



HAL
open science

Substrat céramique métallisé en structure mesa pour la montée en tension des modules de puissance

Hélène Hourdequin, Lionel Laudebat, Marie-Laure Locatelli, Zarel Valdez Nava,
Pierre Bidan

► **To cite this version:**

Hélène Hourdequin, Lionel Laudebat, Marie-Laure Locatelli, Zarel Valdez Nava, Pierre Bidan. Substrat céramique métallisé en structure mesa pour la montée en tension des modules de puissance. 3ème Symposium de Génie Electrique (SGE 2018), Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. pp.189304. <hal-02981914>

HAL Id: hal-02981914

<https://hal.science/hal-02981914v1>

Submitted on 28 Oct 2020

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.



HAL Authorization

Substrat céramique métallisé en structure mesa pour la montée en tension des modules de puissance

Hélène HOURDEQUIN¹, Lionel LAUDEBAT^{1,2}, Marie-Laure LOCATELLI¹,
Zarel VALDEZ-NAVA¹, Pierre BIDAN¹

¹ LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie) ; Université de Toulouse, CNRS, UPS, INPT; 118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse, France.

² Université de Toulouse ; Institut National Universitaire Champollion ; Place de Verdun 81012 Albi, France.

RESUME - L'emploi des composants de puissance très haute tension à semi-conducteur grand gap dans les modules de puissance est un défi pour le système d'isolation électrique des modules de puissance. Plus particulièrement, une zone appelée « point triple », située à la jonction entre trois matériaux (substrat / métallisation / encapsulation), est sujette à de forts champs électriques. Des solutions pour contenir cette contrainte sont proposées dans la littérature le plus souvent par action sur l'encapsulant. La solution étudiée ici repose sur un profilage particulier de la céramique, en forme de plateau (mesa). La structure a été mise en œuvre par un usinage ultrason. Les résultats présentés montrent une amélioration significative du seuil de tension d'apparition de décharges partielles.

Mots-clés— *isolants, packaging, point triple, structure mesa, usinage ultrason, décharges partielles.*

1. INTRODUCTION

L'électronique de puissance est à l'aube d'une importante évolution grâce à l'introduction dans les systèmes de nouveaux composants de puissance à semi-conducteur « grand gap ». En effet, l'évolution de la filière technologique à base de carbure de silicium (SiC) permet le développement de puces capables de supporter des tensions supérieures aux tensions actuelles, restreintes depuis quelques années par les propriétés physiques du silicium, tout en permettant de fonctionner à plus haute fréquence de commutation [1]. L'introduction de ces composants impose cependant d'adapter leur environnement pour prendre en compte ces nouvelles performances. D'un point de vue électrique, les contraintes imposées aux matériaux isolants deviennent proches de leurs limites admissibles, notamment dans les configurations de packaging des modules de puissance actuellement utilisées. L'objectif de cet article est de proposer une solution originale permettant d'intégrer les composants de tenue en tension 15 kV, actuellement en phase de développement, dans une structure telle que le module de puissance [2],[3]. Après avoir analysé différentes solutions de packaging, l'étude s'est focalisée sur une zone particulière, appelée zone de point triple située à l'intersection entre le substrat isolant, la métallisation et l'encapsulation, comme spécifié sur la Figure 1. Cette zone est le lieu d'un renforcement de champ électrique qui va contraindre particulièrement l'isolation du système. Au-delà des propriétés intrinsèques des isolants et des compromis sévères qui en résultent déjà, le facteur haute tension des composants à venir

(SiC) va contraindre encore plus fortement l'isolation. Afin d'assurer la fiabilité des systèmes, il est devenu primordial d'axer les recherches sur des moyens pour réduire l'impact des contraintes électriques élevées à l'intérieur des packagings, sans (trop) pénaliser les performances en terme de dissipation thermique, fonctionnement à haute fréquence etc.

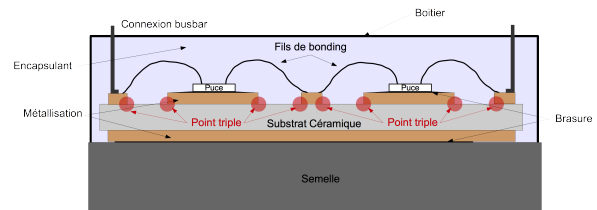


Figure 1 : Représentation schématique d'un module de puissance et localisation de points triples

Différentes approches ont été proposées ces dernières années dans les domaines du génie électrique pour atténuer les renforcements de champ électrique, sans augmenter l'épaisseur du substrat isolant, à savoir [4]:

- Améliorer les propriétés diélectriques de l'isolant d'encapsulation en volume, pour qu'il accepte les forts niveaux de champ électrique, souvent par l'ajout de particules pour augmenter, par exemple, la tenue aux décharges partielles [5].
- Ajouter un film mince dans le système d'isolation permettant soit d'assurer la tenue en tension par un film de polyimide (PI), ou de polyamide-imide (PAI) [6], à l'endroit où la contrainte est la plus importante, soit d'étaler les équipotentielles avec un effet gradateur de champ par l'emploi de vernis semi-résistifs à base de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) [7], ou de vernis semi-résistifs à conductivité non-linéaire à base de polyimide chargé en micro-particules d'oxyde de zinc (ZnO) [8].
- Améliorer localement les propriétés diélectriques de l'isolant d'encapsulation avec des matériaux anisotropes et à gradient de propriétés (*Field Grading Materials* - FGM) [9]). C'est une approche de gradation de potentiel à travers une structuration locale du matériau composite sous forme d'un gradient de permittivité auto-adaptatif localisé là où les contraintes sont les plus intenses [10][11][12].
- Modifier la géométrie des pistes en optimisant les bords de métallisation [13], par un enfouissement des pistes dans le

substrat [14] ou par une élévation de la métallisation avec une géométrie arrondie [15].

Si l'on s'oriente vers une solution « géométrique », par opposition à une solution « matériau », suivant l'état de l'art présenté ci-dessus, les solutions de modification de la métallisation par un arrondissement ou bien même par leur enfouissement semblent déjà représenter un intérêt pour l'atténuation du champ électrique au point triple en particulier dans la partie encapsulation. Mais le verrou commun à ces solutions reste leur faisabilité technologique. Nous allons présenter une structure originale permettant de réduire l'intensité du champ électrique à la fois dans la partie céramique et dans l'encapsulant, en s'appuyant sur une modification géométrique du substrat.

2. SOLUTION D'UN SUBSTRAT EN STRUCTURE MESA

2.1. Principe de la mesa

Une modification de la géométrie par la création d'une structure en plateau à flanc abrupt (mesa) (Figure 2) pour laquelle la métallisation de cuivre affleure le flanc vertical formé dans la céramique va permettre de diminuer le champ électrique au point triple [16]. La répartition du champ électrique au niveau du point triple va dépendre de paramètres physiques des matériaux (permittivité, conductivité) et de paramètres géométriques de la mesa (la hauteur h et la largeur e de la gorge, cf. Figure 2).

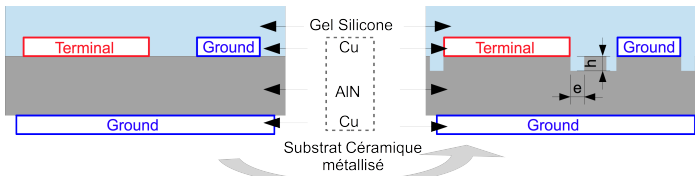


Figure 2 : Modification d'un substrat métallisé classique en structure mesa

Afin d'estimer le bénéfice en terme de diminution du champ électrique, une étude par éléments finis (FEM) de la structure proposée a été réalisée avec le logiciel Comsol Multiphysics. Le champ électrique a la particularité, contrairement au champ magnétique, d'être divergent (cf. équations de Maxwell-Gauss $\text{div } \vec{E} = \rho_v / \epsilon_0$), ses lignes de champ ne sont pas fermées, elles divergent autour des sources et donc, dans le cas du substrat, autour du point triple. La valeur théorique du champ tend vers l'infini. Il s'agit d'une singularité dont la solution numérique sera donc très sensible au maillage qui permet de discrétiser la structure. Par conséquent, pour une même structure et de mêmes conditions d'application de potentiels, le paramètre principal influant sur la valeur calculée du champ électrique proche des zones de divergence, est le maillage (exemple Figure 3 pour deux maillages différents).

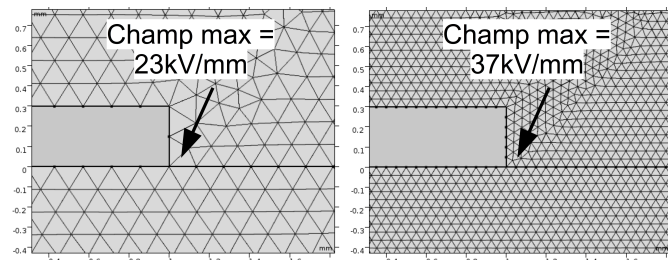


Figure 3 : Comparaison du champ électrique maximal pour 2 tailles de maillage différentes (150µm à gauche et 50µm à droite)

En partie déterminées par les choix du concepteur, et en partie déterminées automatiquement par l'outil de simulation

(maillage auto-adaptatif notamment aux frontières entre les sous-domaines), les caractéristiques du maillage (dont la taille minimale des mailles aux interfaces, aux points triples, etc.) dépendent aussi de la géométrie de la structure. Pour contourner le problème et permettre une étude comparative des différentes structures, nous avons proposé un maillage défini au préalable sur lequel est implanté la géométrie de la structure, cette étude est détaillée dans [16]. La taille minimale des maillages rectangulaires utilisées a été fixée à 25 µm.

En maîtrisant le maillage et avec les mêmes paramètres pour chacun des matériaux (permittivités relatives de l'encapsulant et du substrat céramique respectivement de 2,7 et de 9, et épaisseurs de la métallisation et du substrat respectivement de 0,3 mm et 1 mm), des simulations électrostatiques ont été menées pour comparer la structure mesa à une structure conventionnelle (Figure 4).

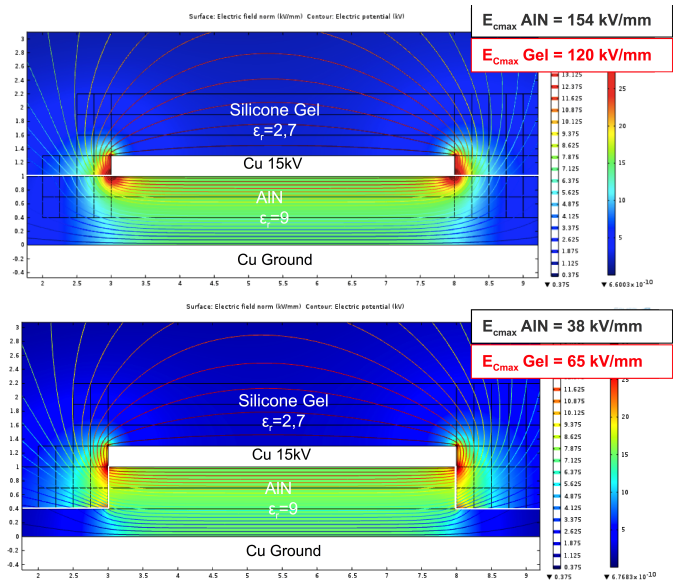


Figure 4 : Comparaison des simulations électrostatiques pour la structure mesa (en bas) et la structure conventionnelle (en haut)

Pour cette configuration, simulée pour une tension de 15 kV avec une hauteur du flanc de la mesa de 0,6 mm, le champ électrique maximal, situé au point triple, est de 65 kV/mm dans la partie gel silicone, et il est de 38 kV/mm dans le substrat, comme le montre la Figure 4 (en partie inférieure). Comme on peut l'observer, la contrainte au point triple est considérablement réduite par rapport à celle de la structure conventionnelle (en partie supérieure de la Figure 4, indiquant des valeurs maximales de 120 kV/mm dans l'encapsulation et de 154 kV/mm dans le substrat), avec une réduction respectivement de 46 % et de 75 % dans l'encapsulant et dans la céramique. On remarque que le matériau encapsulant devient le matériau isolant électriquement le plus contraint dans la structure mesa. Cependant, les zones de contrainte maximale (points triples) ne coïncident plus avec des zones où risquent d'être présents des défauts de fabrication, tels que des bulles d'air qui ont plus tendance à se former aux pieds des reliefs lors de l'élaboration de l'encapsulation. Ainsi, du point de vue des décharges partielles, la structure mesa devrait permettre d'augmenter leur seuil d'apparition, grâce à des champs électriques plus faibles dans les zones sensibles.

2.2. Variation des paramètres de la mesa

La variation de la hauteur h de la gorge dans la céramique (voir Figure 2) a déjà été étudiée dans [16], dont nous rappelons le principal résultat, illustré par la Figure 5,

montrant, pour deux épaisseurs du substrat différentes, que le champ électrique maximal, simulé lorsque h augmente, varie très peu au-delà d'une hauteur de mesa de 0,3 mm.

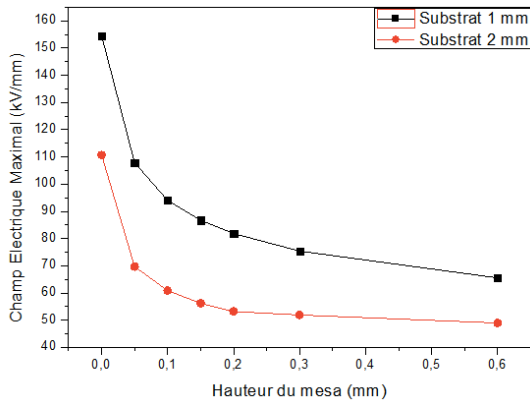


Figure 5 : Evolution du champ électrique maximal au point triple en fonction de la hauteur de mesa, pour deux épaisseurs différentes du substrat en AlN.

Nous avons exécuté les mêmes simulations en fixant cette fois la hauteur de mesa et en faisant varier la largeur e de la gorge. Le résultat est présenté Figure 6. La répartition des équipotentielles n'est plus influencée, conduisant à un champ électrique maximal au niveau du point triple devenant constant en fonction de e , au-delà d'une largeur de gorge proche de 0,5 mm.

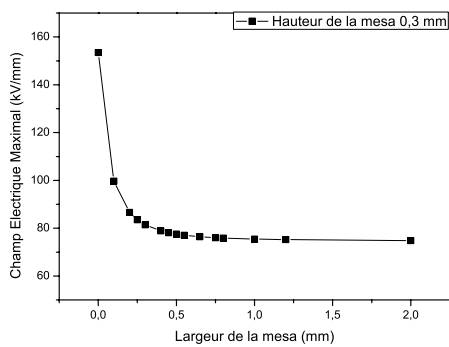


Figure 6 : Variation du champ électrique maximal au niveau du point triple en fonction de la largeur "e" de la mesa (hauteur de flanc fixe de 0,3mm). Application d'une tension de 15kV.

Comme on peut l'imaginer et comme confirmé par les simulations (non présentées ici, cf. [4]), le désalignement de la métallisation avec le substrat et l'inclinaison des parois de la métallisation et de la céramique par rapport à la verticale ont un très fort impact sur la valeur du champ électrique au niveau du point triple. Les valeurs optimales (i.e. minimales) de champ électrique sont obtenues pour des flancs verticaux et, un alignement parfait entre la métallisation et le substrat. Cela met en évidence l'importance de ces caractéristiques géométriques pour la mise en œuvre de la structure mesa.

3. MISE EN OEUVRE

Afin de proposer des prototypes, différentes techniques de mise en œuvre ont été analysées qui peuvent être classées en deux catégories : la mise en forme de la structure mesa à partir d'un substrat métallisé et donc une ablation de la céramique et du métal lors de l'opération ou la fabrication de la céramique en mesa puis une métallisation a posteriori.

3.1. Structuration en mesa lors de la fabrication

Le substrat céramique peut être élaboré par la voie conventionnelle à partir de la poudre de céramique mise en

forme lors du frittage dans un moule préformé en mesa, ou par usinage à cru de la céramique avant frittage. De manière plus innovante, le substrat peut être élaboré et mis en forme par un procédé par ajout de matière : la fabrication additive (ou impression 3D). L'assemblage se fait couche par couche (allant de 10 μm à quelques millimètres suivant la technologie) afin de former la pièce passage après passage (Figure 7). La pièce finale est frittée soit a posteriori (*StereoLithography Apparatus*, Figure 7) [21], ou au cours de l'assemblage des couches (*Selective Laser Sintering*) [22], suivant la technique choisie et le type de matériaux.

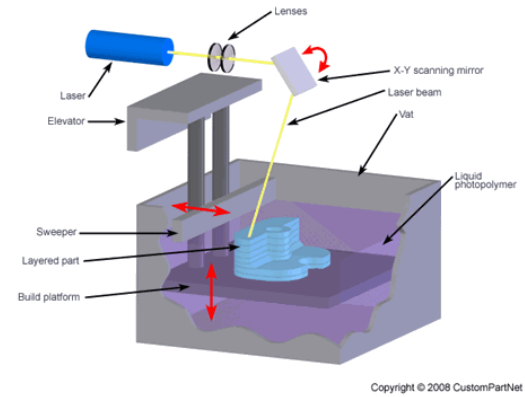


Figure 7 : Schéma de principe de la technique SLA [23].

Cette technologie offre des possibilités qui vont au-delà des autres techniques car elle permet de réaliser des pièces de forme complexe. Elle présente cependant une limitation sur les types de céramique, notamment une difficulté pour mettre en œuvre de l'AlN [24]. Cette voie de structuration en mesa lors de la fabrication nécessite en outre une métallisation a posteriori de la céramique pour obtenir la fonction recherchée. Industriellement, elle s'effectue à l'aide de feuilles métalliques généralement en cuivre ou aluminium de plusieurs centaines de micromètres. Différents procédés de report de ces feuilles sur le substrat céramique existent à l'heure actuelle, dont les plus répandus sont le « *Direct Bonded Copper* » DBC (ou DBA pour l'Aluminium) et l'« *Active Metal Brazing* » AMB, suivant le type de céramique [25][26]. Une voie de « laboratoire » aurait été de métalliser en couche mince par exemple par sérigraphie ou PVD, mais cette configuration n'aurait pas été représentative d'une structure d'électronique de puissance avec des pistes de plusieurs centaines de microns d'épaisseur. Cependant, quelles que soient les voies de métallisation envisagées, le problème du centrage (Figure 8) de l'électrode sur la mesa céramique est une difficulté importante que nous avons proposé de contourner en partant d'un substrat présentant déjà les zones métallisées.

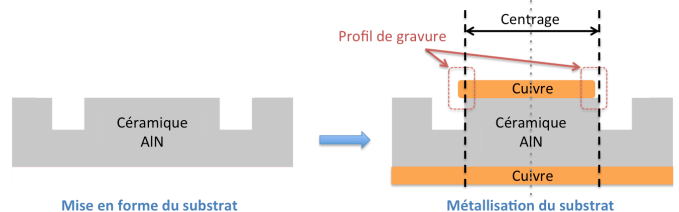


Figure 8 : Schéma descriptif des difficultés lors de la métallisation de la structure mesa

3.2. Structure mesa par ablation

Une approche différente est la création de la mesa par l'ablation de matière d'un substrat déjà métallisé. Dans ce cas, les solutions envisagées peuvent être l'usinage mécanique,

l'ablation laser ou l'usinage ultrasonore en essayant de garantir un alignement des flancs entre le métal et la céramique.

L'usinage mécanique par fraisage ou carottage de la céramique peut être réalisé par un outil diamanté en prévoyant un système de refroidissement thermique pour pallier l'élévation de température en tenant compte de la bonne conductivité thermique de la céramique. Mais cette technique se heurte à la difficulté d'enlever deux matériaux de dureté différente en une seule passe pour obtenir des flancs bien alignés entre les deux matériaux.

L'ablation laser a aussi été envisagée. En effet, parmi les nombreuses applications du laser, se trouve l'usinage. Le laser possède l'avantage par rapport aux techniques de gravure traditionnelles, de ne pas exercer de pression mécanique sur la pièce à usiner, puisque c'est une technique sans contact et par conséquent sans usure pour les outils. Le choix du laser va dépendre du type d'interaction laser / matériau rencontré. Ces interactions vont dépendre à la fois de la source laser (sa longueur d'onde, le temps d'application et la densité de puissance délivrée) et du matériau (sa nature : métal, semi-conducteur, diélectrique; ses propriétés physiques : optiques, thermiques et son état de surface : nature chimique, rugosité) [18]. L'effet thermique engendré par l'interaction laser / matière représente un point faible qui peut néanmoins être en partie pallié par l'utilisation d'un laser pico ou femto-seconde au processus quasi « athermique ». Cependant, la nature différente des matériaux à usiner reste une difficulté pour cette technique vis-à-vis de l'alignement vertical nécessaire de la métallisation avec la mesa céramique, qui peut être compromis au niveau de la zone d'impact (dite Zone Affectée Thermiquement ou ZAT) Enfin, une analyse du matériau post-usinage doit être réalisée pour s'assurer que les propriétés physico-chimiques du substrat n'ont pas été modifiées notamment en surface [19].

La dernière technique envisagée est l'usinage par ultrason qui permet comme le laser de pallier les difficultés rencontrées par l'usinage traditionnel tout en garantissant l'alignement entre l'électrode en cuivre et le substrat céramique. C'est la solution retenue pour la mise en œuvre de nos premières structures de test, comme détaillé ci-après.

3.3. L'usinage par ultrason

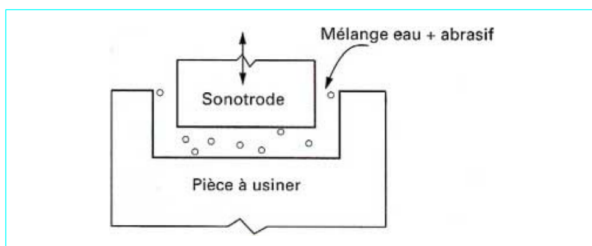


Figure 9 : principe de l'usinage par ultrason [20]

L'usinage abrasif ultrasonore est un procédé de reproduction de forme par abrasion, particulièrement adapté à l'usinage de matériaux durs ou fragiles et cassants (pas de pression mécanique sur la pièce) [20]. Cette abrasion est réalisée par une sonotrode qui est un outil animé d'un mouvement longitudinal avec une fréquence ultrasonore (supérieure à 16 kHz) choisie en fonction du matériau à usiner. La vibration est transmise jusqu'à l'extrémité de la sonotrode mettant en mouvement des particules abrasives très dures appelées aussi grains d'abrasifs (Figure 9). Ces grains d'abrasifs (pouvant être en carbure de silicium) sont accélérés par la vibration de l'outil et viennent arracher la matière sur la

pièce à usiner. L'outillage (la sonde) ne rentre pas en contact direct avec la pièce à usiner. Un gap est laissé entre la pièce et l'outil correspondant à la zone de travail dans laquelle les grains circulent librement à travers un liquide porteur. Un flot constant de ce liquide assure l'évacuation des résidus de matières appelés « copeaux », ainsi que le renouvellement des grains d'abrasifs et l'évacuation de la chaleur.

L'usinage ultrasonore est un usinage numérique permettant l'ablation de matière suivant des profils prédéfinis comme autour de pistes d'un circuit d'électronique à partir des fichiers de C.A.O. Les paramètres d'ablation (puissance de vibration, densité des grains, fréquence, etc.) varient en fonction des matériaux à usiner et les essais présentés dans cette étude sont les premiers tests dans cette configuration avec les matériaux cuivre et le nitrure d'aluminium.

4. RESULTATS

4.1. Profil de l'usinage

Huit échantillons, issus de substrats céramiques AlN de 1 mm d'épaisseur, métallisés avec 300 μm de cuivre (DBC), présentant en face supérieure des motifs de métallisation ronds de diamètre 20 mm, ont été usinés par ultrason. L'usinage par ultrason permet de retirer à la fois le cuivre et l'AlN en une seule passe. Les échantillons ont été usinés par la société Microcertec [28]. La hauteur h visée de paroi verticale de la mesa pour l'usinage ultrasonore est de 250 μm avec une largeur de gorge e de 1 mm (sans intégrer le congé de l'outil d'environ 100 μm). Une vue en coupe d'un échantillon est présentée sur la Figure 10. Pour les besoins de la découpe, l'échantillon a été préalablement encapsulé dans une résine époxy. On remarque le très bon alignement entre la métallisation et la mesa et le profil vertical des flancs. On note toutefois que l'usinage semble avoir impacté le bord du cuivre comme le montre la vue de coupe de la Figure 10 par l'apparition d'un « bourrelet » de cuivre sur l'angle supérieur qui est également visible par une observation au MEB.

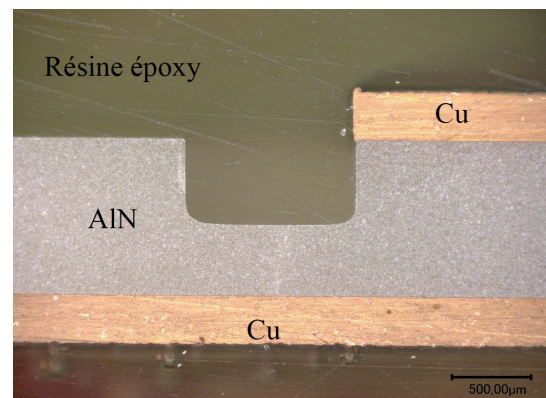


Figure 10 : Vue en coupe du profil de la mesa par usinage ultrason.

De plus, ces échantillons étant les premiers essais de la société sur ces matériaux, il s'est avéré que les profondeurs finales de la gorge ont présenté une valeur moyenne égale à 494 μm pour les huit échantillons traités, supérieure à la profondeur totale de 350 μm initialement prévue. Ce mode d'usinage n'étant pas en contact direct avec la pièce à usiner (gap laissé entre l'outil et la pièce pour la circulation du liquide porteur de particules), le contrôle du paramètre profondeur est difficile à déterminer a priori, en particulier pour les plus faibles profondeurs, et une optimisation des paramètres doit être réalisée (grâce aux retours d'expérience).

Nous avons également observé l'état de surface de l'AlN par microscopie électronique à balayage (MEB) sur les

surfaces non usinée et usinée (Figure 11) afin de connaître les différences à l'échelle du micromètre que peut causer un tel usinage sur la céramique. L'observation du fond de la mesa est délicate, mais on constate que la surface usinée par ultrasons semble légèrement plus rugueuse, lié au procédé qui consiste à l'arrachement des grains de céramique, mais cet enlèvement de matière est fait de manière très homogène. Ces résultats ont été confirmés par des mesures au profilomètre mécanique avec une rugosité qui se révèle être presque doublée (rugosité quadratique de 500 nm contre 290 nm pour la surface non usinée). La Figure 11 observe la partie haute de la mesa et le début de la gorge montrant que le flanc de la mesa se trouve être bien franc et net à l'échelle considérée.

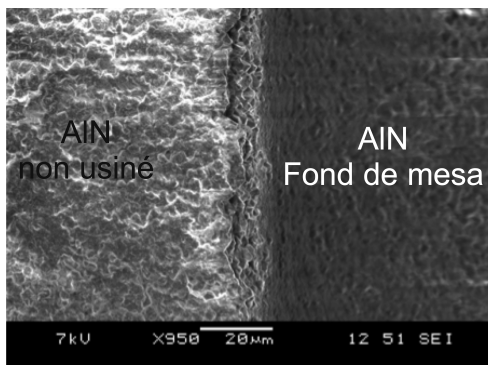


Figure 11 : Observation de la surface de l'AlN sous microscope électronique à balayage, à cheval sur une partie non usinée et usinée

4.2. Résultats électriques

Les substrats usinés avec une structure mesa sont comparés à des structures classiques (Figure 2) à travers des mesures de décharges partielles (DP), les échantillons étant plongés dans une huile fluorée isolante (Galden HT55). Les mesures des tensions d'apparition et de l'intensité des décharges partielles ont été réalisées sous tension sinusoïdale de 50 Hz. La tension efficace appliquée est augmentée manuellement par paliers successifs, la tension retenue est la tension de détection (et maintien) des décharges à 10 pC (TDP10 pC).

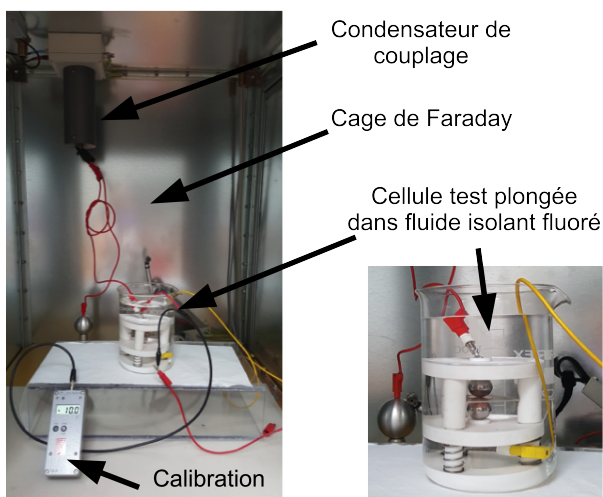


Figure 12 : Banc de test de mesures de décharges partielles

Les résultats sont présentés sur la Figure 13, où l'on relève la tension de détection des décharges à 10 pC ($TDP_{10\text{pC}}$) pour chacun des échantillons (8 sans mesa et 8 avec une mesa). La moyenne des tensions (RMS) de la $TDP_{10\text{pC}}$ est de 7 kV pour les échantillons sans mesa et de 9,2kV pour les structures avec une mesa, ce qui correspond à un gain significatif de + 30%. On constate toutefois une dispersion plus importante des valeurs pour les échantillons usinés. Des imperfections liées à

l'usinage du cuivre (comme observées par exemple sur la Figure 10, montrant un bourrelet au niveau du cuivre), ou la rugosité de surface plus importante après usinage au niveau du fond de la mesa (montrée en Figure 11), pourraient contribuer à la dispersion des valeurs de $TDP_{10\text{pC}}$ pour les échantillons usinés.

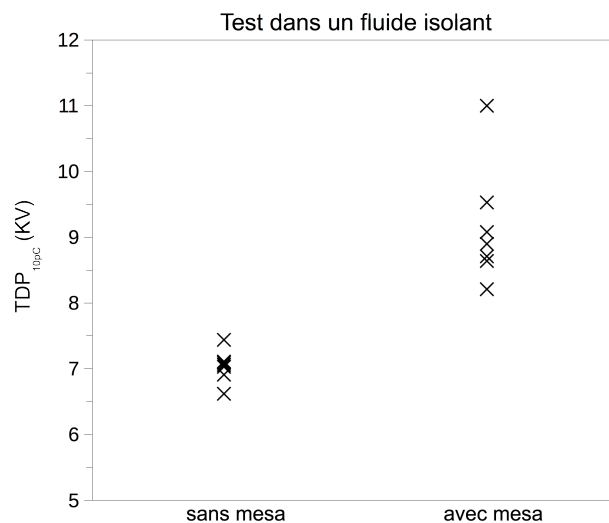


Figure 13 : Mesures des seuils de DP à 10 pC avec et sans mesa dans un fluide isolant

Les mesures ont été répétées dans plusieurs huiles isolantes et dans l'air et aussi pour des niveaux de détection différents (1 pC) avec toujours un gain en terme de tension de seuil d'apparition des DP, associé à la structure mesa. L'exemple des résultats des mesures effectuées dans l'air est présenté en Figure 14.

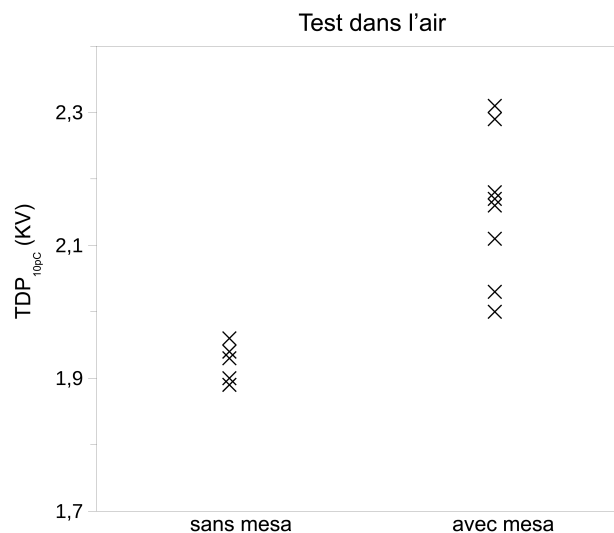


Figure 14 : Mesures des seuils de DP à 10 pC avec et sans mesa dans l'air

5. CONCLUSIONS

Ce travail montre l'intérêt de structures originales de substrats isolants métallisés pour le packaging des modules de puissance en vue de la montée en tension. Elles ont pour objectif de réduire la contrainte électrique sur le système d'isolation au niveau du point triple, tout en minimisant l'impact sur les autres performances du module (dissipation thermique, etc.). La technique d'usinage par ultrason permet de mettre en œuvre le concept de structure mesa proposé, et d'obtenir une amélioration des résultats électriques en terme de décharges partielles par rapport à la structure conventionnelle.

6. REFERENCES

- [1] Yole Développement, "Power Module Packaging - Material Market and Technology Trends 2017," 2017.
- [2] CREE. (2017) CREE custom_power_services_overview.pdf.
- [3] Tetsu Negishi, Ryo Tsuda, Kenji Ota, Shinichi Iura, Hiroshi Yamaguchi, "3.3 kV All-SiC Power Module for Traction System Use. PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2017.
- [4] H. Hourdequin, "Contribution à la conception et mise en œuvre de structures de packaging pour la montée en tension des modules de puissance : contraintes sur les isolants", Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2018.
- [5] N. 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," 2010.
- [6] J. Zhou, S. Ang, A. Mantooth, J. C. Balda, "A nano-composite polyamide imide passivation for 10 kV power electronics modules. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE," 2012.
- [7] G. Mitic, T. Licht, G. Lefranc, "IGBT Module Technology with High Partial Discharge Resistance. Siemens AG, Corporate Technology Department, CT MS 4, 81730 Munich, Germany 2 eupec GmbH, D-59581 Warstein, Germany," 2001.
- [8] L. Donzel, J. Schuderer, "Nonlinear resistive electric field control for power electronic modules. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, vol. 19, no 3, p. 955-959.," 2012.
- [9] M. Kozako, Z. Valdez-Nava, S. Diahm, S. Dinculescu, T. Lebey, "Fundamental investigation of dielectric phenomena in epoxy composites during curing process under a uniform electric field. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012 Annual Report Conference on. IEEE, 2012. p. 574-550.," 2012.
- [10] G. Belijar, S. Diahm, Z. Valdez-Nava, T. Lebey, "Online optical and dielectric monitoring of anisotropic epoxy/BaTiO₃ composite formation tailored by dielectrophoresis. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, vol. 49, no 4, p. 045501.," 2015.
- [11] Diahm, Z. Valdez Nava, L. Lévêque, G. Belijar, L. Laudebat and T. Lebey, "Procédé de traitement d'un matériau électriquement isolant lui conférant des propriétés de gradation de champ électrique auto-adaptatives pour composants électriques", International Patent application, N° PCT/EP2017/063740, CNRS/UPS/INUC, 6 June 2017-French Patent application, N° FR 16 55173, CNRS/UPS/INUC, 6 June 2016.
- [12] L. Leveque, "Nouveaux matériaux composites à gradient de permittivité structurés par un champ électrique et leur application pour la gradation de potentiel. 2017. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.," 2017.
- [13] Minh Tuan Do, "Propriétés diélectriques des gels isolants : application aux composants d'électronique de puissance. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier Grenoble 1," 2008.
- [14] D. Frey, J. L. Schanen, J. L. Augé, O. Lesaint, "Electric field investigation in high voltage power modules using finite element simulations and partial discharge measurements. Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the IEEE, 2003. p. 1000-1005," 2003.
- [15] H. Reynes, C. Buttay, H. Morel "Protruding Ceramic Substrates for High Voltage Packaging Of Wide Bandgap Semiconductors". The 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA 2017), Oct 2017, Albuquerque, United States.
- [16] H. Hourdequin, L. Laudebat, M-L. Locatelli, P. Bidan, "Contribution à la conception de structures de packaging pour les modules de puissance très haute tension : contraintes sur les isolants", Symposium de Génie Electrique 2016, 7-8-9 juin 2016, Grenoble.
- [17] L. Leveque, "Nouveaux matériaux composites à gradient de permittivité structurés par un champ électrique et leur application pour la gradation de potentiel". Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2017.
- [18] P. Laurens, C. Dubouchet, D. Kechemair, "Application des lasers aux traitements de surface. Techniques de l'Ingénieur," 1996.
- [19] M. Decup, "Impact des procédés industriels de traitement sur les propriétés diélectriques des substrats d'Alumine utilisés dans les modules de commutation haute tension. 2010. Thèse de doctorat. Université Toulouse III-Paul Sabatier," 2010.
- [20] D. Kremer, "Usinage par ultrasons. Techniques de l'Ingénieur" 1998.
- [21] M. L. Griffith, J. W. Halloran, "Freeform Fabrication of Ceramics via Stereolithography", Journal of the American Ceramic Society, 79: 2601-2608, 1996. doi:10.1111/j.1151-2916.1996.tb09022.x
- [22] U. Lakshminarayan, S. Ogrzydziak, and H. L. Marcus, "Selective Laser Sintering of Ceramic Materials"; pp. 16–26 in Proceedings of the Solid Free Form Fabrication Symposium (Austin, TX, August 1990). Edited by H. L. Marcus et al. University of Texas, Austin, TX, 1990.
- [23] Image extraite du site de Custompartnet.net <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>.
- [24] N. Travitzky, A. Bonet, B. Dermeik, T. Fey, I. Filbert-Demut, L. Schlier, T. Schlordt and P. Greil, Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials. Adv. Eng. Mater., 16: 729-754. (2014) doi:10.1002/adem.201400097
- [25] M. Goetz, N. Kuhn, B. Lehmeier, A. Meyer, U. Voller "Comparison of Silicon Nitride DBC and AMB Substrates for Different Applications in Power Electronics" PCIM Power Electronics Conference; 1; 57-65; PCIM Europe Stuttgart, Germany; 2013.
- [26] A. Miric and P. Dietric, "Inorganic substrates for power electronics applications", Heraeus Deutschland GmbH and Co., KG 63450 Hanau Germany, March 2015.
- [27] N. Murayama, K. Hirao, M. Sando, T. Tsuchiya, H. Yamaguchi, "High-temperature electro-ceramics and their application to SiC power modules", Ceramics International, Vol. 44, n° 4, p 3523-3530, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.140>.
- [28] Microcertec - PAE de Lamirault-Collegien - 22, rue de Lamirault - 77090 Collegien, <http://www.microcertec.com/>.