

Contribution à la conception de structures de packaging pour les modules de puissance très haute tension : contraintes sur les isolants

Hélène HOURDEQUIN^{1,2}, Lionel LAUDEBAT^{1,2,3}, Marie-Laure LOCATELLI^{1,2}, Pierre BIDAN^{1,2}

¹ Université de Toulouse ; UPS, INP ; LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie) ; 118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse, France. ² CNRS ; LAPLACE ; F-31062 Toulouse, France. ³ Centre Universitaire Jean-François Champollion ; Place de Verdun 81012 Albi Cedex, France.

RESUME –L'utilisation des composants de puissance à semi-conducteur grand gap de très forte tenue en tension est un défi pour le système d'isolation électrique des modules de puissance. En particulier, la zone de point triple, entre le substrat isolant, les pistes métalliques et l'encapsulation, est soumise à de forts champs électriques. Ces champs peuvent dépasser la rigidité diélectrique des isolants utilisés et conduire à des décharges partielles ou même à une rupture de l'isolation. L'emploi des composants très haute tension (> 10 kV) nécessite donc une adaptation du packaging et la mise en œuvre d'une structure adaptée. La méthode de simulation par éléments finis permettra d'analyser la répartition du champ électrique dans le module et de valider la nouvelle structure proposée. Une amélioration significative de la répartition du champ électrique par la modification des matériaux ou de la structure elle-même sera montrée.

Mots-clés : module de puissance, substrat isolant métallisé, point triple, méthode des éléments finis.

1. INTRODUCTION

L'arrivée des matériaux semi-conducteurs à grand gap comme le carbure de silicium (SiC) permet le développement de puces de tailles plus petites et pouvant chacune tenir des tensions bien supérieures (au-delà de 6,5 kV et jusqu'à quelques dizaines de kV), comparées aux puces en silicium actuellement disponibles [1]. Par conséquent, l'environnement de ces nouveaux composants doit être complètement réadapté pour faire face à leurs spécificités nouvelles, comme la forte densité de courant induite par la taille réduite des composants et par voie de conséquence la forte dissipation thermique par unité de surface. De plus, la très grande rapidité de commutation de ces composants nécessite de prendre des précautions pour limiter les inductances parasites. Enfin, ces niveaux de tensions élevés envisagés impliquent la tenue en tension des matériaux isolants.

La structure typique d'un module de puissance 6,5 kV à « Insulated Gate Bipolar Transistor » (IGBT) en silicium est représentée sur la Fig.1. Un substrat céramique métallisé est brasé sur un dissipateur thermique et les puces sont brasées sur la métallisation. Le substrat est soit en alumine, soit en nitrure d'aluminium (AlN) pour de meilleures propriétés thermiques. On peut aussi envisager l'utilisation de nitrure de silicium aux

excellentes propriétés mécaniques. La métallisation, généralement en cuivre, est fixée sur le substrat céramique par un procédé « Direct Bonded Copper » (DBC) ou bien « Active Metal Braze » (AMB). Le module entier est actuellement rempli par une encapsulation de gel silicone, mais on peut envisager l'utilisation d'une résine époxy [2]. Les connexions en face avant des puces sont le plus souvent assurées par des fils (bonding) ou des rubans [3].

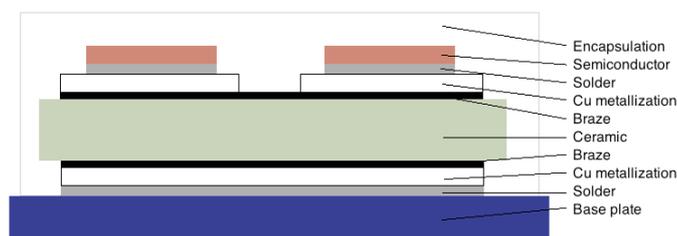


Fig.1 Représentation schématique d'un module de puissance avec métallisation AMB. Le DBC n'a pas de brasure.

2. LE SYSTEME D'ISOLATION ELECTRIQUE

Le module de puissance est environné de deux isolants principaux : le substrat en céramique et le gel silicone utilisé comme agent d'encapsulation. L'interface de ces deux isolants est l'un des points faibles du module : plus précisément la jonction (point triple) entre substrat/métallisation/encapsulation qui est une zone de renforcement du champ électrique, comme le montre la Fig.2. Le champ peut y dépasser le seuil d'apparition des décharges partielles (PDIV), aboutissant avec le temps à la défaillance du module.

Des travaux de recherche ont été réalisés sur les matériaux d'encapsulation dans le but d'améliorer la distribution du champ électrique au point triple par l'utilisation de matériaux semi-résistifs sous forme de vernis à base de silicium [4] favorisant l'étalement des équipotentielles. D'autres technologies, comme les matériaux résistifs non linéaires fabriqués à partir d'un polymère chargé de particules, de conductivité variable en fonction du champ électrique, en SiC ou en oxyde de zinc [5][6], confèrent une meilleure conductivité dans les zones à fort champ. Enfin les matériaux à haute permittivité fabriqués à partir d'un polymère chargé de

particules de permittivité variable (fonction du champ électrique) en titano-zirconate de plomb ou en titanate de baryum ($BaTiO_3$), permettent aussi de repousser les équipotentielles [7]. Les résultats de cette dernière approche sont significatifs, avec une amélioration de 60% du seuil des PDIV dans le cas d'un module IGBT encapsulé dans un gel silicone chargé à 15 vol.% de $BaTiO_3$, par comparaison avec un encapsulant non chargé.

Pour concevoir un packaging résistant à la très haute tension, la seule modification de l'encapsulation n'est pas suffisante. Les travaux portant sur la modification géométrique du substrat sont plus rares et principalement orientés vers l'amélioration du comportement thermique et surtout thermomécanique du module de puissance. Pourtant un changement de structure par l'ajout d'une « poche » sous le substrat céramique [8], a montré en simulation une amélioration en termes d'isolation électrique, par la réduction de l'intensité du champ électrique au point triple.

Cet article propose donc l'action sur la géométrie du substrat pour résoudre la problématique du point triple.

3. ETUDE DE LA REPARTITION DU CHAMP ELECTRIQUE PAR SIMULATION

La méthode des éléments finis (FEM) permet de simuler la distribution de champ électrique à l'intérieur du module de puissance afin d'évaluer l'effet des propriétés des matériaux et de l'architecture même de la structure. La simulation fournit des résultats quantitatifs sur le champ électrique permettant ainsi d'étudier différentes configurations de substrats DBC qui peuvent être comparées. Pour l'étude de l'isolation électrique, la structure modélisée est celle classiquement représentée sur la Fig.3, avec le substrat DBC, le gel silicone qui encapsule l'ensemble du module et les électrodes en cuivre.

Une modification de la structure DBC (Fig.5), par la création d'un espace entre les deux électrodes qui forme ainsi deux mesa structures (sans augmenter son épaisseur mais avec des paramètres sur la géométrie et les matériaux qui seront précisés dans l'article final), permet de diminuer l'intensité du champ électrique au point triple de 57%, par comparaison avec une configuration classique, comme le montrent les Fig. 4 et Fig. 6.

4. CONCLUSIONS

Grâce à une analyse par FEM, ce travail démontre l'intérêt de structures originales de substrats isolants métallisés pour le packaging des modules de puissance, proposées en vue de permettre l'utilisation des nouvelles puces SiC destinées aux applications très haute tension.

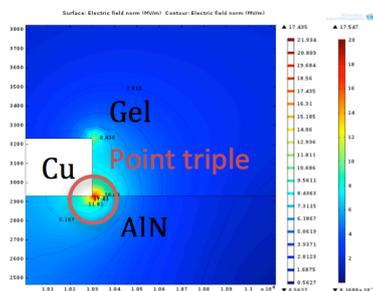


Fig.2 Champ électrique au point triple sous COMSOL Multiphysics (application de 15kV sur l'électrode en Cu visible sur la figure, les autres électrodes sont à la masse) en condition électrostatique, équations résolues : Maxwell-Gauss et Poisson.

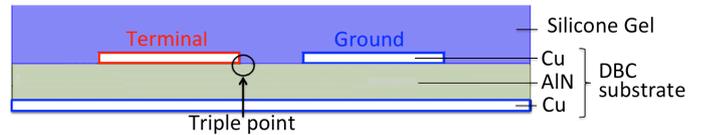


Fig.3 Géométrie pour la simulation « Usual structure ».

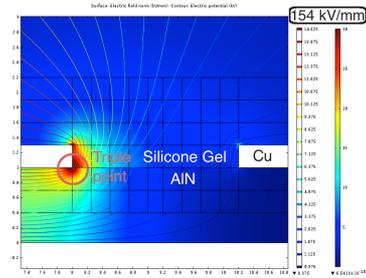


Fig.4 « Structure usuelle » : champ électrique en dégradé de couleur et équipotentielles en lignes.

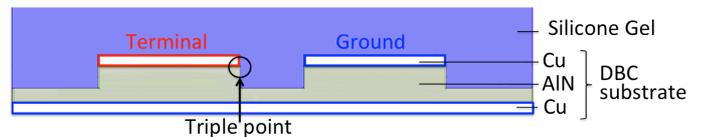


Fig.5 Géométrie pour la simulation « Mesa structure ».

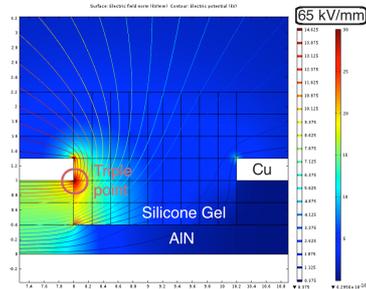


Fig.6 « Structure mesa » : champ électrique en dégradé de couleur et équipotentielles en lignes.

5. REFERENCES

- [1] S. Ryu, C. Capell, C. Jonas, Y. Lemma, M. O'Loughlin, J. Clayton, E. Van Brunt, K. Lam, J. Richmond, A. Burk, D. Grider, S. Allen, and J. Palmour, « Ultra High Voltage IGBTs in 4H-SiC », Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), IEEE Workshop on, pp.36,39, 2013
- [2] Masafumi Horio, Yuji Iizuka, Yoshinari Ikeda, « Packaging Technologies for SiC Power Modules », FUJI ELECTRIC REVIEW, vol.58, no.2, pp.75,78, May 2012
- [3] L. Ménager, B. Allard, V. Bley, « Conditionnement des modules de puissance », article Techniques de l'Ingénieur, 2010
- [4] G. Mitic, T. Licht, G. Lefranc, « IGBT Module Technology with High Partial Discharge Resistance », Industry Applications Conference, Thirty-sixth IAS Annual Meeting, vol.3, pp.1899,1904, 2001
- [5] C. Duchesne, Contribution à l'étude de la gradation de potentiel dans les modules de puissance haute tension, PhD Thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2009
- [6] L. Donzel, J. Schuderer, « Nonlinear resistive electric field control for power electronic modules », Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.19, no.3, pp.955,959, June 2012
- [7] Ningyan Wang, I. Cotton, J. Robertson, S. Follmann, K. Evans, D. Newcombe, « Partial discharge control in a power electronic module using high permittivity non-linear dielectrics », Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.17, no.4, pp.1319,1326, August. 2010
- [8] C. Wesley Tipton, D. Ibitayo, D. Urciuoli, G. K. Ovrebø, « Development of a 15kV Bridge Rectifier Module Using 4H-SiC Junction-barrier Schottky Diodes », Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.18, no.4, pp.1137,1142, August 2011