

Etude thermomécanique de la dégradation des assemblages de puissance soumis à des vieillissements à haute température

F.Arabi^a, W.Sabbah^a, L. Théolier^a, D. Martineau^b, E. Woïgard^a

^a University of Bordeaux, IMS Laboratory, UMR 5218, F-33400 Talence, France

^b Labinal Power System, Safran Group, Réau, France

RESUME -Des vieillissements sévères (cycles thermiques [-55 °C /+245 °C]) ont révélé des dégradations dans des substrats de puissance AMB Si₃N₄ Cuivre Nickel flash or. A l'issue de 2000 cycles thermiques, l'empreinte des motifs de métallisation de la surface supérieure se reflète sur la surface inférieure. Ce phénomène n'est constaté que sur des cycles sévères. La question posée par cet article porte sur les causes de l'apparition de cette dégradation, et les pistes pour y remédier. Il a été clairement établi que l'origine de ces dégradations est la propagation de contraintes mécaniques dans le substrat, car le phénomène a été reproduit par des simulations thermomécaniques. En vue de proposer des solutions pour remédier à ces dégradations rédhibitoires, l'influence de l'épaisseur de la métallisation cuivre, du coefficient de dilatation de cette couche, du gauchissement du substrat et de la dimension des plages de report est évaluée.

Mots-clés—hautes températures, substrat AMB, tests de fiabilité, microparticules d'argent frittées, module de young, cyclage thermique.

1. INTRODUCTION

Des cycles thermiques [-55 °C /245 °C] sont appliqués sur des assemblages, composés d'une puce de puissance reportée par joint fritté sur un substrat AMB Si₃N₄ métallisation cuivre nickel flash or. Le report de la puce sur le substrat par frittage de pâte d'argent va incontestablement augmenter sa robustesse aux cycles thermiques passifs [-55 °C +140 °C] [1]. Cela induit une migration des zones fragiles du joint vers d'autres technologies composant l'assemblage de puissance. L'objet de cet article est d'étudier une des conséquences de l'augmentation de la différence de température de ces cycles thermiques passifs sur le substrat.

2. DESCRIPTION DE L'EXPERIMENTATION

2.1. Description des véhicules de test

Les VTs (véhicules de test) se composent de diodes en carbure de silicium (SiC) 15 A – 1200 V (CREE), reportées sur des substrats céramiques Si₃N₄ métallisés cuivre avec une finition nickel flash or (KYOCERA). Le joint entre la puce et substrat est composé de microparticules d'argent frittées (Fig.1).

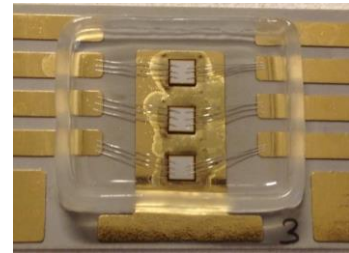


Fig.1 Véhicule de test composé d'une diode SiC reporté par frittage de pâte d'argent sur un substrat céramique Si₃N₄

2.2. Le vieillissement accéléré

Les VTs ont été vieillis par des cycles thermiques VRT (Variation Rapide de Température) de [-55 °C /+245 °C], durée de maintien aux paliers de température haute et basse : 30min, pente de transition entre les deux paliers : 10°C/min. Tous les VTs ont été insérés dans l'enceinte thermique avant vieillissement, puis après une durée prédéfinie de cyclage, certains véhicules de test sont prélevés pour subir un protocole d'analyses destructives (cisaillement, micro section) ou non destructives (RX, microscopie acoustique, caractéristiques thermiques).

2.3. Observation des dégradations apparaissant durant le vieillissement sur le substrat AMB

Une augmentation de la rugosité de surface de la métallisation inférieure du substrat apparaît sur l'ensemble des VTs vieillis en VRT. Le motif gravé sur la métallisation supérieure se reflète et s'imprime sur la métallisation inférieure. L'aspect visuel montre que la métallisation s'est dégradée au droit des motifs gravés sur la surface supérieure (Fig.2 gauche) avec une rugosité de surface très importante (de l'ordre d'une dizaine de micromètres mesurés au profilomètre). Cette dégradation est spécifique à ce type de cyclages thermiques. En effet, elle n'a pas été observée sur les mêmes véhicules de test soumis à plus de 2500 cycles thermiques par chocs [-55 °C / +180 °C].

Les analyses EDX ont montré que les fissures sont moins importantes dans la zone dégradée que dans celle non-dégradée. Il est également montré qu'à l'intérieur des fissures,

le cuivre s'est oxydé. Cette dégradation est rédhibitoire et peut se répercuter sur la tenue d'accroche des puces.

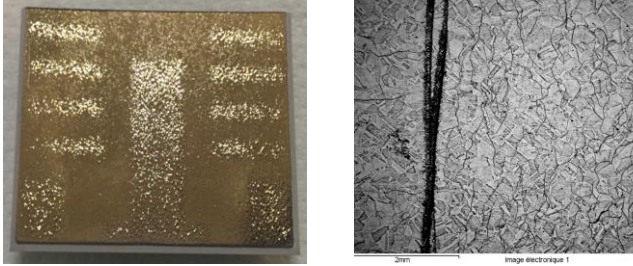


Fig.2 Empreinte des motifs de la métallisation supérieure du substrat sur la métallisation inférieure(gauche) et Image EDX de la face inférieure du substrat métallisé(droite).

2.4. Conclusion

Des cycles thermiques à différences élevées de température entre paliers haut et bas ont montré l'apparition de dégradations rédhibitoires par fissuration de la couche de nickel sur la couche de métallisation inférieure au droit des motifs gravés sur la surface supérieure du substrat. Les tests ont été effectués sur des assemblages puce substrat, qui ne sont pas fixés sur une semelle dissipatrice. L'objectif de cette étude est de démontrer par des simulations thermomécaniques que l'origine de l'apparition de ce type de dégradations est exclusivement la conséquence des contraintes thermo-mécaniques engendrées dans le substrat par les dilatations différentielles du cuivre et de la céramique. En effet, seule la modélisation du comportement thermomécanique des cycles de vieillissement sur le substrat permet d'isoler les phénomènes thermomécaniques et d'examiner si l'effet sur la métallisation inférieure est reproduit, comme l'a montré l'expérimentation.

3. SIMULATION PAR ELEMENTS FINIS (ANSYS ©) DE L'EFFET THERMOMECHANIQUE DES CYCLES VRT [-55 °C/+245 °C]*

3.1. Effet d'un cycle thermique sur les contraintes équivalentes de la face inférieure du substrat

Pour toutes les simulations thermomécaniques de cette étude, seul un quart du substrat est modélisé (Fig.3) du fait de la présence de deux symétries planaires, le modèle utilisé est le substrat AMB Si3N4 métallisé cuivre utilisé dans l'expérimentation. Les couches de nickel et le flash d'or n'ont pas été modélisés. Par hypothèse, le substrat est considéré à 25 °C (température de référence) sans contraintes ni déformations résiduelles. Les températures lui sont appliquées selon le profil indiqué. La céramique est considérée comme un matériau fragile et le cuivre comme un matériau plastique. Les paramètres thermophysiques de ces deux matériaux et les épaisseurs des couches associées sont fournis dans le tableau 1.

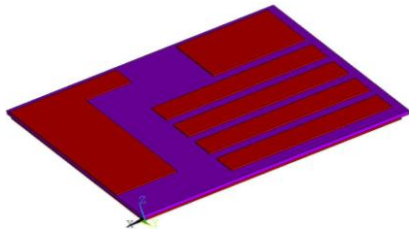


Fig.3 : représentation du modèle substrat.

Tableau 1. Les propriétés des matériaux utilisés dans les simulations thermomécaniques [3]

Matériaux	e (µm)	α (K-1)	E (MPa)	ν
Si3N4	320	3.3	300	0,25
Copper	150	15.4	110	0,34

A l'issue de l'application d'un cycle thermique, à la température de référence, l'empreinte des motifs de cuivre gravé de la face supérieure se distingue sur la face inférieure (Fig.4 droite). Le phénomène décrit dans le chapitre précédent est clairement d'origine mécanique sous l'effet des cycles thermiques. Les contraintes observées sont homogènes (Fig.4 gauche), ce qui peut expliquer, lors de l'expérimentation, les raisons de l'apparition de fissurations de surface ou de modification de rugosité et l'absence de délaminage.

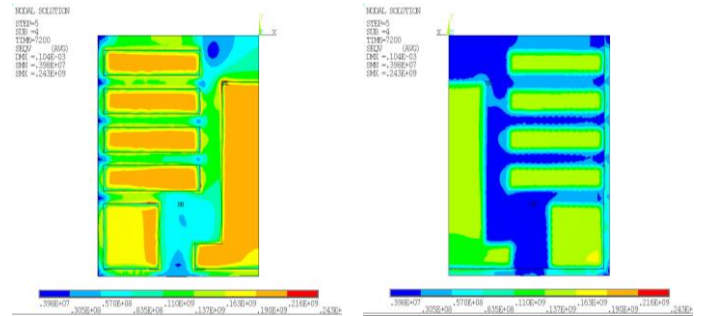


Fig.4 Contraintes équivalentes (Pa) sur la surface supérieure (gauche) et inférieure du substrat (droite)

3.2. Evolution de la contrainte équivalente moyenne en face inférieure du substrat en fonction du nombre de cycles

La courbe (Fig.5) montre l'accroissement de l'accumulation des contraintes de Von Mises (valeur quadratique moyenne des contraintes en un point) moyennées sur l'ensemble de la métallisation inférieure du substrat. Elle peut donner une indication approximative du nombre de cycles subis par le substrat avant rupture de sa métallisation.

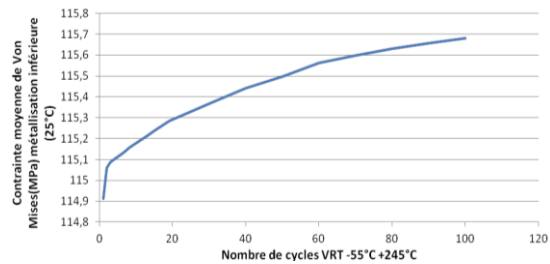


Fig.5: Contrainte moyenne dans la métallisation inférieure en fonction du nombre de cycles thermiques

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude décrite dans ce papier a montré que des dégradations survenues lors de cycles thermiques sévères à ΔT élevé sont d'origines thermomécaniques. Cette constatation oriente les solutions proposées pour en réduire les apparitions. Le papier final contiendra une étude paramétrique (dimension de plages de report de la couche de métallisation supérieure, épaisseur de cuivre et coefficient de dilatation thermique) afin d'optimiser les choix technologiques du substrat dans l'objectif de réduire ou de supprimer l'apparition de ces dégradations.

5. REFERENCES

- [1] H. Schwarzbauer and R. Kuhnert, Novel large area joining technique for improved power device performance, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, 1991, pp. 93-95.
- [2] F. Le Henaff, S. Azzopardi, J. Deletage, E. Woigard, S. Bontemps and J. Joguet, A preliminary study on the thermal and mechanical performances of sintered nano-scale silver die-attach depending on the substrate metallization, Microelectronics Reliability, vol.52, issues 9-10, 2012, pp. 2321-2325.
- [3] Dong G, Lei G, Chen X, Ngo K, Lu G-Q. Edge tail length effect on reliability of DBC substrates under thermal cycling. Solder Surf Mt Technol 2009; 21(3):10-5.