

Solution hybride PCB et céramique pour la gestion thermique dans les applications de puissance

Lucile MAGE, Charlotte MEULY, Emmanuel MARCAULT, Marie BEAUJARD, Régis DELSOL

CEA, CEA Tech Occitanie, F-31670 Labège, France

RESUME - Les composants grand gap, tels que les HEMT GaN, présentent de fort dI/dt , pouvant atteindre 100A/ns. Cette caractéristique peut engendrer des surtensions dues à des inductances parasites dans le circuit, menaçant la fiabilité des dispositifs. De plus, les courants élevés sont concentrés sur de petites surfaces, provoquant des surchauffes dans les composants et leurs assemblages. Pour des systèmes nécessitant davantage de puissance, les concepteurs préfèrent utiliser des modules de puissance en céramique plutôt que des circuits imprimés, car ceux-ci offrent de meilleures performances thermiques et isolantes. Cependant, ces solutions augmentent les coûts et compliquent le routage, car elles empêchent l'utilisation de systèmes multicouches. Une approche hybride combinant PCB et céramique 3D est proposée ici, alliant les avantages de coût et de simplicité de routage du PCB avec les propriétés thermiques et isolantes de la céramique. Cette solution permet ainsi de répondre aux besoins de puissance tout en optimisant le routage et l'intégrité du signal.

Mots-clés— électronique de puissance, packaging, grand gap, GaN, impression 3D céramique

1. INTRODUCTION

Les nouvelles générations de convertisseurs de puissances intègrent des transistors de puissances grand gap (GaN, SiC, ...). Suivant la puissance visée, ces composants peuvent être nus, encapsulés de manière discrète ou sous forme de modules (figure 1). Quel que soit le packaging, il est essentiel de réduire les inductances parasites dans la boucle de commutation afin de minimiser les pertes et le risque de défaillance. De plus, dans les configurations demi-pont classiques l'isolation électrique du dissipateur métallique, ajoute une capacité supplémentaire au système, ce qui présente des inconvénients au niveau thermique et CEM [4-6].



Figure (a)

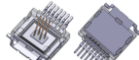


Figure (b)

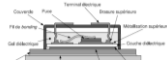


Figure (c)

Figure 1: (a) exemple de puce nue dont le report est assuré par des bump [1], exemple de composant discret utilisé pour des composants SiC [2], (b) Structure d'un module de puissance classique [3].

Ainsi et afin de répondre à ces défis, une solution hybride combinant PCB, pour l'efficacité du routage et céramique 3D pour la protection, la gestion thermique et la réduction des EMC est proposée ici.

2. CONCEPTION

La conception de l'assemblage est réalisée avec Ansys Q3D pour la partie électrique et Ansys Mechanical pour l'optimisation thermique. Le design retenu vise à améliorer le R_{th} global du système en réduisant le nombre d'interfaces thermiques. La réalisation est rendue possible grâce à l'impression 3D céramique qui permet de fabriquer un dissipateur assurant les trois fonctions de support mécanique, isolant électrique et dissipateur thermique (figure 2).

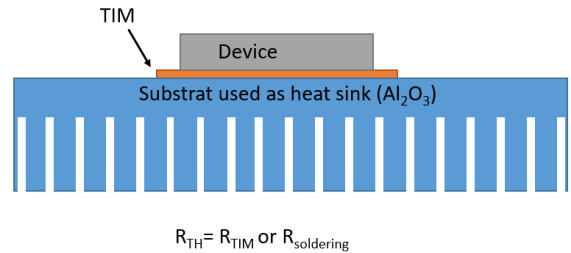
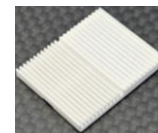


Figure 2 : Schéma de principe de la réduction du nombre d'interfaces obtenue grâce à l'impression 3D céramique.

La liberté de conception apportée par l'impression 3D permet d'envisager différents types de dissipateurs : simple (3.a), aéraulique (3.b), hydraulique (3.c), ...



(a)



(b)



(c)

Figure 3 : exemples de dissipateurs réalisés par impressions 3D céramique : (a) simple, (b) aéraulique, (c) hydraulique

3. REALISATION DU DISSIPATEUR EN CERAMIQUE

Les pièces en céramique ont été fabriquées par stéréolithographie sur une imprimante SLA-DLP (V6000 de Prodways®, Fig 4). La pâte d'alumine utilisée est commercialisée par la société Cerhum®. Elle est principalement composée de résines polyacrylates, de poudre d'alumine (52 % en vol) et d'un initiateur photo UV.

Le procédé d'impression SLA-DLP (fig. 5) consiste à étaler une fine couche de pâte d'alumine (50 µm) sur le plateau de construction. Cette imprimante est équipée d'une tête UV de 365 nm. Un pochoir constitué d'une matrice de miroirs configurable (système DLP) est positionné sur le trajet de la lumière et permet de délimiter les zones de la pâte à insoler. Une fois la couche réticulée, la plateforme de construction descend à une profondeur de 50 µm, une nouvelle épaisseur de de pâte est étalée, puis la lumière UV est de nouveau projetée sur la surface de la pâte à travers le DLP. Le cycle d'impression est répété jusqu'à ce que des pièces complètes soient produites. À la fin de l'impression, les pièces sont nettoyées dans un bain d'éther de glycol afin d'éliminer la pâte non réticulée.



Figure 4 : Imprimante céramique 3D : V6000

La matrice polymère réticulée des pièces est ensuite éliminée par déliantage thermique sous air. Ce cycle thermique d'environ 4 jours est extrêmement lent afin de respecter les seuils de décomposition thermique des différents composants de la résine et ainsi d'éviter d'endommager les pièces. Puis, les pièces sont frittées à 1 650 °C pendant 2 heures lors d'un second traitement thermique. Les substrats atteignent ainsi des densités supérieures à 98 % de la densité théorique de l'alumine.

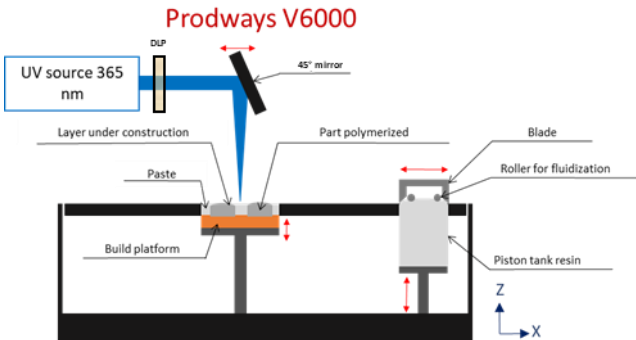


Figure 5 : Schéma de principe du processus d'impression de la V6000.

4. ASSEMBLAGE

- 1) Un dispositif GaN HEMT (EPC®2030) est brasé sur un substrat PCB qui peut être conçu spécifiquement pour réaliser un composant discret (figure 6 a) ou directement sur une carte (figure 6 b) pour assurer le refroidissement local d'une carte électronique.

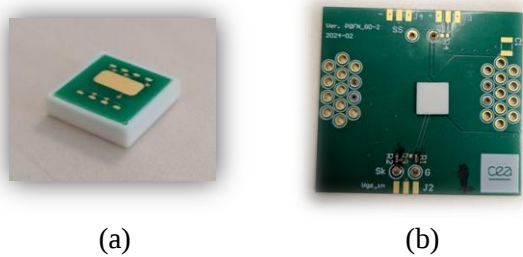


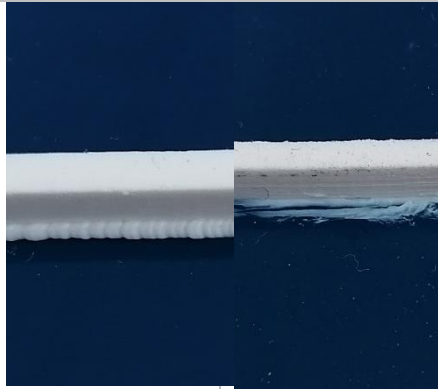
Figure 6 : (a) package discret réalisé par l'assemblage d'un PCB avec une céramique qui assure à la fois le refroidissement du composant et la protection du PCB contre l'humidité.
(b) Gestion thermique locale et protection d'une puce nue (figure 1.a) par l'utilisation d'un dissipateur céramique 3D.

- 2) Le dissipateur céramique est ensuite collé sur le PCB à l'aide d'une colle silicone après avoir pris soin d'intercaler un TIM (Thermal Interface Material) entre la céramique et la face arrière de la puce. Différents TIM utilisables sont présentés dans le tableau 1. Le TIM choisi est le TIM Carbice® à base de nanotube de carbone car dans le cas de l'assemblage présenté ici, il présente le meilleur compromis entre contrainte mécanique, simplicité d'assemblage et dissipation thermique. Les différents essais de collages sont quant à eux présentés dans le tableau 2 et font apparaître que le meilleur résultat est obtenu en utilisant la solution de collage avec pression.

Tableau 1 : Tableau comparatif des solutions d'interface thermique

	Conductivité thermique (W/mK)	Conducteur électrique	Maintien mécanique
Brasure SAC305 [8]	58	Oui.	Fort, grâce aux intermétalliques.
Pâte thermique [9]	Entre 2 et 7	Non.	Non.
Pad thermique (fibre de verre) [10]	Entre 1,5 et 6	Non.	Non.
TIM Carbice® [7]	• 200 (dans le plan) • 12 (normal au plan)	Partiellement conducteur.	Non.

Tableau 2 : Tableau comparatif des essais de collage

Joint externe	Joint Sans pression	Joint avec pression
		
Dépôt facile, cordon plutôt épais	Dépôt facile, positionnement délicat,	Dépôt facile, positionnement délicat
Faible tenue mécanique	Bonne tenue mécanique	Très bonne tenue mécanique

On notera également que le dissipateur doit être aligné avec la puce. Ainsi, suivant la configuration choisie, cet alignement peut se faire naturellement (par design) comme dans le cas de la figure 6a, par pick and place comme dans le cas de la figure 6b ou encore en utilisant un outillage d'assemblage permettant de conserver l'alignement des différentes pièces et de contrôler la pression exercée lors du collage (figure 7).

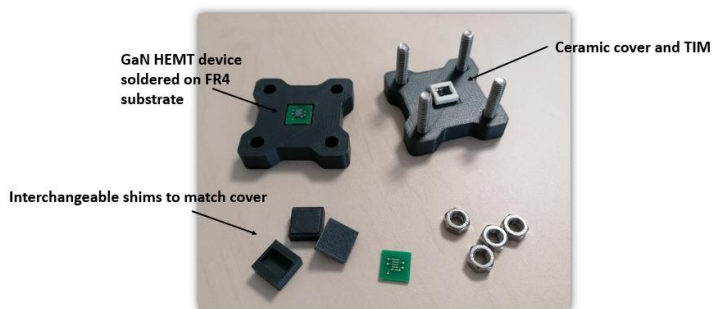


Figure 7 : Outils d'assemblage

5. INTERFACES PUCE CÉRAMIQUE

Afin de vérifier la bonne conduction entre la puce, le matériau d'interface thermique et la céramique, l'assemblage a été plongé dans une résine époxy puis tronçonné, puis observé au microscope Keyence©. Ce qui fait apparaître figure 8 :

- Il n'y a pas de discontinuité visible entre la puce et le TIM ou entre le TIM et le capot céramique. La conduction thermique est donc bien assurée.

- Le TIM apparaît surdimensionné par rapport à la puce. Ce qui fait apparaître un problème de flambage lorsque le TIM n'est pas comprimé entre la puce et le capot céramique.

- La colle est en partie chassée vers l'intérieur de la cavité lorsqu'on applique une pression sur l'assemblage et forme un bourrelet qui vient parfaitement sceller l'ensemble

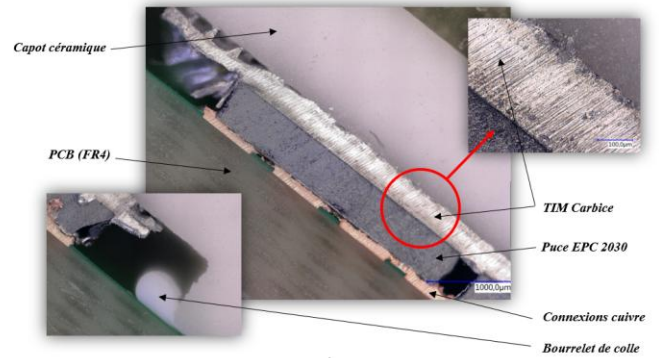


Figure 8 : Observation au microscope de la coupe de l'assemblage PCB/puce/TIM/capot

6. TESTS ÉLECTRIQUES

Le circuit de test (figure 9) est constitué d'une alimentation de laboratoire, d'une capacité de découplage, d'une résistance de 50 Ohm servant de charge et d'un générateur de pulse permettant de piloter la grille. Les contacts électriques entre le banc de test et le dispositif sont assurés par un socket de test.

La figure 10 présente les résultats de tests électriques du composant qui est présenté figure 3a et montre que le process d'assemblage proposé n'impacte pas les performances des composants.

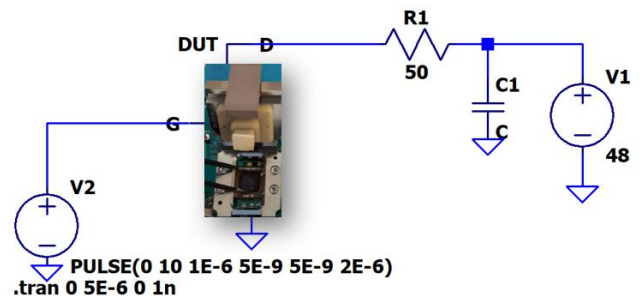


Figure 9 : Banc de test électrique

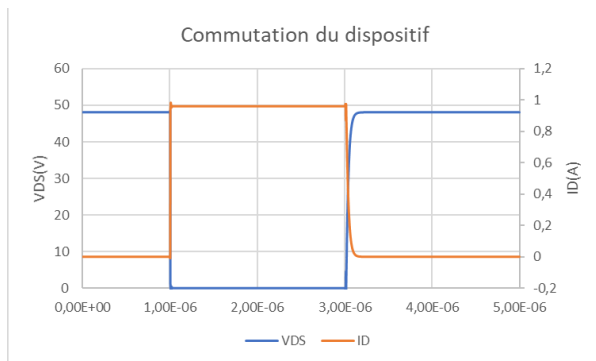


Figure 10 : résultat de test de fonctionnalité

7. CONCLUSION

L'assemblage à faible inductance présenté ici permet une optimisation à la fois thermique et électrique des packagings discrets ou des composants nus montés en surface de PCB. Il permet donc d'envisager des applications moyenne puissance en tirant avantages de la facilité de conception des PCB (routage, multicouche, ...) ou des IMS allié à la liberté de design qu'offre l'impression 3D céramique. Le dispositif en céramique servant à la fois de capot de protection et de dissipateur thermique.

8. REFERENCES

- [1] EPC, APPLICATION NOTE: AN009, Assembling GaN FETs and Integrated Circuits
- [2] ST technical note HU3PAK package mounting and thermal behavior, HU3PAK package mounting and thermal behavior
- [3] BUTTAY, Cyril. Le Packaging en électronique de puissance. HDR : Sciences de l'ingénieur, INSA de Lyon, 2015
- [4] Kjærsgaard, Benjamin Futtrup; Jørgensen, Asger Bjørn; Aunsborg, Thore Stig et al "Analysis of Miller Region Sustained Oscillations during Turn-on of High-Side 10kV SiC MOSFET". 2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe), Aalborg, Denmark, 2023
- [5] Z. Zhang, X. Yuan and L. Xie, "A New Package for SiC Power Modules with Ceramic Heatsink," 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2022, pp. 1-7
- [6] A. B. Jørgensen, S. Beczkowski, B. F. Kjærsgaard, T. S. Aunsborg, S. Munk-Nielsen and H. Zhao, "Ceramic baseplate-less 10 kV SiC MOSFET power module with integrated liquid cooling," 2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe), Aalborg, Denmark, 2023
- [7] CARBICE. Carbice Carbon, the new standard for Thermal Materials. Disponible sur : <http://carbice.com/> (consulté le 28/07/2021). Datasheet complète délivrée après contact avec l'entreprise.

[8] BO-HUNG Liou, CHIH-MING Chen, RAY-HUA Horng, YI-CHEN Chiang, DONG-SING Wu. Improvement of thermal management of high-power GaN-based light-emitting diodes. Microelectronics Reliability, 2012, Volume 52, Issue 5, pp 861-865.

[9] RS PRO. Datasheet Silicone Thermal Grease 2,9 W/m.K.

[10] BERQUIST. Datasheet Sil-Pad 1500ST 1,8 W/m.K.