanismes de défaillance principaux et enfin de relier niveau

de contrainte et niveau de défaillance dans une loi permettant d'estimer l'état de vieillissement d'un dispositif.

La bibliographie recense plusieurs modes de défaillance associés aux interrupteurs de puissances, chacun de ces modes est lié à un type de contraintes reproductibles en laboratoire. Le cyclage thermique en sollicitant la dilatation des diverses couches de matériaux entraîne une dégradation des brasures liant ces matériaux [4]. La conduction thermique devenant difficile le phénomène s'amplifie jusqu'à la destruction de la puce de puissance. Plusieurs études réalisées sur le vieillissement des IGBT et MOSFET de puissance ont montré que sous des contraintes de cyclage en puissance (court-circuit et avalanches) la reconstruction de la couche de métallisation est l'un des mécanismes de dégradation le plus observé [1-2].

On constate donc que lors des essais en laboratoires, les deux types de stress identifiés conduisent à des processus de dégradation différents. Nous nous intéresserons, dans cette étude, aux conséquences du cyclage en puissance de très courte durée, c'est-à-dire à la reconstruction de la couche de métallisation.

2. CADRE DE L'ETUDE

Nous nous intéresserons au stress des composants smart power soumis à des court-circuits répétitifs. Lors de l'allumage d'une lampe de phare le courant appelé est très important (impédance très faible), dans ce cas le composant power switch se protège contre les surcharges en s'ouvrant lorsque le courant dépasse un certain seuil puis tente de se refermer et ce, jusqu'à ce que le courant appelé soit supportable par l'interrupteur de puissance. Le dispositif intégré de protection sollicite donc le composant en court-circuit répétitifs. Le mécanisme de reconstruction de la couche de métallisation résulte des contraintes thermomécaniques rapides et locales imposées par des niveaux de température élevés et des fortes variations de cette dernière [3-4]. Le principal indicateur thermosensible de l'état de la couche de métallisation est la mesure de la résistance à l'état passant ($R_{DS(on)}$). Dans la littérature, l'augmentation de cette résistance est associée à l'état de vieillissement de la couche de métallisation en se basant sur des observations optiques ou électroniques [5].

Dans ce papier, nous allons confirmer par des mesures expérimentales l'effet de la reconstruction de la couche de métallisation sur l'évolution de la résistance $R_{DS(on)}$ par deux mécanismes distincts. Le premier est dû à l'augmentation physique de la résistance à l'état passant à cause du fait que la reconstruction d'aluminium conduit à la diminution de sa conductivité électrique. La seconde est également due à la baisse de la conductivité de l'aluminium mais qui conduit à la dépolarisation de la grille avec une redistribution des lignes de courant et ainsi une focalisation des lignes de courant sous les contacts des fils de bonding au cours du vieillissement du composant [6].

Afin d'analyser expérimentalement ce comportement, une cartographie du potentiel de la métallisation de source sera tracée et son évolution sera suivie au cours d'essais de vieillissement par court-circuits répétitifs.

3. PROTOCOL EXPERIMENTAL

Afin de reproduire le vieillissement d'un composant soumis au mode de protection décrit au paragraphe 1, des essais de vieillissement accélérés par court-circuits (CC) répétitifs sous une température ambiante contrôlée ont été réalisés en utilisant un banc de test dédié (Fig 1).

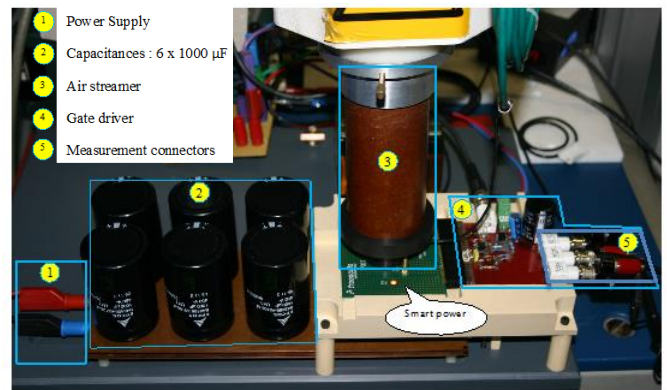


Fig.1 Banc de vieillissement

Les composants testés (DUTs) sont des MOSFET smart power 24V-9A d'une résistance à l'état passant de 6 mΩ à 25°C. Ces composants sont conçus pour des applications camions et/ou autobus. Les tests de vieillissement ont été réalisés sous les conditions suivantes: tension drain-source $V_{DS} = 15V$, tension grille-source $V_{GS} = 15V$, la durée de la phase de court-circuit $T_{CC} = 40\mu s$ et la température ambiante fixée à $T_{am} = 25^\circ C$ (figure 2). La fréquence du court-circuit est fixée à 200ms, on considère donc qu'à la suite du stress, le composant retourne à température ambiante. Une mesure régulière de la résistance à l'état passant est réalisée à l'aide d'un traceur. La défaillance du composant est survenue après 330.10^3 court-circuits à la commutation au blocage du composant. La résistance à l'état passant a augmenté de 4%. La défaillance apparaît après seulement $80,2.10^3$ court-circuits à 100°C de température ambiante.

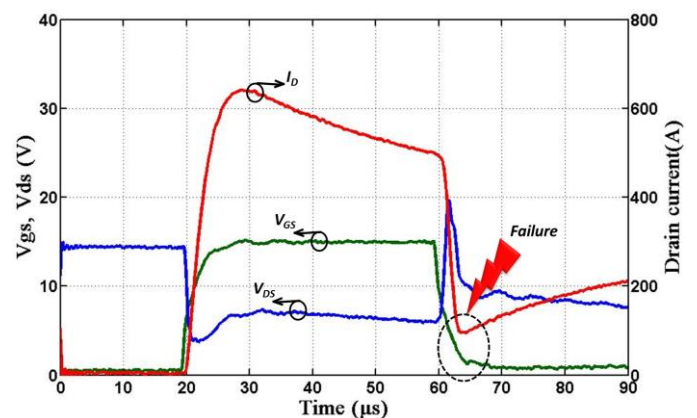


Fig.2 Exemple de Commutation et défaut de l'interrupteur de puissance à 80,2kCycles.

Ces essais de vieillissement ont donné lieu à des observations de l'état de la métallisation et à son évolution (figure 3). On constate, au microscope électronique, le changement d'état de la surface.

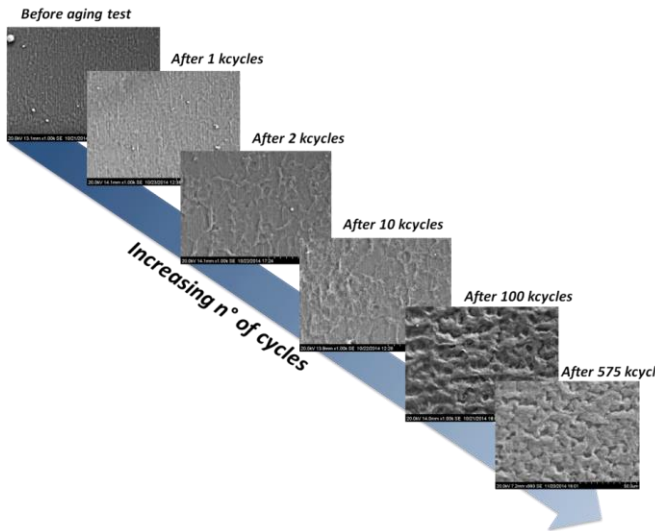


Figure 3 : Dégradation progressive de l'état de la couche de métallisation lors du vieillissement. (SEM, échelle 50µm)

Lors de cette étude, nous avons, de même, étudié l'évolution de la résistance à l'état passant R_{DSON} lors du vieillissement (figure 4). On note qu'à température ambiante élevée, cette résistance évolue rapidement et dans une large plage, la durée de vie, dans ce cas est faible. A température ambiante faible (25°C) cette évolution est moins importante et la durée de vie beaucoup plus longue. La température ambiante est donc bien un facteur aggravant du vieillissement en court-circuit mais l'évolution de la résistance R_{Dson} ne permet pas, pour ce type de mode de stress, de définir un seuil au-delà duquel la défaillance est certaine.

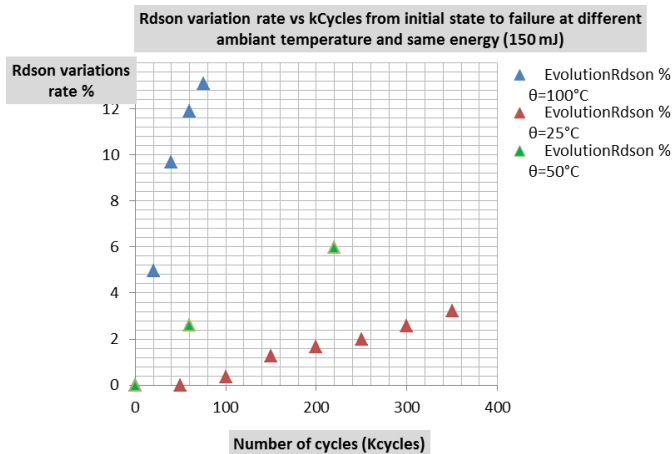


Figure 4 : Evolution des résistances R_{Dson} mesurées au traceur pour divers cyclages en puissance (150mJ) pour différentes températures ambiantes.

Le vieillissement de la couche de métallisation se révèle donc un processus plus complexe que celui caractérisé par l'évolution de la résistance à l'état passant.

Pour étudier et caractériser d'un point de vue électrique l'évolution de cette dégradation, une cartographie du potentiel a été réalisée sur des composants de même référence, boîtier ouvert, à divers stades de vieillissement.

4. CARTOGRAPHIE DU POTENTIEL DE SOURCE

Le potentiel de la métallisation de source est mesuré entre une référence prise au plus proche de la source du composant et une pointe de touche (diamètre 200µm) positionnée sur la surface de la métallisation à l'aide d'un bras manipulateur robotisé.

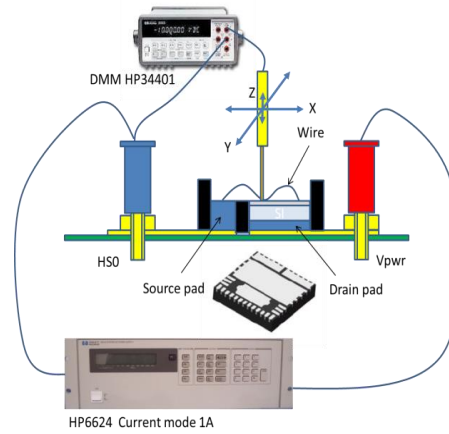


Figure 5 : Schéma simplifié du banc de mesure de potentiel

Durant la mesure le composant est commandé à l'état passant ($V_{GS} = 15V$) et on fait passer un courant de 1A à l'aide d'une source de courant. Ce faible niveau de courant est choisi pour minimiser l'auto échauffement de la puce par effet Joule et considérer la température homogène sur la surface de la puce. La mesure de la différence de potentiel est faite sur des composants ayant subi 1.10^3 CC, 50.10^3 CC, 200.10^3 CC et 300.10^3 CC (juste avant la défaillance).

La figure 6 présente la pointe de mesure, ici positionnée sur un fil de bonding. Le composant étudié comportant, dans un même boîtier deux power switch, on peut voir, sur la photo figure 6, les deux métallisations de source ainsi que les trois fils de bondings reliés à la connexion de source.

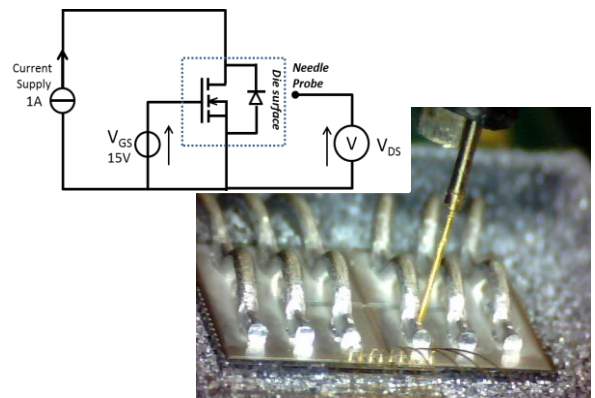


Fig.6 Dispositif de mesure du potentiel de source

Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 7. Les mesures sont réalisées à l'aide d'un voltmètre HP34401 6digits/2, les potentiels mesurés entre la connexion de source et le point de mesure sont de l'ordre de la dizaine à la centaine de microvolts. Afin d'éviter une éventuelle dégradation de la métallisation par la pointe de touche, les mesures présentées dans ce qui suit ont été réalisées sur des composants différents. Les résultats doivent donc être pris de manière qualitative.

Les bandes blanches (Fig.7) correspondent aux emplacements des fils de bonding sur lesquels aucune mesure n'a été réalisée. Nous observons une inhomogénéité croissante du potentiel sur la surface de la métallisation au cours du vieillissement. En effet, le potentiel est toujours plus élevé au centre de la puce. Au cours du vieillissement la valeur du potentiel augmente avec une concentration plus élevée au voisinage des pieds de bonding. Une image prise (figure 8) au microscope électronique de la métallisation d'un DUT soumis

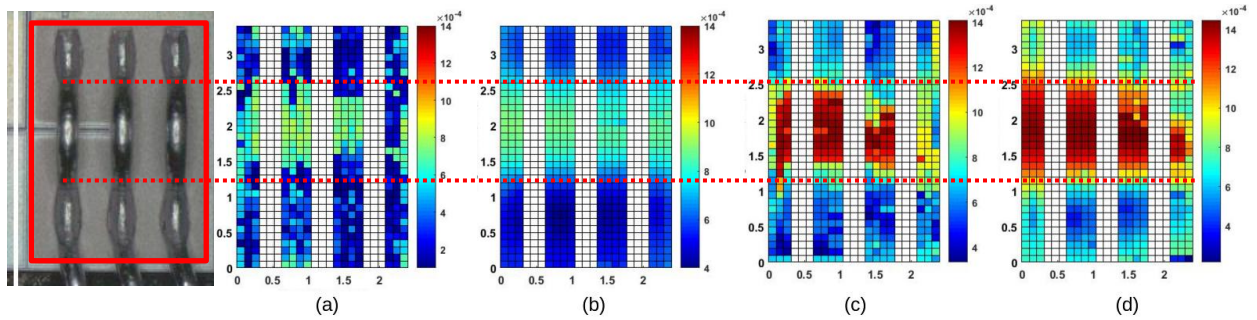


Fig. 7 Cartographies de potentiel à différents niveaux de vieillissement [V] avec $I_D = 1A$, après 1 kcycles (a), after 50 kcycles (b), après 200 kcycles (c) et après 300 kcycles (d). Les zones blanches indiquent l'emplacement des fils de bonding avec un potentiel très proche de zéro.

à des cycles de court-circuit, au niveau d'un pied de bonding, montre une dégradation importante de l'aluminium de source en surface après la défaillance du composant.

Ces résultats laissent supposer que la résistance à cet endroit est plus élevée (puisque la mesure se fait à courant constant). Cela conduira à une redistribution non homogène du courant sur la surface de la métallisation.

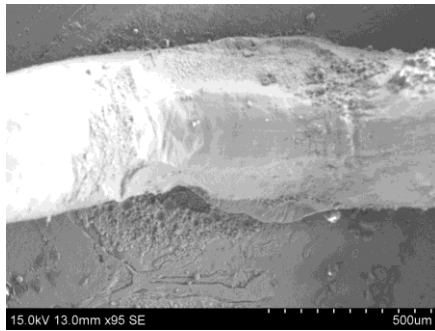


Fig.8 Dégradation de la métallisation au niveau des pieds de bonding après défaillance (SEM).

Ces résultats sont à comparer avec les simulations de température lors d'un court-circuit présentées figure 9 [6]. Sur cette figure sont présentées, pour un DUT identique à celui des mesures réalisées dans cette étude (figure 9a), à l'aide d'un modèle électrothermique 3D, l'évolution de la cartographie de puissance en fonction de la résistivité de la couche de métallisation. On note que l'augmentation de cette résistivité, en simulation montre une concentration de la puissance dissipée lors des court-circuits autour des pieds de bonding.

Lors d'une commutation, le courant de source s'évacue par les pieds de bonding vers la connexion de source. En traversant les résistances plus importantes situées dans la métallisation, au niveau des pieds de bonding (figure 7) la puissance dissipée localement est donc plus importante, ce qui est cohérent avec les simulations réalisées.

Simulations électrothermiques, mesures et analyse au microscope électronique semblent donc confirmer que, soumis à des court-circuits, les smart power testés subissent bien un vieillissement de la couche de métallisation. Ce vieillissement hétérogène est dû à des échauffements rapides locaux, principalement autour des pieds de bonding. L'augmentation de résistivité locale augmente les échauffements qui amplifient le vieillissement. Cette analyse peut permettre d'expliquer l'une des défaillances constatée qui est la levée des fils de bonding.

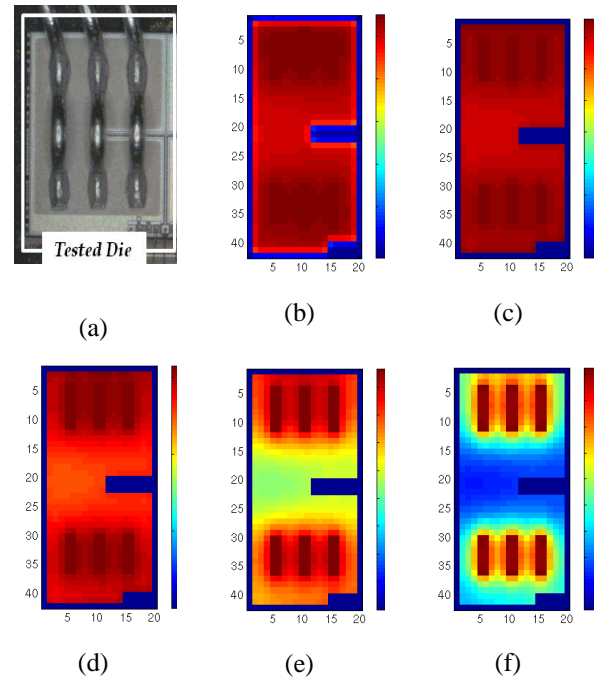


Fig. 9. (a) image du DUT; (b) simulation des cartographies des températures maximales atteinte ($^{\circ}C$, semelle à $27^{\circ}C$) durant un essai en court-circuit pour un composant sain.; distribution de puissance [W] au plus haut niveau de température durant le court-circuit avec une résistivité de la couche de métallisation ρ_{Al} augmentée d'un facteur (c) 1 (sain), (d) 3, (e) 10, and (f) 50.

Les essais en court-circuit, en soumettant le composant en test à des courants très importants (quelques dizaines de fois le courant nominal) injectés via les pieds de bonding dans la métallisation favorisent les échauffements locaux dans celle-ci créant une hétérogénéité de sa résistivité au cours du vieillissement.

5. CONCLUSIONS

Ce travail présente des mesures de cartographies de potentiel réalisées sur des composants smart power soumis à des tests extrêmes de cyclage en puissance (court-circuits). Les cartographies de potentiel de la métallisation de source réalisées mettent en évidence une hétérogénéité croissante de ceux-ci au cours du cyclage. Ces résultats montrent une cohérence avec les cartographies de puissance réalisées à partir de modèles électrothermiques 3D. Le vieillissement des composants testés lors de cyclages en court-circuit est donc bien lié à une évolution des caractéristiques de la métallisation de source. Le lien entre les caractéristiques de la métallisation et la défaillance de la puce de puissance reste à établir. Pour évaluer le vieillissement d'un composant en vue d'une estimation de son état, il est nécessaire de connaître le lien

entre la contrainte (court-circuit) et l'évolution de ses caractéristiques, ce lien reste à établir.

6. REFERENCES

- [1] L. Lorenz. Fast switching power semiconductor devices and Smart Power IC's: An enabling technology for future high efficient electronic system. International Symposium on VLSI Technology Systems and Applications (VLSI-TSA), 2010.
- [2] M. Nelhieb et al. A reliable technology concept for active power cycling to extreme temperatures. *Microelectron Reliab* 2011, 51:1927–32. J. P. Ferrieux, F. Forest, « Alimentations à découpage, convertisseurs à résonance : principes, composants, modélisation », 3^{ème} édition, Dunod, collection Sciences Sup, 2006.
- [3] S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran, P. Tavner. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review. *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 25, No. 11, 2010
- [4] D. Martineau et al. Characterization of alterations on power MOSFET devices under extreme electro-thermal fatigue. *Microelectronics Reliability*, vol. 50, pp. 1768–1772. 2010.
- [5] A. Testa, S. De Caro and S. Russo. A Reliability Model for Power MOSFETs Working in Avalanche Mode Based on an Experimental Temperature Distribution Analysis. *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 27, no. 6, june 2012
- [6] M. Riccio *and al.* 3-D electrothermal simulation of active cycling on smart power MOSFETs during Short-Circuit and UIS conditions. *Microelectronics reliability*, Volume 54, Issues 9-10, Sept. Oct. 2014, pages 1845-1850.