

Performances et fiabilité de capacités commutables MEMS pour les déphaseurs DMTL de puissance

F. Maury¹, A. Pothier¹, J.C. Orlianges¹, T. Reveyrand¹, D. Mardivirin¹, F. Conseil², P. Blondy¹

¹XLIM UMR 6172 - Université de Limoges/CNRS - 123 avenue Albert Thomas - 87 060 LIMOGES cedex

²MBDA France, 1 avenue Réaumur, 92 358 Le Plessis-Robinson

fabien.maury@xlim.fr : correspondant principal

Résumé

Ce papier présente des capacités commutables MEMS spécifiquement conçues pour des applications de puissance. Les premiers tests en cyclage montrent qu'ils sont capables de fonctionner en commutation à chaud sous 5 W jusqu'à 1 milliard de cycles sans défaillance notable. Ces composants MEMS ont été implémentés dans un déphaseur de type DMTL (Distributed MEMS Transmission Line) opérant à 15 GHz. Des mesures de déphasage pour des sections DMTL de 90° et 180° démontrent de faibles erreurs de phase ainsi qu'une faible sensibilité en conversion AM/PM pour des niveaux de puissance allant jusqu'à 39 dBm.

1. Introduction

L'utilisation de commutateurs MEMS dans des dispositifs semi passifs permet généralement de gagner en intégration, consommation, et/ou en pertes comparés à leurs homologues semi conducteurs [1]. Toutefois, ce choix impliquait jusqu'à présent de travailler à des niveaux de puissance relativement faibles. En effet les meilleurs commutateurs MEMS affichent des tenues en puissance légèrement supérieures au Watt en commutation à chaud [2]-[4]. Pour la majorité d'entre eux, seul un fonctionnement en commutation à froid peut garantir l'absence de phénomène de défaillance pour des puissances supérieures au Watt. Ce mode de fonctionnement est le plus contraignant car il est nécessaire de couper ou d'atténuer fortement le signal micro-onde à transmettre lors des phases d'actionnement des commutateurs. Les structures MEMS présentées dans cet article permettent d'envisager des applications en commutation à chaud pour des puissances de l'ordre de 5W. Les capacités commutées présentées ici démontrent une excellente fiabilité en puissance. Des déphaseurs de type DMTL intégrant ces structures ont montré de faibles pertes et erreurs de phase. Des mesures AM/PM ont également permis de mettre en évidence leur quasi insensibilité de phase jusqu'à des puissances atteignant 8W.

2. Topologie DMTL proposée

2.1. Fabrication

Les capacités MEMS utilisées se présentent sous la forme de micro-poutres cantilevers métalliques obtenues

par le dépôt de deux couches de chrome 60 Å et 90 Å entourant une couche centrale d'or de 2 µm d'épaisseur afin de générer le gradient de stress souhaité. L'utilisation de ce type de poutre est favorable à notre application car mécaniquement stable même avec des élévations raisonnables de température et a déjà été éprouvée avec des signaux de moyenne puissance [5]. Une cellule déphaseur élémentaire est constituée de deux de ces poutres implémentées en shunt sur une ligne coplanaire comme présentée sur la Figure 1.

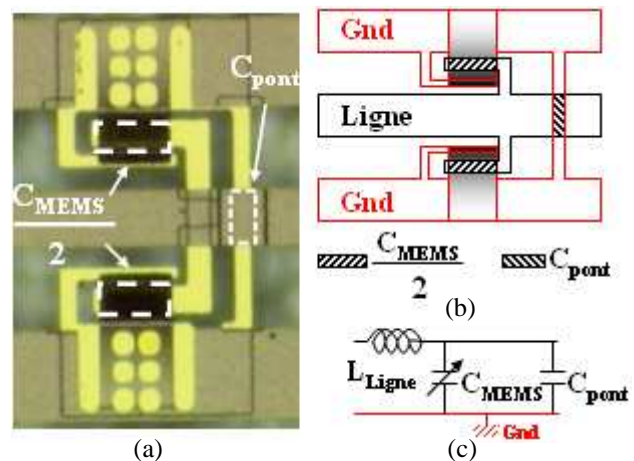


Figure 1. (a) Photographie d'une cellule élémentaire (b) vue schématique de la cellule déphaseur élémentaire (c) et schéma électrique équivalent

Ces structures ont été réalisées sur un substrat de silice fondue. Les électrodes inférieures sont faites d'une couche d'or de 150 nm d'épaisseur et sont entièrement recouvertes d'une couche isolante d'alumine de 0,4 µm d'épaisseur. Des tensions de polarisation de 70 V doivent être appliquées entre la ligne centrale et les plans de masse, où sont ancrées les poutres, pour les actionner. Une capacité parallèle de 20 fF accompagne chaque paire de cantilevers et permet de relier les plans de masse entre eux évitant la génération de modes de propagation parasites. Contrairement aux commutateurs MEMS classiques, la poutre déformable est arrêtée (plot d'arrêts mécaniques) avant d'arriver en contact avec le diélectrique laissant un mince film limitant ainsi des effets de charge dans le diélectrique.

Des trous sont également disposés sur le corps des poutres pour réduire les tensions d'actionnement. Une photographie d'une cellule de test est présentée Figure 2.

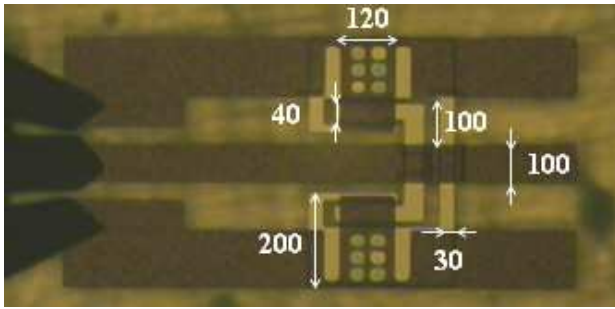


Figure 2. Cellule élémentaire de test en circuit-ouvert et ses dimensions en μm .

2.2. Mesures de fiabilité en puissance

La fiabilité des capacités MEMS a été éprouvée avec un banc de mesure similaire à [6]-[7] dont une vue schématique est montrée Figure 3.

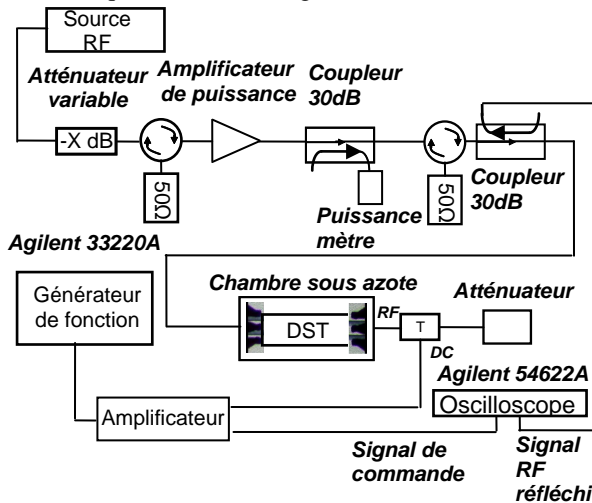


Figure 3. Schéma du banc de mesure de fiabilité en puissance.

Le signal RF réfléchi à l'entrée du dispositif est mesuré alors que celui-ci est cyclé en commutation à chaud sous 5 W à 10 GHz. Un programme d'acquisition automatique piloté par Labview [6] permet de relever périodiquement la caractéristique C(V) des composants sous test. Les capacités ont été cyclées au moyen d'un signal carré bipolaire à 20 KHz.

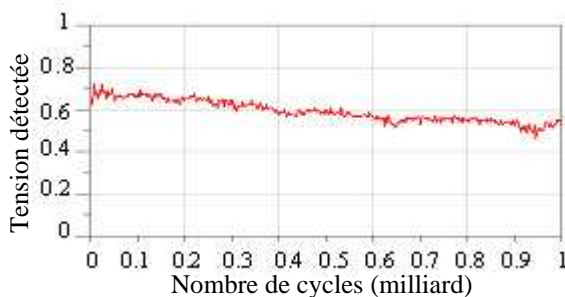


Figure 4. Tension détectée sur la réponse en réflexion d'une cellule élémentaire en commutation à chaud sous 5 W.

La structure DMTL ne fournissant pas un contraste d'amplitude suffisant pour créer une transition franche entre les états haut et bas, un signal proportionnel au contraste entre l'état haut et l'état bas des commutateurs a seulement pu être détecté. Sur la Figure 4, une mesure de la réponse d'une structure MEMS montre un contraste significatif jusqu'à l'arrêt de la mesure à 1 milliard de cycles.

3. Déphaseurs DMTL fiables en puissance

3.1. Principes de conception

Concevoir un déphaseur de type DMTL [8]-[11] consiste à placer périodiquement des cellules élémentaires de déphasage le long d'une ligne de transmission. Chacune d'entre elles est équivalente à une capacité commutée modifiant l'impédance de la ligne chargée et donnant un déphasage égal à (1).

$$\Delta\phi = \frac{360 fs Z_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \left(\frac{1}{Z_{up}} - \frac{1}{Z_{dwn}} \right) \quad (1)$$

$\Delta\phi$ s'exprime en fonction de :

- f la fréquence d'opération en Hz
- s la longueur de la cellule élémentaire en m
- Z_0 l'impédance caractéristique en Ω
- ϵ_{eff} la constante diélectrique effective
- c la vitesse de la lumière dans le vide en m/s
- Z_{up} et Z_{dwn} les impédances de la ligne aux états haut et bas respectivement en Ω .

Les pertes en réflexion maximales (RLmax) peuvent être réglées en choisissant les impédances adéquates de la ligne chargée. La longueur de la cellule élémentaire est un paramètre critique pour déterminer la fréquence de Bragg. Il s'agit de la fréquence au-delà de laquelle il n'est plus possible de transmettre de puissance le long de la ligne.

f	15 GHz
f_b	35 GHz
s	780 μm
Z_0	95 Ω
ϵ_{eff}	2.4
RLmax	-15 dB
Z_{up} / Z_{dwn}	59.9 Ω / 41.8 Ω
C_{up} / C_{dwn}	64 fF / 176 fF
$\Delta\phi$	11.25°

Tableau 1. Paramètres de conception de déphaseurs DMTL.

Tous les paramètres de conception sont regroupés Tableau 1. Ils ont été choisis de manière à atteindre des déphasages bien définis : 0°, 90°, 180°, 270°. Par exemple, 8 et 16 cellules élémentaires constituent des déphaseurs 90° et 180° respectivement. Comme nous pouvons le voir Figure 1, une capacité parallèle additionnelle est présente sur chaque cellule élémentaire de déphasage et vaut 20 fF. Pour obtenir les capacités équivalentes (Tableau 1) adéquates, chaque cantilever doit donc présenter des capacités de 22fF et 77fF respectivement aux états haut et bas.

3.2. Mesures en paramètres S

Des déphaseurs 90° et 180° intégrant nos capacités MEMS commutables ont été réalisés sur une architecture de type DMTL pour un fonctionnement à 15 GHz. Des mesures effectuées à l'aide d'un analyseur vectoriel ont montré des pertes d'insertion de 1,3 dB et 3,2 dB pour ces deux types de déphaseurs, correspondant à des facteurs de mérite de l'ordre de 60°/dB. L'adaptation des déphaseurs reste meilleure que -10 dB jusqu'à 25 GHz. Il faut préciser que les déphaseurs 90° ont été actionnés avec un signal carré unipolaire de 80 V tandis que les déphaseurs 180° ont nécessité 100 V d'actionnement. La Figure 5 présente les mesures de pertes sur ces deux types de déphaseurs. Les déphasages obtenus lors de ces mesures (Figure 6) sont de 89,3° et 178° à 15 GHz et apparaissent en bon accord avec nos simulations.

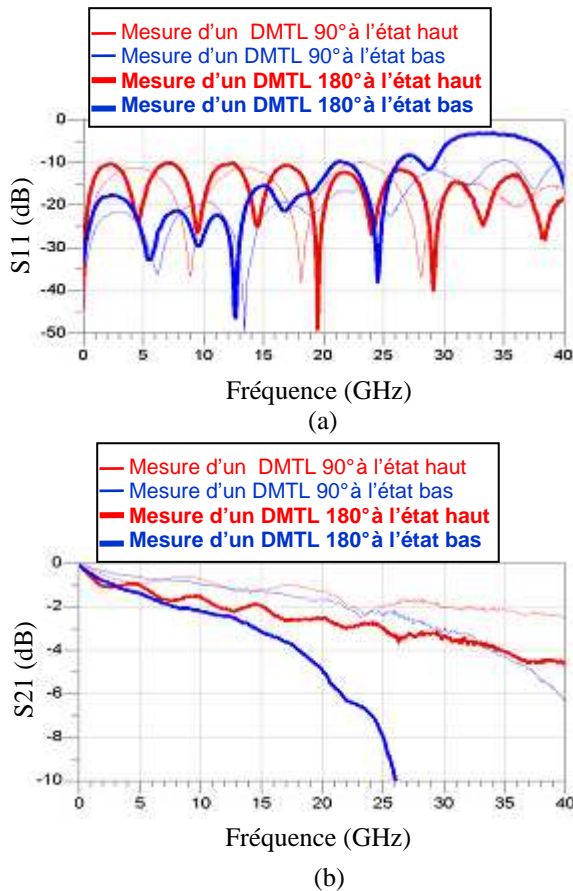


Figure 5. Mesures de pertes en réflexion (a) et en transmission (b) de déphaseurs DMTL 90° et 180°.

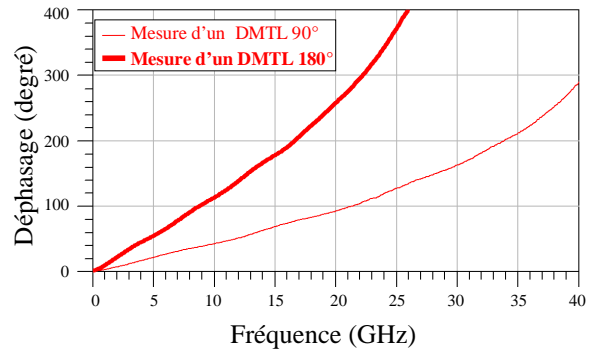


Figure 6. Mesures des déphasages de DMTL 90° et 180°.

Des rétro-simulations en éléments localisés effectuées par le biais du logiciel ADS circuit ont permis de connaître les capacités équivalentes présentées par les cantilevers. Le Tableau 2 montre les valeurs des capacités commutées pour les déphaseurs 90° et 180°.

Capacité MEMS à l'état haut	Capacité MEMS à l'état bas	Déphasage souhaité	Déphasage réalisé
20	70	90°	89.32°
20	68	180°	178°

Tableau 2. Capacités équivalentes de déphaseurs DMTL obtenues en rétro-simulation.

Les capacités équivalentes à l'état et l'état bas sont proches de celles calculées lors de la conception analytique des DMTL et valident donc notre démarche de conception.

3.3. Mesures de linéarité en puissance

Le banc de mesure présenté Figure 7 a permis de relever la variation de phase en puissance des déphaseurs. Un analyseur de réseau vectoriel a été utilisé et une procédure de calibration SOLT (Short-Open-Load-Thru) a été effectuée avant les mesures.

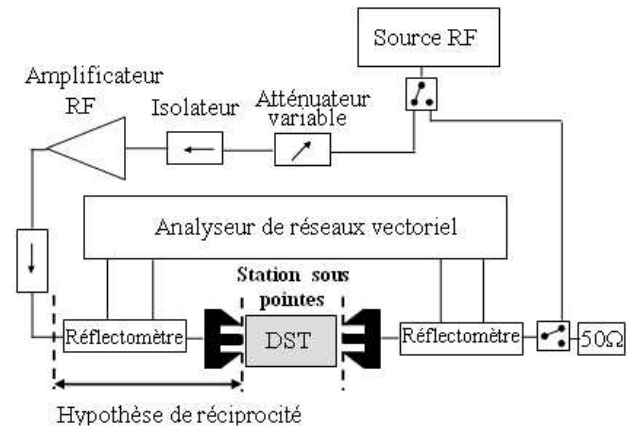


Figure 7. Banc de mesures AM/PM utilisé pour mesurer la linéarité de phase en puissance à 10 GHz.

Un puissance-mètre est placé à l'entrée d'un réflectomètre et une méthode basée sur un théorème de réciprocité [12] permet de connaître les 4 ondes de puissance (a_1 , b_1 , a_2 et b_2) au niveau des pointes RF. On peut ainsi facilement déterminer les puissances réellement appliquées aux dispositifs. Un signal micro-onde de puissance variable a été appliqué, en l'absence de signal de commande, lorsque les poutres sont en position haute. Les mesures de la phase en sortie des dispositifs testés ont été faites tous les dBm entre -4 dBm et 39 dBm. Des résultats de mesures AM/PM réalisées sur un déphaseur 90° à 10 GHz sont montrés sur la Figure 8. Ils démontrent la stabilité en phase des déphaseurs à des variations de niveau de puissance jusqu'à 39 dBm.

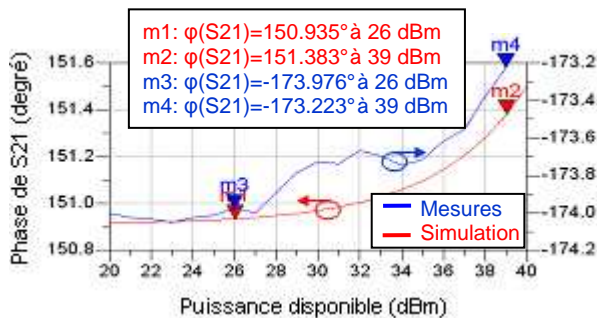


Figure 8. Résultats de simulation et de mesure de la variation de phase d'un déphaseur DMTL 90° à 10 GHz.

En effet, une dérive de phase de seulement 0,75° a été observée pour une puissance appliquée de 39 dBm. Ces mesures sont ici comparées à des résultats de simulations (ADS circuit) effectuées à l'aide d'un modèle non linéaire de capacité. Le modèle permet de calculer la capacité présentée par une poutre, d'une géométrie donnée, en fonction de la force d'attraction micro-onde qui lui est appliquée. Il a ainsi permis de prédire une variation de phase de 0,55°, ce qui est en bon accord avec les résultats de mesure obtenus a posteriori.

4. Conclusion

Ce papier illustre le potentiel de capacités commutables MEMS spécifiquement conçues pour des applications de puissance. L'approche proposée a démontré expérimentalement une fiabilité très encourageante de fonctionnement jusqu'à 5 W en commutation à chaud. Des déphaseurs DMTL intégrant ce type de poutres MEMS ont été réalisés. Ils ont montré de bonnes performances RF et les valeurs des capacités commutées obtenues par rétro-simulations sont en bon accord avec celles déterminées lors de notre démarche analytique de conception. Les dispositifs de déphasage ont également montré une quasi insensibilité de phase en fonction de la puissance RF jusqu'à 8 W.

5. Bibliographie

[1] G. M. Rebeiz, RF MEMS: Theory and Technology. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2003.

[2] D. Peroulis, S. P. Pacheco, L. P. B. Katehi, « *RF MEMS switches with enhanced power-handling capabilities* », 2004 IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 52, pp.59-68, Jan.2004.

[3] J. B. Muldavin, R. Boisvert, C. Bozler, S. Rabe and C. Keast « *Power handling and linearity of MEM capacitive series switches* », 2003 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., vol. 3, pp. 2119-2122, Juin 2006.

[4] C. Palego and al « *RF-MEMS switched varactor for high power applications* », 2006 IEE MTT-S Int. Symp. Dig., San Francisco, Juin 2006.

[5] J. D. Martinez, P. Blondy, A. Pothier, A. Crunteanu and M. Chatras « *Surface and bulk micromachined RF MEMS capacitive series switch for watt-range hot switching operation* », 2007 37th European Microwave Conference, Munich, Germany, 9-12 Oct. 2007.

[6] M. Van Spengen, W. M. Puers, I. De Wolf « *The prediction of stiction failures in MEMS* », 2004 IEEE Transaction on Device and Material reliability, vol.3, issue 4, pp.167-172, Dec. 2003.

[7] X. Yuan, J. C. M. Hwang, D. Forehand, C. L. Goldsmith, « *Modeling and characterization of dielectric-charging effects in RF MEMS capacitive switches* », 2005 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp.753-756, Juin 2005.

[8] D. Mardivirin, D. Bouyge, A. Crunteanu, A. Pothier, P. Blondy « *Study of residual charging in dielectric less capacitive MEMS switches* », 2008 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Juin 2008.

[9] B. Lacroix, A. Pothier, A. Crunteanu, P. Blondy, « *Phase shifter Design Based On Fast RF MEMS Switched Capacitors* », 2008 European Microwave Conference, Amsterdam, Oct. 2008.

[10] N. Barker and G. M. Rebeiz, « *Optimization of distributed MEMS Phase Shifters* », 1999 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., vol1, pp299-302, Juin 1999.

[11] J. S. Hayden, A. Malczewski, J. Kleber, C. L. Goldsmith and G. M. Rebeiz, « *2 and 4-bit DC 18 GHz Microstrip MEMS Distributed Phase Shifters* », 2001 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., vol1, pp219-222, Mai 2001.

[12] A. Ferrero, U. Pisani, « *An improved calibration technique for on wafer large-signal transistor characterization* », 1993 IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, vol.42, No.2 pp.360-364, Avril 1993.