

Évaluation d'une technologie SOI pour l'utilisation de circuits intégrés à des températures extrêmes

Cyril CALVEZ

AMPERE, UMR CNRS 5005, Université de Lyon, INSA-Lyon, 20 av. A. Einstein, 69621 Villeurbanne, France

RESUME – La technologie Silicon On Insulator (SOI) est de plus en plus employée pour la fabrication d'électronique intégrée haute température. En effet, avec des températures ambiantes de fonctionnement supérieures à 230°C, elle est particulièrement indiquée pour la réalisation de circuit intégré pour commander des interrupteurs de puissance Grand-Gap en environnements extrêmes. Le but de cette étude est de définir les limites de cette technologie à haute température. Pour y parvenir, des transistors MOSFET et des structures de test ont été caractérisées de -75 à +300°C en statique. Les différents MOSFET utilisés sont fonctionnels sur cette plage de température et aucune dégradation n'a été observée après ces tests. Des structures d'électromigration en AlCu et Tungstène seront mesurées à 250°C pour trouver la limite de la densité de courant admissible dans les interconnexions métalliques à haute température.

MOTS-CLES – SOI, haute température, électromigration, structures de test

1. Introduction

La technologie Silicon On Insulator (SOI) devient de plus en plus employée dans la fabrication de circuits intégrés haute température. Avec des températures de fonctionnement atteignant 250°C [1] [2], celle-ci est toute indiquée pour la réalisation de driver pour les interrupteurs de puissance Grand Gap. Avec la mise sur le marché d'interrupteurs de puissance en Carbure de Silicium (SiC) pouvant fonctionner à haute température, l'association à un driver SOI haute température permet de réaliser un système compact pouvant être situé au plus près de l'actionneur. L'industrie aéronautique, militaire ou encore automobile s'intéressent à ce type de système qui permettrait de diminuer le câblage reliant driver, interrupteurs de puissance et actionneur ainsi que de réduire, voire supprimer, les systèmes de refroidissement grand consommateurs de poids et de place.

Pour cette étude, on va s'intéresser aux performances des transistors MOSFET SOI en haute température afin de vérifier leur fonctionnement. Une étude des dégradations subies lors d'un test en commutation à 250°C et plus permettra de définir la limite d'utilisation et les verrous technologiques pour leur utilisation à des températures supérieures.

Une autre partie de cette étude concernera les structures d'électromigration (EM). A haute température, les effets de l'électromigration sont fortement augmentés et la densité de puissance acceptable par les interconnexions métalliques s'en ressent. Des résultats préliminaires seront présentés, ainsi que les moyens mis en œuvre pour contourner les difficultés rencontrées, inhérentes à la mesure de composants à températures supérieures à 250°C.

2. Caractérisation des transistors MOS en SOI

2.1 Présentation des transistors

La société X-REL (EASII-IC) nous a fourni plusieurs types de transistors MOSFET SOI (voir Tableau 1) qui sont encapsulés dans des boîtiers métalliques TO-220 et TO-18. Ceux-ci sont spécifiés pour un fonctionnement en température ambiante à 230°C. Les deux transistors de puissance en boîtier TO-220 peuvent être comparés aux transistors de l'étage de sortie push-pull d'un driver.

Tableau 2. Caractéristiques principales des différents transistors SOI étudiés.

Composant	Type	Vds_max	Rds_on@230°C	Application	Boîtier
XTR2N0425	NMOS	55 V	0,550 Ω	Power	TO-220
XTR2N0625	PMOS	- 75 V	4,8 Ω	Power	TO-220
XTR2N0807	NMOS	90 V	7,5 Ω	Low Signal	TO-18
XTR2N0307	PMOS	- 45 V	13 Ω	Low Signal	TO-18

2.2 Caractérisations statiques

Pour effectuer la caractérisation des différents transistors, un banc d'essai haute température pour les composants encapsulés a été développé. Avec l'aide d'un analyseur de puissance Agilent B1505A et d'un conditionneur thermique à air pulsé Thermonics T2500E/300 il a été possible de mesurer différents paramètres des transistors de -75°C à $+300^{\circ}\text{C}$ par pas de 25°C . Une grande attention a été portée à la mise en place des câblages et des programmes de caractérisations afin d'obtenir des mesures les plus justes possibles. Les mesures directes ont été effectuées en mode pulsé avec des largeurs de pulse de 50 à 100 μs afin de diminuer l'auto-échauffement du composant et les pics sur la tension de grille.

La transconductance, la résistance à l'état passant, la caractéristique directe, le courant de fuite sur le drain, le courant de fuite sur la grille ont été mesurées à chaque palier de température afin d'étudier leur évolution en fonction du temps et de la température.

2.3 Résultats des caractérisations

Tout les NMOS et PMOS sont fonctionnels sur la plage de température -75°C à 300°C (voir Figure 1 gauche). Lors du retour à température ambiante (25°C) les transistors n'ont subi aucune dégradation liées au stress en température ou au stress électrique des mesures. Ils ont tous conservés un fonctionnement normalement-fermé (voir Figure 1 droite) sur l'ensemble de la plage de température.

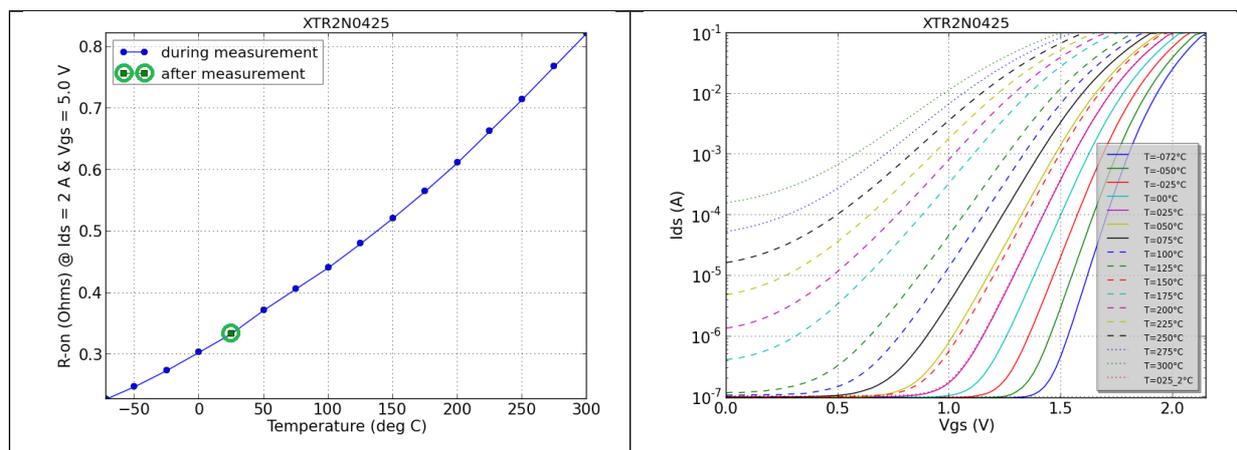


Figure 1 : Résistance Drain-Source du NMOS XTR2N0425 pour des températures de -75°C à $+300^{\circ}\text{C}$ (gauche) ; Transconductance du NMOS XTR2N0425 pour des températures de -75°C à $+300^{\circ}\text{C}$ (droite)

2.4 Conclusions et perspectives

Lors des précédentes caractérisations, l'ensemble des transistors testés sont fonctionnels de -75°C à $+300^{\circ}\text{C}$. Aucune dégradation n'a pu être observée sur l'ensemble des composants.

Des tests TDDDB sur le drain et la grille, ainsi qu'une caractérisation du composant pendant un stress en commutation et en température sont actuellement en développement. Ceux-ci permettront de vérifier la tenue en température des composants en fonctionnement réel et d'analyser les éventuelles dégradations qui pourraient survenir.

3. Caractérisation des structures de test d'électromigration

L'électromigration est un déplacement d'atome dans un conducteur induit par la circulation d'un courant. Ce phénomène est due à la friction des électrons traversant le conducteur, qui ajoutée au champ électrique permet le déplacement des atomes du conducteur. L'électromigration est dépendante de la densité de courant, de la température, de la nature du matériau et de sa géométrie. Ce mécanisme peut provoquer la modification géométrique du conducteur, donc de sa résistance, et provoquer un emballement thermique par augmentation de la puissance dissipée dans celui-ci, jusqu'à la destruction de l'interconnexion métallique. Le phénomène est aggravé à haute température, ce qui a conduit à utiliser

d'autres matériaux que l'aluminium utilisé habituellement, comme le tungstène qui se montre fiable jusqu'à 320°C [3]. Un phénomène additionnel de thermomigration des pistes aluminium a aussi été mis en évidence lorsque le circuit est soumis à un gradient de température [4], et devra aussi être envisagé dans l'étude des structures de test.

3.1 Présentation des structures de tests d'électromigration

Deux structures permettant de mettre en évidence l'électromigration des pistes métalliques d'un circuit intégré ont été réalisées. L'une en alliage d'aluminium et l'autre en tungstène (voir Figure 2 gauche).

Celles-ci nous permettront de mettre en évidence la limite d'utilisation en densité et en température. En effet, à haute température, les effets de l'électromigration sont fortement augmentés et la densité de puissance acceptée dans les pistes métalliques s'en trouve diminuée. Cela peut être problématique lors de la commande d'interrupteurs à fort courant de grille/base tels que les SJT ou BJT.

Une diode PIN latérale fabriquée à même la puce est située entre les deux structures d'électromigration (voir Figure 2 gauche) et permet de connaître précisément la température de la puce SOI à moins d'un degré Celsius près [5]. En effet, à courant constant, la tension de la diode PIN SOI en mode direct est quasiment linéaire avec la température sur la plage de température choisie et est de la forme :

$$V_D(T) = V_{g0} - \frac{T}{T_r} [V_{g0} - V_D(T_r)] - \eta \cdot V_T \ln\left(\frac{T}{T_r}\right)$$

On choisira un courant constant de 10µA afin d'obtenir à la fois une mesure fiable de la tension et un auto-échauffement négligeable de la diode (voir Figure 2 droite).

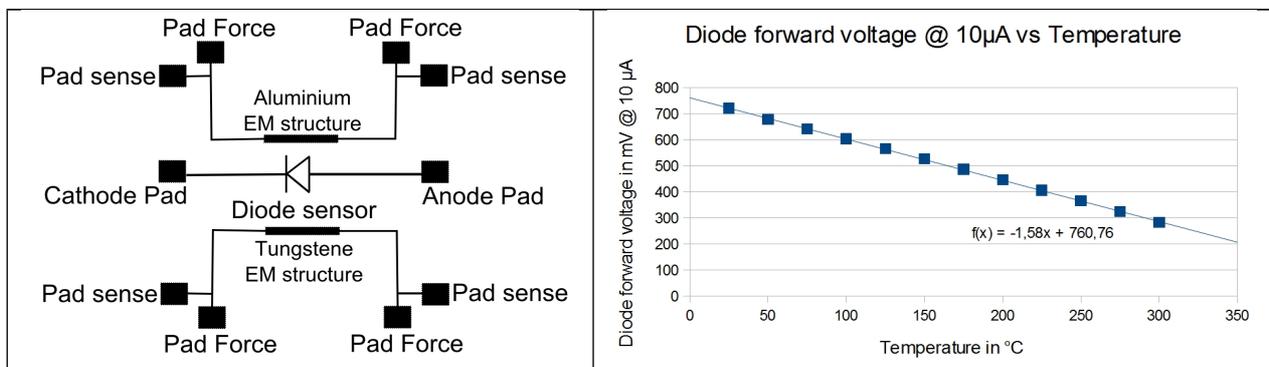


Figure 2 : Schéma de principe des structures d'électromigration (gauche) ; Caractéristique du capteur de température (Tension de la diode à courant constant en fonction de la température de +25 à +300°C) (droite)

3.2 Mise en place du banc de test

Dix puces contenant les structures d'électromigration ont été montées dans des boîtiers DIL 28 céramiques résistants à la température.

Une caractérisation de la diode interne à l'aide d'un conditionneur thermique a été effectuée de +25 à +300°C à un courant constant de 10µA afin de calibrer sa tension en mode direct avec la température. On a pu observer que cette dérivation est linéaire sur cette plage de température.

Un premier test sur une structure aluminium a permis de mettre en évidence une dégradation élevée de la structure d'électromigration avec une destruction à 660 mA au lieu des 1A prévu initialement pour des tests dans la durée. Une augmentation de la résistance, qui a triplée entre un courant de 100mA et 660mA, nous montre qu'un phénomène d'auto-échauffement intervient au niveau des structures d'électromigration (voir Figure 3).

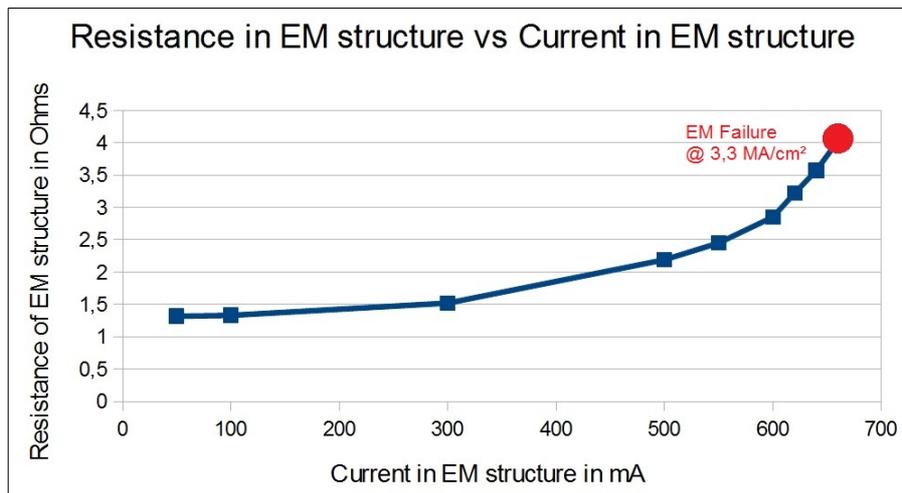


Figure 3 : Résistance de la structure d'électromigration en fonction du courant la traversant

3.3 Conclusions et perspectives

La procédure de test doit être revue, tout d'abord en calibrant la résistance des structures aluminium en fonction de la température. Ensuite, des mesures de résistance à différents courant permettront de relier la température vue par la diode et la température de la résistance d'électromigration. Cela nous permettra soit de mettre en évidence la résistance thermique du matériau entre la diode et la résistance, soit de montrer que les structures d'électromigration doivent être testées à une température interne inférieure à 250°C, sous peine de voir leur durée de vie diminuer trop drastiquement pour pouvoir observer un phénomène d'électromigration.

4. Conclusion

Cette étude préliminaire a permis la mise en place de bancs de test et de procédures de caractérisation fiables. Les difficultés techniques de caractérisation ont pu être identifiées et des moyens ont pu être mis en œuvre pour les contourner.

Pour les transistors encapsulés, le procédé de caractérisation ainsi que le banc de test sont finalisés. Les premiers résultats montrent des transistors fonctionnels jusqu'à 300°C. Différents tests en condition d'utilisation à haute température sont prévus pour observer la présence de dégradations.

Pour les structures d'électromigration, une première série de mesure a permis de mettre en évidence un auto-échauffement important des structures. Une calibration de la résistance de ces structures en fonction de la température nous permettra de mettre en évidence soit un gradient de température entre la structure et la diode, soit une défaillance des structures à plus basse température que 250°C. Auquel cas, la densité de courant apportée à la structure sera modifiée en conséquence afin de débiter des tests de plus longue durée.

5. Références

- [1] Khalil EL FALAH, « Contribution à la conception de driver en technologie CMOS SOI pour la commande de transistors JFET SiC pour un environnement de haute température », Thèse INSA-LYON 2012, Lyon (France).
- [2] Yoann Dusé, Fabien Laplace, Nicolas Joubert, « Robust True Low-dropout Linear Voltage Regulator and Digitally Tunable Buffered Precision Voltage Reference for High-Temperature, Low-Voltage Applications », HITEN 2013, Oxford (Royaume-Uni).
- [3] Jian Chen, J.-P. Colinge, « Tungsten metallization technology for high temperature silicon-on-insulator devices », EMRS 1994, Strasbourg (France).
- [4] H.V Nguyen, C. Salm, B. Krabbenborg, « Effect of thermal gradients on the electromigration life-time in power electronics », IEEE 42nd Annual International Reliability Physics Symposium 2004, Phoenix (États-Unis).
- [5] Bertrand Rue, Olivier Bulteel, Denis Flandre, Michelly de Souza, MA Pavanello « SOI Lateral PIN Diodes for Temperature and UV Sensing in Very Harsh Environments », HITEN 2009, Oxford (Royaume-Uni).