

Caractérisation électromécanique en puces « flottantes » d'IGBT à grille planaire

Yassine Belmehdi, Stéphane Azzopardi, Jean-Yves Delétage, Florence Capy, Eric Woïrgard

Université Bordeaux - Laboratoire IMS. 351 cours de la Libération, 33405 Talence Cedex, France

Les puces silicium brasées dans les modules de puissance doivent supporter simultanément des contraintes électriques, thermiques et mécaniques. Les contraintes mécaniques ont un impact déterminant sur la fiabilité de l'assemblage de puissance, mais aussi sur le comportement électrique du composant. L'étude présentée dans ce papier se focalise sur la caractérisation électromécanique de puce IGBT à grille planaire en régime statique à l'aide d'expérimentations et de simulations. Un banc de test spécifique a été mis en œuvre pour réaliser ces expérimentations sur des puces silicium « flottantes » et donc non précontraintes mécaniquement par le procédé de report. La simulation physique par éléments finis complète ces tests par une analyse du comportement interne du composant sous des contraintes électriques et mécaniques combinées. Les résultats obtenus montrent que de telles contraintes influencent les caractéristiques électriques de sortie alors qu'elles ne modifient que très peu la caractéristique de transfert et la tension de claquage.

I. INTRODUCTION

L'électronique de puissance a un rôle de plus en plus grandissant dans les systèmes de transports : voitures électriques et hybrides, trains et avions. Pour ces applications, la sécurité est un point critique et par conséquent la fiabilité du système de puissance doit être optimisée. La connaissance du temps de fonctionnement avant défaillance est une donnée recherchée par les concepteurs de ces systèmes. Dans cette optique, un indicateur de défaillance précoce permettrait de prédire la défaillance des systèmes avant que celle-ci soit effective.

Les contraintes thermique et mécanique que subissent les assemblages de puissance sont à l'origine des défaillances diverses. Avec l'augmentation des puissances commutées par les puces de puissance, de nouvelles architectures d'assemblages sont développées (double face, press-pack, contact pressé, etc) [1, 2]. Il apparaît que ces nouvelles technologies, qui dissipent plus de calories au niveau de la puce de puissance, favorisent les contraintes mécaniques vues par celle-ci (due aux différences entre les coefficients de dilatation thermique des matériaux utilisés) par rapport aux architectures d'assemblage plus classiques (substrat DBC - Direct Bonded Copper, substrat DBA - Direct Bonded Aluminum, SMI - Substrat Métallique Isolé, etc.).

Des travaux ont été menés sur l'impact des contraintes mécaniques sur le silicium. Ils montrent qu'elles peuvent affecter la mobilité des porteurs de charges et la répartition des bandes d'énergie [3, 4, 5]. Cela se traduit, suivant la structure, par des modifications au niveau des caractéristiques électriques des composants comme le courant de fuite, la tension de claquage, le courant de saturation, la chute de tension à l'état passant... Sur la base de ces travaux, il apparaît qu'une solution envisageable pour détecter les défaillances des systèmes de puissance consisterait à exploiter l'influence des contraintes mécaniques appliquées sur la puce semi-conductrice de puissance. En effet, une puce de puissance reportée par brasage est contrainte mécaniquement. Si la brasure se détériore suite à des phénomènes liés à la fatigue thermiques, les contraintes mécaniques seront plus faibles modifiant ainsi les caractéristiques électriques du composant.

L'étude présentée dans cet article propose d'identifier, dans un premier temps, l'impact de contraintes mécaniques sur les caractéristiques électriques statiques d'un IGBT asymétrique à grille planaire. La commutation sera abordée à la suite de ces travaux préliminaires. Deux approches complémentaires sont réalisées :

- Un banc expérimental spécifique a été conçu pour réaliser des tests mécaniques sur des puces silicium « flottantes », et donc non pré-contraintes mécaniquement par le procédé de report. Des flexions, représentatives des contraintes réellement subies par l'assemblage, sont appliquées sur les puces et les caractéristiques électriques telles que la tension de claquage, les caractéristiques de sortie et de transfert sont relevées.
- Les tests mécaniques de flexion des puces sont ensuite reproduits par simulation à l'aide du simulateur thermo-mécanique par éléments finis ANSYS afin de remonter à la répartition et aux valeurs des contraintes exercées dans le silicium. Puis des simulations électromécaniques sont réalisées à l'aide du logiciel SENTAURUS-TCAD en appliquant sur le composant physique simulé, les valeurs des contraintes obtenues avec ANSYS. Ces simulations permettent de vérifier les résultats expérimentaux du banc de test, d'analyser l'impact des contraintes sur le silicium et ainsi d'expliquer les modifications des caractéristiques électriques.

II. MODELISATION ELECTRO-MECANIQUE

La première phase de nos travaux est d'explorer par le biais d'outils de modélisation et de simulation le comportement électromécanique de l'IGBT. L'expérimentation viendra dans une deuxième phase valider les résultats obtenus par la simulation.

Pour réaliser la modélisation électromécanique deux étapes sont nécessaires :

- Des simulations purement mécaniques sont réalisées dans un premier temps avec le logiciel ANSYS. Habituellement, nous utilisons ce logiciel pour réaliser des simulations thermomécaniques 3D de l'assemblage de puissance. Dans le cas étudié, une simulation 3D de la lamelle de silicium sera effectuée. Les conditions

d'expérimentation du banc de test seront reproduites pour remonter aux valeurs et à la répartition des contraintes dans le volume.

Puis des simulations électromécaniques au niveau composant sont effectuées avec le logiciel SENTAURUS-TCAD : ce n'est plus la lamelle qui est modélisée, mais l'IGBT asymétrique à grille planaire. Ce composant physique, est simulé électriquement, en prenant en compte des contraintes, pour l'instant constantes dans tout le volume. Les valeurs des contraintes appliquées sont données par les résultats de la simulation mécanique avec ANSYS. SENTAURUS va nous permettre, en plus de voir l'effet des contraintes mécaniques sur les caractéristiques électriques, de remonter aux paramètres physiques internes à la structure comme la durée de vie des porteurs, la mobilité, ...pour expliquer les modifications des paramètres électriques du composant.

A. Simulation sous ANSYS

Une simulation 3D sous ANSYS a été réalisée pour déterminer la nature et la distribution des contraintes mécaniques produites par le banc de flexion quatre points sur la lamelle de silicium. Grâce à la symétrie géométrique de la lamelle, seulement un quart de la lamelle est simulée. La figure suivante montre le maillage de la lamelle, ce dernier est régulier à travers toute la structure.



Figure 1 – Modèle de la lamelle simulée sous ANSYS.

Le chargement mécanique est effectué pour un déplacement le long de l'axe y, un déplacement négatif suivant l'axe y correspond à une contrainte de traction de la partie supérieure de la lame sous test.

La simulation a été réalisée pour un déplacement négatif ($y = -2.2\text{mm}$), ce qui correspond à une contrainte de traction de 300MPa dans la partie supérieure et une contrainte de compression de -300MPa dans la partie inférieure de la lame de silicium (Figure 2).

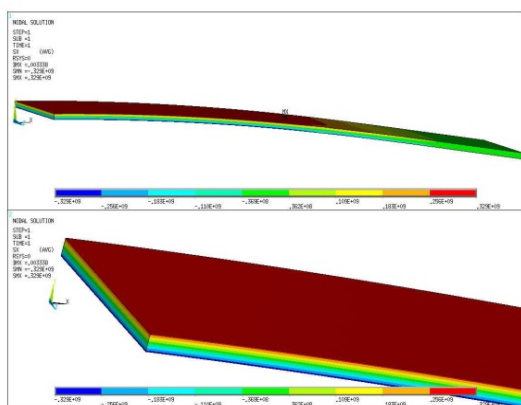


Figure 2 – Répartition des contraintes mécaniques dans le silicium (simulation ANSYS)

La simulation confirme la nature et la distribution non uniforme suivant l'épaisseur de la lamelle de la contrainte mécanique engendrée par le banc de flexion quatre points. Les données obtenues, c'est-à-dire les valeurs des contraintes et leur répartition dans le volume, sont les grandeurs mécaniques d'entrée pour les simulations réalisées à partir du logiciel SENTAURUS-TCAD [6].

Ces grandeurs mécaniques sont prises par exemple à partir d'une simulation thermomécanique d'un assemblage de puissance de type SMI (Substrat Métallique Isolé).



Figure 3 – Assemblage SMI simulé sous ANSYS

La figure ci-dessous présente le résultat de simulation de cet assemblage après le brasage de la puce sur le substrat et le stockage de l'assemblage de puissance pendant trois mois. Effectivement, sur la figure 4 la contrainte maximale est de l'ordre de 300MPa au centre de la puce de puissance.

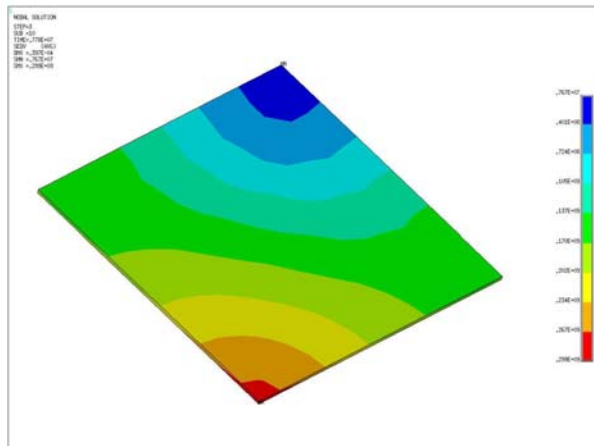


Figure 4 – Répartition des contraintes mécaniques en surface de la puce silicium (simulation ANSYS).

B. Simulation sous SENTAURUS-TCAD

Les simulations électromécaniques réalisées avec SENTAURUS-TCAD vont permettre de tracer les caractéristiques électriques du composant en prenant en compte l'effet des contraintes mécaniques. Pour cela deux modèles sont utilisés : le modèle de déformation du potentiel (équation 1) qui traduit la modification des bandes d'énergie en fonction de la contrainte, et l'effet piezorésistif (équation 2) qui traduit la modification de la mobilité des porteurs de charge [7, 8].

$$\Delta E_k^B = \zeta_{k1}^B (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + \zeta_{k2}^B (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) + \zeta_{k3}^B (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) + \zeta_{k4}^B \varepsilon_4 + \zeta_{k5}^B \varepsilon_5 + \zeta_{k6}^B \varepsilon_6 \quad (1)$$

avec ζ_{ki}^B le tenseur de déformation potentiel, la notation B peut être C (bande de conduction) ou V (bande de valence), k le niveau d'énergie; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ les composantes

des déformations normales; et $\varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$ les composantes des déformations tangentielles.

$$\frac{\Delta\mu_i}{\mu_0} = \bar{I} - \sum_{j=1}^6 \pi_{ij} T_j \quad (2)$$

avec $\frac{\Delta\mu_i}{\mu_0}$ la fraction du changement de la mobilité, \bar{I} le tenseur identité, et π_{ij} le tenseur des coefficients piezorésistifs.

La structure simulée est un IGBT asymétrique à grille plane et à couche tampon (Figure 5). Dans cette structure, une couche dopée N^+ sépare la base N^- de l'anode P^+ . La durée de vie des porteurs de charge est contrôlée par l'épaisseur et le dopage de la couche tampon N^+ . Ce composant est conçu pour une tenue en tension de 600 V.

La structure du composant simulé correspond au type de l'IGBT sur lequel les expérimentations seront effectuées, les résultats de simulations obtenues sont donnés ici pour illustrer les tendances. En effet, nous sommes dans une phase d'analyse de construction pour remonter aux paramètres géométriques et physiques nécessaires pour calibrer les résultats des simulations aux résultats expérimentaux.

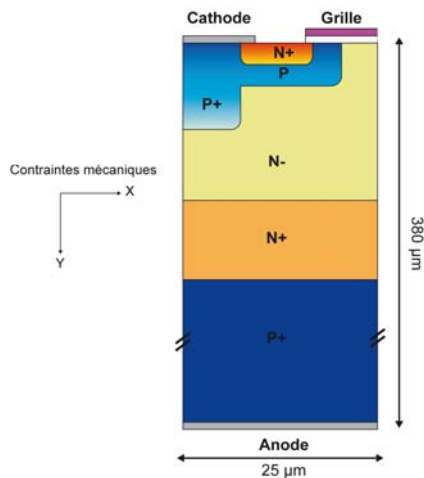


Figure 5 – IGBT asymétrique à grille plane simulé avec SENTAURUS-TCAD

a. Caractéristiques de sortie

La tension de grille-cathode est fixée à 7V. La figure 6 montre la variation des caractéristiques de sortie $I_A(V_{AK})$ suivant les différentes valeurs des contraintes mécaniques uniaxiales appliquées sur l'IGBT. Les valeurs négatives de contraintes traduisent une compression alors que les valeurs positives traduisent une traction.

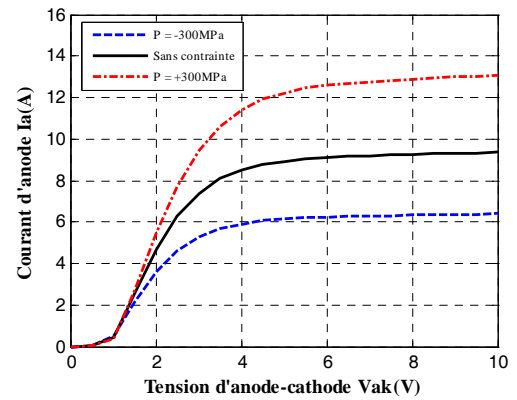


Figure 6 – $I_A(V_{AK})$ dans le cas de l'application d'une contrainte mécanique uniaxiale

Le niveau du courant de saturation va dépendre à la fois de la valeur et du type de contraintes appliquées. Il est intéressant de noter que la chute de tension à l'état passant V_{ON} est aussi affectée par la contrainte. Pour un niveau de courant fixé, V_{ON} diminue avec la contrainte mécanique en traction alors qu'elle augmente avec des contraintes de compression.

L'analyse 2D de la structure simulée permet de suivre l'évolution des paramètres électriques au cours des simulations, la figure ci-dessous présente l'évolution de la densité du courant dans le canal du MOSFET. La densité de courant est plus importante dans le canal lorsque le composant est sous contrainte mécanique de traction (Figure 7).

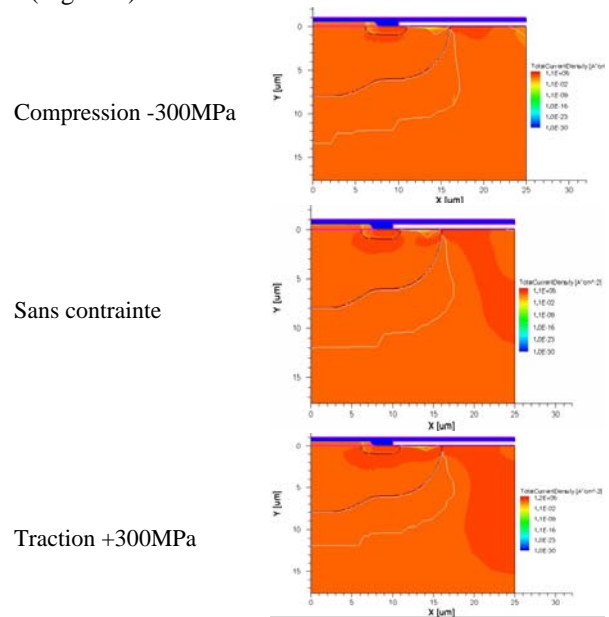


Figure 7 – Distribution 2D de la densité du courant dans le canal du MOSFET suivant la contrainte mécanique appliquée

Le courant dans le canal est donné par l'expression suivante [9]:

$$I_{ak} = \frac{Z}{L} \mu_n C_{ox} (V_{gk} - V_{th}) V_{ak} \quad (3)$$

avec Z la largeur du canal, L la longueur du canal, C_{ox} capacité d'oxyde de grille, V_{gk} tension grille-cathode, V_{ak} la tension anode-cathode, V_{th} la tension de seuil et μ_n la mobilité des électrons dans le canal du MOSFET.

Comme le montre l'équation 3, le courant dans le canal dépend de la mobilité qui elle-même dépend de la

contrainte mécanique appliquée sur le composant (équation 2). On peut conclure que la modification de la densité de courant dans le canal du MOSFET vient du changement de la mobilité des électrons dans le canal.

b. Caractéristique de transfert $I_A(V_{GK})$

La tension V_{AK} est fixée 10 V. Les résultats de simulation (Figure 8) montrent que la tension de seuil n'est pas modifiée par la contrainte, mais que la transconductance gm augmente dans le cas d'une traction et diminue dans le cas d'une compression.

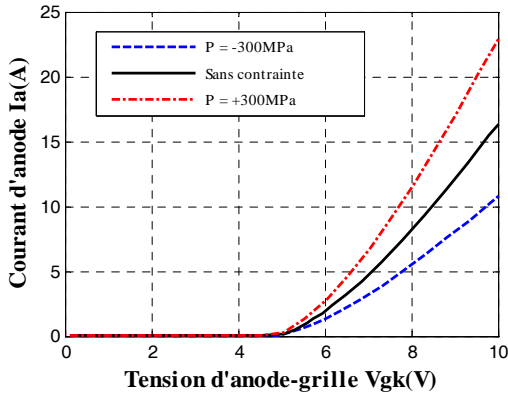


Figure 8 – $I_A(V_{GK})$ dans le cas de l'application d'une contrainte mécanique uniaxiale

c. Tenue en tension

Pour déterminer la tension de claquage, la tension de grille est maintenue à 0V et une rampe de tension est appliquée sur l'anode. Comme on peut observer sur la figure suivante, la contrainte mécanique n'a aucun effet sur la tenue en tension du dispositif.

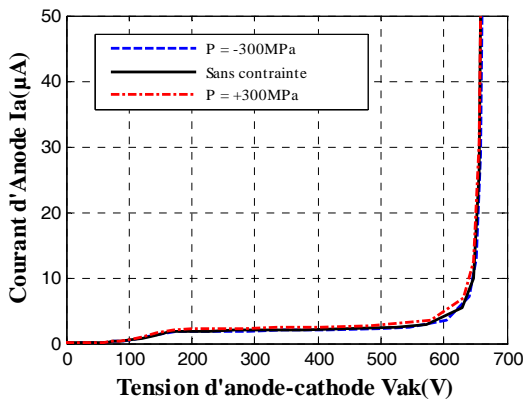


Figure 9 – $I_A(V_{AK})$ à $V_{GK}=0$ V dans le cas de l'application d'une contrainte mécanique uniaxiale

III. CARACTERISATIONS ELECTROMECHANIQUES

Pour étudier l'impact des contraintes mécaniques sur le silicium, un banc expérimental a été développé. Ce banc doit être capable d'appliquer des contraintes mécaniques uniaxiales sur des puces nues et de réaliser des tests électriques sur les composants ainsi contraints. Le choix des contraintes uniaxiales permet de simplifier l'étude. Grâce à l'étude expérimentale, on pourra éventuellement valider les tendances obtenus par la simulation physique par éléments finis 2D.

Dans un premier temps, des tests de traction pure ont été envisagés, mais la fragilité des plaquettes de silicium ne

permettait pas d'appliquer des valeurs de contraintes suffisamment élevées. Nous avons donc opté pour des tests de flexion quatre points qui sont relativement plus simple à mettre en œuvre.

A. Principe de la flexion quatre points

La flexion quatre points d'une poutre (dans notre cas une plaquette de silicium) consiste à soutenir la poutre en deux points de contacts extérieurs et à la déformer par l'appui de deux points de contacts intérieurs (Figure 10(a)). La contrainte ainsi appliquée est quasiment constante le long de la poutre (axe Ox) et se distribue non uniformément dans l'épaisseur (axe Oy) (Figure 10(b)). L'expression analytique de la contrainte suivant l'axe Oy est donnée par l'équation (4) :

$$\sigma_{xx} = \frac{Eyt}{2a\left(\frac{L}{2} - \frac{2a}{3}\right)} \quad (4)$$

avec E le module de Young du silicium, t l'épaisseur de la lamelle, L la distance entre les deux points de contact externes et a la distance entre un point de contact externe et interne. Pour modifier la valeur de la contrainte à appliquer, il faut donc déplacer les quatre points de contact.

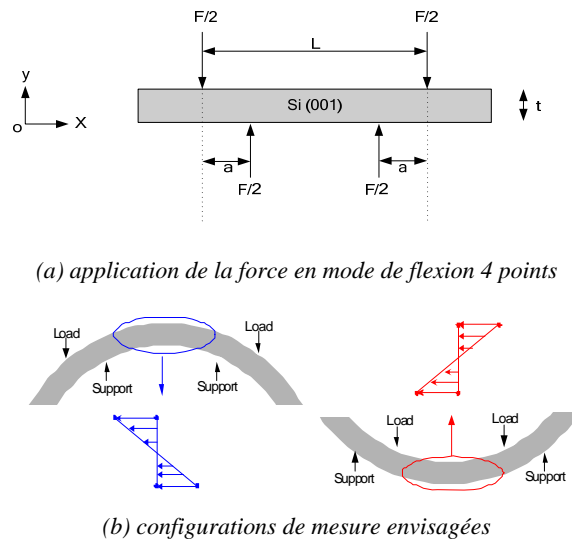


Figure 10 – Aperçu de la flexion 4 points

La première configuration consiste à appliquer une contrainte mécanique de traction sur la partie haute de la lamelle et une contrainte de compression sur sa partie basse. La deuxième configuration consiste à inverser par rapport à la première configuration le sens de l'application de la contrainte mécanique.

B. Dispositif expérimental

Le composant analysé est un IGBT à couche tampon et à grille planaire. Ce composant a été conçu pour bloquer une tension maximale d'environ 600V et pour conduire un courant nominal de l'ordre de 40A. Après avoir découpé des lamelles de composant sur le wafer (Figure 11), des véhicules de test ont été câblés sur un banc d'essai.



Figure 11 – Lamelles IGBT obtenues à partir d'un wafer (découpes suivant les deux axes cristallographiques)

La puce centrale de la lamelle est connectée à un substrat métal-céramique avec des fils de câblage aluminium. Grâce à cette connectique, il est possible de relier la puce ainsi câblée à un traceur de caractéristique électrique TEK371A (Figure 12) afin d'effectuer des relevés électriques statiques sous contraintes mécaniques contrôlées. La température ambiante peut aussi être réglée par l'intermédiaire d'une enceinte thermique. La contrainte mécanique est appliquée grâce à une machine de caractérisation mécanique « Instron 5565 » (Figure 13), cette machine a une capacité maximale en charge qui peut atteindre 5000N.

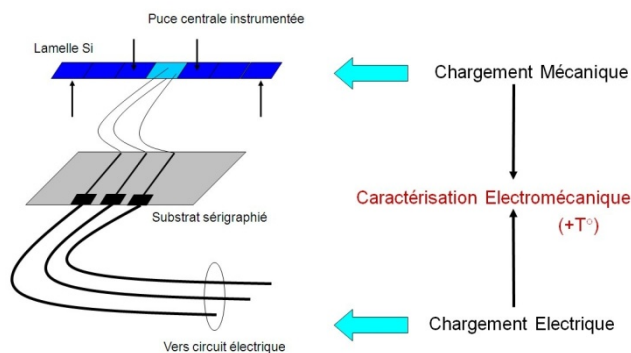


Figure 12 – Instrumentation de la lamelle pour la caractérisation électromécanique

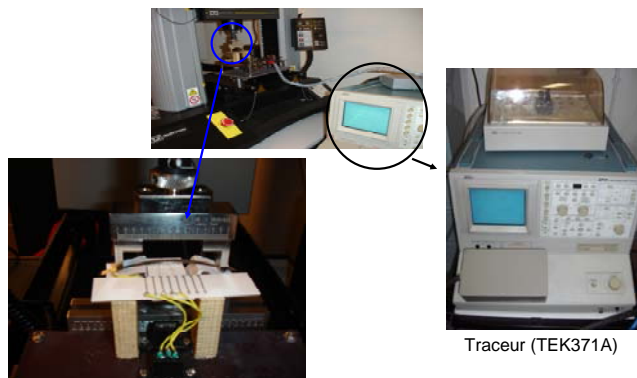


Figure 13 – Lamelles d'IGBT sous contraintes 4 points

C. Résultats

Toutes les mesures sont effectuées à température ambiante contrôlée, c'est-à-dire à 25°C. Il est à noter que les effets liés à l'auto-échauffement sont négligeables en mode statique (mode impulsif du TEK371A à faible polarisation). Une cartographie infrarouge a été effectuée afin de conforter ce résultat.

Les caractéristiques de transfert, de sortie et la tension de claquage sont relevées pour différents écartements des points de contacts, c'est-à-dire différentes contraintes maximales. Les distances L et a (Figure 10) ont été

optimisées pour avoir le maximum de contrainte mécanique appliqué sur la puce IGBT. Nous avons fixé ces valeurs :

- $L = 6\text{cm}$
- $a = 1\text{cm}$

Le tableau suivant présente les valeurs de déplacements suivant l'axe y obtenues expérimentalement :

Déplacement y (mm)	1.1	1.5	2.2
Contrainte maximale (MPa)	150	200	300

Tableau 1 – Valeurs des contraintes mécaniques maximales en fonction du déplacement suivant l'axe y

La figure 14 montre la caractéristique $I_A(V_{GK})$ obtenue pour une tension d'anode de 10V.

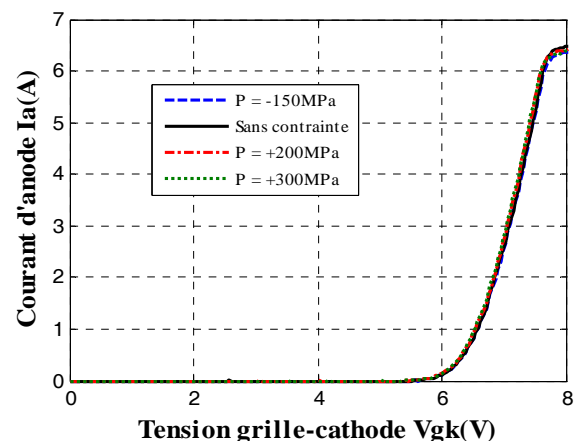


Figure 14 - Caractéristique $I_A(V_{GK})$ pour $V_{AK}=10\text{V}$

Quelle que soit la valeur de la contrainte et son type (compression ou traction), la valeur de la tension de seuil (5,5-6V) n'est pas modifiée. Il est aussi possible de remarquer que la transconductance g_m n'est pas influencée par la contrainte appliquée. Cette différence par rapport au résultat obtenu par simulation, peut être expliquée par le fait que le composant simulé n'est pas encore calibré par rapport à l'IGBT testé. On rappelle que l'approche expérimentale est réalisée afin de valider les tendances obtenues par simulation physique.

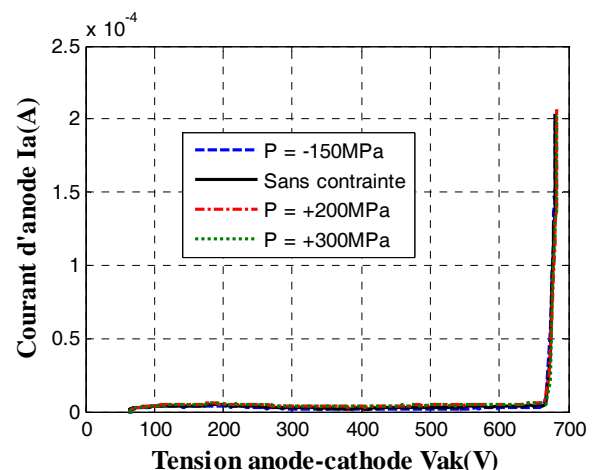


Figure 15 - Caractéristique $I_A(V_{AK})$ pour $V_{GK}=0\text{V}$

En ce qui concerne la tension de claquage du dispositif, représentée sur la figure 15 (environ 650V), l'expérimentation montre le même résultat trouvé par simulation. La tension de claquage de l'IGBT n'est pas sensible à l'application d'une contrainte mécanique uniaxiale.

Seules les caractéristiques de sortie sont affectées par l'application de contraintes mécaniques. En effet, sur la figure 16, qui représente $I_A(V_{AK})$ pour $V_{GK}=7$ V, on peut remarquer que le niveau du courant de saturation est modifié lorsque la puce est contrainte. De plus, sa variation va dépendre du type de contrainte appliquée : son niveau augmente quand la contrainte augmente s'il s'agit d'une traction alors qu'il diminue quand la contrainte augmente s'il s'agit d'une compression. Les résultats expérimentaux montrent les mêmes tendances que les résultats de simulation.

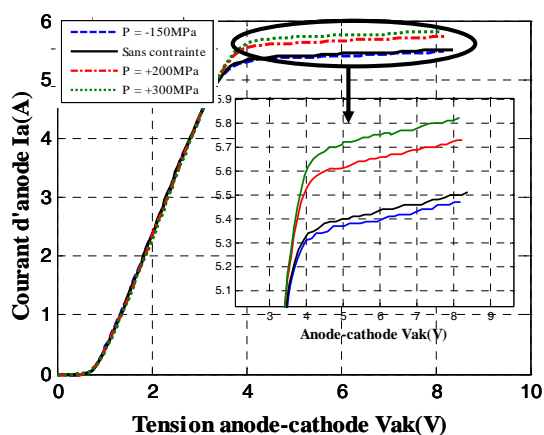


Figure 16 - Caractéristique $I_A(V_{AK})$ pour $V_{GK}=7$ V

IV. CONCLUSION

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la caractérisation électromécanique de l'IGBT à couche tampon et à grille planaire sous trois modes de configuration statique (caractéristique de sortie, caractéristique de transfert et tension de claquage). Les

puces utilisées sont des puces flottantes, non contraintes par les procédés de report. Les résultats expérimentaux montrent que les contraintes mécaniques ont très peu d'influence sur la tension de claquage et la tension de seuil, alors que ces effets se manifestent de manière importante sur le courant de conduction. Les tendances illustrées par les résultats expérimentaux sont reproduites par les simulations électromécaniques, ce qui permet d'avoir un aperçu du comportement interne du composant.

L'exploitation de ces résultats permettra, à plus long terme, de réaliser un indicateur de l'état mécanique des assemblages de puissance à des fins de fiabilités prédictives.

V. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été financés dans le cadre du projet CEPIA. Les auteurs remercient la DGA, le département des Hautes Pyrénées et la région Aquitaine pour leurs supports.

VI. REFERENCES

- [1] M. Otsuki, H. Kanemaru, Y. Ikeda, K. Ueno, M. Kirisawa, Y. Onozawa and Y. Seki, "Advanced thin wafer IGBTs with new thermal management solution", Proc. Of 15th Int. Symp. On Power Semiconductor Devices and ICs (2003), pp. 144-147.
- [2] C. Gillot, C. Schaeffer, C. Massit and L. Meysenc, "Double-sided cooling for high power module IGBT modules using flip chip technologies", IEEE trans. On Comp. and Packg. Technol. 24 (2001), pp. 698-704.
- [3] M. Usui et al., "Effects of uni-axial mechanical stress on IGBT characteristics", Microelectronics and Reliability, Volume 45, Issues 9-11, September-November 2005, pp. 1682-1687.
- [4] T. Hiroaki et al., "Mechanical stress dependence of power device electrical characteristics", International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, 2006, 4-8 June 2006, pp. 1-4.
- [5] Y. Belmehdi et al. "Assessment of uni-axial mechanical stress on Trench IGBT under severe operating conditions: a 2D physically-based simulation approach", 1st IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, Sept. 2009
- [6] SENTAURUS TCAD Software, V9.08.
- [7] J. J. Wortman et al., "Effects of stress on p-n junction device characteristics", J. of Applied Physics 35 (1964), pp. 2122-2131.
- [8] C. S. Smith, "Piezoresistance effect on germanium and silicon", Physical Review 94 (1954), pp. 42-49.
- [9] B. J. Baliga, "Modern power devices", Krieger, 1992..