HAL
open science

Etude du comportement mécanique des joints de brasure Au-Ge pour le report des composants SiC pour l'électronique de puissance haute température

Alioune Cisse, Gregor Massiot, Catherine Munier, Paul-Etienne Vidal, Francisco Carrillo, Joël Alexis

▶ To cite this version:

Alioune Cisse, Gregor Massiot, Catherine Munier, Paul-Etienne Vidal, Francisco Carrillo, et al.. Etude du comportement mécanique des joints de brasure Au-Ge pour le report des composants SiC pour l'électronique de puissance haute température. 14ème édition de la Conférence Electronique de Puissance du Futur, Jul 2012, Bordeaux, France. hal-00944560

HAL Id: hal-00944560

https://hal.science/hal-00944560v1

Submitted on 10 Feb 2014

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.

Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)
OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: http://oatao.univ-toulouse.fr/
Eprints ID: 10601

To cite this version:

Cisse, Alioune and Massiot, Gregor and Munier, Catherine and Vidal, Paul-Etienne and Carrillo, Francisco and Alexis, Joël *Etude du comportement mécanique des joints de brasure Au-Ge pour le report des composants SiC pour l'électronique de puissance haute température.* (2012) In: 14ème édition de la Conférence Electronique de Puissance du Futur, 05 July 2012 - 07 July 2012 (Bordeaux, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Etude du comportement mécanique des joints de brasure Au-Ge pour le report des composants SiC pour l'électronique de puissance haute température

Alioune Cissé [1,2], Gregor Massiot [1], Catherine Munier [1], Paul-Etienne Vidal[2], Francisco Carrillo[2], Joël Alexis[2]

[1] EADS France – Innovation Works, 12 rue Pasteur 92152 SURESNES

[2] Université de Toulouse - INPT - LGP, 47 avenue d'Azereix 65016 TARBES

…

Ce papier contribue à l'étude de nouvelles technologies d'assemblage des puces en SiC utilisées dans les modules de puissance hautes températures (250°C). En effet, parmi tous les matériaux entrant dans l'assemblage de ces modules de puissance, le matériau de report des puces sur les substrats fait partie des matériaux les plus susceptibles aux contraintes thermomécaniques. Ainsi, pour répondre aux problématiques d'assemblage de ces puces en SiC, de nouvelles solutions de brasure doivent être développées. L'alliage de brasure Au-Ge peut être utilisé comme alliage de brasure sans plomb pour la haute température grâce à ses bonnes propriétés thermiques et mécaniques. Dans cet article, l'étude du comportement mécanique des joints formés avec la brasure Au-Ge et les puces en SiC, a été réalisée dans le but d'évaluer la robustesse et la fiabilité de ces jonctions en haute température.

I. INTRODUCTION

Le niveau de maturité atteint par les composants grand-gap tels que ceux en carbure de silicium (SiC) permet de réaliser des modules électroniques de puissance plus intégrés et pouvant fonctionner à des températures beaucoup plus élevées que dans le cas des composants en silicium (Si). Cependant les composants en SiC ne pourront atteindre tout leur potentiel qu'avec une technologie d'assemblage adaptée à la haute température. Dans le domaine aéronautique, cela sous-entend de produire des modules de puissance haute température (au-delà de 200°C), et pouvant tenir des cycles thermiques de plus de 300°C d'amplitude entre -55°C et 250°C [1]. Parmi tous les matériaux entrant dans la fabrication de ces modules de puissance, le matériau de connexion de la puce en SiC sur son substrat est l'un des points sensibles. En effet, en haute fréquence de commutation, les puces en SiC génèrent des flux de chaleur drainés vers le système de refroidissement via la couche de brasure. Ainsi, en faisant fonctionner ces puces à des températures de jonction de 250°C, le matériau de report, donc la brasure peut voir des gradients thermiques à l'origine de contraintes thermomécaniques. Ces contraintes thermomécaniques sont concentrées dans la brasure et de façon générale à toutes les interfaces. Ainsi, pour répondre aux problématiques d'assemblage de ces puces en SiC, de nouvelles solutions de brasure haute température doivent être développées.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact du profil de refusion d'un alliage de brasure haute température, Au-Ge (or-germanium) ainsi que l'influence de la métallisation des surfaces de contact de la puce sur la tenue thermomécanique des jonctions puce en SiC / brasure. Le véhicule de test considéré est constitué de puces en SiC, de brasures Au-Ge (préforme 88%Au et 12%Ge massique). Les puces seront ainsi brasées sur un substrat en nitrure de silicium (Si_3N_4). Ensuite, les assemblages sont soumis à un plan de caractérisation constitué d'analyses destructives et non destructives.

II. ALLIAGE DE BRASURE AU-GE

L'alliage Au-Ge généralement utilisé a une composition correspondant à l'eutectique avec 88% Au et 12% Ge (pourcentage en masse) dont la température de fusion est de 361°C. Le diagramme de phase à l'équilibre de l'alliage Au-Ge est présenté sur la Figure 1 [2].

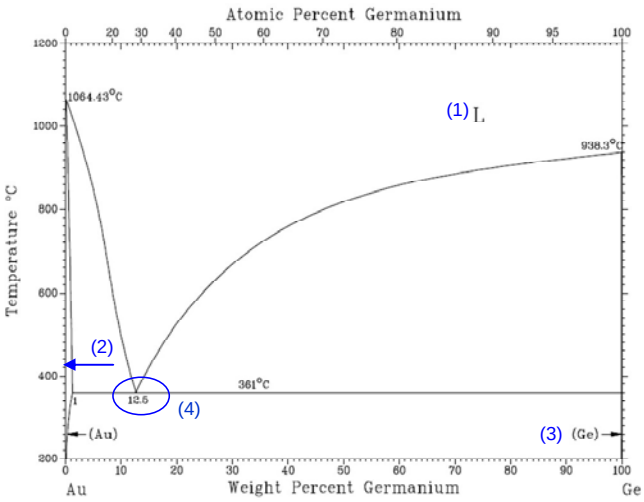


Figure 1 : Diagramme de phase de l'alliage de brasure Au-Ge [2]

Le diagramme est composé de quatre phases :

- (1) une phase liquide, notée L
- (2) une solution solide riche en or acceptant au maximum 1% de germanium en soluté à la température de la transformation eutectique
- (3) une phase de germanium avec une proportion d'or quasiment nulle,
- (4) le point eutectique, constitué par une transformation triphasée pour des proportions massiques de 88% d'or et 12% germanium.

A. *Joint de brasure Au-Ge avec une finition Au*

La présence d'une finition en or permet d'avoir une bonne mouillabilité avec la brasure Au-Ge. Cependant,

cette couche d'or a tendance à se dissoudre dans la brasure pendant le procédé de refusion [3]. Ainsi une fois que cette couche de métallisation est entièrement consommée dans le joint de brasure, l'alliage Au-Ge pourrait se retrouver directement en contact avec la barrière de nickel (Ni) généralement présente dans les métallisations de la puce et/ou du substrat céramique. A haute température (au-delà de 300°C) la couche de nickel peut diffuser dans la brasure [4] et réagir avec le germanium contenu dans la brasure pour former de nouveaux composés intermétalliques NiGe tel que Ni_5Ge_3, Ni_2Ge (Figure 2). Le germanium a tendance aussi à migrer vers les métallisations et diminuer ainsi sa proportion dans l'alliage Au-Ge. Ce phénomène peut aboutir à la destruction de la structure eutectique. Il peut aussi en résulter la formation de coalescences d'or [3].

A noter que certains de ces composés intermétalliques NiGe peuvent fragiliser les joints brasés, en diminuant leur résistance au cisaillement [5].

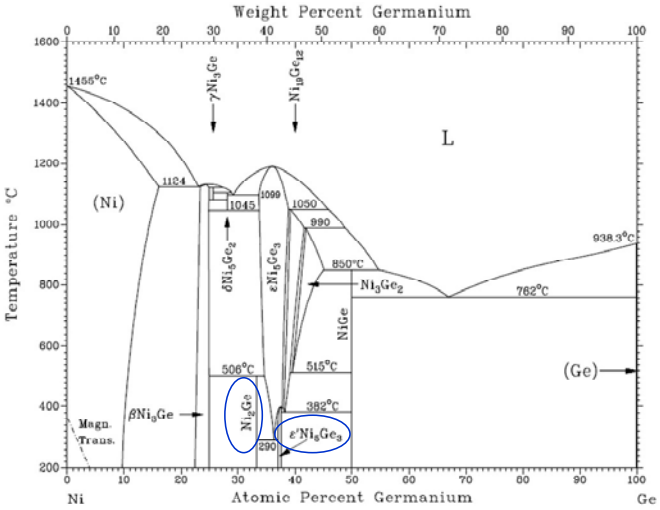


Figure 2 : Diagramme de phase de l'alliage binaire NiGe [2]

Pour limiter, voir éviter les phénomènes d'inter-diffusion entre le nickel et le germanium, deux solutions combinées pourraient convenir :

- la première consiste à augmenter l'épaisseur des couches de finition en or,
- la seconde consiste à diminuer la température et la durée de la refusion lors du procédé de brasage.

Ces solutions permettraient d'avoir une bonne mouillabilité des surfaces à braser et de garder toujours une couche d'or intermédiaire entre le nickel et le germanium.

B. Joint de brasure Au-Ge avec une finition Ag

La refusion de la brasure Au-Ge sur une métallisation en argent peut aboutir à un système ternaire Au-Ge-Ag (Figure 3) en utilisant une épaisse (20 µm) couche de finition en argent [4, 6]. En effet, des travaux ont montrés qu'en utilisant une épaisse couche d'argent, il est possible de diminuer la concentration en germanium dans le joint de brasure et ainsi former un nouvel alliage eutectique qui a une température de fusion supérieure (~500°C) à celle de l'alliage AuGe [4].

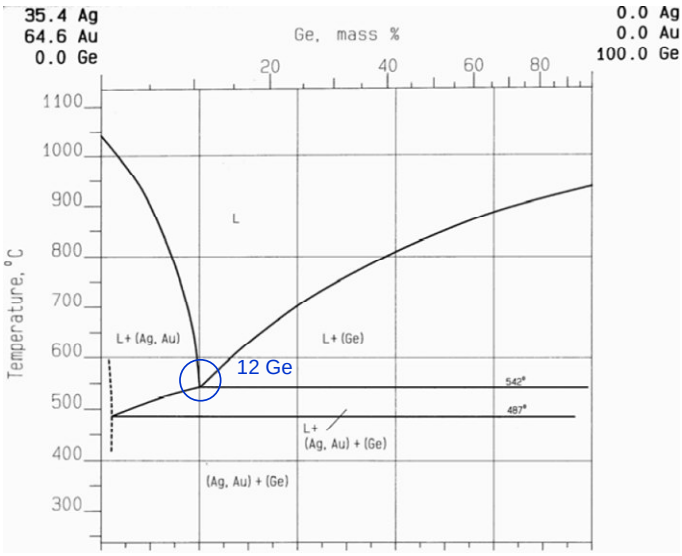


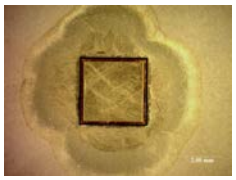
Figure 3 : Diagramme de phase partiel de l'alliage ternaire Au-Ge-Ag [6]

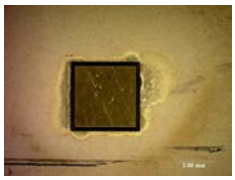
Le diagramme de phase partiel de l'alliage ternaire Au-Ge-Ag présente la même configuration que le diagramme binaire Au-Ge. Cependant le point eutectique de l'alliage Au-Ge-Ag est plus haut, 500°C contre 360°C.

III. DESCRIPTION DES ASSEMBLAGES

Les assemblages sont réalisés à l'aide d'un four à convection. Ils sont constitués d'une diode en SiC et d'un substrat céramique en Si_3N_4 métallisé cuivre (Cu) avec la technologie AMB (Active Metal Brazing). La diode est brasée sur le substrat avec l'alliage eutectique 88Au-12Ge (Figure 4).

(a)





(b) *(c)*

Figure 4 : Configuration des assemblages étudiés après refusion (a), finition Au (b), finition Ag (c)

Parmi les assemblages étudiés, il y a deux types d'échantillons. D'une part, les échantillons pour lesquels la métallisation de la face arrière des diodes est en or (Figure 4b). D'autres part, les échantillons dont la métallisation de la face arrière des diodes est en argent (Figure 4c).

A noter que sur les assemblages avec une finition en or (Figure 4b), la brasure s'étale largement autour des puces après la refusion.

IV. PLAN DE CARACTERISATION

Pour chaque type de métallisation, plusieurs profils de refusion sont testés en jouant sur certains paramètres du four. Ces paramètres sont les pics de refusion, la vitesse de convoyage des échantillons et l'atmosphère du four de refusion. Après refusion, et afin d'évaluer la qualité des joints brasés, les échantillons sont soumis à un plan de caractérisation complet. Ce plan est constitué d'analyses non destructives (imagerie) :

- observation optique,
- microscopie aux rayons X,

et de contrôles destructifs :

- test mécanique de cisaillement,
- observation par microscopie électronique à balayage (MEB) couplée à des analyses par spectrométrie à dispersion d'énergie X.

Ce plan de caractérisation permet d'étudier et de statuer sur la qualité des joints brasés. Pour cela, des critères d'acceptabilité des joints ont été définis en fonction de certains paramètres après refusion. Ces critères sont :

- assurer une bonne tenue mécanique en cisaillement de la liaison formée,
- présenter des structures métallurgiques ainsi que des composés intermétalliques robustes.

Ces paramètres ont une influence importante sur la fiabilité et la durée de vie des assemblages brasés.

V. DEFINITION DES PROFILS DE REFUSION POUR LES ASSEMBLAGES

Le four de refusion utilisé est un four à convection à quatre zones. Il permet de régler différents paramètres tels que :

- la consigne de température de chacune des quatre zones du four,
- la valeur de température du pic de refusion mesurée sur le substrat d'essai,
- la vitesse de convoyage des échantillons,
- les types de gaz injectés dans le four pour créer différentes atmosphères.

La Figure 5 montre un profil typique de refusion de l'alliage Au-Ge avec un four à convection.

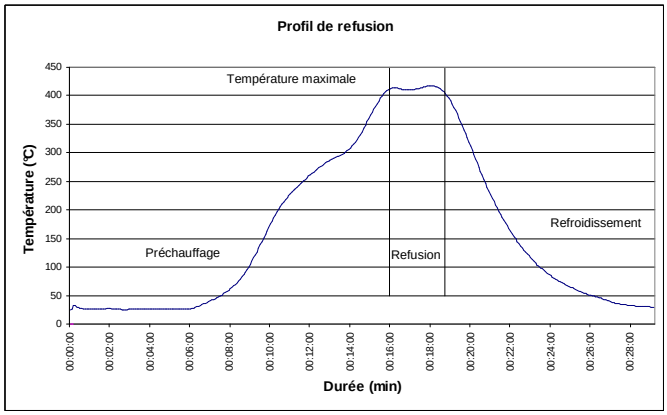


Figure 5 : Profil de refusion typique de l'alliage de brasure 88Au-12Ge

Ce profil est constitué de trois phases : une partie de préchauffage en-dessous de la température eutectique pour homogénéiser la température dans l'assemblage suivi d'un palier d'environ deux minutes à une température de ~ 40°C au-dessus de l'eutectique pour effectuer la refusion de l'alliage de brasure, et une zone de refroidissement contrôlée.

VI. RESULTATS DES ANALYSES EXPERIMENTALES SUR LES ASSEMBLAGES

Une vingtaine d'échantillons ont été assemblés selon quatre profils de refusion différents. En effet, il y a six échantillons par profil dont trois en finition or et trois en finition argent. Pour chaque finition, deux échantillons ont été passés au test de tenue mécanique en cisaillement.

Les premières observations effectuées sur ces assemblages montrent que la finition de la face arrière des puces influe sur les caractéristiques des joints après refusion (Figure 4b). Les assemblages avec une métallisation en argent présentent une plus grande tenue mécanique en cisaillement. Comme le montrent les courbes de résistance au cisaillement en fonction de la déformation (Figure 6), la tenue des assemblages avec finition en argent varie entre 50 et 75 MPa (Figure 6b) tandis que les assemblages avec une finition en or ont une résistance maximale de 30 MPa (Figure 6a). Cet écart pourrait s'expliquer par les phénomènes d'étalement de la brasure observés sur le substrat après refusion (Figure 4b). Ces phénomènes pourraient être déclenchés par un pic de refusion trop élevé et/ou un temps de refusion « long ». En effet, la couche de finition en or mouille très bien les surfaces de contact. Ainsi, l'épaisseur (2µm) des couches de finition en or pourrait contribuer à augmenter les proportions d'or dans le joint de brasure.

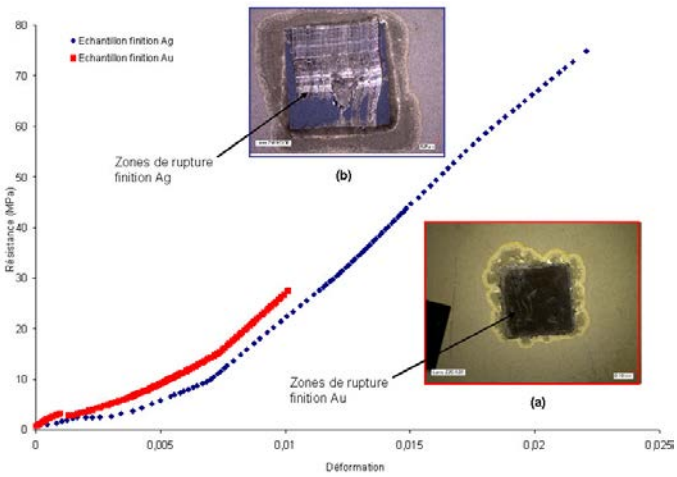


Figure 6 : Courbes des résistances au cisaillement, analyses et examen du faciès de rupture après cisaillement : finition Au (a) et finition Ag (b)

A. *Analyses de la zone de rupture des échantillons en finition Au*

Les analyses métallurgiques de la zone de rupture montrent la présence d'éléments chimiques tels que du silicium et du nickel sur la surface après cisaillement (cartographie EDX, Figure 7b). Ces éléments ne peuvent provenir que des couches de métallisation des puces (Ni), voir de la puce elle-même (Si). Ceci pourrait présager que la rupture s'est passée à l'interface entre les métallisations de la puce et la brasure.

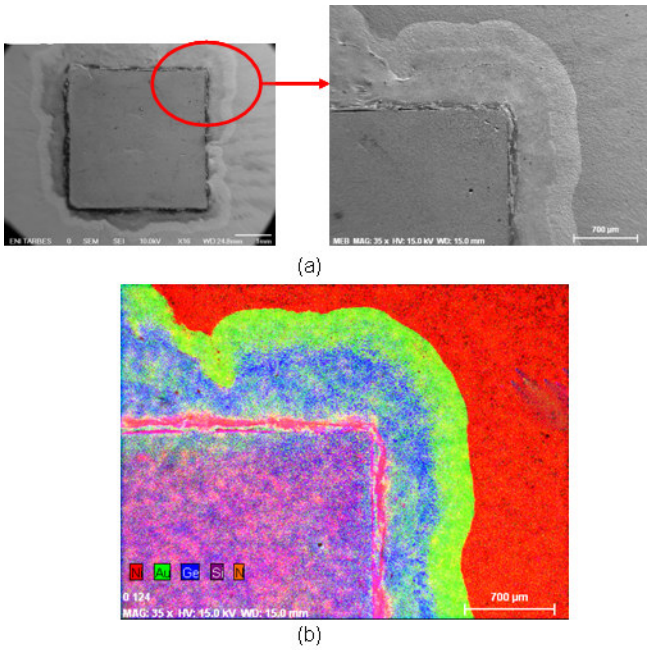


Figure 7 : Observations au MEB et analyses EDX de la zone de rupture après cisaillement (finition Au) : fractographies MEB de la surface arrachée (a) et cartographie EDX de la surface (b)

Ces résultats sont confortés par des mesures, au profilomètre optique, de l'épaisseur des couches après cisaillement (Figure 8). Celles-ci indiquent une couche de brasure de l'ordre de 95µm, tandis que l'épaisseur de la préforme de brasure était de 100µm. Cette analyse conforte l'hypothèse d'une rupture interfaciale entre la puce et la brasure.

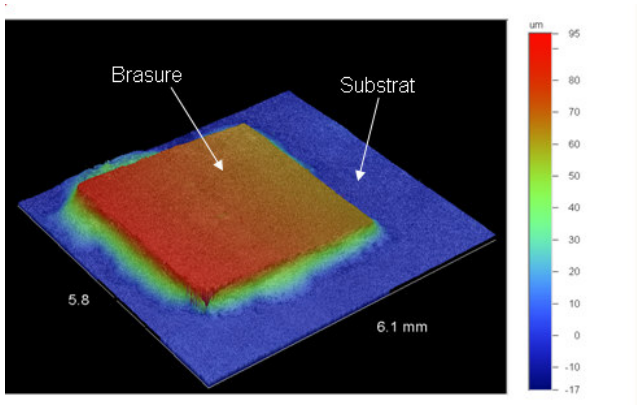


Figure 8 : Analyses au profilomètre optique de la zone de rupture après cisaillement pour la finition Au

B. *Analyses de la zone de rupture des échantillons en finition Ag*

Les analyses chimiques effectuées sur la zone de rupture des échantillons avec une finition Ag montrent la présence d'éléments tels que du titane, du nickel, du germanium, de l'or et par endroit du Cuivre (Figure 9b). Le titane et le nickel proviennent tous deux des métallisations de la puce tandis que le Cu est issu des métallisations du substrat AMB.

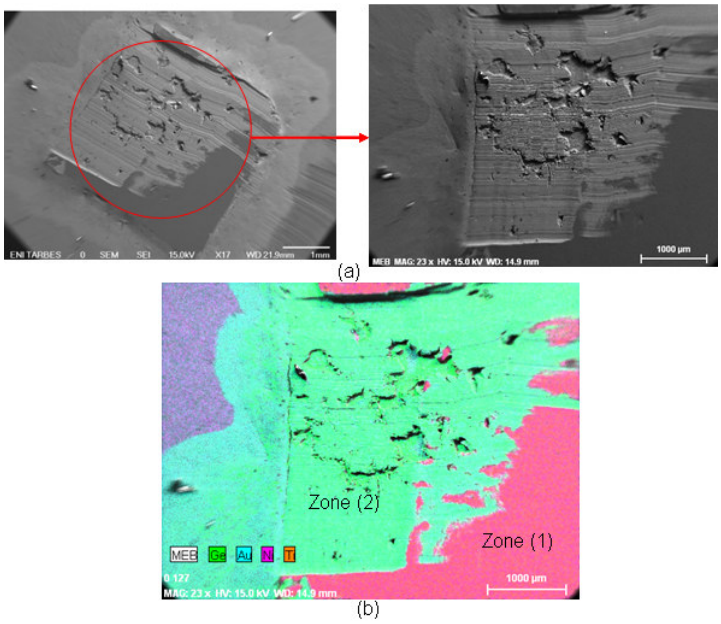


Figure 9 : Observations au MEB et analyses EDX de la zone de rupture après cisaillement (finition Ag) : fractographies MEB de la surface arrachée (a) et cartographie EDX de la surface (b)

La cartographie du faciès de rupture montre deux zones : une première zone (1) où on voit que la rupture a eu lieu à l'interface puce/brasure et une zone (2) où la rupture s'est produite au milieu de la brasure. En effet, dans la zone (1), il y a des éléments telsque le nickel et le titane qui proviennent des métallisations de la puce. Tandis que dans la zone (2), il y la présence combinée de l'alliage Au-Ge et du profil de topographie (Figure 10)

La Figure 10 présente les analyses au profilomètre optique qui montrent bien les résidus de brasure au niveau de la zone de rupture.

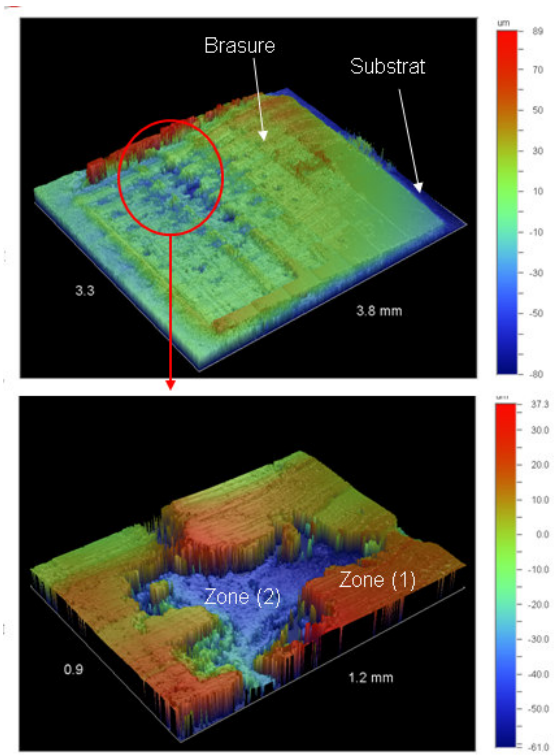


Figure 10 : Analyses au profilomètre optique de la zone de rupture après cisaillement pour la finition Ag

C. *Analyses de l'interfaces puce / brasure Au-Ge*

La Figure 11 présente une analyse de la micro-section de l'interface puce / brasure Au-Ge. Elle permet de constater la diffusion du germanium vers la couche barrière de nickel de la puce (Figure 11b). La couche de finition en or (2 µm) déposée sur le nickel n'a pu empêcher l'inter-diffusion entre le germanium et le nickel. En effet, cette dernière s'est complètement dissoute dans le joint de brasure. Sur la Figure 11b, il y a une couche (couleur jaune) entre la couche de nickel (couleur verte) et la couche d'or (couleur violette). Ainsi, on peut s'attendre à ce que cette couche (jaune) soit un composé intermétallique NiGe fragiles et qui favorise la rupture de la puce [7].

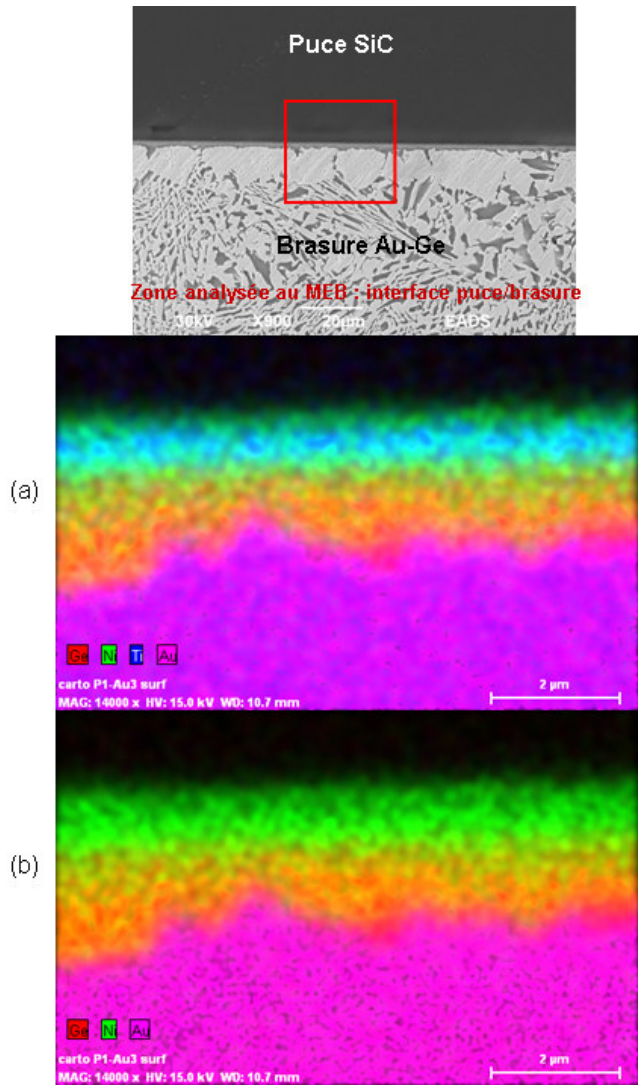


Figure 11 : Analyses de la jonction réalisée après refusion de l'alliage Au-Ge sur une finition Au : composition chimique Ti-Ni-Au-Ge (b) et composé NiGeAu(b)

VII. DISCUSSION DES RESULTATS

Les assemblages avec une finition en or présentent des joints fragiles comparés aux assemblages avec une finition argent. Les analyses destructives montrent que la puce n'accroche pas bien sur le joint de brasure après refusion. Ceci semble résulter de la création de phases intermétalliques (NiGe) fragiles. En effet, l'analyse des interfaces puce / brasure montre qu'il y a bel et bien une accumulation du germanium à proximité du nickel ainsi qu'une dissolution de la finition d'or dans le joint de brasure (Figure 11b).

VIII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ces travaux ont permis d'évaluer l'impact du type de métallisation utilisée, dans les finitions classiques des puces SiC sur la résistance mécanique des joints de brasure pour la haute température.

Ainsi donc, les jonctions avec une finition en argent semblent plus robustes que celles utilisant une finition en or. Par exemple, la tenue mécanique en cisaillement des assemblages en argent varie entre 50 MPa et 75 MPa tandis que celle des assemblages en or est de 30 MPa.

Ceci pourrait s'expliquer par la présence de composés intermétalliques fragiles dans les assemblages en finition or après refusion.

Finalement, afin d'améliorer la robustesse et la fiabilité des joints de brasure des puces SiC métallisées or, d'autres profils de refusion vont être mis en place avec un four sous atmosphère contrôlée. Cet autre procédé permettra de faire le vide pendant les phases de refroidissement et ainsi d'éviter les problèmes de porosités dans les joints.

Pour valider les résultats encourageants sur les métallisations en argent, des essais de vieillissement en haute température, à 250°C seront lancés afin de vérifier le comportement de ces jonctions.

IX. REFERENCES

[1] R. W. Johnson, C. Wang, Y. Liu, and J. D. Scofield, "Power device packaging technologies for extreme environments," *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, vol. 30, pp. 182–193, jul 2007*

[2] H. Okamoto, T. B. Massalski, "Phase diagrams of binary Au alloys". *American Society for Metals, 1987*

[3] Y. Liu, "Packaging of silicon carbide high temperature, high power devices – process and materials" *Master thesis, pp. 65-66, Auburn University, 2006*

[4] J. Hornberger, S. Mounce, R. Schupbach, et al., "High-Temperature Integration of Silicon Carbide (SiC) and Silicon-on-Insulator (SOI) Electronics in Multichip Power Modules (MCPMs)" *EPE Dresden 2005, ISBN 90-75815-08-5, pp. 1-6*

[5] Michael J. Palmer and R. Wayne Johnson, "Thick Film Modules for 300oC Applications," *Proceedings of the International High Temperature Electronics Conference, Santa Fe, NM, May 16-18, 2006, pp. 118 124*

[6] G. Petzow and G. Effenberg, "Ternary alloys- a comprehensive compendium of evaluated constitutional data and phase diagrams" *VCH Publishers, New York, 1988*

[7] F. Lang, S. Tanimoto, H. Ohashi, and H. Yamaguchi, "Long-term joint reliability of SiC power devices at 330°C" *pages 1-5. European Conference on Microelectronics and Packaging, 2009*