HAL
open science

Caractérisation jusqu'aux ondes millimétriques des capacités ferroélectriques et intégration dans deux déphaseurs accordables et compacts à 40 GHz et 60 GHz

Rosa de Paolis, Sandrine Payan, Mario Maglione, Guillaume Guegan, Fabio Coccetti

To cite this version:

Rosa de Paolis, Sandrine Payan, Mario Maglione, Guillaume Guegan, Fabio Coccetti. Caractérisation jusqu'aux ondes millimétriques des capacités ferroélectriques et intégration dans deux déphaseurs accordables et compacts à 40 GHz et 60 GHz. Journées Nationales Micro-ondes (JNM), Jun 2015, Bordeaux, France. hal-01238297

HAL Id: hal-01238297

https://hal.science/hal-01238297v1

Submitted on 4 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation jusqu'aux ondes millimétriques des capacités ferroélectriques et intégration dans deux déphaseurs accordables et compacts à 40 GHz et 60 GHz

Rosa De Paolis[1,2], Sandrine Payan[3], Mario Maglione[3], Guillaume Guegan[4], Fabio Coccetti[1,2]

[1]*CNRS, LAAS, 7 avenue du colonel Roche, F-31400 Toulouse, France*
[2]*Univ de Toulouse, LAAS, F-31400 Toulouse, France*
[3]*CNRS, Université de Bordeaux, ICMCB, UPR9048, F-33608 Pessac, France*
[4] *ST Microelectronics, 16 Rue Pierre et Marie Curie, 37100 Tours, France*
coccetti@laas.fr

Résumé

Deux déphaseurs accordables et compacts ont été développés aux ondes millimétriques en exploitant des capacités ferroélectriques à base de BST intégrées sur un substrat silicium. Les propriétés diélectriques du matériau ont été extraites à partir des mesures et d'un circuit électrique équivalent sur la bande 0,04-65 GHz. L'accordabilité atteinte est de 80% sous une tension de polarisation entre 0 et 25 V. Le premier déphaseur dérivant montre à 60 GHz un déphasage de 135° et un facteur de mérite de 23°/dB sous une tension de polarisation allant de 0 et 30 V. Le deuxième déphaseur montre à 40 GHz un déphasage de 270° et un facteur de mérite de 21°/dB sous une tension de polarisation allant de 0 et 20 V. Les performances de ces dispositifs sont meilleures que l'état de l'art actuel.

1. Introduction

Les futurs systèmes de communication sans fils nécessitent la réduction de la taille et des coûts de fabrication ainsi que le développement de fonctions complexes en travaillant dans la gamme des ondes millimétriques. Dans ce contexte, les performances accrues peuvent être obtenues par le remplacement de nombreux composants par des éléments accordables et agiles. Les matériaux ferroélectriques à base de BST répondent à ces besoins avec des taux d'agilité importants et de faibles temps de réponse [1]. Le nombre d'études publiées sur les propriétés du BST aux fréquences supérieures à 45 GHz [2,3] reste faible à ce jour, par rapport aux autres technologies utilisables (cristaux liquides [4] et MEMS [5]). La raison est imputable à deux facteurs : d'une part, les pertes diélectriques intrinsèques du BST dans cette gamme de fréquences sont très élevées, d'autre part, ces matériaux requièrent une analyse complexe pour la modélisation fiable des propriétés diélectriques à ces fréquences [6-9]. Cependant des études récentes ont démontré que les pertes à hautes fréquences peuvent être améliorées grâce aux progrès des technologies de fabrication [10, 11]. En conséquence une caractérisation des propriétés du matériau jusqu'aux fréquences millimétriques doit être menée en amont de la conception des dispositifs plus complexes à base de BST.

Dans cet article sont présentés deux déphaseurs accordables aux ondes millimétriques qui utilisent des capacités MIM (Métal-Isolant-Métal) accordables à base de BST fabriquées selon un procédé industriel à faible coût (sol-gel), en collaboration avec ST Microelectronics. Les propriétés électromagnétiques des capacités en fonction de la tension de polarisation appliquée ont été préalablement extraites par un circuit équivalent appliquées aux mesures de capacités de test [12].

A notre connaissance, les déphaseurs proposés sont le premier exemple dans la littérature avec cette configuration et ont des bonnes performances par rapport à l'état de l'art actuel des déphaseurs à base de matériaux ferroélectriques [13,14].

2. Caractérisation du BST jusqu'aux ondes millimétriques

Les capacités de test à base de BST ont été réalisées par ST Microelectronics sur substrat silicium à haute résistivité et sont constituées d'un empilement d'une couche de BST de 250 nm, déposée par procédé sol-gel, et comprise entre deux métaux (Figure 1). En outre, trois différentes tailles des électrodes ont été étudiées et comparées.

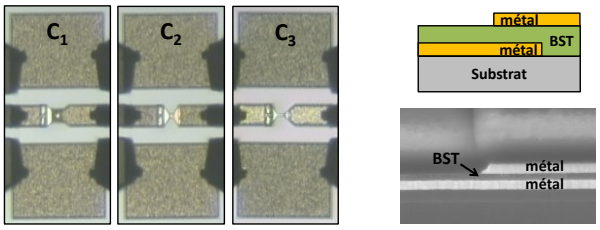

Figure 1. Micrographie optique des capacités de test et empilement des couches.

Des mesures de paramètre S ont été réalisées à température ambiante à l'aide d'un analyseur de réseau Anritsu 37397C et de Picoprobes de pas 150 µm. Un calibrage SOLT et une suppression des effets liés aux lignes d'accès ont été appliqués.

Le circuit équivalent utilisé consiste en une capacité, une inductance, et une résistance en série obtenues par un système d'équations à l'aide de MatLab et par d'une approche semi-empirique (effectué par le logiciel Agilent ADS). Comme on peut le voir sur la Figure 2, le modèle proposé présente un très bon accord entre mesures et simulations sur la bande 0,04-65 GHz. L'inductance reste constante à 0,045 nH pour les trois capacités, la résistance est de quelques Ohms et comprends les pertes des métaux comme du diélectrique. La valeur de capacité en fonction de la tension appliquée est représentée sur la Figure 2.

Les paramètres diélectriques du BST ont été extraits en fonction de la fréquence et de la tension de polarisation appliquée (0-25 V). La permittivité a été calculée sur la base d'un condensateur plan et est montrée en fonction de la tension appliquée dans la Figure 3. Par conséquent, l'agilité du matériau, définie comme $(\varepsilon_r(V_{min})-\varepsilon_r(V_{max}))/\varepsilon_r(V_{min})$, est autour de 80%.

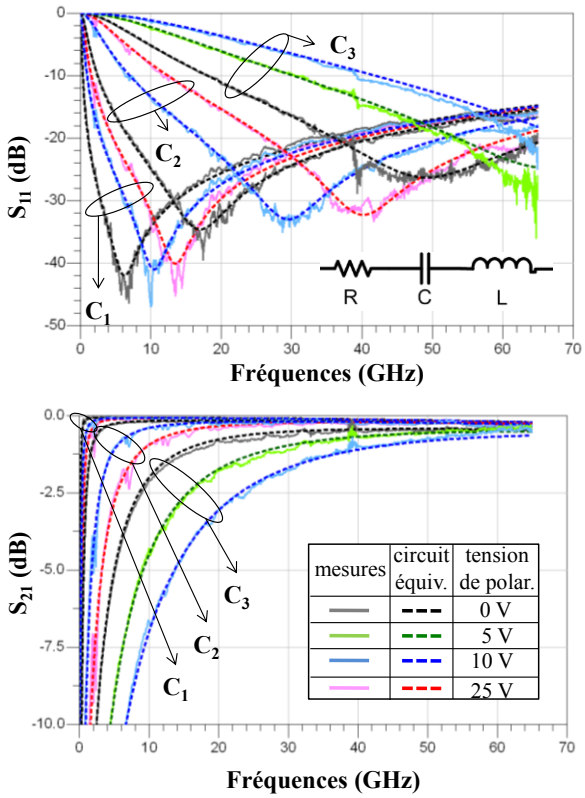

Figure 2. Paramètres S : comparaison mesures et simulations du circuit équivalent.

Ces paramètres ont été utilisés, dans un deuxième temps, pour la conception de deux déphaseurs accordables aux ondes millimétriques à base de capacités BST de taille spécifique pour cette application. La valeur de capacité et le facteur de qualité de ces capacités ont été extraits sur la base de mesures grâce à la même méthode à base de circuit équivalent utilisée pour les capacités de test, comme on peut le voir sur la Figure 4. Les valeurs de la tangente de perte, estimée comme l'inverse du facteur Q afin de considérer les pertes totales du dispositif, sont respectivement de 0,17 et de 0,12 à 60 GHz et à 40 GHz, en accord avec la littérature [3,13].

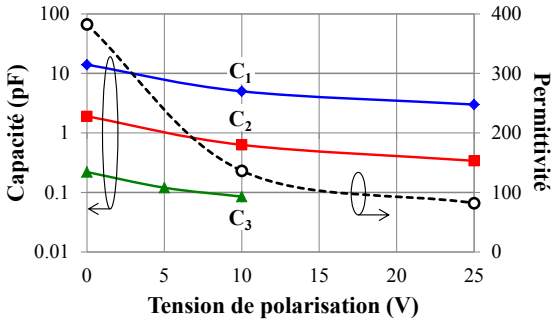

Figure 3. Capacité et permittivité sous tension de polarisation.

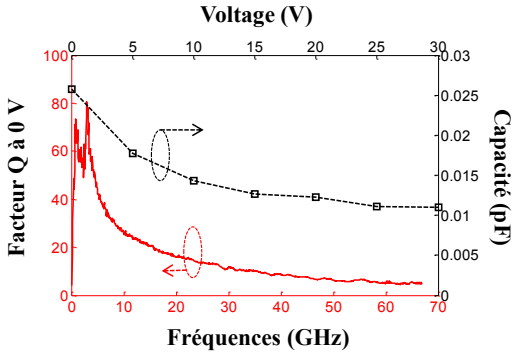

Figure 4. Capacité en fonction de la fréquence (rouge) et facteur de qualité en fonction de la tension de polarisation (noire).

3. Déphaseurs aux ondes millimétriques

Le premier déphaseur accordable proposé a été conçu en suivant une approche à lignes distribuées, comme celle proposé dans [15]. Il est constitué d'une ligne coplanaire à haute impédance, chargée de façon périodique par douze capacités BST identiques comme celle de Figure 4. Grâce à cette configuration la tension de polarisation peut être appliquée simultanément sur toutes les capacités et cela implique le changement du déphasage produit par le dispositif. En outre, le déphaseur proposé est de taille totale (1,5 x 0,8) mm², soit moins de $0{,}05\lambda_0^2$.

Afin d'évaluer les performances du déphaseur, un facteur de mérite (FoM) a été calculé comme le rapport entre le déphasage et la plus grande valeur des pertes d'insertion. Les paramètres S mesurés, le facteur de mérite et une micrographie du dispositif sont présentés sur la Figure 5.

Le maximum de déphasage (par rapport à la condition à 0 V) à 60 GHz a été obtenu avec 90 V et est de 150 degrés. Le facteur de mérite calculé à 60 GHz est de 25°/dB. Toutefois, une tension de polarisation de 30 V permet de obtenir le 90% du déphasage maximum, à savoir 135° avec une FoM de 23°/dB.

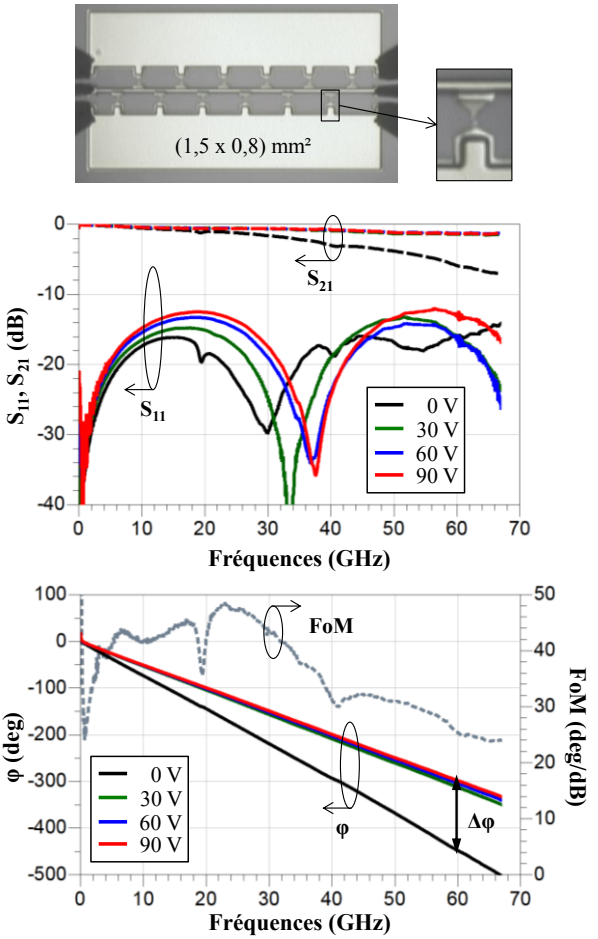

Figure 5. Micrographie optique du déphaseur. Mesures de paramètres S et de facteur de mérite.

Le deuxième déphaseur proposé a été conçu en utilisant un coupleur directionnel hybride 90°, comme celui proposé dans [16], qui permet d'envisager des déphasages importants en un minimum d'espace. Le coupleur est connecté à deux lignes en réflexion identiques qui sont chargées par des capacités BST. Grâce à cette configuration l'application de la tension de polarisation sur les capacités implique le changement du déphasage produit par le dispositif. En outre, des autres capacités BST ont été utilisées pour réduire la taille des branches à quart d'onde avec un modèle à π. Ces dernières capacités ont été placées de façon à former des ponts entre les deux plans de masse au croisement entre les lignes de 50 Ω et les lignes de 35 Ω, et en faisant en sorte d'avoir un deuxième avantage : la suppression des modes parasites couplés des lignes coplanaires, une fonction qui est habituellement réalisée par des ponts à l'air. Le déphaseur proposé est de taille totale (0,81 x 0,82) mm², soit moins de $0{,}012\lambda_0^2$. Les paramètres S mesurés, le facteur de mérite et la micrographie du dispositif sont présentés sur la Figure 6. Un déphasage de 270° a été obtenu à 40 GHz avec 20 V et le facteur de mérite calculé de 21°/dB.

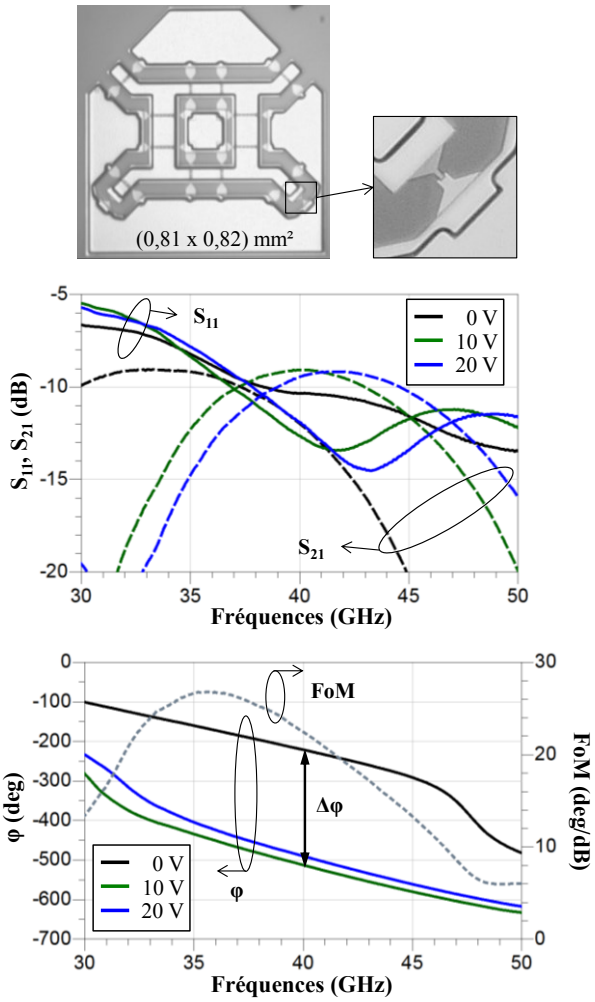

Figure 6. Micrographie optique du déphaseur. Mesures de paramètres S et de facteur de mérite.

Réf.		Δφ (°)	S_{21} (dB)	FoM (°/dB)	FoM/V_{max} (°/(dB*V))	Taille (mm²)	V_{max} (V)	Fréq (GHz)
[13]		220	-10	22	0.07	33.4	320	60
[14]		**275**	-33	8	0.26	/	**30**	
Ce travail	1	150	**-5.9**	**25**	**0.28**	**1.2**	90	
		135	**-5.9**	**23**	**0.77**	**1.2**	**30**	
	2	270	-13	21	**1.05**	**0.66**	**20**	40

Tableau 1. Déphaseurs passifs aux ondes millimétriques à base de BST.

Enfin, les déphaseurs accordables ont été comparés à l'état de l'art actuel des déphaseurs à base de BST, comme présenté dans le Tableau 1. A notre connaissance, les dispositifs proposés sont supérieurs à l'état de l'art, notamment à niveau de FoM, pertes d'insertion, et taille totale.

4. Conclusion

Deux déphaseurs accordables et compacts aux ondes millimétriques ont été présentés en intégrant des capacités ferroélectriques à base de BST réalisées par ST Microelectronics sur un substrat silicium. Les résultats expérimentaux démontrent une supériorité par rapport à l'état de l'art. Les propriétés diélectriques du matériau ont été extraites sur la bande 0.04-65 GHz à partir de mesures expérimentales et d'un circuit électrique équivalent en fonction de la fréquence et de la tension de polarisation appliquée. La capacité étudiée présente une accordabilité de 80% sous une tension de polarisation entre 0 et 25 V. Le premier déphaseur montre à 60 GHz une différence de phase de 135° et un facteur de mérite de 23°/dB sous une tension de polarisation allant de 0 et 30 V. Les pertes d'insertion sont comprises entre 1.3 et 5.9 dB. Le deuxième déphaseur montre à 40 GHz un déphasage de 270° et un facteur de mérite de 21°/dB sous une tension de polarisation allant de 0 et 20 V. La taille des deux déphaseurs est très compactes : 1.5 x 0.8 mm² et 0.81 x 0.82 mm², qui correspondent respectivement à $0.048\lambda_0^2$ et à $0.012\lambda_0^2$.

5. Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche pour son support financier dans le cadre du projet ABSYS2 (n°ANR 2010 VERS 012) et Mitsubishi Materials Corporation pour la fourniture des solutions sol-gel.

6. Bibliographie

[1] S. Gevorgian, *« Ferroelectrics in Microwave Devices, Circuits and Systems»*, London: Springer, 2009.

[2] G. Houzet, L. Burgnies, G. Velu, J.C. Carru, and D. Lippens, *« Dispersion and loss of ferroelectric $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ thin films up to 110 GHz»*, Applied Physics Letters, Vol. 93, 2008.

[3] A. Ghalem, F. Ponchel, D. Remiens, J.F. Legier, and T. Lasri, *« Broadband dielectric characterization of sapphire / TiO_x / $Ba_{0.3}Sr_{0.7}TiO_3$ (111)-oriented thin films for the realization of a tunable interdigitated capacitor»*, IEEE Trans. on Ultr., Ferr. and Freq. Control, Vol. 60, n° 5, 2013.

[4] A.L. Franc, O.H. Karabey, G. Rehder, E. Pistono, R. Jakoby, P. Ferrari, *« Compact and broadband millimeter-wave electrically tunable phase shifter combining slow-wave effect with liquid crystal technology»*, IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn., Vol. 61, n° 11, 2013.

[5] N.S. Barker, and G.M. Rebeiz, *« Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wide-band switches»*, IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn., Vol. 46, n° 11, 1998.

[6] A. Vorobiev, P. Rundqvist, K. Khamchane, and S. Gevorgian, *« Microwave loss mechanisms in $Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO_3$ thin film varactors»*, J. Appl. Phys., Vol. 96, n° 8, 2004.

[7] O.G. Vendik, L.T. Ter-Martirosyan, and S.P. Zubko, *« Microwave losses in incipient ferroelectrics as functions of the temperature and the biasing field»*, J. Appl. Phys., Vol. 84, 1998.

[8] A.K. Tagantsev, V.O. Sherman, K.F. Astafiev, J. Venkatesh, and N. Setter, *« Ferroelectric materials for microwave tunable applications»*, J. Electroceram., Vol. 11, 2003.

[9] M.E.Lines and A.M. Glass, *« Principles and applications of ferroelectrics and related materials»*, Clarendon Press, Oxford, 1977.

[10] D. Levasseur, E. Bouyssou, R. De Paolis, A. Rousseau, F. Coccetti, G. Guegan, S. Payan, M. Maglione, *« Systematic tuning of the conduction mechanisms in ferroelectric thin films»*, Journal of Physics: Condensed Matter, Vol. 25, n° 49, 2013.

[11] C-H Lee, N.D. Orloff, T. Birol, Y. Zhu, V. Goian, E. Rocas, R. Haislmaier, E. Vlahos, J.A. Mundy, L.F. Kourkoutis, Y. Nie, M.D. Biegalski, J. Zhang, M. Bernhagen, N.A. Benedek, Y. Kim, J.D. Brock, R. Uecker, X.X. Xi, V. Gopalan, D. Nuzhnyy, S. Kamba, D.A. Muller, I. Takeuchi, J.C. Booth, C.J. Fennie, D.G. Schlom, *« Exploiting dimensionality and defect mitigation to create tunable microwave dielectrics»*, Nature, Vol. 502, 2013.

[12] R. De Paolis, F. Coccetti, S. Payan, M. Maglione, G. Guegan, « *Characterization of ferroelectric BST MIM capacitors up to 65 GHz for a compact phase shifter at 60 GHz*», European Microwave Conf., Rome, 2014.

[13] A.B. Kozyrev, A.V. Ivanov, O.I. Soldatenkov, A.V. Tumarkin, S.V. Razumov, S.Y Aigunova, *« Ferroelectric $(Ba,Sr)TiO_3$ thin-film 60-GHz phase shifter»*, Techn. Phys. Lett., Vol. 27, 2001.

[14] G. Velu, L. Burgnies, G. Houzet, K. Blary, D. Lippens, J. C. Carru, *« Characterization of ferroelectric films up to 60 GHz: application to phase shifters»*, International Symposium on Integrated Ferroelectrics, Bordeaux (France), 2007.

[15] E.G. Erker, A.S. Nagra, Y. Liu, P. Periaswamy, T.R. Taylor, J. Speck, R.A. York, *« Monolithic Ka-Band Phase Shifter Using Voltage Tunable $BaSrTiO_3$ Parallel Plate Capacitors»*, IEEE Microw. And Guided Wave Letters, Vol.10, n° 1, 2000.

[16] F. Congedo, G. Monti, L. Tarricone, P. Farinelli, R. Sorrentino, J. Iannacci, V. Mulloni, B. Margesin, *« MEMS-Based Frequency-Tunable Reflect-Line Phase Shifter»*, MEMSWAVE2011, 2011.