

Projet : ICE-T

Identification du Courant Electrique par mesure de Température :
application à un module de puissance à semi-conducteur
(ICE-T)

Laboratoires SATIE et LMT

Résumé : Nous nous proposons d'explorer différentes approches d'identification du courant électrique (source de chaleur volumique) dans un module de puissance. Nous cherchons ainsi à remonter aux sources de courant, à partir de cartographies surfaciques de température. Des éprouvettes spécifiques seront développées afin de valider la ou les méthodologies retenues.

Responsables scientifiques :

Stéphane Lefebvre (SATIE)
Eric Florentin (LMT)

Membres de l'équipe projet avec la proportion de temps consacré au projet

SATIE : Ghania Belkacem (composants à SC de puissance, modélisation thermique 20%), Mounira Berkani (composants à SC de puissance, modélisation thermique 10%), Pierre Yves Joubert (Instrumentation multi-capteurs, traitement de signal 10%), Stéphane Lefebvre (composants à SC de puissance, essais, caractérisations 10%) ; Tien Anh Nguyen (modélisation électromagnétique , 20%).

LMT : Eric Florentin (mécanique des structures, vérification et validation, 20%), Christian Rey (mécanique des structures, décomposition de domaines, vérification, méthodes numériques, 10%)

Objectif

L'analyse des mécanismes physiques à l'origine des défaillances observées sur des puces et modules de puissance à semi-conducteur (voir annexe) nécessite des études de modélisation et simulation complexes. Le vieillissement de tels dispositifs se traduit par un certain nombre de dégradation (des interconnexions fils/métallisation de puce, de la métallisation, des brasures). Ces dégradations ont un effet sur la température de la puce, notamment sur sa surface supérieure correspondant aux températures les plus élevées et qui agit à son tour sur la répartition du courant dans les puces [LUT08], [CIA02], [YAM07], [KHO07], [IRA05], [CAS04]. La connaissance fine (distribution et intensité) des courants circulant dans la puce est ainsi primordiale notamment dans le cadre d'applications nécessitant une forte durée de vie et /ou fiabilité élevée. La mesure directe de ces courants n'est guère envisageable d'un point de vue expérimental. *A contrario* la mesure par thermographie infrarouge du champ de température à la surface du composant est accessible.

L'ambition de ce projet exploratoire est ainsi d'aider à la compréhension des mécanismes physique à l'origine des défaillances observées sur ces dispositifs par la localisation des sources de courant représentatives de pertes en conduction dans la puce.

L'objet de ce projet est donc d'étudier et développer des techniques d'identification permettant de localiser les sources de courant à partir d'une cartographie de la température à la surface supérieure de celle-ci. C'est à notre connaissance une démarche originale dans ce contexte d'étude.

Contexte scientifique

La thématique d'identification couvre un large spectre dans le domaine de l'ingénierie : de l'identification de paramètres matériaux, de défauts (fissures, cavités ...) mais aussi des chargements. Il s'agit évidemment d'un problème inverse, à savoir retrouver des données d'entrée connaissant des données de sortie. Une formulation classique d'un tel problème consiste en la minimisation, éventuellement sous contraintes, d'une fonctionnelle (régularisée ou non). La définition de la fonctionnelle (et des contraintes) dépend de la nature des grandeurs à identifier, des mesures expérimentales disponibles mais aussi du choix des équations que l'on souhaite satisfaire exactement. On trouve dans la littérature d'autres formulations. Tout ceci conduit à une riche zoologie d'approches. Citons notamment l'approche FEMU (Finite Element Method Update) [KC71, LSVH90], l'approche CREM (Constitutive Relation Error Method) [GHP02, CDH02, FL10, LF11, BFLM12], l'approche EGM (Equilibrium Gap Method), l'approche VFM (Virtual Field Method) [G89, GTP02, AHPS08], ou encore l'approche basée sur l'écart à la réciprocité [I90, AB93]. La littérature est relativement abondante concernant l'identification de paramètres matériaux, on trouvera notamment dans [ABB08] une review de ces différentes approches.

L'identification de sources dans l'équation de la chaleur à partir de mesures de température sur le bord du domaine paraît moins abordée tout particulièrement dans le contexte de l'étude des modules de puissance à semi-conducteur. Les méthodes précédentes peuvent néanmoins être mises en œuvre. Il s'agit en règle générale d'approches itératives qui souffrent malgré tout d'une

sensibilité au choix tant de l'initialisation que du préconditionneur. Une première approche basée sur l'écart à la réciprocity est proposée dans [ABP11]. Toutefois pour l'heure, elle n'est envisagée que dans le cas d'un nombre fini de sources ponctuelles et de mesure de température sur l'ensemble du bord du domaine.

Dans le présent projet Farman, nous nous proposons de mettre en œuvre différentes approches d'identification précédemment évoquées, d'étudier leur adéquation à notre problème cible et éventuellement proposer de nouvelles méthodes numériques qui améliorent leurs performances. Nous nous intéresserons notamment au cas d'une mesure du champ de température sur une partie seulement du bord du domaine. En outre, des tests de validations seront menés pour évaluer la qualité de la stratégie d'identification proposée. A cet effet, des éprouvettes spécifiques seront réalisées en technologie PCB (printed Circuit Board) ou SMI (Substrat Métallique Isolé) multicouches. Ces éprouvettes simplifiées mais représentatives du problème cible, nous permettra, sur des cas tests réels, une première validation des approches développées par confrontation entre l'intensité connue (parce que maîtrisée) et celle identifiée.

Originalité du projet

Le problème de la fiabilité de composants électroniques de puissance est un problème industriel réel très actuel. La compréhension des mécanismes de défaillance est un des points clef de toute étude de fiabilité. Si des études de localisation de défauts ont déjà été mises en œuvre à l'aide de mesures thermiques, à notre connaissance, et dans le domaine des composants à semi-conducteur de puissance, aucune étude n'a été entreprise afin de chercher à remonter, à partir de mesures thermiques aux sources de puissance, et donc à la distribution de courant dans les puces.

Ainsi, au-delà de l'interaction pluridisciplinaire et du regard croisé entre les partenaires du LMT et du SATIE, l'originalité tient aussi dans la volonté de développer une approche à la fois rigoureuse et performante pour traiter cette question d'identification et de la mener jusqu'à la validation sur maquette réelle.

Pour résumer, les objectifs du projet sont :

- Etat de l'art
- Mise en œuvre, sur des modèles simples, des techniques d'identification
- Mise en évidence des limitations liées à la localisation des sources, leurs discrétisations, la géométrie du modèle...
- Développement d'éprouvettes de test simplifiées, et mesure des températures sur les bords et comparaison entre intensité identifiée et mesurée
- Encadrement de stages de M2R en commun
- Publication d'un à deux articles + conférence
- Envisager la poursuite de telles études dans le cadre de projets de type ANR

Planning prévisionnel

Ce projet à caractère exploratoire sera d'une durée de 24 mois. Il permettra de lancer un à deux stages de Master M2 sur les deux ans. Il pourra conduire à terme à un projet de plus grande envergure avec notamment un changement de dimension de l'équipe projet dans le cadre d'un projet de type ANR. Une réunion mensuelle est programmée sur ces deux années de projet pour régulièrement faire un état d'avancement du projet.

Apports scientifiques des différents partenaires à la réalisation du projet :

Le SATIE a des compétences reconnues en instrumentation multi-capteurs et traitement de signal, notamment pour l'analyse non destructive mais également dans la mise en œuvre et l'instrumentation de composants à semi-conducteur de puissance. Il possède les moyens de mesure nécessaires aux différentes expérimentations proposées dans ce projet, ainsi que les outils et l'expérience nécessaire en modélisation thermique

Le LMT a des compétences reconnues en modélisation et simulation numérique en mécanique des solides et des structures. Il dispose notamment d'une expertise dans le domaine de la vérification et validation. Plusieurs équipes travaillent sur la résolution de problèmes inverses de nature variées. Les moyens informatiques nécessaires aux différents tests numériques nécessaires à ce projet sont disponibles au laboratoire.

Financements, fonctionnement et équipement (14 000 €) :

Un total de 14 keuros est demandé pour 2 ans, qui se décompose comme suit :

Équipement (8 000 €):

- Eprouvettes et composants spécifiques (composants réalisés sur « mesure » pour la validation des modèles)	4 000 €
- Achat de nœuds pour le Cluster-LMT	4 000 €
TOTAL (HT)	8 000 €

Fonctionnement (6 000 €):

- Missions (conférences)	3 000 €
- Gratification de stage (420 €/mois)	3 000 €
TOTAL (HT)	6 000 €

Annexe : description des puces MOSFET et IGBT

Les puces de puissance sont des composants verticaux d’une épaisseur variant entre environ 70µm pour des transistors de tenue en tension 600V jusqu’à environ 1mm pour les dispositifs devant assurer le blocage des tensions les plus élevées (de l’ordre de 10 kV). Les puces transistors MOSFET (Metal Oxyde Semiconductor Fiel Effect Transistor) et IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) sont constituées par la mise en parallèle de cellules élémentaires (transistors élémentaires) avec une densité d’intégration toujours plus élevées (entre 1 et 10 millions de cellules élémentaires par cm²) afin d’améliorer les performances électriques des composants. La Figure suivante montre les cellules élémentaires sur une puce de puissance. Les modules de puissance peuvent ensuite intégrer plusieurs puces en parallèle en fonction du niveau de courant souhaité.

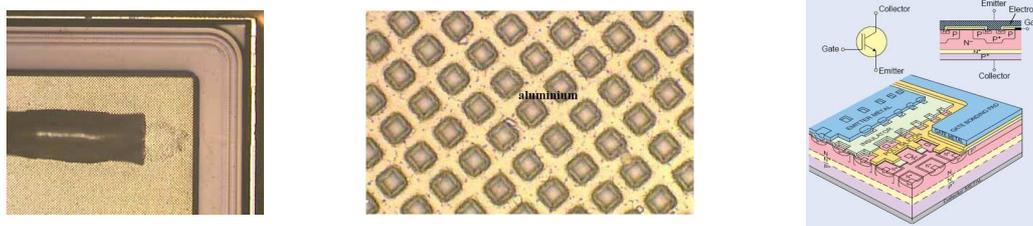


Figure 1 : Cellules élémentaires verticales d’une puce de puissance, (a) (b) surface supérieure de la métallisation de puce à deux échelles différentes montrant le motif des cellules élémentaires, (c) représentation schématique d’un transistor IGBT (grille latérale)

Ces puces doivent être assemblées dans un boîtier permettant simultanément l’évacuation vers un refroidisseur des pertes dans les puces, l’isolation électrique des puces du boîtier et la connexion électrique des puces vers l’extérieur du boîtier. La Fig. 2 présente une coupe simplifiée d’un module de puissance à semi-conducteur. La puce est isolée de la semelle (qui est montée sur un refroidisseur à air ou eau) par l’intermédiaire d’un substrat céramique métallisé. La céramique utilisée (Al₂O₃, AlN, Si₃N₄) assure les fonctions antagonistes d’isolation électrique et de conduction de la chaleur.

La puce est reliée à l’extérieur du module par des connecteurs (généralement brasés sur la métallisation supérieure du substrat céramique) et des fils généralement en aluminium (fils de bonding) soudés sur la puce (soudure ultrasonique) et de diamètre variant entre environ 100 et 500µm pour les puces de forte intensité nominale. La puce est brasée sur la métallisation supérieure du substrat céramique. Cette brasure assure également la circulation du courant traversant la puce dans son épaisseur (ce courant est collecté par les fils de bonding sur la surface supérieure de la puce). Enfin, le substrat céramique est également brasé (généralement par une brasure à plus faible température de fusion que la précédente) sur la semelle du module qui sera montée sur le refroidisseur.

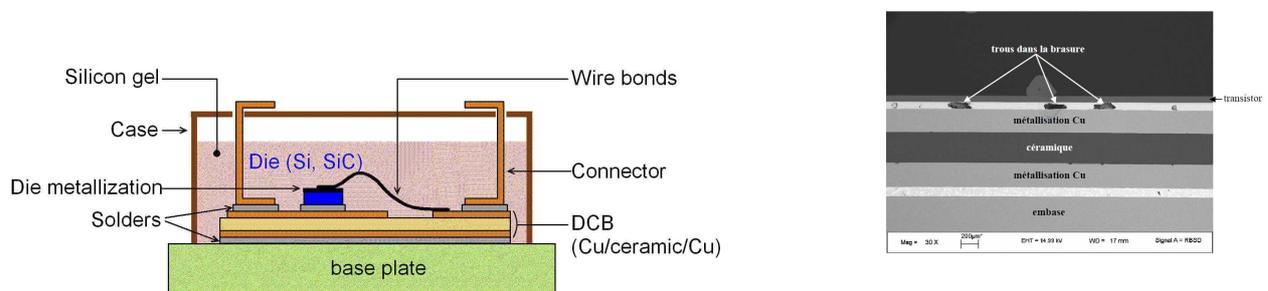


Figure 2 : Coupe d’un module de puissance à semiconducteur

Références

- [LUT08] Lutz J, Hermann T, Feller M, Bayerer R, Licht T, Amro R. Power cycling induced failure mechanisms in the viewpoint of rough temperature environment. In: Proceedings of the 5th international conference on integrated power electronic systems; 2008. p. 55–8.
- [CIA02] Ciappa M. Selected failure mechanisms of modern power modules. *Microelectron Reliab* 2002;42:653–67.
- [YAM07] Yamada Y, Takaku Y, Yagi Y, Nakagawa I, Atsumi T, Shirai M, et al. Reliability of wire-bonding and solder joint for high temperature operation of power semiconductor device. *Microelectron Reliab* 2007;47(12):2147–51.
- [KHO07] Khong B, Legros M, Tounsi P, Dupuy Ph, Chauffleur X, Levade C, et al. Characterization and modelling of ageing failures on power MOSFET devices. *Microelectron Reliab* 2007;47(9–11):1735–40.
- [IRA05] Irace A, Breglio G, Spirito P, Letor R, Russo S, “Reliability enhancement with the aid of transient infrared thermal analysis of smart Power MOSFETs during short circuit operation”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 45, 2005, pages 1706-1710.
- [CAS04] Castellazzi A, Schwarzbauer H, Schmitt-Landsiedel D, “Analysis of PowerMOSFET chips failed in thermal instability”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 44, 2004, pages 1419-1424.
- [AB93] S. Andrieux and A. Ben Abda. *The reciprocity gap : a general concept for flaws identification problems.*, Mechanics Research Communications, 20, 415–420, 1993.
- [EH00] A. El Badia, T. Ha Duong. *An inverse problem in potential analysis*, *Inverse Problems*, 16, 651–663, 2000.
- [JL01] J. Baumeister, A. Leitão. *On Iterative methods for solving ill-posed problems modeled by PDE's*, *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*, 9, 13–29, 2001.
- [F07] M. Farah. *Problèmes inverses de sources et liens avec l'Electro-Encéphalo-Graphie*, Thèse de doctorat, UTC Compiègne, 2007.
- [G89] Grédiac, M.: Principe des travaux virtuels et identification. *Comptes-Rendus Mecanique* 309, 1–5 (1989)
- [FL10] Florentin, E., Lubineau, G. Identification of the parameters of an elastic material model using the Constitutive Equation Gap Method. *Computational Mechanics*. Vol 46. Num 4. Pages 521-531. (2010)
- [LF11] Lubineau, G., Florentin, E. The global equilibrium method and its hybrid implementation for identifying heterogeneous elastic material parameters. *Computers & Structures*. Vol 89. Num 7-8. Pages 656-667. (2011)
- [BFLM12] B. Blaysat, E. Florentin, G. Lubineau and A. Moussawi. Identification of the parameters of an elasto-plastic material model using the Dissipation Gap Method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* (2012).
- [GTP02] Grédiac, M., Toussaint, E., Pierron, F.: Identification of the mechanical properties of materials with the virtual fields method, an alternative to finite element model updating. *Comptes-Rendus Mecanique* 330(2), 107–112 (2002)
- [AHPS08] Avril, S., Huntley, J.M., Pierron, F., Steele, D.D.: 3d Heterogeneous stiffness reconstruction using MRI and the virtual fields method. *Exp. Mech.* 48, 479–494 (2008)
- [AFPV10] Avril S.; Feissel P.; Pierron F.; Villon P., Comparison of two approaches for differentiating full-field data in solid mechanics. *Measurement Science and Technology* 21:1 (2010)
- [FA07] Feissel P.; Allix O., Modified constitutive relation error identification strategy for transient dynamics with corrupted data: The elastic case, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 196:13-16 1968-1983 (2007)
- [KC71] Kavanagh, K.T., Clough, R.W.: Finite element application in the characterization of elastic solids. *Int. J. Solids Struct.* 7, 11–23 (1971)
- [LSVH90] Lecompte, D., Sol, H., Vantomme, J., Habraken, A.M.: Identification of elastic orthotropic material parameters based on espi measurements. In: SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, June 2005
- [I90] Ikehata, M.: Inversion formulas for the linearized problem for an inverse boundary value problem in elastic prospection. *SIAM J. Appl. Math.* 50, 1635–1644 (1990)
- [CHR07] Claire, D., Hild, F., Roux, S.: Identification of a damage law by using full-field displacement

measurements. *Int. J. Damage Mech.* 16, 179–197 (2007)

[CHR02] Claire, D., Hild, F., Roux, S.: Identification of damage fields using kinematic measurements. *Comptes-Rendus Mécanique* 330, 729–734 (2002)

[GHP02] Geymonat, G., Hild, F., Pagano, S.: Identification of elastic parameters by displacement field measurement. *Comptes Rendus Mécanique* 330(6), 403–408 (2002)

[CDH02] Calloch, S., Dureisseix, D., Hild, F.: Identification de modèles de comportement de matériaux solides: utilisation d'essais et de calculs. *Technol. Form.* 100, 36–41 (2002)

[ABB08] Avril, S., Bonnet, M., Bretelle, A.-S., Grédiac, M., Hild, F., Jenny, P., Latourte, F., Lemosse, D., Pagano, S., Pagnacco, E., Pierron, F.: Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements. *Exp. Mech.* 48, 381–402 (2008)

[ABP11] Auffray N., Bonnet M., Pagano S., Identification de sources de chaleur dans le contexte de la thermographie infrarouge, 10ème colloque National en Calcul des Structures, Giens, (2011).

Elément de bibliographie des partenaires :

M. Arab, S. Lefebvre, Z. Khatir, S. Bontemps, “Experimental Investigations of Trench Field Stop IGBT under Repetitive Short-Circuits Operations”, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008. 15-19 June 2008, page(s): 4355-4360.

Pietranico S, Pommier S, Lefebvre S, Khatir Z, Bontemps S, Cadel E. A study of the effect of degradation of the aluminium metallization layer in the case of power semiconductor devices, *Microelectronics Reliability*, Volume 51, Issues 9–11, September–November 2011, Pages 1824–1829

N’guyen T.A., P.-Y. Joubert, S. Lefebvre, G. Chaplier, L. Rousseau. Study for the characterisation of ageing power electronics semiconductor components using the eddy current technique. *Microelectronics Reliability* 51 (2011) 1127–1135.

S. Bausson, V. Thomas, P.-Y. Joubert, L. Blanc-Feraud, J. Darbon, G. Aubert, regularized inversion of a distributed point source model for the reconstruction of defects in eddy currents imaging, *compel* vol. 30 no. 6, 2011, pp. 1777-1791.

Cung T.L., P.-Y. Joubert, E. Vourc’h, Eddy current evaluation of air gaps in aeronautical multilayered assemblies using a multi-frequency behavioral model, *Measurement*, Volume 44, Issue 6, July 2011, Pages 1108-1116.

P.-Y. Joubert, E. Vourc’h, A. Tassin, Y. Le Diraison, Source separation techniques applied to the detection of subsurface defects in the eddy current NDT of aeronautical lap joints, *NDT&E International* 43 (2010) 606–614.

Gosselet P., Rey C., Non-overlapping domain decomposition methods in structural mechanics, *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol 13, 4, pp 515-572, 2006.

Pebrel J., Rey C., Gosselet P., A nonlinear dual domain decomposition method: application to structural problems with damage, *Int J of Multiscale Computational Engineering*, V 6, 3, pp 251-262, 2008.

S. Gavaille, C. Rey, A. Delaplace, and C. Mariotti. Stratégie de couplage de la méthode des éléments discrets avec la méthode des éléments spectraux. In *9e Colloque National en Calcul des Structures*, 2009.

Parret-Fréaud, A., Rey, C., Gosselet, P., Feyel, F, Fast estimation of discretization error for FE problems solved by domain decomposition, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v.199, 49-52, pp 3315-3323, 2010.

Florentin, E., Lubineau, G. Identification of the parameters of an elastic material model using the Constitutive Equation Gap Method. *Computational Mechanics*. Vol 46. Num 4. Pages 521-531. (2010)

Lubineau, G., Florentin, E. The global equilibrium method and its hybrid implementation for identifying heterogeneous elastic material parameters. *Computers & Structures*. Vol 89. Num 7-8. Pages 656-667. (2011)

B. Blaysat, E. Florentin, G. Lubineau and A. Moussawi. Identification of the parameters of an elasto-plastic material model using the Dissipation Gap Method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* (2012).