



HAL
open science

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

Hélène Hourdequin, Lionel Laudebat, Marie-Laure Locatelli, Pierre Bidan

► To cite this version:

Hélène Hourdequin, Lionel Laudebat, Marie-Laure Locatelli, Pierre Bidan. Contribution à la conception de structures de packaging pour les modules de puissance très haute tension : contraintes sur les isolants. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361698

HAL Id: hal-01361698

<https://hal.science/hal-01361698>

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.

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 Institut National Universitaire Champollion ; Place de Verdun 81012 Albi Cedex, France.

RESUME –L'emploi des composants très haute tension (> 10 kV) nécessite la mise en œuvre d'une structure adaptée pour leurs packaging. En particulier dans la zone du point triple, entre le substrat isolant, les pistes métalliques et l'encapsulation, résident de forts champs électriques. Une nouvelle architecture est proposée pour le substrat céramique métallisé. Son intérêt est validé à l'aide de la méthode de simulation par éléments finis pour analyser la répartition du champ électrique à l'intérieur du module de puissance. Il est montré que la création d'un espace entre les électrodes supérieures, formant ainsi des structures dénommées mesas, permet une amélioration significative de la répartition des lignes équipotentielles. Le champ électrique maximal résultant décroît de façon exponentielle par rapport à la hauteur de la structure mesa, ces résultats sont meilleurs que lorsque l'on procède à une simple augmentation de l'épaisseur de la céramique dans une structure de module classique.

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 supporter des niveaux de tensions bien supérieurs (au-delà d'une dizaine de kV), comparées aux puces en silicium actuellement disponibles. La disponibilité de démonstrateurs très haute tension (comme des diodes bipolaires [1], et transistors [2], [3], [4]), permet une évolution majeure dans le domaine de l'électronique de puissance et fait apparaître un besoin nécessaire d'adapter les caractéristiques du packaging des modules de puissances actuels. L'environnement de ces nouveaux composants doit évoluer 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, et c'est sur ce point que nous nous attarderons particulièrement, les tensions envisagées impliquent une plus haute 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. Les trois principaux rôles du packaging d'un module sont de protéger et d'isoler la puce de

son environnement, d'évacuer la chaleur dissipée par les puces, et enfin de fournir une liaison électrique entre les puces et les connexions de puissance. À l'intérieur du module, les puces semi-conductrices sont brasées sur un substrat céramique métallisé, qui doit assurer à la fois une excellente conductivité thermique et l'isolation électrique. Les matériaux céramiques les plus couramment utilisés sont l'alumine (Al_2O_3) et le nitrure d'aluminium (AlN). La métallisation est généralement réalisée par une couche épaisse de cuivre qui est relié par un oxyde, soit par un procédé de liaison eutectique (« *Direct Bonded Copper* », DBC), ou bien par un procédé de brasage métallique actif (AMB). Le substrat céramique est ensuite fixé sur une semelle (ex. AlSiC) qui assure le maintien mécanique de l'assemblage et le transfert thermique vers la source froide. Le module entier est généralement plongé dans un matériau d'encapsulation, typiquement un gel silicone, afin d'assurer la rigidité diélectrique le long des surfaces du substrat et entre toutes les autres parties du module sujets à de forts champs électriques. L'utilisation d'une résine époxy peut être envisagée afin de rigidifier encore d'avantage la structure notamment les connexions [5]. Les connexions en face avant des puces sont assurées par des fils (*bonding*) ou des rubans [6], afin de relier électriquement les différentes puces et plaquettes.

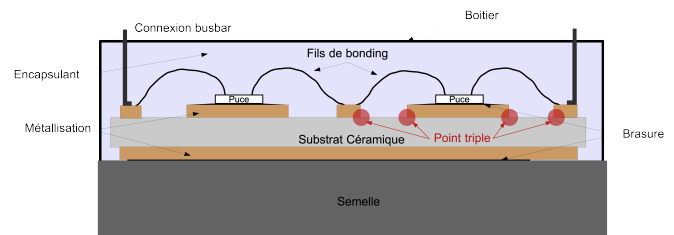


Fig. 1 Représentation schématique d'un module de puissance.

Cet article se focalise sur le substrat céramique utilisé dans l'isolation des modules de puissance. Les céramiques sont les seuls isolants électriques ayant de bonnes propriétés thermiques. L'épaisseur minimale de ce substrat est imposée par la tension d'isolation visée et dépend de la rigidité diélectrique du matériau. Pour les modules de fortes puissances, l'AlN est le seul matériau qui offre le meilleur compromis thermique et électrique. En pratique, l'épaisseur du substrat employé est de 0,320 mm pour une tenue en tension inférieure à 1,2 kV, de

0,635 mm pour des tensions allant de 1,7 à 3,3 kV et de 1 mm pour les modules de 6,5 kV. Aujourd'hui, l'épaisseur maximale disponible pour le substrat AlN est de 1 mm.

Le point triple créé à la jonction entre substrat/métallisation/encapsulation est l'un des points faibles du module de puissance. Cette région, au bord de la métallisation du substrat, est une zone de renforcement du champ électrique, zone indiquée avec les points en rouge sur la Fig. 1. Le champ peut y dépasser le seuil d'apparition des décharges partielles (PDIV) du gel silicone couramment utilisé comme encapsulant, aboutissant avec le temps à des décharges partielles ou même à la rupture de l'isolation.

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 à gradation de champs en couche résistive sur la surface du substrat, ou bien un composite haute permittivité. Un film résistif sous forme de vernis à base de silicium [7] est déposé sur le substrat et contribue à l'étalement des équipotentielles dans cette zone. Cela permet de réduire la contrainte électrique, mais cela peut aussi conduire à des pertes supplémentaires par effet Joule. Les matériaux résistifs non linéaires qui peuvent être mise en œuvre à partir d'un polymère chargé de particules de SiC ou en oxyde de zinc, confèrent une grande conductivité dans les zones à fort champ [8] [9] et peuvent être une solution d'amélioration. Une autre voie consiste à augmenter la permittivité d'un revêtement plutôt que d'agir sur la résistivité. Les matériaux fabriqués à partir d'un polymère chargé de particules à haute permittivité en titano-zirconate de plomb ou en titanate de baryum ($BaTiO_3$), peuvent contribuer à mieux répartir les équipotentielles [10], et ainsi augmenter le seuil des PDIV et de la rupture diélectrique. 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 par un gel silicone chargé à 15 vol.% de $BaTiO_3$, par comparaison avec un encapsulant non chargé. D'autres technologies sont étudiées comme un composite époxy/alumine micro-chargé [11], pour qui l'addition de nanoparticules permet d'augmenter la rigidité diélectrique et la résistance aux décharges partielles.

Pour concevoir un packaging résistant à très haute tension, la seule action sur la modification de l'encapsulation n'est actuellement pas suffisante. Les travaux portant sur la modification géométrique du substrat pour des contraintes d'isolation sont plus rares et principalement orientées vers l'amélioration du comportement thermo-mécanique du module de puissance, ou bien sur l'abaissement des inductances parasites. Pourtant un changement de structure par l'ajout d'une « poche » sous le substrat céramique [12] a montré en simulation une amélioration en termes d'isolation électrique, par la réduction de l'intensité du champ électrique au point triple. Une autre proposition consistant à incorporer la métallisation dans le substrat a été proposée [13]. Cette solution a l'avantage de localiser le champ électrique maximal à l'intérieur du substrat, dont les caractéristiques, notamment en terme de rigidité électrique ou de seuil d'apparition des décharges partielles, peuvent être mieux maîtrisées que celles du gel de silicone.

Cet article propose donc une action sur la géométrie du substrat, par la création d'une structure mesa, afin d'améliorer la distribution du champ électrique au point triple. L'objectif étant de minimiser le renforcement du champ électrique en ce point par l'évaluation et l'optimisation de la géométrie du

packaging en utilisant l'outil de simulation numérique avec les éléments finis comme moyen de dimensionnement préalable.

2. PRESENTATION DE LA METHODE

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 de celui-ci. La simulation fournit des résultats quantitatifs sur le champ électrique permettant ainsi d'étudier et de comparer différentes configurations de substrats. Les équations associées à une analyse électrostatique sont résolues par FEM sous COMSOL Multiphysics :

$$\text{Maxwell-Gauss} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (1)$$

$$\text{Poisson} \quad \vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (2)$$

Afin d'étudier le système d'isolation électrique, la structure modélisée est généralement représentée par le substrat métallisé, le gel silicone encapsulant et les électrodes en cuivre. Le modèle est maillé en utilisant une forme quadrilatère représenté en Fig. 2, ce maillage est le mieux adapté à la forme de la structure simulée. En effet, cette structure de maillage a été choisie afin de parfaitement contrôler et fixer la taille des éléments. Ceci nous permettra de comparer les résultats de la simulation pour les différentes structures.

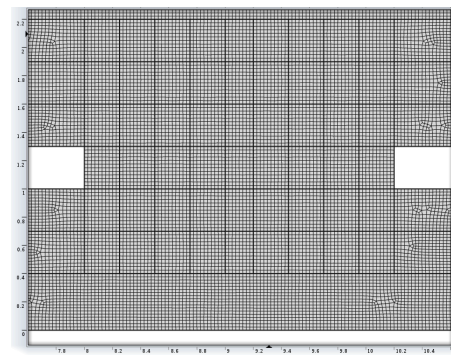


Fig. 2 Maillage généré sous COMSOL Multiphysics. La taille du maillage est fixée à $0,025 \times 0,025 \text{ mm}^2$.

2.1. Structure conventionnelle

La géométrie proposée pour la simulation est une géométrie typique d'un substrat DBC avec une céramique de 1 mm d'épaisseur.

Dans un premier temps, nous avons fait le choix de ne pas représenter le profil de gravure réel mais un profil de gravure académique, dans le but de générer un maillage contrôlé. Par la suite, nous aborderons le cas d'un profil réel de gravure et vérifierons le bénéfice apporté par la structure proposée.

Deux électrodes placées sur le substrat sont considérées comme des conducteurs parfaits et positionnées à 2 mm l'une de l'autre. Une autre électrode est placée en face arrière du substrat. Le milieu environnant est le matériau encapsulant en gel silicone. L'électrode de gauche en face avant du substrat est au potentiel électrique de 15 kV (en rouge nommé « Terminal » dans la Fig. 3) et les autres électrodes sont reliées à la masse.

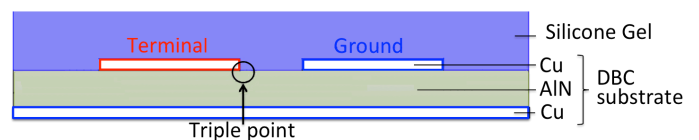


Fig. 3 Géométrie pour la simulation de la « structure conventionnelle ».

Par la suite, cette structure est considérée comme notre "référence". Les résultats obtenus par simulation seront comparés à d'autres solutions où une modification de la structure a été effectuée.

2.2. Structure Mesa

L'objectif est de créer une structure qui puisse améliorer la répartition du champ électrique au niveau du point triple.

Sur la Fig. 4, une modification de la structure par la création d'un espace entre les deux électrodes et formant ainsi deux structures mesas est proposée.

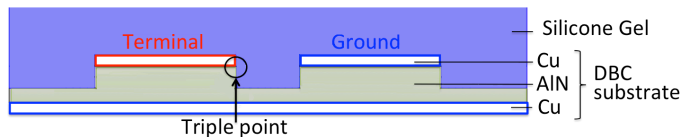


Fig. 4 Géométrie pour la simulation de la « structure Mesa ».

Les simulations des champs électriques et des potentiels sont réalisées pour cette structure avec la même source de tension 15 kV que la structure classique. La hauteur du mesa est modifiée, tout en gardant l'épaisseur initiale du substrat céramique égale à 1 mm sous les électrodes supérieures (Terminal et Ground), pour pouvoir procéder à une comparaison avec la structure de référence de la Fig. 3. Par la suite, les cas de céramiques plus épaisses seront aussi considérés.

3. ETUDE DE LA REPARTITION DU CHAMP ELECTRIQUE PAR SIMULATION

La Fig. 5 correspond à la simulation par FEM de la structure de référence (Fig. 3), sur lequel est représentée les équipotentielles et la cartographie de l'intensité du champ électrique (des couleurs les plus chaudes pour les niveaux de champ les plus élevés au plus froides pour les champs faibles). L'unique paramètre des matériaux est la permittivité relative de la céramique et du gel silicone, respectivement égales à 9 et 2,7. L'ordre de grandeur du champ électrique est affiché sur la Fig. 5 et montre une valeur maximale de 154 kV/mm qui est obtenue dans la zone du point triple pour cette structure de référence.

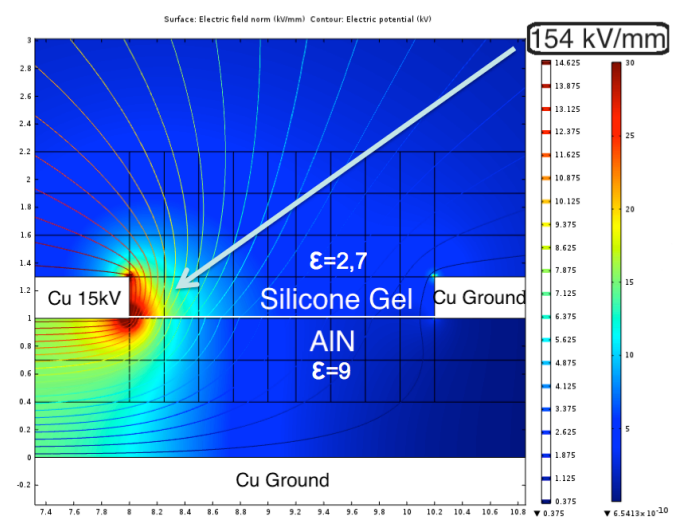


Fig. 5 Distribution du champ électrique dans « Structure conventionnelle ».

La structure de référence est ensuite modifiée pour obtenir la structure en mesa présentée auparavant avec une hauteur de 0,6 mm (Fig. 6). En simulant avec les éléments finis cette

structure, nous obtenons un champ électrique maximal de 65 kV/mm pour les mêmes paramètres de maillage, ce qui signifie que la contrainte au point triple est considérablement relâchée (diminution de 57% du champ électrique par rapport à la structure conventionnelle Fig. 5).

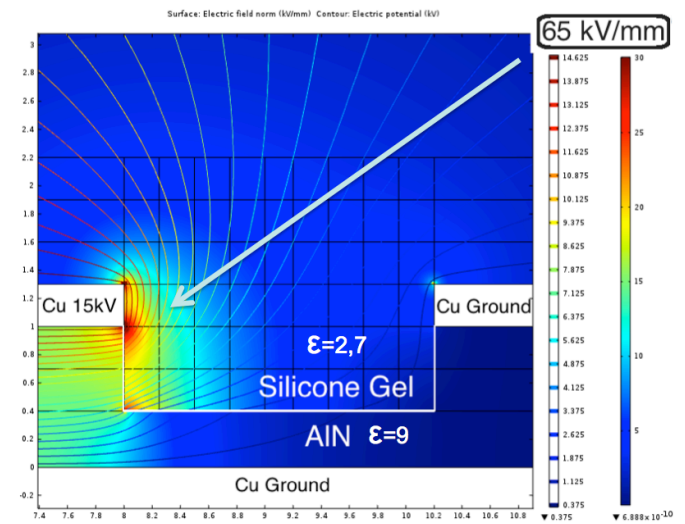


Fig. 6 Distribution du champ électrique dans une « Structure mesa » de hauteur 0,6 mm.

L'observation en Fig. 7 de la localisation des points de contraintes, révèle que la structure conventionnelle en possède deux, à chaque extrémité des électrodes et le renforcement de champ le plus élevé se situe au point triple dans le substrat. Dans le cas de la structure mesa, on observe 3 points de contraintes, aux extrémités des électrodes et dans le fond du mesa. On constate que le renforcement du champ est quasiment le même aux deux extrémités des électrodes.

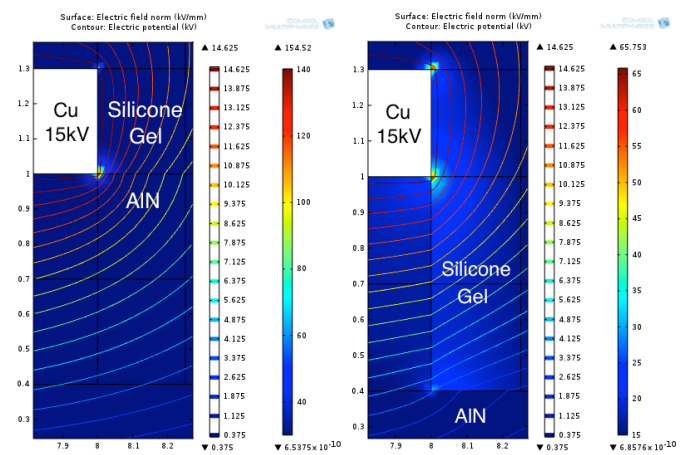


Fig. 7 Localisation des renforcements du champ électrique dans la « Structure conventionnelle » et la « Structure mesa ».

D'autres hauteurs des mesas ont été testées, allant de 0 à 0,6 mm, dans l'épaisseur de substrat de 1 mm, afin d'évaluer l'effet de la hauteur du mesa sur le champ au point triple. La Fig. 8 (courbe noire) montre que la relation entre le champ électrique au point triple et la hauteur des mesas est inversement exponentielle. Ceci nous permet de montrer qu'une diminution significative du champ électrique au point triple, par la création de mesas dans 1 mm d'épaisseur de substrat peut être obtenue, sans a priori détériorer la résistance thermique (en première approche) puisque l'épaisseur du substrat sous les électrodes reste identique à celle de la structure de référence.

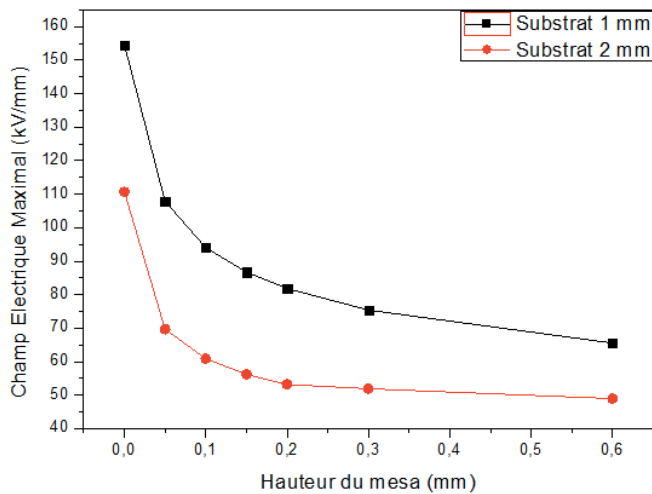


Fig. 8 Variation du champ électrique maximal au point triple en fonction de la hauteur des mesas (0; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,6 mm).

Néanmoins, les valeurs de champs électriques obtenues pour un potentiel d'électrode de 15 kV et pour un substrat d'épaisseur 1 mm, restent élevées comparé à la rigidité diélectrique des matériaux isolants [14]. La solution consistant à doubler l'épaisseur de l'AlN a ainsi été simulée (Fig. 8, courbe rouge). On observe alors une diminution du champ électrique au point triple avec l'augmentation de l'épaisseur et toujours un effet bénéfique de la structure mesa apportant une réduction supplémentaire du champ.

Pour montrer les atouts de la structure mesa, une comparaison avec la structure conventionnelle est effectuée. Les simulations indiquent que, même avec une augmentation de l'épaisseur du substrat en AlN de 3 mm (présenté Fig. 9), la réduction du champ électrique au niveau du point triple qui en résulte, ne pourra jamais être aussi importante que celle qui peut être obtenue dans le cas d'un substrat plus mince (Fig. 8) comportant des mesas même de hauteur assez faible (0,2 ou 0,3 mm).

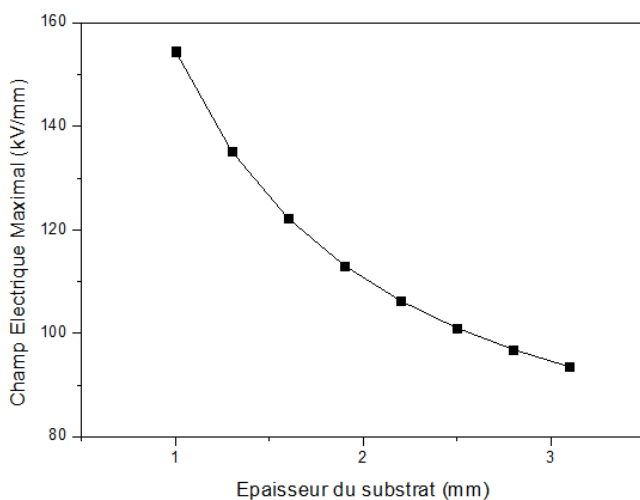


Fig. 9 Variation du champ électrique maximal au point triple en fonction de l'épaisseur du substrat sur une « structure conventionnelle ».

4. ETUDE DE LA REPARTITION DU CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CADRE D'UNE GEOMETRIE REELLE

La géométrie réelle d'une métallisation d'un substrat DBC classique est représentée sur la photo Fig. 10. La forme géométrique de la métallisation est directement conditionnée par les caractéristiques du procédé de gravure. On remarque

que le bord de la métallisation n'est pas franc, mais forme une courbure avec un effet de pointe à l'interface métallisation/céramique. Ce dernier engendre un renforcement de champ local en ce point.

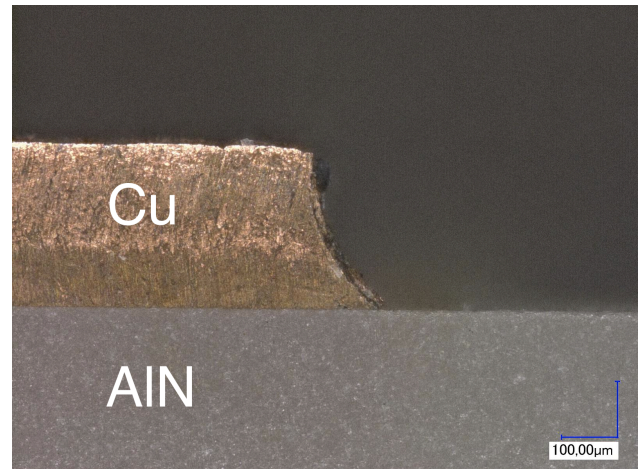


Fig. 10 Vue en coupe du profil de gravure réel d'un substrat DBC.

La simulation par FEM d'une structure contenant une forme de gravure réelle, implique une contrainte sur le maillage qui ne pourra pas être aussi bien maîtrisé que dans le cas précédent. Le maillage est toutefois contraint au niveau du point triple avec l'application des mêmes mailles quadrilatères de $0,025 \times 0,025 \text{ mm}^2$. Nous avons vérifié que le maillage était bien le même dans la zone de renforcement de champ pour les simulations avec et sans mesa, afin de pouvoir comparer les valeurs. Du fait de la géométrie, le maillage évolue suivant le contour de la gravure comme le montre la Fig. 11.

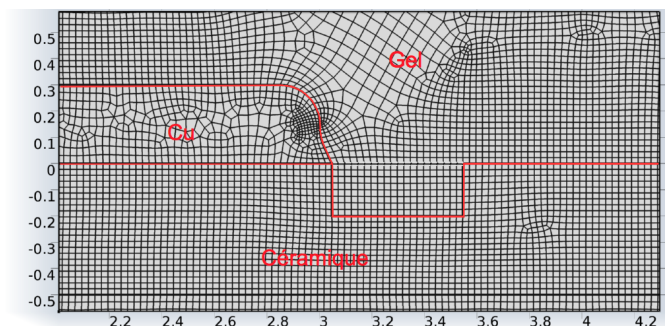


Fig. 11 Maillage adapté à la forme réelle de l'électrode avec mesa.

Dans le cadre de la gravure (Fig. 10), nous avons procédé à une simulation FEM où nous obtenons une valeur de champ électrique maximal de 190 kV/mm dans la zone du point triple. Cette valeur est bien plus élevée que sur la structure de référence (géométrie académique), conséquence de la géométrie en pointe.

Si nous intégrons une structure mesa de hauteur de 0,2 mm et de largeur 0,5 mm, nous pouvons observer sur la Fig. 12 la répartition de champ électrique. Une valeur du champ électrique réduite à 114 kV/mm est mesurée, soit une amélioration de 40% de la valeur précédente, imputable à l'effet de la structure mesa.

Contrairement à la structure classique, l'introduction d'un mesa répartit les contraintes, ce qui peut avoir du bon, en diminuant le champ électrique maximal mais aussi du moins bon, en créant des contraintes ailleurs (Fig. 13). Notamment au niveau du fond du mesa, dont la géométrie exacte dépendra de sa mise en œuvre.

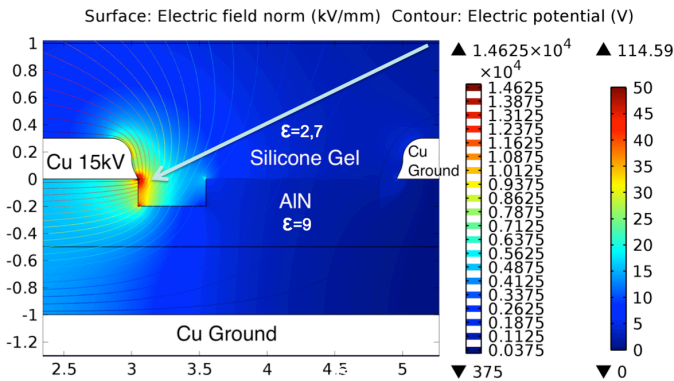


Fig. 12 Distribution du champ électrique dans une « Structure mesa » aux profils de gravure réels de hauteur 0,2 mm et de largeur 0,5 mm.

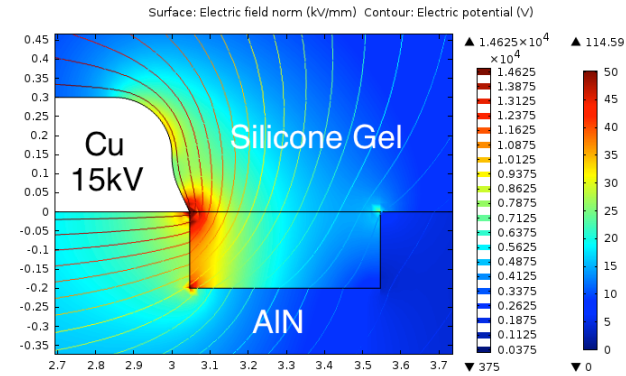


Fig. 13 Grossissement sur la zone de renforcement du champ électrique de la « Structure mesa » aux profils de gravure réels.

Concernant le procédé de mise en œuvre d'une structure mesa, il peut être réalisé par usinage avant ou après frittage, l'inconvénient étant, que la rigidité mécanique de l'AlN après frittage entraîne des complications pour l'usinage. D'autres moyens peuvent être envisagés, comme une préforme en matrice céramique ou bien une fabrication additive, mais des difficultés de dépôts des électrodes en cuivre après fabrication sont à prendre en considération, notamment l'alignement entre la mesa et l'électrode.

Des tests préliminaires de gravure au laser sur un substrat DBC en alumine d'épaisseur 0,635 mm ont été effectués, dans le but de créer un mesa. Les résultats sont encourageants (Fig. 14) mais le processus de gravure est à affiner et les éventuelles modifications post gravure sont à étudier pour l'amélioration de l'état de surface (le fond du mesa).

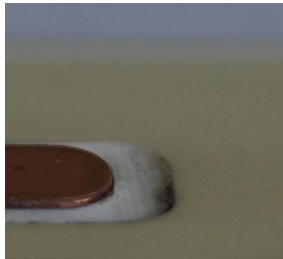


Fig. 14 Substrat DBC en alumine contenant un mesa gravé au laser.

5. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons étudié une nouvelle structure géométrique pour réduire l'intensité du champ électrique en un point singulier : le point triple. Par le biais de l'analyse FEM, nous avons comparé une structure conventionnelle à une structure mesa. Ce travail démontre l'intérêt de l'utilisation de structures originales sur les substrats isolants métallisés,

apportant un gain significatif d'au moins 57% pour une hauteur de mesa de 0,6 mm. On constate que l'intensité du champ électrique obtenu dans une structure conventionnelle ne pourrait pas être aussi faible que celle obtenue dans une structure mesa, même si l'épaisseur de l'AlN en structure conventionnelle était triplée. La structure mesa pourrait alors permettre le meilleur compromis entre performances électrique et thermique. La prise en compte de la forme réelle des électrodes en simulation montre que le niveau du champ électrique augmente d'avantage à cause de la forme en pointe, et l'optimisation de celle-ci apportera une contribution supplémentaire à la diminution du champ. Des essais expérimentaux seront effectués et comparés avec la simulation. Par ailleurs, la structure ici proposé offre des perspectives en terme de combinaison à d'autres technologies, comme l'emploi de matériaux d'encapsulation innovants, dans le but de cumuler leurs effets bénéfiques sur le point triple.

6. REFERENCES

- [1] T. Kimoto, K. Kawahara, H. Niwa, N. Kaji, J. Suda, « Ion Implantation Technology in SiC for Power Device Applications », Junction Technology (IWJT), International Workshop on, 2014
- [2] Ryu, S. B., Capell, C., Jonas, C., Lemma, Y., O'Loughlin, M., Clayton, J., et al. (2013). « Ultra high voltage IGBTs in 4H-SiC » (pp. 36–39). Presented at the Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), 2013 IEEE Workshop on IS - SN - VO - VL -, IEEE. <http://doi.org/10.1109/WiPDA.2013.6695557>
- [3] Madhusoodhanan, S., Hatua, K., Bhattacharya, S., Leslie, S., Ryu, S.-H., Das, M., et al. (n.d.). « Comparison study of 12kV n-type SiC IGBT with 10kV SiC MOSFET and 6.5kV Si IGBT based on 3L-NPC VSC applications » (pp. 310–317). Presented at the 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE. <http://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342807>
- [4] Miyake, H., Okuda, T., Niwa, H., Kimoto, T., & Suda, J. (2012). « 21-kV SiC BJTs With Space-Modulated Junction Termination Extension ». *IEEE Electron Device Letters*, 33(11), 1598–1600. <http://doi.org/10.1109/LED.2012.2215004>
- [5] Masafumi Horio, Yuji Iizuka, Yoshinari Ikeda, « Packaging Technologies for SiC Power Modules », FUJI ELECTRIC REVIEW, vol.58, no.2, pp.75,78, May 2012
- [6] L. Ménager, B. Allard, V. Bley, « Conditionnement des modules de puissance », article Techniques de l'Ingénieur, 2010
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] Ningyan Wang, I. Cotton, J. Robertson, S. Follmann, K. Evans, D. Newcombe, « Partial discharge control in a power electronic ic module using high permittivity non-linear dielectrics », Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.17, no.4, pp.1319,1326, August. 2010
- [11] Z. Li, K. Okamoto, Y. Ohki, T. Tanaka, « The Role of Nano and Micro Particles on Partial Discharge and Breakdown Strength in Epoxy Composites », Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.18, no.3, pp.675,681, 2011
- [12] C. Wesley Tipton, D. Ibitayo, D. Urciuoli, G. K. Ovrebo, « 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
- [13] D. Frey, J. L. Schanen, J. L. Auge, O. Lesaint, « Electric field investigation in high voltage power modules using finite element simulations and partial discharge measurements », Industry Applications Conference, Thirty-eighth IAS Annual Meeting, vol.2, pp.1000,1005, 2003
- [14] D. Malec, F. Talbi, and F. Lalam, « Dielectric Breakdown Characteristics of Alumina », Solid Dielectrics, IEEE International Conference, July 2010