



**HAL**  
open science

## Caractérisation et analyse des performances des capacités ferroélectriques à BST dans le domaine des ondes millimétriques

Aurelian Crunteanu, Areski Ghalem, Laure Huitema, Caroline Borderon,  
Raphaël Renoud, Hartmut W Gundel

### ► To cite this version:

Aurelian Crunteanu, Areski Ghalem, Laure Huitema, Caroline Borderon, Raphaël Renoud, et al.. Caractérisation et analyse des performances des capacités ferroélectriques à BST dans le domaine des ondes millimétriques. 16èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux (JCMM), Toulouse, 30 mars – 1er avril 2020/ en ligne 23-25 nov 2020, Nov 2020, Toulouse, France. hal-03029522

**HAL Id: hal-03029522**

**<https://hal.science/hal-03029522>**

Submitted on 3 Dec 2020

**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 et analyse des performances des capacités ferroélectriques à BST dans le domaine des ondes millimétriques

Aurelian Crunteanu<sup>1</sup>, Areski Ghalem<sup>1</sup>, Laure Huitema<sup>1</sup>, Caroline Borderon<sup>2</sup>, Raphael Renoud<sup>2</sup>, Hartmut W. Gundel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*XLIM, UMR CNRS 7252, Université de Limoges, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France*

<sup>2</sup>*IETR, UMR CNRS 6164, Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 3, France*

aurelian.crunteanu@xlim.fr, caroline.borderon@univ-nantes.fr

**Résumé**—Nous présentons la réalisation et l'analyse des performances hyperfréquences de condensateurs interdigités à capacité variable (IDC) intégrant des couches minces ferroélectriques de titanate de baryum et strontium ( $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ ). Les dispositifs intégrant des films avec deux compositions différentes ont été caractérisés sur une plage fréquentielle allant de 200 MHz à 67 GHz, en leur appliquant différentes tensions de polarisation. Les résultats montrent des variations de capacités dans le domaine des fréquences millimétriques allant jusqu'à 40% sous des champs électriques relativement faibles, de 150 kV/cm. Ces caractéristiques prometteuses permettent d'envisager l'intégration de ces composants IDC au sein des antennes millimétriques reconfigurables.

## I. INTRODUCTION

Les matériaux ferroélectriques et notamment le titanate de baryum et strontium,  $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  (BST), sont de très bons candidats pour le développement de dispositifs reconfigurables micro-ondes [1-6]. En effet, leur capacité à modifier leur permittivité diélectrique sous l'action d'un champ électrique externe et leurs pertes relativement faibles permettent leur intégration dans des condensateurs variables de type MFM (métal-ferroélectrique-métal) [2-4] ou IDC (peignes interdigités situés sur la couche ferroélectrique) [1,6]. Ces dispositifs peuvent être utilisés par la suite comme éléments d'accord au sein de divers dispositifs microondes à reconfiguration fréquentielle tels que des filtres, des déphaseurs [6] ou des antennes [5]. Alors que leurs propriétés et leur intégration dans les domaines RF/ micro-ondes sont bien référencées dans la littérature, les performances des films de BST dans la gamme des ondes millimétriques (> 30 GHz) sont très peu recensées actuellement. Dans la perspective de leur intégration future dans des systèmes reconfigurables pour des applications 5G ou millimétriques, nous présentons ici la caractérisation de dispositifs de type IDC intégrant des couches de BST dans ce domaine de fréquences.

## II. REALISATION ET CARACTERISATION DES CONDENSATEURS IDC A BST

Nous avons préparé des couches minces de 800 nm d'épaisseur de BST avec deux compositions différentes ( $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  avec  $x=0.8$  -BST80-20 et  $x=0.5$  - BST50-50), en utilisant la technique de sol-gel, sur des substrats d'alumine. Les dispositifs IDC ont été réalisés sur ces deux types de couches en utilisant des techniques de micro fabrication classiques en salle blanche (photolithographie optique en procédé lift-off pour définir la structure des électrodes et évaporation thermique des couches métalliques - Ti/Au, 10/600 nm). La topologie globale intègre deux condensateurs en parallèle (partageant une électrode commune) pour faciliter les mesures hyperfréquences qui

utilisent des sondes de test de type GSG (Ground-Signal-Ground). L'image d'un condensateur IDC typique réalisé est montrée sur la Fig. 1a. Chaque dispositif intègre deux paires d'électrodes en parallèle (largeur de l'électrode  $w=20\ \mu\text{m}$ , longueur  $L=30\ \mu\text{m}$  et distance entre les électrodes  $g=6\ \mu\text{m}$ ).

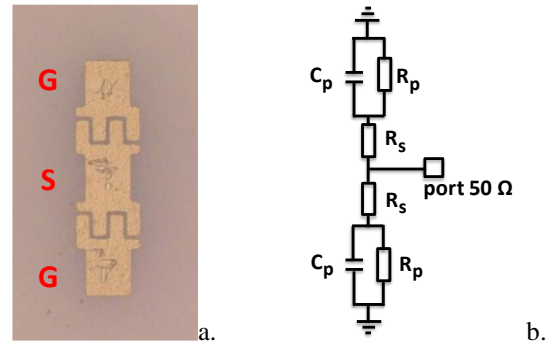


Fig. 1. Topologie de la structure métallique IDC fabriquée sur les deux types de films ferroélectriques (a.) et schéma électrique équivalent (b.).

La caractérisation hyperfréquence large bande (mesure des coefficients de réflexion,  $S_{11}$ ), a été réalisée dans le domaine [200 MHz – 67 GHz] en utilisant un analyseur de réseau vectoriel (ZVA Rohde& Schwarz) et des sondes GSG. La tension de polarisation DC (0 à 80 V) a été appliquée sur les IDC via un Té de polarisation entre les électrodes de masse (G) et de signal (S) des sondes. Le circuit électrique équivalent du dispositif global mesuré est représenté sur la Fig. 1b ( $C_p$  est la capacité d'un condensateur IDC en parallèle avec une résistance  $R_p$  liée aux pertes des films BST, le tout en série avec une résistance  $R_s$  liée aux pertes métalliques des électrodes).

Ce modèle simplifié permet d'extraire, à partir des valeurs des paramètres  $S_{11}$ , les valeurs de résistance et de réactance de l'impédance  $Z_{11}$  des IDC, en utilisant (1) et (2) :

$$Z_{11} = Z_0 \cdot \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (1)$$

$$Z_{11} = \frac{R_p}{(R_p C_p \omega)^2 + 1} + R_s - j \cdot \frac{R_p^2 C_p \omega}{(R_p C_p \omega)^2 + 1} \quad (2)$$

$$\approx \frac{1}{R_p (C_p \omega)^2} + R_s - j \cdot \frac{1}{C_p \omega} = Z_R + jZ_I$$

En considérant  $R_p C_p \omega \gg 1$ , nous avons représenté sur les graphiques dans la Fig. 2a et b, pour chaque type de couche BST, les dépendances fréquentielles des capacités  $C_p$ , en fonction des tensions DC appliquées, entre 0 et 80V.

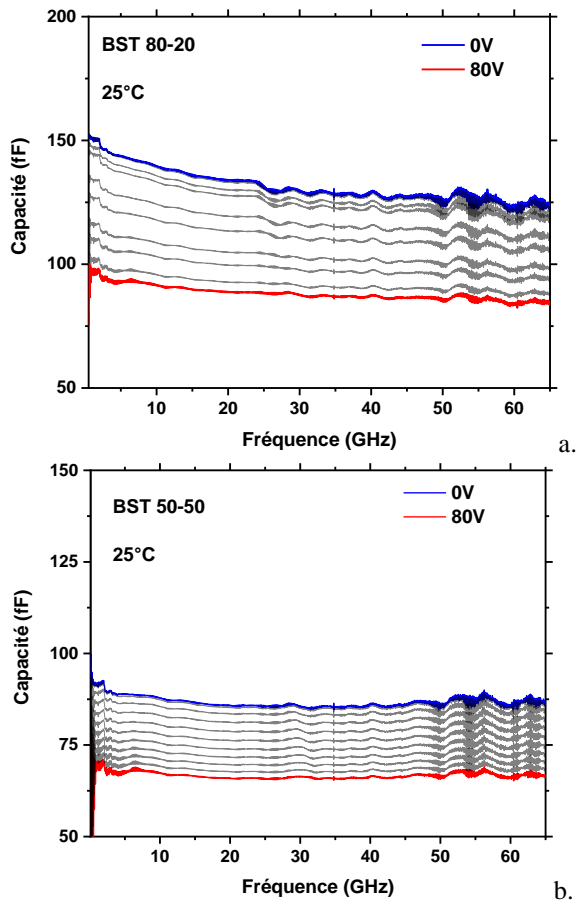


Fig. 2. Évolution fréquentielle des capacités des dispositifs IDC en fonction de la tension DC appliquée, pour la composition BST80-20 (a.) et BST50-50 (b.).

L'agilité des composants peut être déterminée en utilisant la relation (3) :

$$T(\%) = \left( \frac{C(0V) - C(80V)}{C(0V)} \right) * 100 \quad (3)$$

Où  $C(0V)$  et  $C(80V)$  correspondent aux valeurs des capacités à 0V et 80V, respectivement. Les agilités obtenues pour les dispositifs intégrant les deux types de couches ferroélectriques sont représentées sur la Fig. 3, en fonction de la fréquence. On observe des valeurs d'agilité quasi-constantes sur toute la gamme fréquentielle de mesure, de l'ordre de 35% pour les dispositifs à base de films de BST80-20 et autour de 25% pour les dispositifs intégrant les couches de type BST 50-50, en appliquant une tension de 80V (correspondant à des champs électriques relativement faibles, d'environ 150kV/cm).

Les valeurs d'agilité des dispositifs peuvent être améliorées en appliquant sur les dispositifs des tensions électriques plus fortes (par exemple jusqu'à environ 42% sous 100 V pour les dispositifs IDC à BST80-20) ou en réduisant les distances entre les électrodes individuelles des IDC.

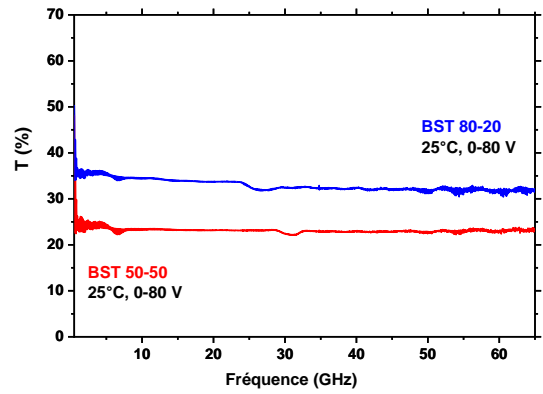


Fig. 3. Agilité des deux types des condensateurs IDC en fonction de la fréquence.

Sur la Fig. 4 sont représentés également les courbes  $C = f(V)$ , correspondant aux variations de la capacité IDC de composition BST 80-20 en fonction de la tension (mesures réalisées à température ambiante suite à l'application des cycles de montée/ descende en tension entre + 80V et - 80 V) aux fréquences de 30 et 45 GHz. Comme remarqué sur la figure, l'évolution de la capacité avec la tension appliquée ne montre pas d'hystérésis marqué et pas de polarisation diélectrique rémanente, dans les limites des erreurs de mesure. Ce comportement, également perceptible dans le cas de la composition BST 50-50 permet de prévoir l'utilisation de ces deux types de matériaux BST dans des dispositifs fonctionnels millimétriques.

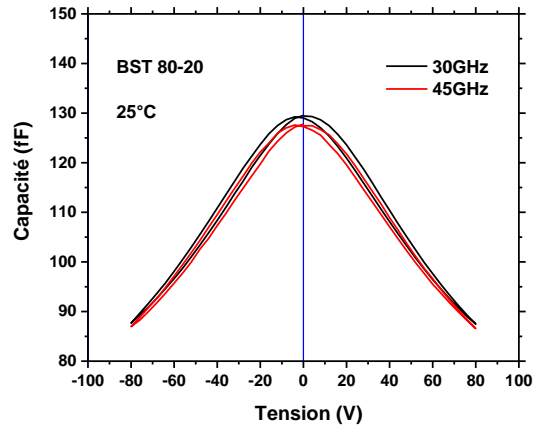


Fig. 4. Cycles d'hystérésis typiques de la variation des capacités IDC avec la tension ( $C(V)$ ) pour la composition BST 80-20.

Les pertes globales de chaque type de dispositif sont représentées sur la Fig. 5a et b, comme l'inverse de leur facteur de qualité ( $Q = |Z_I|/|Z_R|$ ). Ces pertes englobent non seulement les pertes liées au matériau ferroélectrique mais aussi celles dues aux pertes métalliques ou liées à la topologie des dispositifs et permettent, à ce stade, de comparer de manière qualitative les caractéristiques diélectriques de chaque type de composition de BST.

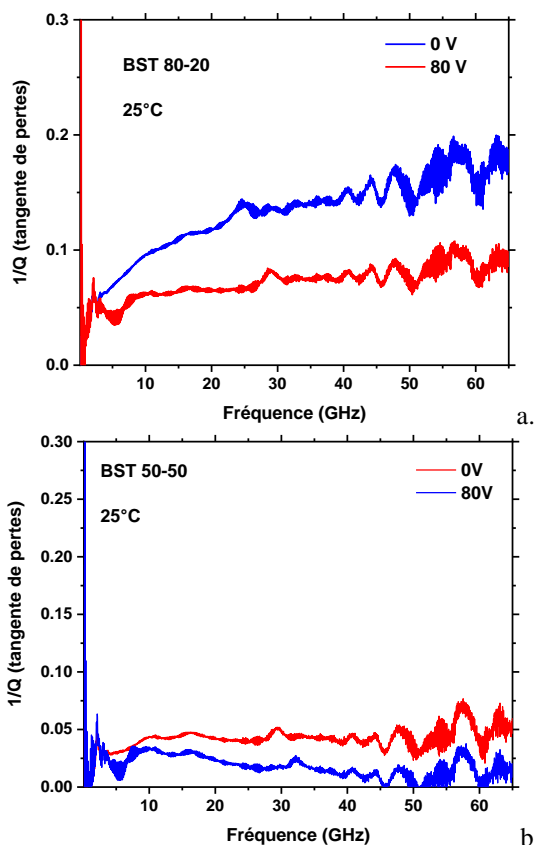


Fig. 5. Pertes globales des dispositifs IDC BST80-20 (a.) et IDC BST50-50 (b.) pour 0 et 80V de tension DC appliqué.

Afin d'extraire les propriétés diélectriques (permittivités et tangente des pertes) des deux types de compositions BST, nous avons réalisé des simulations électromagnétiques par éléments finis en 3D (Ansys HFSS) des dispositifs IDC, pour 0 et 80 V (Fig. 6). La modélisation du dispositif IDC intégrant des films de BST nous a permis d'extraire les valeurs des capacités et des pertes simulées et les comparer avec les valeurs mesurées.

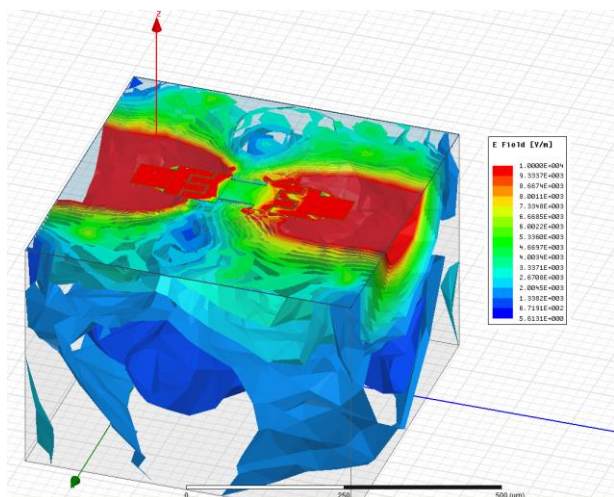


Fig. 6. Modélisation électromagnétiques 3D de la structure des dispositifs IDC avec superposition de la distribution du champ électrique à 67 GHz

En variant de manière itérative les propriétés des matériaux introduites dans le modèle électromagnétique (en utilisant un modèle de variation fréquentielle de la permittivité avec la fréquence), nous avons évalué les

performances diélectriques des deux compositions BST qui se rapprochent le plus des résultats de mesures.

Ainsi, le Tableau I recense les caractéristiques diélectriques des deux types de compositions BST issues des simulations électromagnétiques pour deux fréquences représentatives, à 30 GHz et 60 GHz.

TABLEAU I. VALEURS DES PERMITTIVITES ET TANGENTES DES PERTES UTILISEES DANS LES SIMULATIONS ELECTROMAGNETIQUES POUR LES DEUX COMPOSITIONS BST

	Permittivité		Tangente des pertes
	@30GHz	@60GHz	
<b>BST 80-20</b>			
0 V	435	400	11.5%
80 V	280	260	5.5%
<b>BST 50-50</b>			
0 V	270	260	4%
80 V	200	195	3%

Les courbes des variations fréquentielles des valeurs des capacités sur la Fig.7 comparent les résultats des mesures des IDC (pour des tensions de polarisations de 0V et 80V) avec les résultats des simulations électromagnétiques (utilisant les caractéristiques diélectriques des couches du Tableau I), pour les deux compositions (BST 80-20 sur la Fig. 7a et BST 50-50 sur la Fig. 7b).

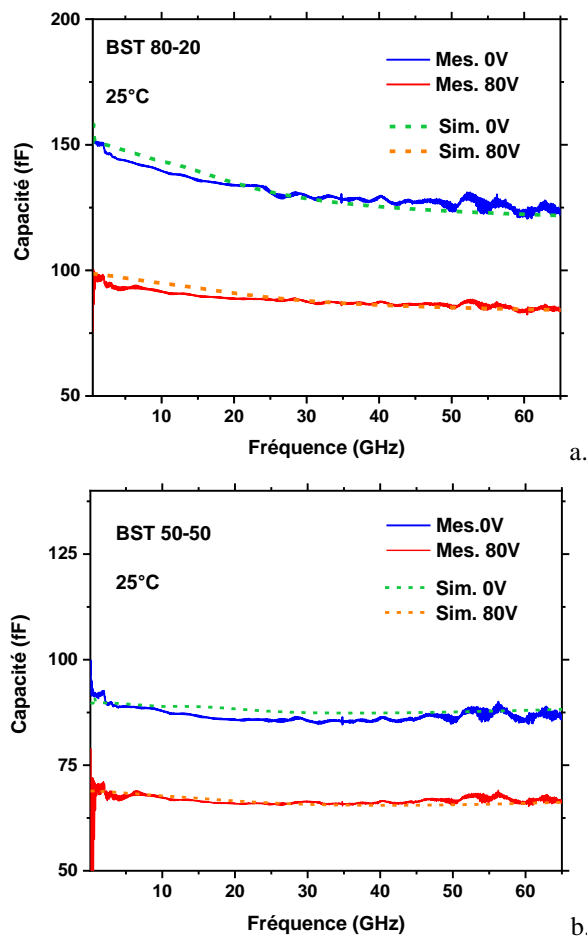


Fig. 7. Comparaison mesures et simulations électromagnétiques des valeurs des capacités IDC en fonction de la fréquence à 0 V et 80 V pour les deux compositions BST 80-20 (a) et BST 50-50 (b).

On remarque un très bon accord entre les résultats expérimentaux et les simulations (avec des erreurs inférieures à 5%) sur l'ensemble de la plage fréquentielle [0.2 GHz- 65 GHz].

Les recherches en cours visent la caractérisation de la stabilité avec la température de ces matériaux BST (en élargissant les types de composition) et l'évaluation de leurs performances sur des substrats adaptés à la réalisation des dispositifs à capacités variables avec faible pertes.

### III. CONCLUSIONS

L'intégration de films minces de BST dans des capacités variables IDC a démontré de très bonnes performances (agilité, pertes) jusqu'à 65 GHz. Ces résultats ont permis, via des simulations électromagnétiques, l'évaluation des propriétés diélectriques des deux compositions de BST dans cette gamme de fréquences. Les performances obtenues sont très intéressantes et offrent de bonnes perspectives quant à la conception de dispositifs agiles plus complexes à base de ces deux types de BST dans le domaine des fréquences millimétriques.

### REFERENCES

- [1] R.De Paolis, S. Payan, M. Maglione, G. Guegan and F. Coccetti, "High-tunability and high-Q-factor integrated ferroelectric circuits up to millimeter waves" *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol 63, pp 2570-2578, 2015.
- [2] A. Ghalem, M. Rammal, L. Huitema, A. Crunteanu, et al., "Ultra-High tunability of Ba(2/3)Sr(1/3)TiO<sub>3</sub> Thin Films at High-frequency domains under Low Electric Fields", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 26 (7), 2016.
- [3] A. Haskou, A. Sharaiha, S. Collardey, C. Borderon, S. Ginestar, R. Renoud, and H.W. Gundel, "A Reconfigurable Miniaturized Planar Inverted-F Antenna with Integrated BaSrTiO<sub>3</sub> Capacitor", *Microwave and Optical Technology Letters*60(6), 1511-1515, 2018.
- [4] L. Huitema, A. Crunteanu, H. Wong, A. Ghalem, M. Rammal "Frequency tunable antennas based on innovative materials" *IEEE International Conference on Computational Electromagnetic, ICCEM*, Kumamoto, Japan, 8-10 March 2017.
- [5] K. Nadaud, C.Borderon, R. Renoud, A. Ghalem, A. Crunteanu, L. Huitema, P. Marchet, C. Champeaux, and H. W. Gundel, "Effect of the incident power on permittivity, losses and tunability of BaSrTiO<sub>3</sub> thin films in the microwave frequency range", *Applied Physics letter*, 212902, 2017.
- [6] Y.Liu, A. S. Nagra, E. G. Erker, P. Periaswamy, T. R. Taylor, J. Speck, R. A. York "BaSrTiO<sub>3</sub> Interdigitated Capacitors for DistributedPhase Shifter Applications,"*IEEE Microw. Guided Wave Let.*, vol.10, 2000.