

Substrat architecturé pour une gestion thermique efficace dans les modules électroniques de puissance

Abderrahmen Kaabi, Yves Bienvenu, David Ryckelynck, J. Idrac, E. Font, B. Pierre

► **To cite this version:**

Abderrahmen Kaabi, Yves Bienvenu, David Ryckelynck, J. Idrac, E. Font, et al.. Substrat architecturé pour une gestion thermique efficace dans les modules électroniques de puissance. Matériaux 2010, Oct 2010, Nantes, France. 5 p. hal-00570547

HAL Id: hal-00570547

<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00570547>

Submitted on 1 Mar 2011

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.

Substrat architecturé pour une gestion thermique efficace dans les modules électroniques de puissance

A. Kaabi^a, Y. Bienvenu^a, D. Ryckelynck^a, J. Idrac^b, E. Font^b, B. Pierre^c

^aMines-ParisTech, Centre des Matériaux, UMR CNRS 7633, BP 87, 91003 Evry Cedex France

^bLNE Trappes, 29 avenue Roger Hennequin 78197 Trappes Cedex France

^cGriset S.A, Groupe Diehl, Rue du Grand Pré, F-60870, Villers Saint Paul, France

RESUME:

Les modules électroniques de puissance sont des composants essentiels pour le développement de nombreuses fonctions dans les véhicules électriques et hybrides. Ces modules sont des assemblages de composants électroniques en silicium (transistor et diode) sur un substrat généralement en cuivre. Le substrat assure le maintien mécanique et le transfert de la chaleur pour obtenir une température de fonctionnement convenable ($<175^{\circ}\text{C}$) du silicium.

En fonctionnement, une partie de la puissance est dissipée sous forme d'un flux de chaleur à cause de la résistance interne des semi-conducteurs. Ce flux diffuse de la face inférieure des composants électroniques vers le substrat et engendre l'échauffement de l'assemblage. Du fait que cet assemblage comprend divers matériaux, les dilatations thermiques différentes génèrent des contraintes de cisaillement dans la zone de liaison (brasure) en provoquant l'endommagement des modules électroniques. Pour résoudre ce problème, le substrat doit avoir un compromis entre des caractéristiques électriques et thermiques proches de celles du substrat actuel (Cu) et un coefficient de dilatation linéique proche de celui du semi-conducteur (Si). Une des solutions alternatives consiste à développer un matériau composite architecturé.

Nous proposons d'atténuer les effets mécaniques de la dilatation différentielle à l'aide d'un substrat architecturé. Le substrat proposé est un matériau composite métallique dont les paramètres de forme ont été optimisés par simulation numérique et validés expérimentalement afin d'accroître au mieux la conductivité du substrat et d'en réduire la dilatation macroscopique. De plus, nous avons validé la mise en œuvre du substrat proposé par des procédés conventionnels de colaminage, de pliage et de découpe.

MOTS-CLES : matériau architecturé, mécatronique, colaminé, module de puissance, modélisation thermomécanique, dilatation thermique, diffusion.

1. Introduction

Plusieurs études ont été réalisées pour développer des substrats à coefficient de dilatation thermique proche de celui du silicium ($5.10^{-6}/\text{K}$) tout en conservant des conductivités thermique et électrique élevées. Les solutions proposées sont souvent des matériaux composites obtenus par association métal-métal ou métal-céramique comme par exemple AlN-Cu, Al-SiC, Cu-C, etc. Néanmoins, ces solutions sont généralement coûteuses et inadaptées aux procédés de mise en forme des substrats pour l'automobile. D'autres matériaux obtenus par plaquage (à chaud ou à froid) comme le Cu-Mo, le Cu-Alliage MoCu et le Cu-FeNi ont également été étudiés. Ces matériaux présentent un coefficient de dilatation thermique faible (6 à $12.10^{-6}/\text{K}$) et

une bonne compatibilité avec les procédés conventionnels (formage, pliage, etc). En revanche, leur conductivité thermique dans l'épaisseur, qui constitue le sens d'évacuation de la chaleur, reste limitée.

2. Concept et optimisation du matériau architecturé

La structure architecturée a été développée en associant un matériau conducteur (Cu) à un matériau à dilatabilité thermique limitée (MDTL) tel que l'alliage FeNi₃₆. La géométrie de cette structure a été imaginée de manière à ce que chaque composant assure une fonction précise (thermique, mécanique et électrique). Des courts-circuits ont été introduits pour favoriser l'évacuation des calories thermiques dans

l'épaisseur du substrat. Le cuivre remplace partiellement le FeNi₃₆ en créant des canaux de conduction rapide de chaleur entre la face supérieure et la face inférieure du substrat comme le montre la **Figure 1**. Ces courts-circuits thermiques sont appelés « les ponts thermiques » et le substrat est un matériau multicouche appelé colaminé à ponts thermiques (CPTH).

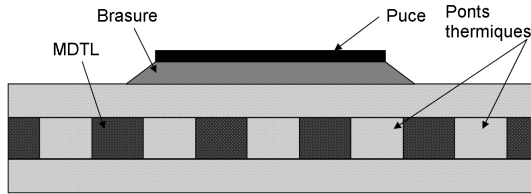


Fig.1. Assemblage dans un module de puissance avec un substrat architecturé (CPTH).

Le substrat architecturé est ainsi constitué d'au moins deux couches externes en cuivre, d'une couche interne en MDTL et de ponts thermiques.

Afin d'optimiser le comportement thermomécanique du substrat CPTH, un modèle thermo-élastique avec des coefficients indépendants de la température a été utilisé. Le **tableau 1** renseigne les propriétés des matériaux constitutifs du CPTH. L'adhérence est considérée sans défaut pour la modélisation.

Propriétés	Cu	FeNi ₃₆	Mo
Conductivité thermique (W/m.K)	403	14.7	138
Dilatation thermique (10 ⁻⁶ /K)	17	1.6	4.9
Module d'Young E (GPa)	120	142	329
Coefficient de Poisson	0.34	0.25	0.29
Densité (g/cm ³)	8.9	8.1	10.3
Capacité calorifique massique (J/kg.K)	380	505	250

Tab.1. Propriétés thermiques et mécaniques des matériaux constitutifs le CPTH.

Le substrat est soumis dans les calculs à un flux thermique surfacique de 300 W/cm² du côté face supérieure. La face inférieure peut échanger de la chaleur avec l'air environnant par convection, h=62.2 W/m².K. Le code de calcul ZeBuLoN a été utilisé sans couplage des calculs thermiques et mécaniques. Un grand nombre de configurations a été étudié (180 au total). Pour un volume élémentaire Vi, les paramètres sont le type du matériau MDTL (FeNi ou Mo), la fraction des ponts thermiques (0-70%) et l'épaisseur des couches. L'optimisation de la structure se base sur l'analyse des températures maximale et minimale, de la conductivité thermique, du coefficient de dilatation homogénéisé et des contraintes thermomécaniques générées par le chauffage de l'assemblage.

3. Influence des paramètres de conception sur les propriétés thermomécaniques

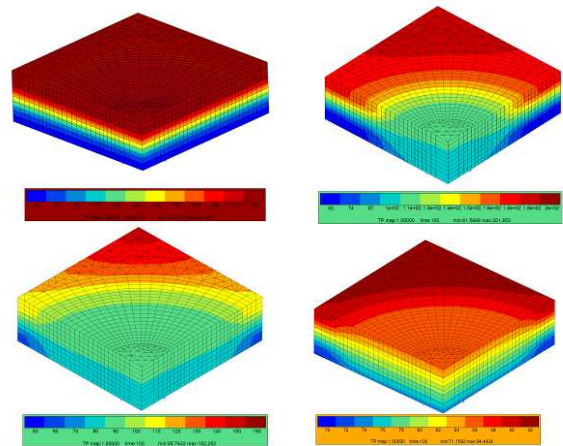


Fig.2. Isovaleurs de la température dans 1/4 du Vi, a) Cu/FeNi/Cu (20-60-20, F=0%), b) Cu/FeNi/Cu (20-60-20, F=20%), c) Cu/FeNi/Cu (20-60-20, F=50%), d) Cu/Mo/Cu (20-60-20, F=50%).

La **Figure 2** illustre les isovaleurs de la température dans 1/4 de Vi. Dans le cas d'un substrat sans pont thermique (**Figure 2a**), le gradient de température est uniquement présent dans le sens de l'épaisseur. L'introduction des ponts thermiques (**Figures 2b, 2c et 2d**) favorise le transfert de chaleur grâce à la présence du cuivre qui remplace localement l'alliage FeNi₃₆. Les zones contenant uniquement le cuivre sont les plus froides et le gradient de température y est triaxial. En comparant les **Figures 2.b et 2.c**, on constate que l'accroissement du diamètre de pont thermique augmente la taille de la zone froide. Ceci a pour conséquence une amélioration du transfert thermique. Entre les **Figures 2.c et 2.d**, la substitution de l'alliage FeNi₃₆ par le Mo entraîne une baisse significative de l'écart thermique dans le substrat. Ceci signifie que les contraintes thermiques sont plus faibles dans le cas du colaminé Cu/Mo/Cu par rapport à celles dans le colaminé Cu/FeNi₃₆/Cu.

Les ponts thermiques n'apportent pas une amélioration significative sur le colaminé Cu/Mo/Cu par rapport à un colaminé Cu/FeNi/Cu. Ceci est dû au fait que le Mo est un bon conducteur thermique, **Figure 3**. Par ailleurs, pour le colaminé Cu/FeNi₃₆/Cu, le gradient thermique est plus faible lorsque la fraction surfacique de ponts thermiques « F » augmente, correspondant ainsi à une amélioration de la conductivité thermique, **Figure 4**. Par exemple, les températures maximales en face supérieure du substrat Cu/FeNi₃₆/Cu (20/60/20) sont respectivement de 225, 170 et 160°C pour « F » correspondant à 0, 20 et 50%.

L'introduction des ponts thermiques a permis de nettement diminuer l'effet de « barrière thermique » de la couche en alliage FeNi₃₆, ce qui

s'accompagne d'une légère augmentation de la dilatabilité. La configuration optimale a été déterminée en maximisant une fonction « G ». G est défini par l'équation suivante :

$$G = \lambda_{TH} / \alpha_{TH}$$

λ_{TH} et α_{TH} sont respectivement la conductivité et la dilatation thermiques homogénéisées.

La configuration optimale consiste en un colaminé Cu/FeNi₃₆/Cu, 30/20/50, F=15%. La conductivité thermique est proche de 270 W/m.K et la dilatation thermique de l'ordre de 11.0 10⁻⁶/K.

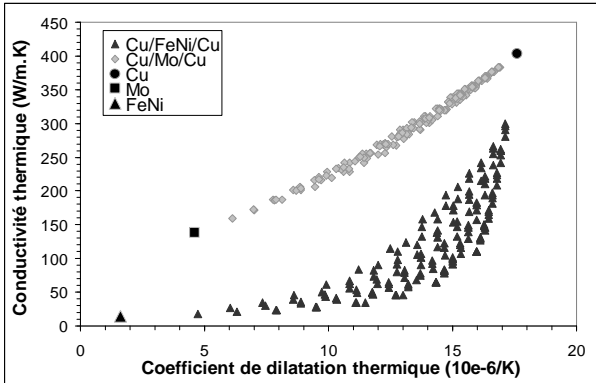


Fig.3. Conductivité et dilatation thermiques homogénéisées du substrat architecturé

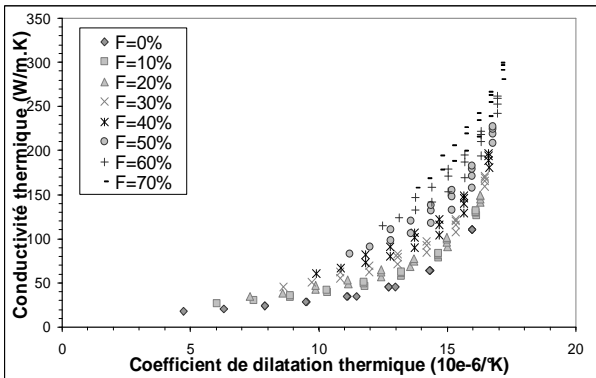


Fig.4. Influence de la fraction des ponts thermiques sur la conductivité et la dilatation thermiques du CPT.

Les contraintes obtenus dans le plan d'assemblage (Sigma xx) pour les colaminés à ponts thermiques augmentent avec la fraction surfacique de ponts thermiques. Cette augmentation est d'autant plus faible que l'épaisseur de FeNi est faible.

Un point d'inflexion a été observé pour F = 60%. Ce point indique une permutation du rôle entre le cuivre et l'alliage FeNi₃₆. A partir de ce point, ce sont les couches en cuivre qui gouvernent la rigidité du substrat, **Figure 5**. En ce qui concerne les contraintes dans l'épaisseur (Sigma zz), elles sont quasiment indépendantes de la fraction de ponts thermiques et restent inférieures à celles dans le plan d'assemblage, **Figure 6**.

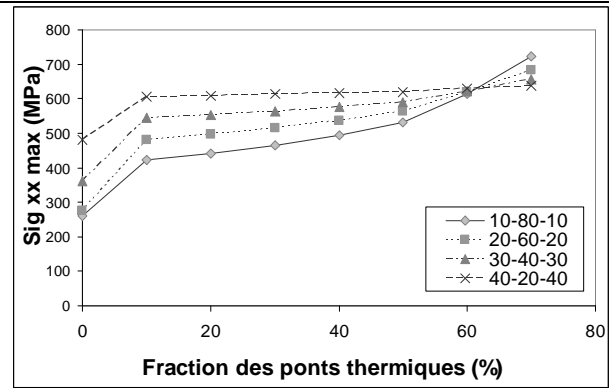


Fig.5. Contraintes thermiques dans le plan d'assemblage (Sigma xx).

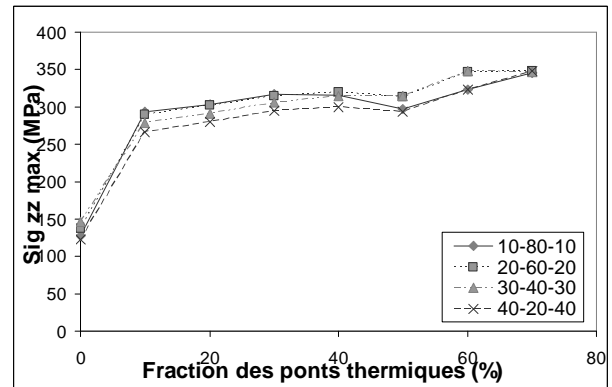


Fig.6. Contraintes thermiques dans l'épaisseur (Sigma zz).

4. Fabrication du matériau architecturé Cu/FeNi/Cu par soudage-diffusion

La fabrication du matériau CPT a été réalisée par soudage sans fusion (colaminage) de différents matériaux en utilisant la déformation plastique et la diffusion.

Dans un premier temps, un dégraissage et un brossage des surfaces ont été réalisés pour favoriser les mécanismes d'adhésion et de diffusion. Après colaminage, le matériau qui a subi une déformation plastique, présente des contraintes résiduelles importantes. Pour cette raison, un traitement thermique de détensionnement et de diffusion a été effectué après le colaminage. La température et le temps du traitement ont été définis en fonction du taux de réduction du colaminage et des propriétés mécaniques des matériaux constituants.

Dans un deuxième temps, les caractéristiques thermomécaniques du matériau architecturé (CPT) ont été déterminées expérimentalement puis comparées aux propriétés des autres substrats (Cu-C, Al-SiC et Cu). Enfin, les zones d'interface ont été étudiées pour déterminer les mécanismes métallurgiques et mécaniques qui

peuvent se produire lors du plaquage à froid et après traitement thermique.

Au cours du colaminage, sous l'effet de la pression deux phénomènes interviennent. D'une part, les oxydes initialement présents à la surface du matériau se fragmentent en exposant de la matière vierge. D'autre part, le cuivre pénètre dans les trous de la plaque perforée en $FeNi_{36}$ dont la fonction est de permettre la réalisation des ponts thermiques. L'adhésion (soudage) s'établit entre les couples $FeNi-Cu$ et $Cu-Cu$. La **Figure 7** illustre une coupe transversale du substrat CPTH. Les paramètres d'élaboration (pression, taux de réduction, vitesse de colaminage, vitesse du brossage, température et temps du traitement thermique) ont été optimisés pour obtenir une surface d'adhérence supérieure à 90%.



Fig.7. Coupe transversale du substrat CPTH.

Le traitement thermique réalisé accélère le processus de diffusion à l'interface. L'attaque chimique du cuivre, à l'aide d'une solution basique oxydante, montre que la zone d'interface présente une morphologie différente. L'épaisseur de l'interface est de l'ordre de $4\mu m$. L'absence de défauts, tels que la porosité, montre un bon développement du soudage par diffusion, **Figure 8**. La température et le temps de traitement peuvent donner lieu à des porosités de Kirkendall en raison de différence de coefficient de diffusion.

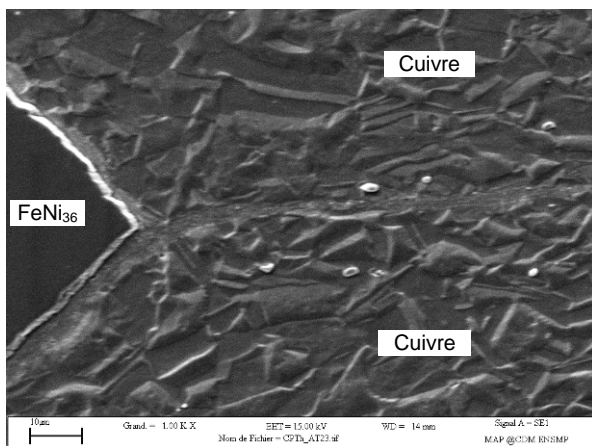


Fig.8. Zones d'interface $Cu-Cu$ et $Cu-FeNi_{36}$.

5. Caractéristiques thermique et électrique du substrat CPTH

Pour l'application en électronique de puissance, les propriétés les plus importantes pour un substrat sont la conductivité thermique, le coefficient de dilatation thermique et la conductivité électrique.

Trois substrats CPTH de configurations différentes ont été élaborés. Le CPTH-A est un substrat symétrique alors que les CPTH-B et CPTH-C sont deux substrats dissymétriques. La conductivité thermique, la conductivité électrique et le coefficient de dilatation thermique « CTE » ont été mesurés en fonction de la température puis comparés par rapport aux substrats utilisés actuellement dans les modules de puissance.

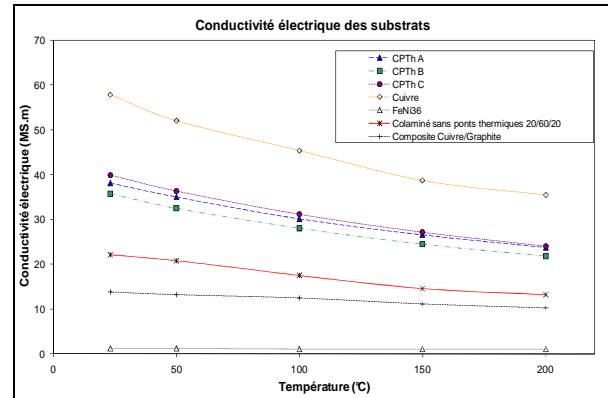


Fig.9. Conductivité électrique du substrat CPTH en fonction de la température.

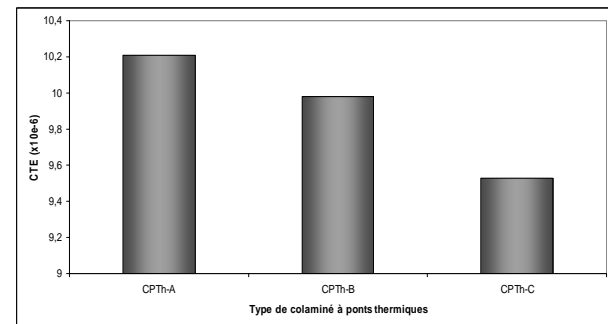


Fig.10. Coefficient de dilatation thermique des substrats CPTH à $25^{\circ}C$.

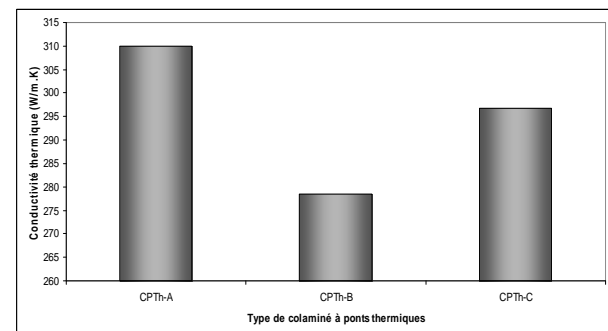


Fig.11. Conductivité thermique des substrats CPTH à $25^{\circ}C$.

La conductivité électrique des substrats CPTH à $25^{\circ}C$ est comprise entre 35 et 40 $MS.m$, soit 77% de celle du cuivre et supérieure à 2,6 fois celle du composite $Cu-Graphite$, **Figure 9**.

La dilatation thermique est aussi une propriété importante du substrat CPTH. La **Figure 10** illustre la dilatation thermique expérimentale dans le plan d'assemblage pour les différents CPTH.

Les substrats CPTH présentent des coefficients de dilatation thermique entre 9.10^{-6} et $10.10^{-6}.K^{-1}$.

En outre, les substrats CPTH possèdent des conductivités thermiques dans l'épaisseur supérieure à 0.75 fois celle du cuivre. Ceci correspond à des valeurs 2 à 5 fois plus élevées que celles des autres substrats composites proposés à ce jour.

6. Conclusion

La démarche de conception et d'optimisation a permis de développer un matériau architecturé. Ce nouveau substrat propose une solution pour répondre aux problèmes thermiques dans les modules électroniques de puissance. La configuration optimale a été déterminée en fonction des paramètres géométriques et des propriétés des matériaux. L'élaboration du colaminé à ponts thermiques a été réalisée grâce à l'association de deux phénomènes ; mécanique et métallurgique. Les ponts thermiques ont ainsi été obtenus par déformation plastique du cuivre puis par diffusion lors d'un traitement thermique. Le nouveau substrat présente une conductivité thermique supérieure à 0.75 fois celle du cuivre, une dilatation thermique de 1.3 à 2 fois celle du silicium et une conductivité électrique proche de 70 %IACS.

Les substrats CPTH développés offrent une solution innovante de substitution aux substrats actuels. Leurs propriétés mesurées présentent des valeurs qui répondent aux nouvelles exigences en électronique de puissance.

7. Remerciements

Les auteurs de cet article remercient l'ensemble des partenaires du projet MENKAR du pôle de compétitivité MOV'EO pour leurs collaborations.

8. Références

- [1] Chris Beck and al, "Developments and trends in thermal management technologie - a mission to the USA", DTI Global Watch Missions, Decembre 2006,
- [2] V.Wesling, and al, "Novel fibre reinforced wires for power electronics", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2007
- [3] J. Dalin and al " Novel aluminium", copper fibre-reinforced bonding wires for power electronics", University of Freiburg, 2008
- [4] C. ZWEBEN, *Thermal Materials Solve Power Electronics Challenges*, *Power Electronics Technology*, Feb. 2006.
- [5] ASM Handbook, "Properties and Selection," No,ferrous Alloys and Special-Purpose Materials", Vol 2, 1990.

[6] David L. Saums, "Developments in Selective High Thermal Conductivity Orientation in CTE-Compatible Substrate and Package Component Materials", DS&A LLC, 2004 IEEE

[7] F. CARPENTIER, *Etude des Mécanismes d'adhésion de bimatériaux métalliques obtenus par colaminage à froid*, Thèse ENSMP, 1993.

[8] Viseslava Rajkovic, « Properties of copper matrix reinforced with nano-and micro-sized Al_2O_3 particles », *Journal of Alloys and Compounds*, April 2007

[9] T.Schubert, « Interfacial design of Cu-based composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications », *Materials, Science & Engineering*, 2006,