

Résonateurs à ondes acoustiques guidées sur miroir de Bragg pour communications radio-fréquences

Issiaka Koné^{1,2,3}, Frédéric Domingue¹, Alexandre Reinhardt¹, Fabrice Casset¹, Marc Aïd¹, Jean François Carpentier², Lionel Buchaillot³, Bertrand Dubus³

¹ LCRF, CEA-Leti-Minatec, F-38054 Grenoble, France

² FTM-Crolles, STMicroelectronics, 38920 Crolles, France

³ IEMN département ISEN, UMR CNRS 8520, Lille, France

Les résonateurs à ondes acoustiques de volumes (appelés résonateurs BAW pour Bulk Acoustic Wave) sont des composants particulièrement attractifs pour les communications radio-fréquences ($f > 1$ GHz). Ils permettent de réaliser des filtres aux performances accrues et aux encombrements et coûts réduits, ou d'intégrer des oscillateurs de référence à faible consommation. Les résonateurs BAW classiques possèdent une fréquence de fonctionnement fixe déterminée principalement par l'épaisseur de la couche piézoélectrique. Cette contrainte est une limitation importante si l'on considère l'évolution actuelle des communications mobiles vers les circuits multi-standards et reconfigurables. Le travail présenté vise à développer un nouveau type de résonateur acoustique en technologie SMR (résonateur isolé du substrat par un miroir de Bragg), qui permette la co-intégration de résonateurs de fréquences différentes. Il repose sur l'utilisation de la résonance latérale d'ondes acoustiques guidées dont la fréquence est déterminée par une étape de gravure. Les principaux résultats présentés concernent la conception d'un miroir de Bragg assurant une isolation efficace de l'onde guidée vis à vis du substrat, la conception du peigne d'électrodes inter-digitées qui optimise le couplage de l'onde acoustique recherchée et minimise les modes parasites, et la technologie de fabrication mise en œuvre pour réaliser ces résonateurs sur substrat silicium. Les caractéristiques mesurées de ces résonateurs sont comparées aux résultats publiés pour des résonateurs à ondes de Lamb réalisés en technologie FBAR (résonateur sur membrane).

1 Introduction

Les résonateurs à ondes de Lamb ont été étudiés récemment pour réaliser, dans des systèmes de transmission sans fil, des filtres passe-bande à bande étroite pour la sélection de canaux aux fréquences intermédiaires (IF) [1-6]. Comparés aux résonateurs à ondes de surface, les résonateurs à ondes de Lamb présentent l'avantage de pouvoir être fabriqués sur des substrats silicium et donc d'être plus facilement intégrables dans des circuits Radio-Fréquences (RF). Les dispositifs réalisés jusqu'à présent exploitent une onde se propageant sur une membrane suspendue et donc naturellement isolée du substrat. La co-intégration de ces résonateurs avec des résonateurs utilisant un mode d'épaisseur (onde longitudinale) de type FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator) a été démontrée, ouvrant ainsi la possibilité de réaliser des filtres RF et IF sur un même substrat [1].

Plusieurs équipes ont proposé d'exploiter les ondes acoustiques se propageant dans un guide d'onde piézoélectrique en les confinant par l'intermédiaire d'un miroir de Bragg, afin de réaliser des résonateurs similaires aux résonateurs à ondes de Lamb dans une technologie compatible avec les résonateurs SMR (Solidly Mounted Resonator) [7]. Cette idée revient à exploiter les ondes de surface de vitesse élevée à haute fréquence en utilisant un miroir omnidirectionnel, d'où le terme OMNISAW [8]. Elle présente également des liens avec la proposition d'utiliser des ondes latérales parasites pour réaliser un couplage latéral entre SMR [9]. Ce travail présente la première réalisation technologique de résonateurs RF à onde acoustique guidée sur miroir de Bragg.

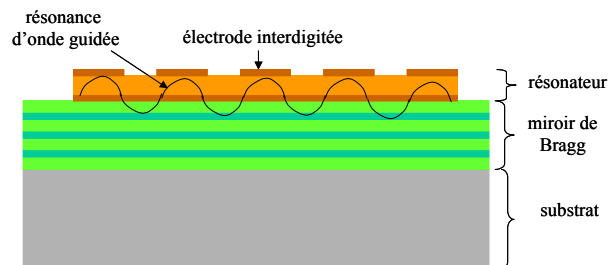


Figure 1 : géométrie schématique d'un résonateur à onde guidée sur substrat silicium

2 Principe général

Le principe du résonateur à onde acoustique guidée est d'utiliser un film mince piézoélectrique (et ses électrodes) comme guide d'onde en confinant l'onde acoustique par une interface air/solide sur la face supérieure et un miroir de Bragg acoustique sur la face inférieure (Fig. 1). Dans ce travail, la couche piézoélectrique est en nitrure d'aluminium (AlN) et les électrodes en molybdène (Mo). Le miroir est constitué d'une alternance de couches de faible (carboxyde de silicium SiOC) et forte (nitrure de silicium SiN) impédances acoustiques. Les électrodes fournissent l'excitation électrique en générant un champ électrique perpendiculaire à l'épaisseur de la couche d'AlN. L'électrode inférieure est un plan métallique flottant tandis que l'électrode supérieure est gravée de manière à réaliser un peigne interdigité dont la période spatiale correspond à une demi-longueur d'onde de l'onde guidée. La couche

piézoélectrique est également gravée pour définir la dimension latérale du résonateur égale à un nombre entier de demi-longueurs d'onde.

Les miroirs de Bragg conventionnels ne visent à isoler qu'un seul type d'onde de volume (longitudinale ou transversale). Ils présentent des performances optimales pour des épaisseurs de couche égales au quart de la longueur d'onde. Les ondes guidées dans la couche piézoélectrique s'expriment sur le plan mathématique comme la superposition d'ondes planes partielles, quasi-longitudinales et quasi-transversales, polarisées dans le plan sagittal. Pour isoler l'onde guidée, il est donc nécessaire d'atteindre un niveau d'isolation important simultanément pour ces deux types d'ondes qui présentent un rapport de vitesse de propagation de l'ordre de deux. Un miroir de Bragg conventionnel n'est efficace que pour l'une des polarisations et présente une transmission importante pour l'autre polarisation. Un miroir de Bragg spécifique, constitué de trois paires de couches a été conçu pour isoler simultanément les ondes de polarisations longitudinale et transversale. Cette optimisation a été conduite en utilisant méthode de la matrice de réflexion [10]. Les coefficients de transmission, calculés pour une onde guidée de vitesse de phase de 32000 m.s^{-1} sont présentés à la Figure 2. Ce miroir de Bragg est, dans son principe, très similaire aux miroirs de Bragg utilisés dans les SMR pour optimiser le coefficient de qualité et contrôler les modes parasites [11].

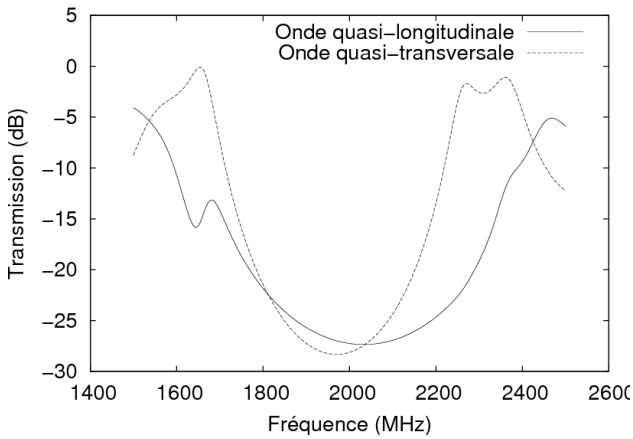


Figure 2 : transmission des ondes partielles (correspondant à une onde guidée de vitesse de phase égale à 32000 m.s^{-1}) à travers un miroir de Bragg SiN/SiOC à 6 couches

3 Fabrication des résonateurs

La procédure de fabrication des résonateurs est décrite ci-après. Dans un premier temps, les trois premiers bicouches SiN (500 nm)/SiOC (1 μm) sont déposés sur des substrats silicium haute résistivité par CVD ("Chemical Vapor Deposition"). Une couche de Mo d'épaisseur 300 nm est déposée par pulvérisation puis gravée par voie sèche pour délimiter l'électrode inférieure. Suivent les dépôts de la couche piézoélectrique d'AlN (1,7 μm) par pulvérisation ("reactive DC sputtering") puis de l'électrode supérieure de Mo (300 nm). L'électrode supérieure est gravée de manière à définir les peignes interdigités (période de 8,4 μm et rapport de métallisation de 0,5). Le film piézoélectrique est gravé de manière à définir les dimensions latérales de la cavité résonante. Une couche de passivation de SiN d'épaisseur 200 nm sert à encapsuler la face supérieure et les flancs du résonateur. Cette couche est gravée par voie

sèche pour ouvrir des passages vers l'électrode supérieure. Finalement, une couche épaisse d'aluminium est déposée et gravée pour former les plots de contacts pour la caractérisation RF et pour réduire les résistances d'accès. La Figure 3 présente une vue MEB du résonateur où la cavité résonante dans la direction latérale est clairement visible.

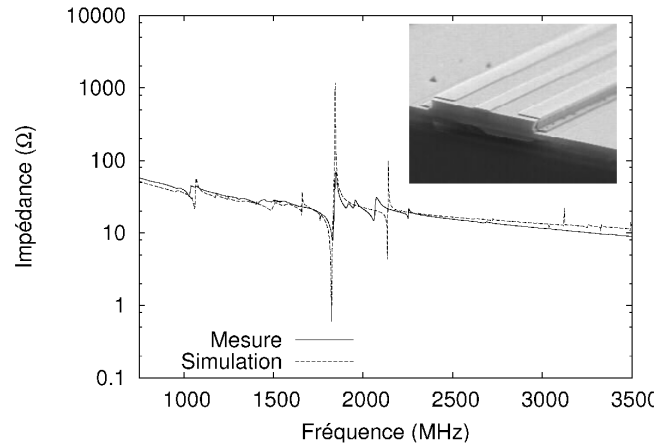


Figure 3 : Image MEB et réponse en fréquence d'un résonateur RF à onde acoustique guidée

4 Caractérisation Radio-Fréquence

Les résonateurs ont été caractérisés par mesures sous pointes à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel. Des structures "ouvertes" équivalentes (résonateurs sans peignes interdigités) ont également été mesurées pour extraire la capacité parallèle associée aux plots de contact et aux lignes d'accès. L'inductance série associée aux lignes d'accès a été identifiée par mesure haute fréquence de l'impédance. Les caractéristiques obtenues pour un résonateur à 30 peignes sont présentées dans le Tableau 1. La réponse en fréquence mesurée de l'admittance est comparée à la réponse simulée [12] (Fig. 3). Un excellent accord est observé pour la fréquence de résonance principale. La comparaison des différents dispositifs réalisés montre que les coefficients de couplage et de qualité varient peu lorsque la dimension latérale du résonateur est modifiée.

	Résonateur à onde guidée	Résonateur BAW
Fréquence de résonance	1830 MHz	1860 MHz
Fréquence d'antirésonance	1845 MHz	1875 MHz
Coefficient de couplage effectif (k^2)	2 %	1,9 %
Coefficient de qualité à la résonance	160	320
Coefficient de qualité à l'antirésonance	200	250

Tableau 1 : caractéristiques mesurées d'un résonateur à onde guidée (30 peignes) et d'un résonateur BAW co-intégré

Les résonateurs BAW fabriqués sur le même substrat ont également été caractérisés (Tableau 1). Leur coefficient de couplage effectif, de l'ordre de 2%, est proche des prédictions théoriques. Cette valeur est faible par rapport à la valeur de 7% obtenue pour les résonateurs BAW avec un miroir de Bragg optimisé. La couche supérieure du miroir

de Bragg réalisé est notablement différente du quart de longueur d'onde ce qui tend à réduire le coefficient de couplage du mode d'épaisseur. Le coefficient de qualité est nettement inférieur à la valeur évaluée à partir des propriétés en transmission du miroir de Bragg (Fig. 2). Cette dégradation peut être attribuée à plusieurs effets :

- un piégeage insuffisant de l'énergie dans la direction latérale causé par la vitesse de phase négative du mode guidé. Le caractère main gauche de ce mode est vérifié expérimentalement par l'élévation de la fréquence de résonance avec l'augmentation de la largeur du résonateur (Fig. 4)

- une gravure insuffisamment profonde des bords de la cavité par rapport à la profondeur de pénétration des modes d'épaisseur et guidés dans le miroir de Bragg (Fig. 5). Le coefficient de qualité pourrait ainsi être augmenté en augmentant la profondeur de gravure des bords du résonateur ou en définissant un nouveau miroir de Bragg permettant de réduire la profondeur de pénétration des différents modes.

- la forte pénétration du mode exploité dans les premières couches de SiOC du miroir de Bragg (Fig. 5). Ce matériau possédant un coefficient d'absorption acoustique relativement élevé, il est fort probable qu'une partie significative de l'énergie acoustique est dissipée dans cette portion du résonateur.

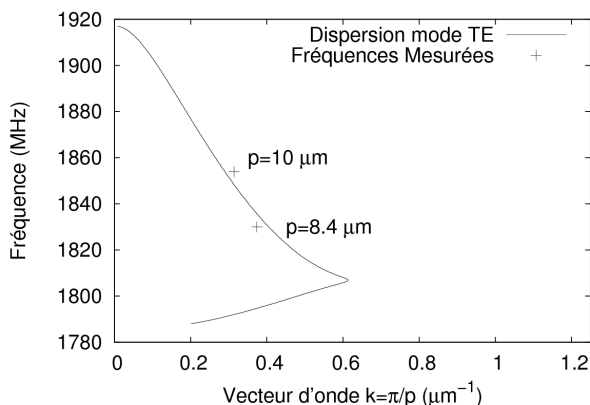


Figure 4 : Courbe de dispersion théorique du mode guidé et caractéristiques mesurées pour deux tailles de résonateurs

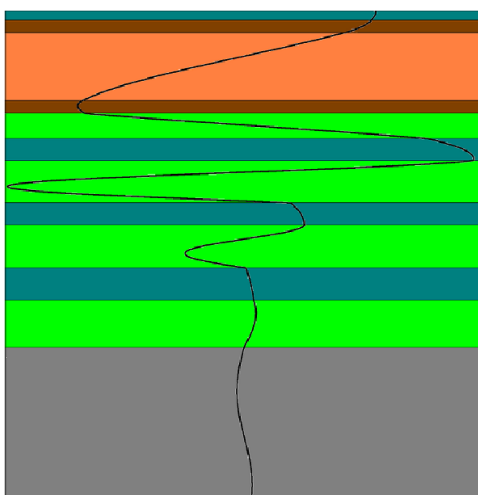


Figure 5 : distribution théorique du déplacement vertical associé au mode guidé

Les caractéristiques mesurées du résonateur à onde guidée sont comparées dans le Tableau 2 aux données existantes sur les résonateurs à onde de Lamb sur membrane. Tous les résonateurs à onde de Lamb utilisent une onde de type S0 et sont réalisés en AlN [1-3] ou en oxyde de zinc [6]. Il apparaît clairement que les propriétés du mode guidé favorisent l'obtention de fréquence de résonance et de coefficient de couplage plus élevés. Par contre, l'isolation insuffisante assurée par le miroir de Bragg actuel se traduit par des coefficients de qualité très inférieurs à ceux des résonateurs sur membrane.

	fréquence de résonance	coefficient de couplage	coefficient de qualité
ce travail	1830 MHz	2 %	160
réf. [1]	20 à 280 MHz	0,8 %	2000
réf. [2]	1280 MHz	0,41 %	1400
réf. [3]	860 et 890 MHz	0,56 et 0,34 %	1200 et 1860
réf. [6]	15 et 90 MHz	-	3400 et 6100

Tableau 2 : caractéristiques du résonateur à onde guidée réalisé et des résonateurs à ondes de Lamb.

5 Conclusion

Un résonateur RF à onde acoustique guidée déposé sur substrat silicium et isolé par miroir de Bragg a été conçu, fabriqué et caractérisé. Les caractéristiques de ce composant apparaissent particulièrement attractives en terme de fréquence de résonance et de coefficient de couplage. L'amélioration du coefficient de qualité suppose une optimisation accrue du miroir de Bragg et des bords du résonateur. La co-intégration de résonateurs à onde acoustique guidée et de résonateurs BAW a été démontrée. Elle offre la possibilité de réaliser simultanément des filtres RF large bande et bande étroite et donc d'intégrer de nouvelles fonctions, comme le filtrage de canal, en bande de base.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le programme NANO 2012 du Ministère de l'Economie de l'Industrie et de l'Emploi. Les auteurs remercient l'ensemble de l'équipe BAW ST-LETI pour son aide. Ils remercient aussi Emmanuel Defaÿ du CEA-LETI et Didace Ekeom de la société Microsonics.

Références

- [1] A. Volatier, G. Caruyer, D. Tanon, P. Ancey, E. Defaÿ, B. Dubus, *UHF/VHF resonators using Lamb waves co-integrated with bulk acoustics wave resonators*, 2005 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, Vol. 2, 902-905 (2005).
- [2] G. Piazza, P. Stephanou, A. Pisano, *Piezoelectric aluminum nitride vibrating contour-mode MEMS resonators*, J. Microelectromech. Syst. **15**, 1406-1418 (2006).
- [3] V. Yantchev, I. Katardjiev, *Micromachined thin film plate acoustic resonators utilizing the lowest order symmetric lamb wave mode*, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control **54**, 87-95 (2007).

- [4] M. Desvergne, E. Defaÿ, D. Wolozan, M. Aid, P. Vincent, A. Volatier, Y. Deval, J.-B. Begueret, *Intermediate frequency Lamb wave coupled resonator filters for RF receiver architectures*, 37th European Solid State Device Research Conference Proceedings, 358–361 (2007).
- [5] M. Benetti, D. Cannata, F. Di Pietrantonio, E. Verona, *Guided lamb waves in AlN free strips*, 2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 1673–1676 (2007).
- [6] G. Ho, R. Abdolvand, A. Sivapurapu, S. Humad, F. Ayazi, *Piezoelectric-on silicon lateral bulk acoustic wave micromechanical resonators*, J. Microelectromech. Syst. **17**, 512–520 (2008).
- [7] I. Koné, B. Dubus, L. Buchaillot, A. Reinhardt, F. Casset, M. Aid, J. Carpentier, P. Ancy, *Resonator using guided waves in a piezoelectric layer above a Bragg mirror*, 2008 IEEE International Frequency Control Symposium, 581–585 (2008).
- [8] A. Khelif, A. Choujaa, J.-Y. Rauch, V. Petreni, H. Moubchir, S. Benchabane, V. Laude, *The OrnniSaw device concept (OmniSAW: Omnidirectional band gap for Surface Acoustic Wave)*, 2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 304–307 (2007).
- [9] R. F. Milsom, F. W. M. Vanhelmont, A. B. M. Jansman, J. Ruigrok, H.-P. Loebel, *Bulk acoustic wave resonator device*, brevet WO2006126168 (2006).
- [10] A. Reinhardt, T. Pastureaud, S. Ballandras, V. Laude, *Scattering matrix method for modeling acoustic waves in piezoelectric, fluid, and metallic multilayers*, J. Appl. Phys. **94**, 6923–6931 (2003).
- [11] S. Marksteiner, J. Kaitila, G. G. Fattinger, and R. Aigner, *Optimization of acoustic mirrors for solidly mounted BAW resonators*, 2005 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 329–332 (2005).
- [12] K. Blotekjaer, K. Ingebrigsten, H. Skeie, *Acoustic surface waves in piezoelectric materials with periodic metal strips on surface*, Transactions on Electron Devices **20**, 1139 (1973).