

Vieillessement thermique de diodes Schottky en carbure de silicium: validation de l'analyse de défaillance par le cas singulier

Patrick DENIS¹, Pascal DHERBECOURT² et Olivier LATRY²

¹INSA de Lyon, Laboratoire Ampère UMR CNRS 5005 / ²Normandie Université, Rouen, Groupe de Physique des Matériaux UMR CNRS 6634

RESUME – Des essais de vieillissement en stockage thermique à haute température (240°C) ont été réalisés sur des diodes Schottky en boîtier TO220 du commerce dans des conditions d'utilisation en mode « Uprating » ou « Derating ». Les analyses ont révélé un mécanisme de défaillance combiné, composé d'une vaporisation de l'humidité présente en quantité importante préférentiellement à l'interface résine/semelle, induisant une dégradation libérant de l'espace, et d'un étalement/dérobement de la brasure sous la puce autorisé par l'espace vide susmentionné. Les analyses aux rayons X, en microscopie acoustique, optique et électronique dans l'ordre méthodologique soutiennent avec force la description du mécanisme de défaillance. L'originalité de ces travaux est double, puisqu'au delà de l'étude des cas statistiquement représentatifs, l'étude d'un cas atypique et singulier appuie et valide indiscutablement les hypothèses posées. Ainsi, le cas particulier est présenté comme un cas potentiellement déterminant à la validation d'une analyse de défaillance et dans la perspective de solutions techniques curatives et palliatives.

MOTS-CLES – Diodes Schottky SiC, Uprating, Derating, Stockage thermique haute température, Mécanisme de défaillance combiné, Singularité.

1. Introduction

Face aux contraintes nouvelles des applications mécatroniques de dernière génération, le développement de la filière carbure de silicium pour des composants électroniques de puissance est en plein essor. Des diodes et transistors en carbure de silicium sont commercialement disponibles depuis 2001 et 2008 respectivement sur des applications types, telles que correction de facteur de puissance, limiteur, et plus récemment conversion de l'énergie électrique. Plusieurs générations de ces composants ont vu le jour et proposent des performances sans cesse améliorées, en terme de rendement notamment, ou encore d'idéalité de caractéristiques.

La technologie carbure de silicium présente de nombreux avantages par rapport à la technologie silicium classique, avec en outre une tenue en température très élevée (600°C) [1]. Les puces en carbure de silicium sont extrêmement fiables et robustes en température, mais les éléments d'assemblage et le boîtier ne permettent pas l'exploitation de cette propriété de grand intérêt. Les composants en boîtier résine époxyde sont généralement qualifiés pour des températures de 175°C, contre 150°C pour leurs homologues en technologie silicium.

Les industriels, ne disposant pas de composants répondant aux conditions en température fonctionnelles et environnementales nécessaires à leurs applications, ni aux contraintes de coûts, optent pour l'emploi de composants en mode « Uprating » ou « Derating » [2] plutôt que d'investir dans d'onéreux boîtiers « haute température ». Le mode « Uprating » consiste en l'utilisation d'un composant à des températures pour lesquelles il n'est pas qualifié, et de ré-estimer sa durée de vie, c'est à dire son temps moyen avant première défaillance (MTTF). Le second mode, en « Derating », consiste à réduire les conditions nominales de fonctionnement, pour diminuer l'auto-échauffement, et de ré-équilibrer la température de jonction par une augmentation de température environnementale.

Dans ces deux modes d'utilisation, les mécanismes de défaillance initiés sont mal connus. La connaissance précise du mécanisme et de l'origine de défaillance pourrait permettre de définir des solutions curatives ou palliatives. Les travaux présentés proposent une description fine du mécanisme de défaillance par l'étude de cas de dégradations majoritaires et de l'étude d'un cas de faible dégradation singulier.

2. Diodes Schottky SiC en stockage thermique haute température

Les composants d'étude sont des diodes Schottky en carbure de silicium du commerce en boîtier TO-220 en résine époxyde. La fiche technique du composant indique une température de jonction maximale de 175°C. Les principaux éléments constitutifs sont illustrés par la Figure 1, et définis dans la nomenclature ci-dessous.

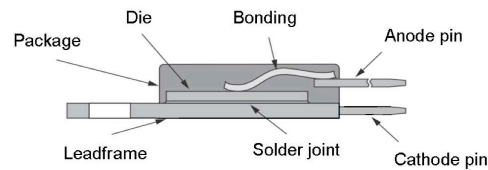


Figure 1 : Vue schématique transversale de la composition du composant et de ses différentes interfaces.

La composition du composant est détaillée ainsi :

- La puce : 100% en carbure de silicium ;
- Le bonding : 100% en aluminium ;
- La brasure : 65% d'étain, 25% d'argent et 5% d'antimoine ;
- La semelle : 99.5% de cuivre, 0.11% de fer, 0.04% de phosphore et 0.80% de nickel ;
- Le boîtier : 75-84% de dioxyde de silicium, 1-10% de résine Phenol Novolac, 0.1-1% de carbone noir, 1-10% de résine époxyde Ortho cresol Novolac et 1-10% de Diglycidylether de biphenol tetramethyl.

2.1 Conditions de tests

La nomenclature des éléments constitutifs du composant fait apparaître la brasure comme élément de faiblesse d'un point de vue thermique. Selon [3], la température de fusion de l'alliage ternaire Sn/Ag/Sb – dans les proportions massiques 65/25/10 et connu sous l'appellation Alliage Motorola J – est d'environ 235°C. En définissant une température de tests à 240°C, il est certain de conclure sur une fusion de la brasure. Néanmoins, la validation de ce seul mécanisme de défaillance reste à démontrer. 20 composants ont été placés en stockage thermique à 240°C pendant 350 heures, dans des campagnes de tests différentielles aux paramètres définis comme suit :

- * Campagne 1 : phase exploratoire – 2 composants sous tests ;
- * Campagne 2 : phase principale – 3 composants sous tests ;
- * Campagne 2 bis : phase discriminatoire – 5 composants sous tests ;
- * Campagne 3 : phase duplicative – 7 composants sous tests ;
- * Campagne 4 : phase de validation – 3 composants sous tests.

Les mesures de reprise ont été effectuées toutes les 24 heures, avec un banc de mesures I-V pulsé et un système de régulation de température Peltier fixé à 25°C, en sortant les composants de l'étuve pendant une heure.

2.2 Résultats expérimentaux

2.2.1 Dégradation électrique

Des résultats de dégradation électrique ont été relevés pour un seul indicateur : la résistance dynamique, pour laquelle les évolutions se distinguent sur la Figure 2. Sur les relevés de cette phase d'essais duplicative, il est apparu une singularité pour l'un des composants. Pour le composant #83, une faible variation de la résistance dynamique est observée au cours du stockage. En fin de cette campagne d'essai, on conclut même sur une variation finale de la résistance dynamique comme non significative.

Les usages de l'analyse de défaillance conduisent à s'intéresser, et même à se focaliser, uniquement sur les cas majoritaires pour mener l'analyse. Cette démarche est bien entendu entreprise et développée jusqu'à identification du mécanisme de défaillance. Toutefois, le cas singulier, et même unitaire, n'a pas été écarté de l'analyse – ce qui apparaîtra comme un choix pertinent, ce cas permettant de valider et de conforter non seulement l'analyse de défaillance, mais aussi d'imaginer des solutions techniques.

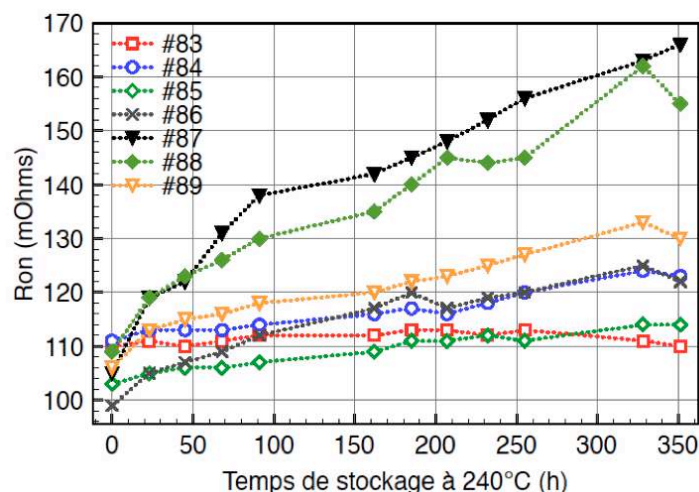


Figure 2 : Evolutions de la résistance dynamique en fonction du temps de stockage à 240°C pour 7 composants Campagne 3.

2.2.2 Dégradations structurales

La première étape de l'analyse physique a été effectuée par une analyse aux rayons X, révélant un étalement de la brasure comme logiquement attendu. De plus, ces images révèlent un état de rugosité important. Les clichés en microscopie acoustique en réflexion ont complété et corroboré les micrographies aux rayons X par la détection de délamination entre le boîtier et la semelle. A ce stade de l'analyse, il est apparu comme indispensable de vérifier l'état de jointure de la zone tête de semelle/résine comme suggéré par l'analyse en microscopie acoustique. Les observations sont concordantes en confirmant une délamination, mais ces images apportent aussi l'information de fissuration de la résine nécessairement issue de contraintes mécaniques, dont l'origine sera déterminée plus loin dans l'analyse de défaillance proposée.

En complément, des découpes et polissages de composants ont abouti à des coupes transversales démontrant que la résine s'est disjointe de la semelle d'un espace estimé à 40-50µm.

Enfin, des ouvertures mécaniques de boîtiers neufs et dégradés par le protocole expérimentale ont permis de conclure sur un affaiblissement important de la tenue mécanique de l'interface brasure/contact ohmique. Bien qu'ayant chimiquement évoluée, l'interface semelle/brasure ne présente aucun vides (voids).

Pour le cas singulier, la configuration de la brasure sous la puce après traitement thermique est bien différente puisqu'elle maintient massivement et surfaciement (Figure 3) le contact électrique comme attesté par les mesures électriques de la Figure 2.

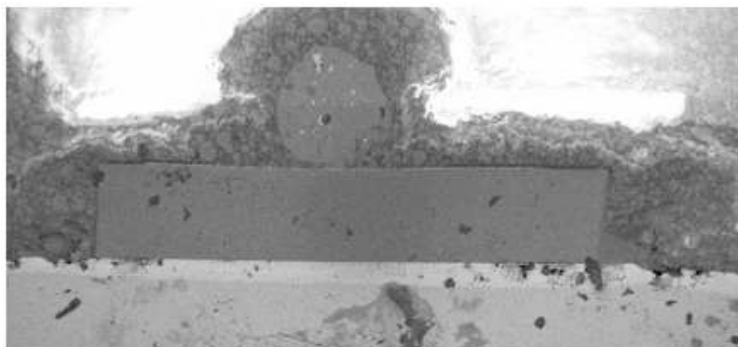


Figure 3 : Etat d'intégrité satisfaisant de l'assemblage du composant singulier (#83) après traitement thermique.

L'intégrité apparente du contact est édifiante et explique la perte nulle du contact électrique au cours des essais. Les faibles fluctuations de la résistance dynamique se comprennent par une brasure en fusion, mais toujours maintenue dans un espace contenu et limité.

2.3 Analyses et description du mécanisme de défaillance à l'œuvre

2.3.1 Cas majoritaires

Les analyses de défaillance menées, à la lumière de tous les éléments méthodologiquement obtenus sur l'ensemble des échantillons, ont amené à conclure sur un mécanisme de défaillance combiné. Une présence importante d'eau à l'interface semelle/boîtier entraîne un effet connu sous le nom d'effet « popcorning » [4]. La transformation brutale de l'eau liquide en vapeur crée une surpression induisant une délamination et une fissuration du boîtier. Un espace est alors libéré autour de la brasure, qui en fusion, va pouvoir s'étaler et se dérober de sous la puce maintenue en position en son dessus par le boîtier. Ce mécanisme combiné se déroule alors en deux étapes illustrées en Figure 4.

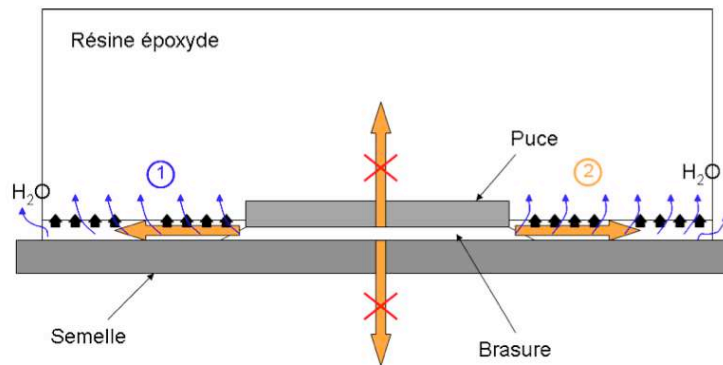


Figure 4 : Illustration des deux étapes successives du mécanisme de défaillance combiné suite à un traitement thermique au-delà des spécifications fabricant.

2.3.2 Cas singulier

Le cas singulier est déterminant dans la validation de l'analyse puisqu'il permet de supposer une faible quantité d'eau initiale à l'interface semelle/boîtier n'ayant pas autorisé l'étalement et le déroboement de la brasure sous la puce. Ainsi, ce cas se présente même comme un cas « sain » qu'il serait de grand intérêt de reproduire par une maîtrise plus élevée du procédé de fabrication. Il permet aussi d'imaginer des solutions techniques qui consisteraient à confiner la brasure dans un logement quasi-inextensible (tel que le procédé « glob-top » [5]) en dépit de fortes températures appliquées.

3. Conclusion

L'analyse de défaillance de diodes Schottky en carbure de silicium soumises à une contrainte thermique élevée a abouti à une identification fine du mécanisme de défaillance combiné à l'œuvre. L'étude d'un cas singulier s'est révélée déterminante pour la validation de l'analyse, mais aussi pour envisager des perspectives de fabrication de composants plus fiables. L'effet « popcorning » identifié alors comme amorce de la perte de contact électrique peut être contrôlé par la production de composants tels que le cas singulier traité. Une autre piste palliative proposée consisterait en l'ajout d'un délimiteur d'espace pour la brasure, telle que la solution « glob-top » limitant la délamination d'un fil de bonding sous contrainte de cyclage thermique.

4. Références

- [1] W. Wondrak, Physical limits and lifetime limitations of semiconductor devices at high temperatures, *Microelectronics Reliability* 39 (1999), 1113–1120.
- [2] L. Condra, R. Hoad, D. Humphrey, T. Brennom, J. Fink, J. Heebink, C. Wilkinson, D. Marlborough, D. Das, N. Pendse, M.G. Pecht, and M.G. Pecht, Terminology for use of parts outside manufacturer-specified temperature ranges, *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on* 22 (1999), no. 3, 355–356.
- [3] Anton Zoran Miric and Angela Grusd, Lead-free alloys, *Soldering and Surface Mount Technology* 10/1 (1998), 19–25.
- [4] M. H. Shirangi, Simulation-based Investigation of Interface Delamination in Plastic IC Packages under Temperature and Moisture Loading, Ph.D. thesis, Fakultät V Verkehrs und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin, 2010.
- [5] A. Hamidi, S. Kaufmann, and E. Herr, Increased lifetime of wire bonding connections for IGBT power modules, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE*, vol. 2, 2001, pp. 1040–1044 vol.2.