

Méthode de caractérisation expérimentale de l'état de santé d'un composant constituant un module de puissance

A. Gopishetti¹, S. Baffreau², P.-E. Vidal^{1,3}

¹Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA), Pau, France, anusha.gopishetti@univ-pau.fr

²IUT-Tarbes GEII, Tarbes, France, stephane.baffreau@iut-tarbes.fr

³Université de Toulouse, INP-ENIT, Tarbes, France, paul-etienne.vidal@enit.fr

Mots clés (en français et en anglais) : protocole de mesure, vieillissement, diagnostic, interrupteur de puissance. experimental protocol, aging test, diagnostic, power switch.

Résumé/Abstract

L'article présente une méthode non destructive de caractérisation de l'état de santé d'un des composant d'un module de puissance. Cette méthode repose sur l'analyse des interactions électromagnétiques sur une large bande de fréquences. Elle est appliquée avant et après chaque cycle de vieillissement d'un composant sous test. Une première détection de défaillance et son analyse sont détaillées afin d'identifier précisément les origines de cette défaillance. Cette identification de défaillance est validée au moyen de simulations électriques. Une amélioration du processus de mesure est décrite. Les résultats des nouvelles expérimentations menées incluant l'évolution du processus sont présentés afin de valider les améliorations attendues.

This paper presents a non-destructive method for characterizing the health status of one component of an power module. This method is based on the analysis of electromagnetic interactions over a wide frequency bandwidth. It is applied before and after each aging cycle of a device under test. A first failure detection and its analysis are detailed in order to precisely identify the origins of this failure. This fault identification is validated by means of electrical simulations. An improvement in the measurement process is described. The results of the new experiments carried out including the evolution of the process are presented in order to validate the expected improvements.

1 Introduction et contexte

La conversion d'énergie électrique revêt un caractère primordial dans bon nombre de systèmes de gestion de l'énergie. Sa mise en œuvre nécessite très souvent l'utilisation de convertisseurs statiques afin d'échanger l'énergie, initialement stockée dans des batteries ou produite par des génératrices, avec des organes récepteurs chargés de l'utiliser pour générer des mouvements ou toute autre action adéquate pour le système considéré. Nous retrouvons très largement ces dispositifs d'électroniques de puissance dans des applications embarquées tels que le domaine des transports où ils se doivent de répondre à différentes contraintes environnementales (perturbations électromagnétiques, etc.) et fonctionnelles (intégration, fiabilité, etc.). L'un des enjeux actuels consiste à détecter ou diagnostiquer, de façon prédictive et non destructive, l'apparition de la défaillance de l'un des éléments actifs (semi-conducteur) ou passifs (substrat céramique ou interconnexions) constituant un module de puissance. Pour essayer de répondre à cet enjeu, il est nécessaire de mettre en place des protocoles de mesures discriminatoires et dont la fiabilité doit être éprouvée.

Notre étude s'intéresse au développement d'un protocole de caractérisation expérimentale non destructive pour surveiller l'état de santé d'un des composants constituant un module de puissance. Cette caractérisation repose sur le postulat qu'une altération des caractéristiques d'un élément du module de puissance va se traduire par une modification d'impédance. L'article décrira dans un premier temps le protocole initialement mis en place pour obtenir une telle caractérisation. Dans un second temps, le protocole de mesure sera appliqué dans le cadre d'une étude de vieillissement accéléré d'un substrat céramique. Les résultats expérimentaux obtenus seront analysés afin d'identifier l'élément en cause de la détection d'une première défaillance. Une amélioration du protocole de mesure sera ensuite décrite et les résultats de mesures obtenus seront comparés au protocole initial. Enfin, une conclusion et les perspectives sur ce sujet d'étude seront présentées.

2 Description du protocole de mesure

Le protocole de caractérisation de l'état de santé d'un élément constituant un module de puissance est composé de deux étapes. La première consiste à mesurer au moyen d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) les paramètres S du dispositif sous test (Figure 1-a). Cette mesure, réalisée sur 2 ports, fournit les paramètres de réflexion (S11 et S22) et de transmission (S21 et S12). La seconde étape permet de convertir [1] les résultats mesurés sous la forme d'une représentation en paramètres Z.

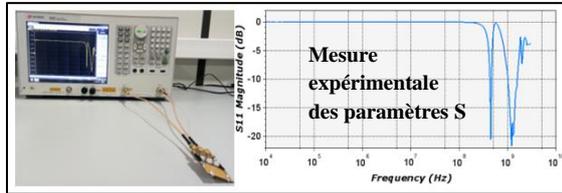
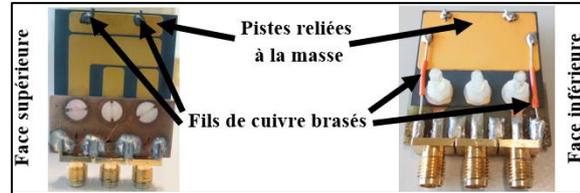


Figure 1 : a - Mesure des paramètres S



b - Substrat céramique avant vieillissement

3 Expérimentation : étude du vieillissement d'un substrat céramique Si₃N₄

Afin de valider le postulat initial, une étude de vieillissement a été menée sur un substrat céramique métallisé utilisé dans les modules de puissance, à savoir du Nitrure de Silicium Si₃N₄. Sur la face supérieure de ce substrat, 4 pistes de cuivre permettent l'intégration d'interrupteur à matériau semi-conducteur, et la circulation des courants de puissance et de commande. La face inférieure présente une large surface de cuivre afin de dissiper l'excès de chaleur obtenu lors du fonctionnement en commutation. Initialement, les pistes non connectées aux ports du VNA sont reliées à la masse au moyen de brasures et de fils de cuivre (Figure 1-b). Enfin, une interface spécifique a été développée pour connecter le substrat aux deux ports du VNA, la troisième étant connectée à la masse.

Avant la première mise en vieillissement du substrat, une mesure a été réalisée constituant ainsi la référence initiale de l'expérimentation. Ensuite, après chaque étape de vieillissement, une nouvelle mesure sera réalisée puis comparée à celle de référence.

4 Première détection de défaillance et identification de l'élément en cause

Après 318 cycles de vieillissement, une modification notable des courbes de paramètres S (Figure 2-a) et par voie de conséquence des paramètres Z (Figure 2-b) a été constaté comme l'illustre la figure 2. Sur la bande de fréquences allant de 50 kHz à 100 MHz, les paramètres Z indiquent clairement que le comportement capacitif du dispositif sous test reste inchangé entre les deux mesures. En revanche, les modifications de la fréquence de résonance et du comportement inductif en suivant permettent d'identifier clairement que cette altération est liée principalement à une modification d'inductance.

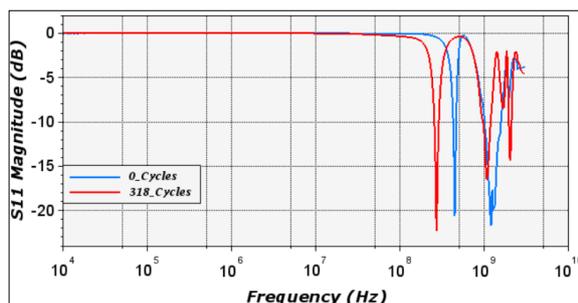
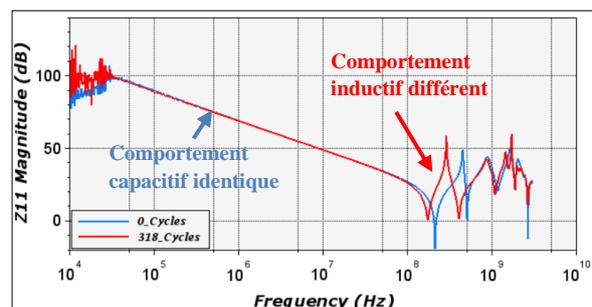


Figure 2 : a - Mesure de paramètre S11



b - Z11 déduit après 318 cycles de vieillissement

Suite à ces mesures (référence et défaillance constatée après 318 cycles de vieillissement), une extraction des impédances [2][3] a été réalisée et est présentée dans le Tableau 1. Les différentes résistances, inductances, capacités et conductance correspondent à celles du DUT et sont représentées sur le schéma électrique de l'expérimentation (Figure 3-a).

Les valeurs obtenues confirment bien une faible évolution de la capacité mais une nette augmentation de l'inductance du dispositif sous test. Par ailleurs, les dimensions et la géométrie des pistes du substrat présentent des caractéristiques de nature capacitive. En revanche, les fils brasés de mis à la masse auront une nature

d'impédance essentiellement inductive. Par conséquent, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'ils sont à l'origine de cette défaillance.

DUT	R_{11} (Ω)	R_{12} (Ω)	R_{22} (Ω)	L_{11} (nH)	L_{12} (nH)	L_{22} (nH)	C_{11} (nF)	C_{12} (nF)	C_{22} (nF)	G_{11} (μ S)	G_{12} (μ S)	G_{22} (μ S)
Sain (0 cycle)	0.12	0.03	4.6	4.53	4.72	12.63	58.47	3854	9.2	45.11	45.94	44.73
Défaillant (318 cycles)	1.06	0.04	7.81	6.37	8.18	31.32	59	4513	10.18	0.908	1.04	0.169

Tableau 1 : Paramètres RLCG extraits des mesures après chaque cycle de vieillissement

Par ailleurs, des simulations électriques reprenant les valeurs d'impédance ci-dessus, ont été réalisées à l'aide du logiciel LTSPICE. Les résultats des paramètres Z obtenus pour le substrat sain sont présentés à la Figure 3-b et comparés à ceux mesurés. La corrélation entre les deux courbes est satisfaisante pour les fréquences inférieures à 250 MHz, soit un peu au-delà de la première résonance.

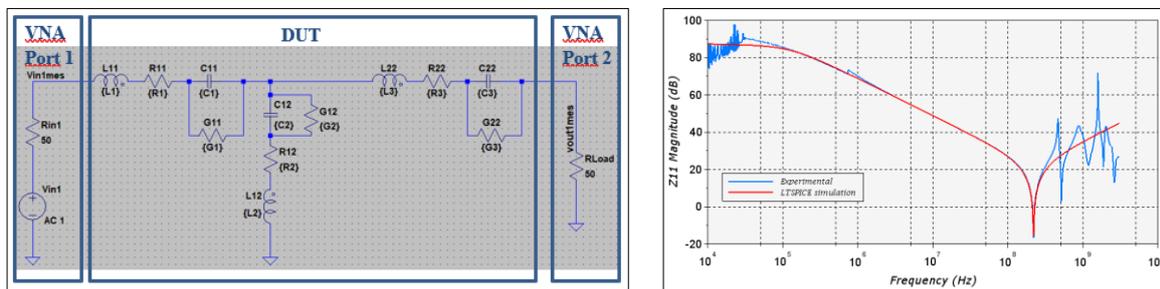


Figure 3 : a - Schéma électrique de l'expérimentation b - Comparaison mesure et simulation d'un substrat sain

Enfin, pour valider définitivement l'hypothèse de départ, les fils de mise à la masse initiaux ont été remplacés par de nouveaux présentant des caractéristiques électriques et géométriques identiques. Les substrats ainsi renouvelés ont été caractérisés au VNA et l'extraction des impédances RLCG ont été comparés à celles des substrats sains de référence et défaillant après 318 cycles de vieillissement (Tableau 2). Nous constatons que la conductance reste très proche de celle du substrat défaillant, mais cette caractéristique reste actuellement difficilement exploitable. En revanche, les valeurs d'inductance des substrats dont les fils de mise à la masse ont été renouvelés sont quasiment identiques aux valeurs initiales de ces mêmes inductances, ce qui confirme bien l'hypothèse de départ.

DUT	R_{11} (Ω)	R_{12} (Ω)	R_{22} (Ω)	L_{11} (nH)	L_{12} (nH)	L_{22} (nH)	C_{11} (nF)	C_{12} (nF)	C_{22} (nF)	G_{11} (μ S)	G_{12} (μ S)	G_{22} (μ S)
Sain (0 cycle)	0.12	0.03	4.6	4.53	4.72	12.63	58.47	3854	9.2	45.11	45.94	44.73
Défaillant (318 cycles)	1.06	0.04	7.81	6.37	8.18	31.32	59	4513	10.18	0.908	1.04	0.169
Renouvelé (318 cycles)	0.68	0.03	8.1	4.8	4.5	11.94	57.85	4321	10.42	0.276	0.354	0.301

Tableau 2 : Paramètres RLCG extraits des mesures pour le substrat sain et après renouvellement des fils de mise à la masse.

5 Amélioration du protocole de mesure

Afin de robustifier le protocole de mesure, une interface spécifique de mise à la masse des pistes non connectées de la céramique a été réalisée en fabrication additive (Figure 4-a). Les fourches présentent sur la partie arrière de l'interface permettent de relier les deux pistes flottantes au même potentiel. Quant aux deux coulisses latérales, elles établissent la liaison électrique entre les deux pistes précédemment citées et le plan de masse présent sur l'interface de connexion située entre le VNA et la céramique sous test (Figure 4-b). Les interfaces de mise à la masse et de connexion au VNA sont utilisées uniquement lors des mesures de contrôle de défaillance mais ne subissent pas les cycles de vieillissement. Ainsi, les fils brasés initialement utilisés pour le protocole de mesure sont supprimés. Le substrat soumis aux tests de vieillissement ne comporte donc plus aucun autre élément extérieur susceptible de venir altérer la mesure après vieillissement.



Figure 4 : Interface de mise à la masse des pistes non connectées - seule (a) et en condition de mesure (b).

Lors de la campagne de mesures suivante, des céramiques seules et d'autres avec des fils de cuivre brasés renouvelés ont été vieillies au cours de cycles supplémentaires. Les mesures ont montré un retour à l'état précédent pour les céramiques avec fils de cuivre (Figure 5), validant également le vieillissement des fils de mise à la masse ou de leurs brasures.

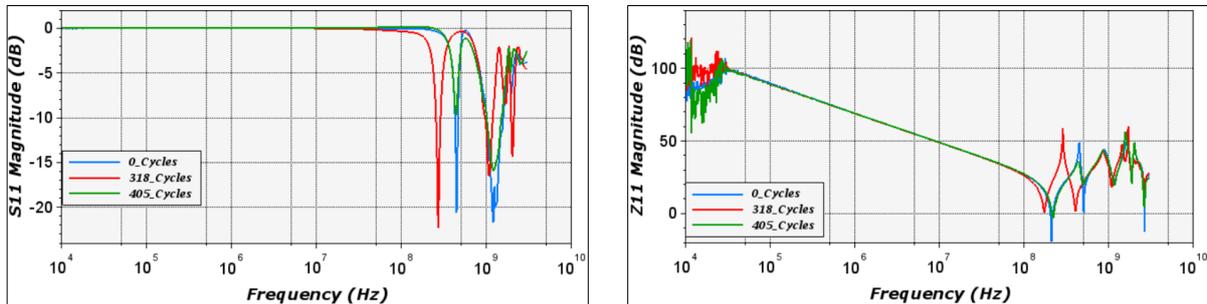


Figure 5 : Mesure de paramètre S11 et Z11 déduit après 405 cycles de vieillissement.

Quant aux mesures réalisées avec l'interface de mise à la masse, elles fournissent des résultats similaires tout en éliminant la problématique de leur propre vieillissement (Figure 6). Par ailleurs, elles sont également à l'origine d'un gain de temps non négligeable et de la robustification du processus de mesure expérimental.

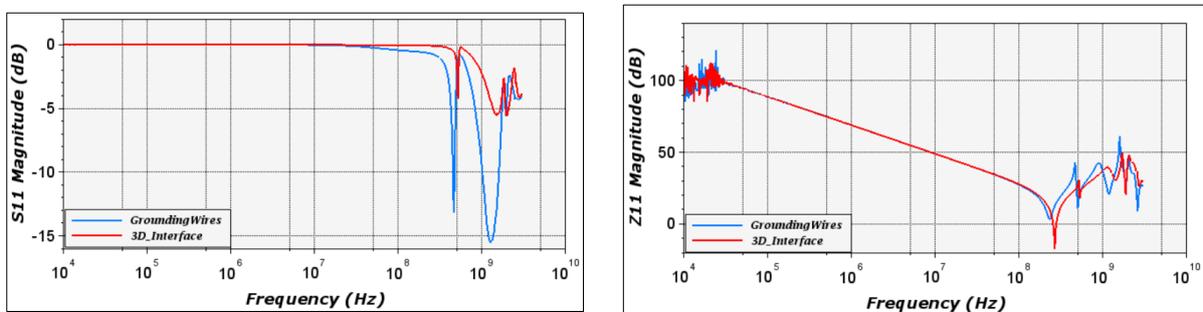


Figure 6 : Comparaison des résultats de mesure entre les deux protocoles (fils brasés et interface 3D de mise à la masse) avant vieillissement.

6 Conclusion et perspectives

Cet article décrit une méthode de contrôle non destructif d'un constituant d'un module de puissance, le substrat céramique métallisé. Le protocole de mesure utilisé a révélé un vieillissement de l'instrumentation nécessaire à la mesure. Une caractérisation de cette altération a conduit à la réalisation d'une interface optimisée. Relativement au vieillissement des matériaux du prototype sous test, les derniers résultats de vieillissement obtenus ne permettent pas de mettre en évidence une altération. En revanche, ils montrent la robustesse du protocole de mesure puisque qu'après 3338 cycles de vieillissement, les mesures sont identiques.

7 Remerciements

Ce travail s'effectue dans le cadre de la chaire partenariale EFICIENCE PIA-ANR-16-IDEX-0002 et est, de ce fait, soutenu par le projet E2S (Solutions et Energie pour l'Environnement) de l'UPPA (Université de Pau et des Pays de l'Adour).

Références bibliographiques

- [1] Test & Measurement Application Note 95-1 S-Parameter Techniques, accessible en ligne le 19/12/2022 : www.ieee.li/pdf/viewgraphs/s_parameter_techniques.pdf.
- [2] T. Liu, T. T. Y. Wong, and Z. J. Shen "A New Characterization Technique for Extracting Parasitic Inductances of SiC Power MOSFETs in Discrete and Module Packages Based on Two-Port S-Parameters Measurement", IEEE Transactions on Power Electronics DOI 10.1109/TPEL.2017.2789240, 2018.
- [3] S. Baffreau, and P. E. Vidal " Méthode de détection de défauts dans des modules d'électronique de puissance par analyse électromagnétique", 19^{ème} Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ElectroMagnétique (CEM 2018), 2018.