

CFA/VISHNO 2016

**Transducteurs capacitifs micro-usinés appliqués à
l'isolation galvanique**

J. Heller, A. Boulmé, D. Alquier, S. Ngo, M. Perroteau et D. Certon
Université François Rabelais de Tours, GREMAN UMR CNRS 7347, 10 rue Thalès de
Milet - CS 97155, 37071 Tours, France
jacques.heller@univ-tours.fr



LE MANS

En électronique de puissance, l'isolation galvanique consiste à transmettre un signal de commande entre deux circuits électriquement isolés l'un de l'autre afin d'assurer la sécurité des utilisateurs. Il a récemment été démontré, grâce à la fabrication de premiers prototypes, au sein de notre laboratoire, que la technologie CMUT (Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer) peut être utilisée pour ce type d'application. Le principe de fonctionnement de ces dispositifs consiste à utiliser, comme signal de commande, une onde ultrasonore transmise entre deux transducteurs CMUT disposés de part et d'autre d'un substrat en silicium. Une plage d'efficacité maximale a été identifiée lorsque la fréquence propre des transducteurs est proche de la fréquence de résonance du substrat. La technologie CMUT permet d'atteindre facilement ce point de fonctionnement optimal en ajustant la fréquence de résonance des CMUTs via leur tension de polarisation. Les travaux présentés ici s'attachent à la modélisation et à la caractérisation de ces dispositifs afin d'identifier des stratégies d'optimisation du transfert de puissance active entre les deux réseaux de CMUTs. Un modèle éléments finis a été développé pour prédire la réponse électromécanique de ces dispositifs. En parallèle, des prototypes CMUT double-faces ont été fabriqués et caractérisés par des mesures électriques.

1 Introduction

Il a récemment été démontré au sein de notre laboratoire que la technologie CMUT (Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer) pouvait présenter une alternative intéressante à la fabrication de transformateurs acoustiques assurant une isolation galvanique [1]. Le principe est de transmettre un signal de commande entre deux parties d'un circuit électrique tout en assurant un haut niveau d'isolation électrique. Cette fonction est aujourd'hui principalement assurée par des transformateurs de type électromagnétiques qui présentent généralement un encombrement important et sont sensibles à leur environnement magnétique. Des isolateurs par optocoupleurs ont également été développés, réduisant l'encombrement, mais cette solution reste limitée en fréquences de fonctionnement et en puissance transmise. Le développement de transformateurs acoustiques est donc ici envisagé par le biais de transducteurs CMUT. Une topologie de puce CMUT double-faces a été développée dans le but d'utiliser le mode de résonance de l'épaisseur du substrat sur lequel le transducteur a été fabriqué pour transmettre une onde ultrasonore d'une face à l'autre de ce substrat.

2 Topologie des dispositifs

Les dispositifs qui ont été fabriqués sont constitués d'un réseau de CMUT de chaque côté d'un substrat en silicium (Figure 1). Chacun de ces réseaux est composé de plusieurs dizaines de milliers de membranes CMUT carrées de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ et de 400 nm d'épaisseur en nitrure de silicium. Celles-ci sont suspendues au-dessus de cavités de 400 nm de haut scellées sous vide et recouvertes à 50 % d'électrodes en aluminium de 450 nm d'épaisseur. Les cellules CMUT sont toutes connectées en parallèle afin d'obtenir deux transducteurs mono-éléments de part et d'autre du substrat, pour une surface totale de puce de 17 mm par 4.1 mm. Les puces CMUT sont dans un premier temps réalisées par micro-usinage de surface sur deux wafers simple-face indépendants. Une couche d'oxyde épaisse est insérée entre le silicium et l'électrode de masse en polysilicium dopé afin d'assurer un haut niveau d'isolation électrique. Ces deux wafers identiques sont dans un second temps assemblés par collage par leur face arrière puis découpés en puces double-faces qui seront finalement montées sur PCB. Les dimensions des membranes et l'épaisseur totale du substrat en silicium sont choisies de sorte que le mode propre des membranes et le mode de résonance du substrat dans son épaisseur aient des

fréquences suffisamment proches pour pouvoir exploiter le couplage entre ces deux phénomènes. La fréquence propre des membranes CMUT étant attendue à 13 MHz, chacun des deux wafers est amincis à une épaisseur de 350 μm de façon à obtenir une épaisseur totale de substrat de 700 μm et d'observer la résonance associée à 12 MHz.

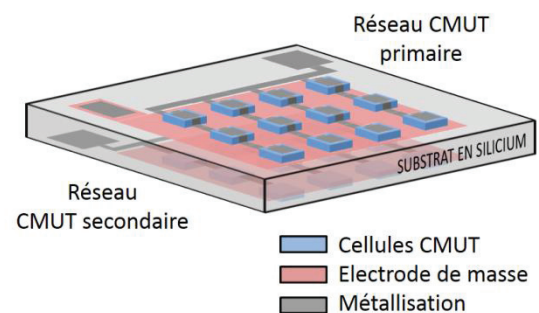


Figure 1 : schéma d'une puce CMUT double-faces

3 Modélisation

Afin d'être capable de prédire le comportement électromécanique de ces prototypes CMUT double-faces, et notamment le couplage entre CMUT et substrat, un modèle en trois dimensions a été développé par la méthode des éléments finis sous le logiciel commercial Comsol Multiphysics. Grâce à l'utilisation de conditions de symétries adéquates, seule un quart d'une structure élémentaire composée de deux cellules CMUT de part et d'autre d'un bloc de silicium sont nécessaires pour simuler le comportement d'une puce entière. Une coupe schématique de la structure modélisée est présentée sur la Figure 2.

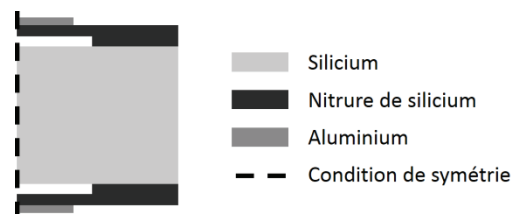


Figure 2 : schéma de la structure simulée.

3.1 Approximation mécanique

Dans un premier temps une étude se limitant à la mécanique du problème a été effectuée. On s'appuie ici sur les résultats publiés par Badi *et al.* [2] qui mettent en avant

le fait que la transmission d'énergie du CMUT à son substrat s'effectue de façon prédominante via les supports de la membrane, par voie mécanique. En effet, l'énergie transmise au substrat par la force électrostatique qui agit sur l'électrode inférieure peut-être négligée dans une première approximation. Ainsi une structure se limitant à une cellule CMUT émettrice, un substrat en silicium et une cellule CMUT réceptrice, un substrat en silicium et une cellule CMUT réceptrice est considérée ici. Pour cette étude, la force électrostatique appliquée entre les deux électrodes est ignorée et remplacée par une force harmonique arbitraire de 1×10^{-6} N appliquée suivant l'axe vertical à la membrane émettrice (voir Figure 2). De plus, en négligeant l'aspect électrostatique du problème, l'effet de softening inhérent au CMUT, qui a pour effet de diminuer la fréquence de résonance du CMUT lorsque la tension de polarisation augmente, n'est pas pris en compte. Le choix a donc été fait dans cette première approximation mécanique, d'utiliser le module d'Young du nitrure de silicium comme paramètre pour agir sur la fréquence de résonance des membranes CMUT. La Figure 3 montre le déplacement moyen de la partie mobile émettrice, constituée de la membrane et de son électrode, en fonction de la fréquence et du module d'Young du nitrure de silicium. La résonance de la membrane est clairement identifiée par la variation linéaire de sa fréquence de résonance en fonction de son module d'Young. D'autre part, l'influence de la résonance du substrat dans son épaisseur est observée sur le déplacement moyen de la membrane émettrice autour de 12,1 MHz. On note cependant que le mode de substrat n'a ici que peu d'importance sur l'amplitude de déplacement qui reste d'autant plus grande que le module d'Young est faible. En revanche, le déplacement moyen du CMUT récepteur (Figure 4) présente clairement un maximum autour de la fréquence de résonance du substrat. Cette simulation mécanique simple, nous permet donc d'identifier un point de fonctionnement où le couplage mécanique entre CMUT émetteur, substrat et CMUT récepteur présente un optimum. L'effet de softening va donc pouvoir être utilisé afin de se placer au plus près de ce point de fonctionnement et ainsi d'optimiser le transfert de puissance du réseau primaire vers le réseau secondaire du transformateur.

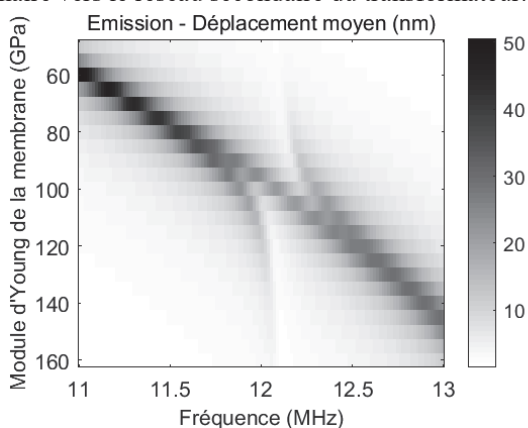


Figure 3 : déplacement moyen de la partie mobile (membrane et électrode) émettrice en fonction de la fréquence et du module d'Young du nitrure de silicium pour une force d'excitation de 10^{-6} N.

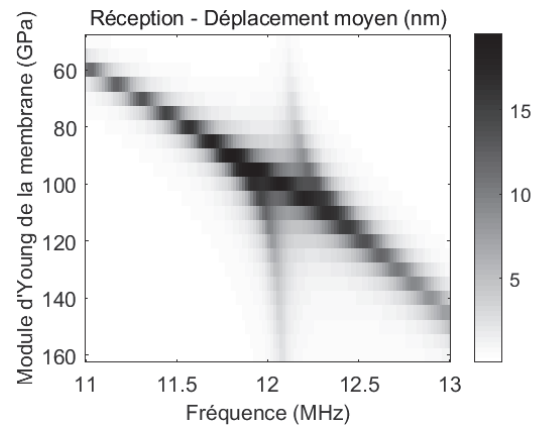


Figure 4 : déplacement moyen de la partie mobile (membrane et électrode) réceptrice en fonction de la fréquence et du module d'Young du nitrure de silicium pour une force d'excitation de 10^{-6} N.

3.2 Impédance électrique

Dans le but de prédire le comportement électromécanique des prototypes les équations électrostatiques ont été couplées à la structure mécanique définie précédemment grâce au module MEMS de Comsol. Une électrode de masse (potentiel nul) est définie à l'interface entre le silicium et la cavité et un terminal électrique est défini à l'interface entre le nitrure et l'aluminium. La simulation s'effectue en deux temps : un premier calcul stationnaire permet de pré-contraindre le problème en appliquant une tension de polarisation continue (V_{DC}) aux membranes. Cette solution est ensuite utilisée comme point de linéarisation à une étude fréquentielle où une tension harmonique V_{AC} de 1V est appliquée à la membrane émettrice. On peut ainsi évaluer le courant d'entrée du système en fonction de la fréquence, et calculer les impédances du CMUT émetteur pour chaque tension de polarisation jusqu'à la tension de collapse. A cette tension, les forces de rappel mécanique dans la membrane ne compensent plus la force électrostatique ce qui se traduit par une divergence de la solution. A partir des courbes d'impédance et d'admittance obtenues pour chaque tension de polarisation, un relevé des fréquences d'antirésonance et des fréquences de résonance est effectué et présenté sur la Figure 5. Deux modes sont bien observés pour chaque tension de polarisation : le mode de membrane à 13 MHz à 0 V (noté mode 2) et le mode de substrat à 12 MHz à 0 V (noté mode 1). Si l'on suit par exemple l'évolution des fréquences de résonance (en pointillés) en partant de 0 V jusqu'à la tension de collapse (120 V), l'effet de softening est clairement visible sur le mode 2 entre 0 et 60 V puis sur le mode 1 entre 90 et 120 V ce qui permet d'identifier la résonance de membrane. Cependant, dans la zone de fort couplage entre les deux modes (entre 60 et 90 V pour les fréquences de résonance) il n'est pas possible de discriminer la membrane du substrat, les deux modes semblent se repousser comme le ferait deux oscillateurs mécaniques couplés.

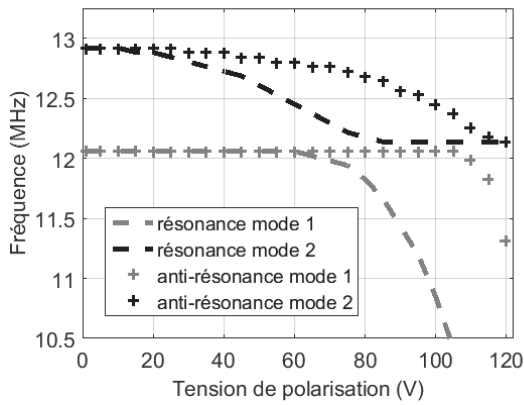


Figure 5 : évolution des fréquences de résonance (en pointillés) et d'antirésonance (croix) avec la tension de polarisation des CMUTs (simulation).

3.3 Coefficient de couplage

Finalement, à partir des fréquences de résonance (f_R) et d'antirésonance (f_A) les coefficients de couplage électromécanique [3] sont calculés pour chacun des deux modes à partir de la formule suivante :

$$k_t = \sqrt{1 - \frac{f_R^2}{f_A^2}}$$

La Figure 6 représente l'évolution du coefficient de couplage électromécanique avec la tension de polarisation pour chacun des deux modes. Le résultat intéressant à noter ici, est que dans la zone de fort couplage, autour de 85 V, une valeur importante de coefficient de couplage est calculée pour les deux modes. C'est-à-dire que même s'il paraît difficile de discriminer la membrane du substrat, le coefficient de couplage électromécanique lié au mode de substrat atteint théoriquement une valeur de 0.3. La validation expérimentale de ce résultat est présentée dans la partie suivante.

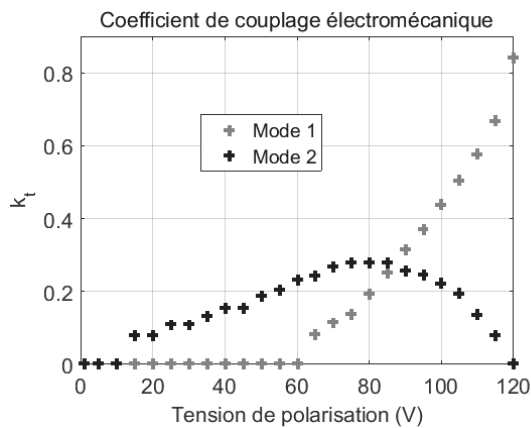


Figure 6 : évolution des coefficients de couplage électromécanique simulés en fonction de la tension de polarisation.

4 Résultats expérimentaux

Avant d'évaluer les performances des prototypes réalisés, des mesures d'impédances ont été réalisées afin de valider le couplage électromécanique implémenté dans le modèle. De la même manière qu'en simulation, un relevé des fréquences de résonance et d'antirésonance est effectué à partir des courbes d'impédance mesurées. Les résultats

sont présentés sur la Figure 7. En comparant ces résultats à ceux simulés sur la Figure 5, on observe une très bonne concordance entre mesures et simulations. En effet la simulation décrit très bien le comportement couplé de ces deux modes en fonction de la tension de polarisation. On note cependant une légère augmentation des fréquences de résonance et d'antirésonance du mode 2 (en noir) entre 0 et 10 V sur les courbes mesurées (Figure 7) qui n'est pas du tout prédite par le modèle (Figure 5). Des effets de charges résiduelles présentes dans les membranes en début de mesure expliquent ce comportement du mode de membrane pour les très faibles tensions de polarisation. Enfin, les coefficients de couplage électromécaniques associés à ces mesures d'impédance ont été évalués (Figure 8) et sont comparés aux résultats de simulation (Figure 6). Encore une fois la simulation apporte une très bonne estimation des coefficients de couplage électromécanique expérimentaux.

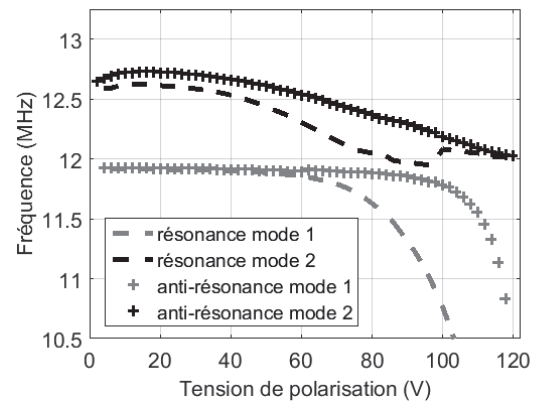


Figure 7 : évolution des fréquences de résonance (en pointillés) et d'antirésonance (croix) avec la tension de polarisation des CMUTs (mesure).

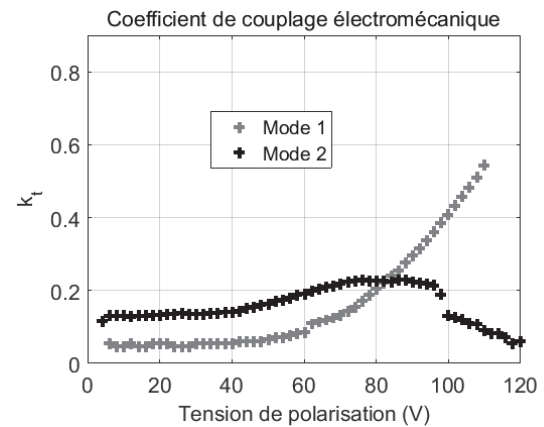


Figure 8 : évolution des coefficients de couplage électromécanique mesurés en fonction de la tension de polarisation

5 Conclusion

Un modèle 3D des prototypes CMUT dédiés à l'isolation galvanique a été développé. Une exploitation négligeant le couplage électrostatique a permis d'identifier un point de fonctionnement mécanique optimal. Les premières validations expérimentales sont concluantes : le couplage électromécanique entre CMUT et substrat a été validé via les impédances électriques simulées du CMUT émetteur. Un coefficient de couplage électromécanique lié au mode de substrat a été défini et mesuré et pourra par la

suite être un indicateur de l'efficacité du transformateur acoustique.

Remerciements

Travaux effectués dans le cadre de TOURS 2015, projet soutenu par le Programme de l'économie numérique des Investissements d'Avenir.

Références

- [1] S. Ngo et al., Galvanically-Isolated Data Transmission Device, US Patent 20130135970A1.
- [2] M. H. Badi, G. G. Yaralioglu, A. S. Ergun, S. T. Hansen, E. J. Wong, and B. T. Khuri-Yakub, Capacitive Micromachined Ultrasonic Lamb Wave

Transducers Using Rectangular Membranes, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 50, no. 9, pp. 1191-1203, (2003).

- [3] G. G. Yaralioglu, A. S. Ergun, B. Bayram, E. Haeggström and B. T. Khuri-Yakub, Calculation and Measurement of Electromechanical Coupling Coefficient of cMUT, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 50, no. 4, pp. 449-456, (2003).