

Titre : vieillissement par électromigration des interconnexions des circuits intégrés 3D, vers une modélisation prédictive

## Résumé

L'intégration 3D consiste à empiler verticalement plusieurs circuits intégrés et à établir des connexions électriques entre eux. Bien que les technologies d'interconnexion 3D présentent des avantages évidents et que leur processus de fabrication ait presque atteint le statut de production de masse, il existe plusieurs problèmes de fiabilité, comme c'est souvent le cas dans les technologies émergentes. L'électromigration est l'une de ces préoccupations. Une défaillance liée à l'électromigration est généralement liée à une densité de courant élevée qui circule dans une interconnexion métallique. Ce phénomène induit la nucléation de cavités dans la ligne métallique et leur croissance aboutissant essentiellement au final à des circuits ouverts. La solution la plus viable pour la compréhension fine de la dégradation par électromigration consiste à utiliser des simulations numériques basées sur des modèles physiques. Cet outil fournit aux concepteurs/ingénieurs-fiabilistes des informations complémentaires aux essais expérimentaux pour mieux comprendre les causes et la cinétique de la dégradation par l'électromigration en vue d'améliorer la conception et la fabrication d'interconnexions plus fiables. Le modèle (nucléation et croissance des cavités) sera mis en œuvre dans l'environnement du logiciel COMSOL. L'implémentation de l'approche par champ de phase ou « phase field » sera requise pour la phase de croissance des cavités. Les résultats obtenus seront confrontés à ceux obtenus expérimentalement pour vérifier la robustesse du modèle numérique et des hypothèses définies. Ce modèle sera amélioré en prenant en compte la microstructure et/ou, dans le cas particulier des alliages métalliques, l'évolution des composés intermétalliques (IMC) en fonction de la température, du courant électrique et du temps.

## Contexte technique

- Electromigration : déplacement d'atomes dans un conducteur induit par un flux d'électrons et accéléré par la température et les contraintes mécaniques. Ce phénomène peut aboutir à des circuits ouverts et/ou à des courts circuits rendant inopérants le système.
- Ce mécanisme est très présent en particulier en microélectronique où l'on observe de très fortes densités de courant et des fonctionnements à plus ou moins haute température.
- Nécessité de recourir à un modèle numérique pour mieux appréhender ce mécanisme de dégradation hautement multi-physique.

## Intérêt du sujet

- Conception/Définition des structures de test pertinentes
- Permettre une meilleure compréhension des analyses de défaillance
- Prédire des durées de vie après calibration

## Descriptif

- But : développement d'un modèle numérique de dégradation par électromigration des interconnexions

- Travail : il s'articulera autour des points suivants
  1. finalisation du modèle COMSOL développé par S. MOREAU concernant la partie nucléation d'une cavité : prise en compte de l'influence du déplacement des lacunes sur les contraintes mécaniques
  2. extension du modèle à la croissance d'une cavité : implémentation de la méthode « phase field » ; corrélation aux résultats expérimentaux (TSV, collage hybride)
  3. prise en compte de la microstructure (générateur de microstructure ; méthode Voronoï) afin de pouvoir établir une statistique de dégradation

et

4. modélisation du phénomène d'électromigration dans les interconnexions à base de brasure avec la prise en compte de la création et de la croissance d'intermétalliques (IMC) sous température, flux électronique

### Compétences recherchées

Simulation par éléments finis, matériaux, mécanique, thermique. Une connaissance de la méthode Phase Field ainsi que du logiciel COMSOL seraient appréciables.

### Encadrement

Stéphane MOREAU (LETI, DCOS/SCMS/LCFC) : ingénieur-chercheur dans le domaine de la fiabilité des briques technologiques avancées pour l'intégration 3D [1-3]. Stéphane a développé, sous COMSOL, une version beta du modèle numérique de dégradation par électromigration des interconnexions qui servira de base au travail demandé.

Olga CUETO (LETI, DCOS/SCME/LSM) : ingénieur-chercheur en simulation/modélisation avec une expérience de l'implémentation de la méthode « phase field », sous COMSOL, dans le cadre des mémoires (PCRAM) [4]

### Bibliographie

- [1] T. Frank, S. Moreau, C. Chappaz, P. Leduc, L. Arnaud, A. Thuair, et al., "Reliability of TSV interconnects: Electromigration, thermal cycling, and impact on above metal level dielectric," *Microelectronics Reliability*, vol. 53, pp. 17-29, 2013.
- [2] S. Moreau, D. Bouchu, V. Balan, A.-L. L. Berrigo, A. Jouve, Y. Henrion, et al., "Mass Transport-Induced Failure of Hybrid Bonding-Based Integration for Advanced Image Sensor Applications," in *2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2016, pp. 1940-1945.
- [3] J. H. Choy, V. Sukharev, S. Chatterjee, F. N. Najm, A. Kteyan, and S. Moreau, "Finite-difference methodology for full-chip electromigration analysis applied to 3D IC test structure: Simulation vs. experiment," in *2017 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD)*, 2017, pp. 41-44.
- [4] O. Cueto, V. Sousa, G. Navarro and S. Blonkowski, "Coupling the Phase-Field Method with an electrothermal solver to simulate phase change mechanisms in PCRAM cells," 2015

International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD),  
Washington, DC, 2015, pp. 301-304