



HAL
open science

Réalisation d'une capacité ferroélectrique accordable en température

Caroline Borderon, Stéphane Ginestar, Raphaël Renoud, H. W. Gundel

► **To cite this version:**

Caroline Borderon, Stéphane Ginestar, Raphaël Renoud, H. W. Gundel. Réalisation d'une capacité ferroélectrique accordable en température. 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-03127678

HAL Id: hal-03127678

<https://hal.science/hal-03127678>

Submitted on 1 Feb 2021

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.

Réalisation d'une capacité ferroélectrique accordable en température

Caroline Borderon¹, Stéphane Ginestar¹, Raphaël Renoud¹, Hartmut W. Gundel¹

¹IETR, UMR CNRS 6164, Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 3, France
 caroline.borderon@univ-nantes.fr

Résumé — Nous présentons la réalisation d'une capacité ferroélectrique accordable en température de type SMD. Cette capacité est réalisée à partir de couches minces de titanate de baryum et strontium ($Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$). Le composant SMD est ensuite inséré dans une antenne planaire F inversée (PIFA) afin d'obtenir une évolution en température des caractéristiques de l'antenne. Les résultats montrent une variation de 0,7 MHz/°C pour des températures au-delà de la température de transition ferroélectrique - paraélectrique du matériau. Cette température peut être modifiée en changeant la composition du matériau. Les caractéristiques prometteuses de l'antenne composée de la SMD montrent l'intérêt d'intégrer ce type de composant dans diverses antennes.

I. INTRODUCTION

Le titanate de baryum et strontium, $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST), est fortement utilisé dans des dispositifs reconfigurables micro-ondes [1–3] car il possède une permittivité élevée et accordable sous l'action d'un champ électrique. Cette particularité permet de l'utiliser dans des condensateurs variables notamment en géométrie MIM (Métal-Isolant-Métal) et de l'intégrer au sein d'une antenne [3]. Les matériaux ferroélectriques sont également pyroélectriques ce qui signifie que leur permittivité dépend de la température. Effectivement, dans la phase ferroélectrique, la permittivité reste stable mais au cours de la transition ferroélectrique – paraélectrique celle-ci diminue et le matériau peut donc être utilisé en capteur de température. L'un des avantages du BST, est que sa température de transition T_C entre la phase ferroélectrique et paraélectrique est ajustable selon le ratio entre Ba et Sr. Plus le matériau sera riche en strontium et plus sa température de Curie sera faible. Il est donc possible de choisir le domaine de variation de la permittivité selon l'application visée.

Dans le présent travail, nous nous sommes intéressés à la conception et au développement d'un composant hyperfréquence accordable qui peut être intégré en tant qu'élément SMD (Surface Mounted Device) dans une topologie d'antenne donnée afin d'obtenir une antenne/capteur sensible à la température. L'élément SMD a une structure MIM (métal / isolant / métal) et est basé sur le composé pérovskite $Ba_{0,80}Sr_{0,20}TiO_3$ (BST) qui a une température de Curie $T_C = 60^\circ C$ [4]. Pour cette étude, le BST est également dopé à 1% de manganèse (Mn^{2+}) afin de limiter les lacunes d'oxygène dans le film mince ferroélectrique, permettant ainsi de réduire les pertes diélectriques [5].

La structure SMD choisie se compose de deux condensateurs MIM à trois couches (figure 1a). L'électrode

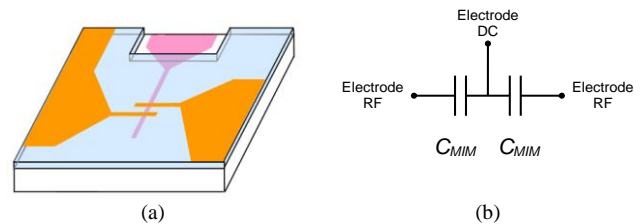


Fig. 1. Illustration a) de la topologie du composant CMS accordable et b) du circuit électrique équivalent.

inférieure commune (rose, Fig. 2a) permet d'appliquer une éventuelle tension de polarisation, nécessaire pour changer l'état de polarisation du film mince ferroélectrique (bleu transparent, Fig. 2a) et donc pour modifier sa permittivité. Le composant SMD utilisé peut ainsi être accordable soit en tension, soit en température. Les deux électrodes RF coplanaires supérieures (orange, Fig. 1a) sont conçues pour être directement insérées dans la topologie de masse d'antenne choisie et sont vues en série à partir du signal RF (figure 2b). L'avantage particulier de la conception SMD est le découplage électrique inhérent entre le signal DC et le signal RF sans la nécessité d'une capacité de blocage supplémentaire, contrairement à ce qui a déjà été rapporté dans la littérature [3]. La réalisation d'un composant SMD permet une intégration facile de la capacité accordable dans de diverses topologies d'antenne, contrairement à l'intégration monolithique qui est limitée en raison de la température de cristallisation élevée du matériau ferroélectrique ($750^\circ C$), le plus souvent non compatible avec le processus de technologie de fabrication d'antenne.

Dans ce qui suit, nous présentons la réalisation du prototype SMD, la caractérisation diélectrique du condensateur MIM (mesurée entre l'électrode DC et les électrodes RF), et l'exemple d'une antenne planaire inversée-F qui sera chargée avec l'élément SMD accordable en température.

II. REALISATION DE LA SMD FERROELECTRIQUE

La structure SMD accordable basée sur le film mince ferroélectrique BST a été formée sur un substrat d'alumine de surface $1'' \times 1''$ par dépôt successif de l'électrode inférieure, de la couche BST et de l'électrode supérieure.

L'électrode inférieure est constituée d'une couche d'adhésion en titane de 40 nm et d'un film de platine d'une épaisseur de 300 nm en réalisant un dépôt par pulvérisation magnétron radiofréquence (RF) à travers un masque mécanique. Le motif de l'électrode inférieure qui se

compose d'un plot de contact effilé avec une électrode en forme de doigt d'une longueur de 800 μm et d'une largeur de 35 μm à son extrémité est représenté sur la figure 2a.

Le dépôt du film $\text{Ba}_{0.80}\text{Sr}_{0.20}\text{TiO}_3$ dopé à 1% Mn^{2+} (ci-après dénommé BST) a été réalisé par voie sol-gel. Le taux de dopant de 1% est optimal [5] pour réduire le courant de fuite, les pertes diélectriques et la diffusion des porteurs de charges à basse fréquence dans le film mince [5–7]. La solution précurseur était composée d'acétates de baryum et de strontium dissous dans l'acide acétique auxquels ont été ajoutés du n-propoxyde de titane et de l'éthylène glycol dans des proportions appropriées. Les détails de la préparation de la solution sont donnés dans [5,8]. La solution a été déposée sur un substrat d'alumine à 4000 trs/min pendant 20 s et l'échantillon a été recuit pendant 15 min dans un four préchauffé à 750°C afin d'évaporer la matière organique et de cristalliser le BST dans la structure pérovskite ferroélectrique. Le dépôt successif de huit couches conduit à une épaisseur globale du film typiquement de 500 nm et à une structure polycristalline [8,9].

La synthèse par voie sol-gel avec dépôt par spin-coating conduit à un film mince de BST sur toute la surface du substrat. Avant le dépôt des électrodes supérieures, une ouverture d'interconnexion avec l'électrode inférieure est donc créée par gravure chimique de la couche de BST [10]. Le masque utilisé pour l'ouverture est constitué d'un rectangle de 2 mm de long et de 900 μm de large représenté sur la figure 2b.

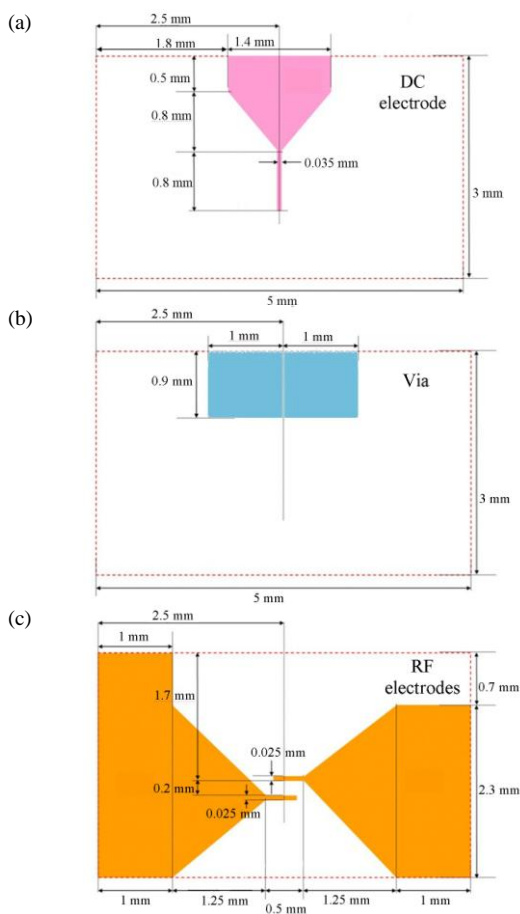


Fig. 2 : Illustration des différents masques utilisés pour l'élaboration de la SMD ferroélectrique: masque pour a) l'électrode inférieure, b) l'ouverture vers l'électrode inférieure, et c) les électrodes supérieures.

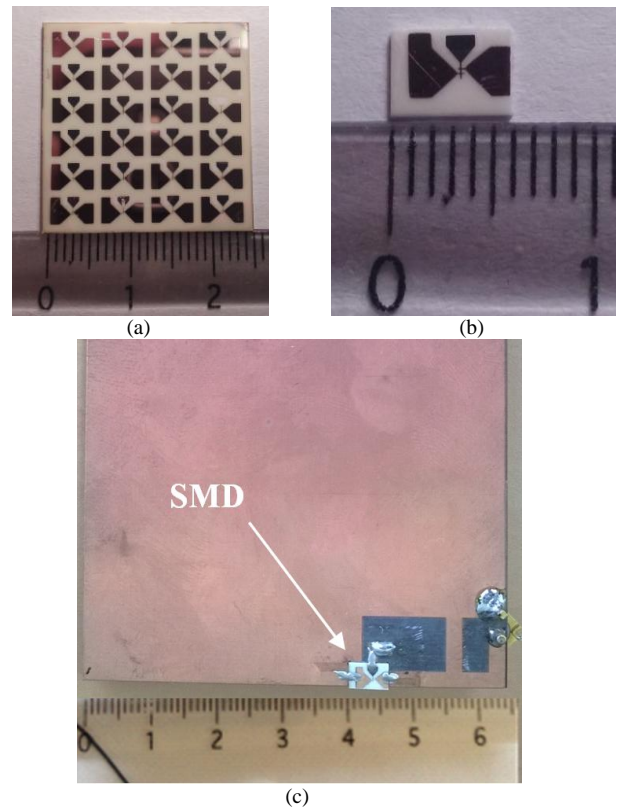


Fig. 3: Photographie a) d'un substrat d'alumine avec 4 \times 6 composants SMD, b) d'un seul SMD, et c) de l'antenne PIFA accordable réalisée avec le SMD ferroélectrique.

Le dépôt des électrodes supérieures en cuivre d'épaisseur 1,2 μm est effectué par pulvérisation RF à travers un masque mécanique et complète le condensateur MIM. La géométrie des deux électrodes RF (figure 2c) est un plot de contact effilé avec une électrode digitale de 300 μm de longueur et 25 μm de largeur. Les deux condensateurs MIM résultants C_{MIM} ont chacun une surface nominale de 875 μm^2 .

24 éléments SMD ont été élaborés sur un substrat d'alumine de surface 1" \times 1" (Fig. 3a) qui peut être découpé avec une scie à diamant. La dimension SMD typique est de 5 \times 3 mm^2 (Fig. 3b). À titre d'exemple, il est inséré dans une antenne planaire à F inversé (PIFA) qui a été imprimée sur un substrat Rogers duroid RT5880 (Fig. 3c). Le détail des caractéristiques de l'antenne est donné dans [11].

L'électrode inférieure du SMD est connectée à la tension de polarisation DC tandis que les deux électrodes supérieures sont connectées à la masse de l'antenne PIFA et sont en série pour le signal RF.

24 éléments SMD ont été élaborés sur un substrat d'alumine de surface 1" \times 1" (Fig. 3a) qui peut être découpé avec une scie à diamant. La dimension SMD typique est de 5 \times 3 mm^2 (Fig. 3b). À titre d'exemple, il est inséré dans une antenne planaire à F inversé (PIFA) qui a été imprimée sur un substrat Rogers duroid RT5880 (Fig. 3c). Le détail des caractéristiques de l'antenne est donné dans [11].

L'électrode inférieure du SMD est connectée à la tension de polarisation DC tandis que les deux électrodes supérieures sont connectées à la masse de l'antenne PIFA et sont en série pour le signal RF.

Le composant SMD final a été examiné avec un microscope optique (Fig. 4) qui permet de vérifier la gravure de haute qualité du film mince BST et le dépôt des

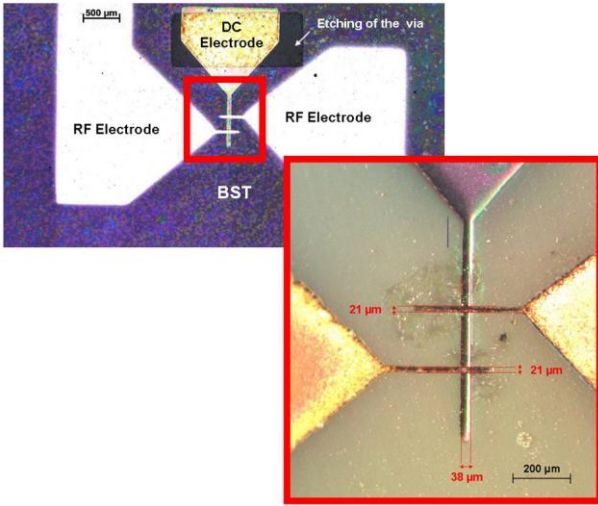


Fig. 4: Photographie du composant SMD final montrant plus particulièrement le passage vers l'électrode inférieure et les doigts d'électrode inférieure et supérieure séparés par le film mince (transparent) BST.

électrodes. Les largeurs mesurées des doigts d'électrode sont d'environ 21 μm et 38 μm pour l'électrode RF et DC, respectivement. La surface de condensateur MIM résultante de 800 μm^2 est environ 10% plus petite que sa valeur nominale, ce qui est propre à la technique de dépôt utilisant un masque mécanique et ses tolérances dimensionnelles.

Afin de déterminer les caractéristiques diélectriques du SMD intégré, la capacité et le facteur de perte diélectrique ($\tan \delta$) ont été mesurés entre l'électrode DC et la masse de l'antenne PIFA à 1, 10 et 100 kHz sur une gamme de température allant de -120 à 210 $^{\circ}\text{C}$ à l'aide d'un analyseur d'impédance Agilent 4294A. La permittivité diélectrique du film mince BST a ensuite été calculée en considérant que les deux électrodes RF sont interconnectées via la masse de l'antenne et sont en parallèle. La capacité mesurée correspond donc à $2 C_{MIM}$.

III. CARACTERISATION DE L'ANTENNE SENSIBLE EN TEMPERATURE

La figure 5 présente la permittivité relative et les pertes diélectriques $\tan \delta$ du BST en fonction de la température. Le BST présente une permittivité relativement stable pour des températures inférieures à 60 $^{\circ}\text{C}$. Au-delà de cette température de transition, le matériau passe en phase paraélectrique et la permittivité décroît de 1 unité par degré. Les pertes $\tan \delta$ restent cependant stables et inférieure à 2×10^{-2} . La permittivité et les pertes ne décroît que légèrement en fréquence et suivent une loi puissance conforme au comportement d'un diélectrique loin d'une relaxation [12]. Pour une utilisation dans la gamme UHF, la permittivité relative du matériau reste donc de l'ordre de $\epsilon_r \approx 350$. Compte tenu des dimensions réelles de la structure MIM (surface de 800 μm^2 et épaisseur de film BST de 500 nm), une valeur de capacité C_{MIM} de 5 pF est calculée pour le film mince déposé.

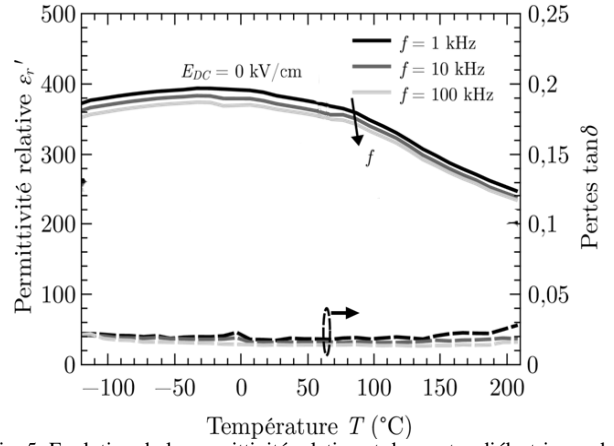


Fig. 5. Evolution de la permittivité relative et des pertes diélectriques du $\text{Ba}_{0,80}\text{Sr}_{0,20}\text{TiO}_3$ utilisé pour la réalisation du SMD.

Le coefficient de réflexion de l'antenne PIFA avec le composant SMD intégré a été mesuré en fonction de la température à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel Agilent E8364B avec une puissance de sortie de -17 dBm (Fig. 6). La fréquence de résonance de l'antenne se situe aux alentours de 500 MHz, ce qui correspond par simulation HFSS de l'antenne PIFA à une capacité C_{MIM} d'environ 5 pF [11] conformément aux mesures réalisées à basses fréquences. En augmentant la température, la permittivité diminue ainsi que la capacité C_{MIM} et la fréquence de résonance de l'antenne augmente. La figure 6 montre la variation de la fréquence de résonance du prototype d'antenne en fonction de la température. La fréquence de l'antenne passe de 510 MHz à 600 MHz lorsque la température passe de 30 $^{\circ}\text{C}$ à 190 $^{\circ}\text{C}$. Cela correspond à un taux d'accord de fréquence TR de 16,2%, calculé par [3] :

$$TR = \left| \frac{f(C_{\min}) - f(C_{\max})}{[f(C_{\min}) + f(C_{\max})]/2} \right| \quad (2)$$

où $f(C_{\min})$ et $f(C_{\max})$ sont les fréquences de résonance de l'antenne avec respectivement les valeurs de capacité minimale et maximale du SMD (à 190 $^{\circ}\text{C}$ et 30 $^{\circ}\text{C}$ respectivement). Pour des températures au dessous de la température de Curie ($T_C = 60^{\circ}\text{C}$), la variation de fréquence

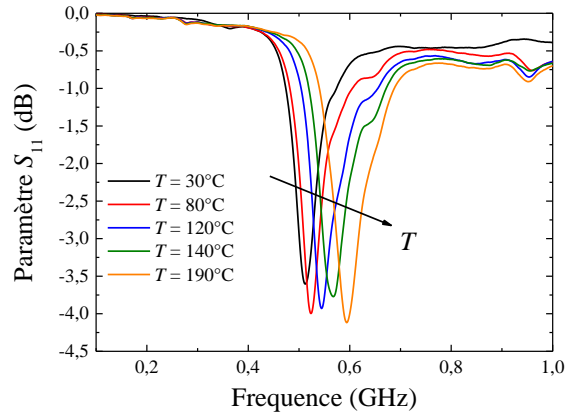


Fig. 6. Evolution du coefficient de réflexion de l'antenne PIFA pour différentes températures. La fréquence d'émission de l'antenne se décale lors que la température augmente.

est faible car les propriétés diélectriques du matériau sont relativement stable en phase ferroélectrique (Fig. 5). Au-dessus de 60°C, le matériau entame sa transition et la variation de fréquence est de 0,7 MHz/°C.

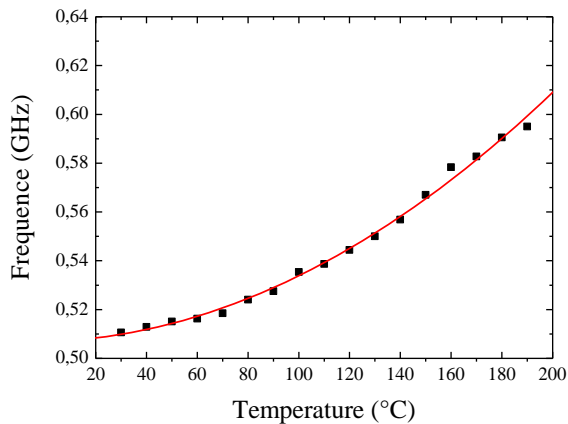


Fig. 7. Décalage de la fréquence d'utilisation de l'antenne PIFA en fonction de la température.

IV. CONCLUSIONS

Un condensateur discret accordable pour montage en surface a été développé sur la base d'un film mince ferroélectrique BaSrTiO₃ dopé avec 1% de manganèse. L'intégration de couches de BST dans une capacité variable SMD 3 x 5 mm² nous permet d'obtenir des antennes capteurs sensibles à la température. L'intérêt de la SMD est d'avoir un composant reporté intégrable facilement dans différentes topologies d'antenne. Les premiers résultats obtenus sur une antenne PIFA nous permettent de montrer l'utilité d'un tel composant sensible à la température. Pour le BST réalisé, une variation de 1 unité de permittivité par degré est obtenue au-dessus de la température de transition $T_C = 60^\circ\text{C}$. Cette caractéristique permet d'obtenir une augmentation de la fréquence d'émission de l'antenne de 0,7 MHz/°C.

La composition du BST peut être par ailleurs changée afin de répondre à la gamme de température souhaitée pour différentes applications données. En augmentant le taux de strontium dans le matériau, sa température de transition diminue d'environ 3°C par 1% de strontium ajouté. La taille de grains du matériau ferroélectrique peut également jouer sur la sensibilité du dispositif. En augmentant la taille de grains du matériau, la permittivité décroît plus rapidement dans la phase paraélectrique.

V. REMERCIEMENT:

Une partie des travaux a été réalisée avec des moyens de la plateforme Smart Sensors du RFI WISE en Pays de la Loire.

REFERENCES

1. Nadaud K, Borderon C, Renoud R, Ghalem A, Crunteanu A, Huitema L, Dumas-Bouchiat F, Marchet P, Champeaux C, Gundel HW. Effect of the incident power on permittivity, losses and

2. tunability of BaSrTiO₃ thin films in the microwave frequency range. *Appl Phys Lett* (2017) **110**:212902. doi:10.1063/1.4984089
3. Trampler ME, Gong X. Phase-Agile Dual-Resonance Single Linearly Polarized Antenna Element for Reconfigurable Reflectarray Applications. *IEEE Trans Antennas Propag* (2019) **67**:3752–3761. doi:10.1109/TAP.2019.2908041
4. Nguyen HV, Benzerga R, Borderon C, Delaveaud C, Sharaiha A, Renoud R, Paven CL, Pavy S, Nadaud K, Gundel HW. Miniaturized and reconfigurable notch antenna based on a BST ferroelectric thin film. *Mater Res Bull* (2015) **67**:255–260. doi:10.1016/j.materresbull.2015.02.034
5. Baumert BA, Chang L-H, Matsuda AT, Tsai T-L, Tracy CJ, Gregory RB, Fejes PL, Cave NG, Chen W, Taylor DJ, et al. Characterization of sputtered barium strontium titanate and strontium titanate-thin films. *J Appl Phys* (1997) **82**:2558–2566. doi:10.1063/1.366066
6. Nadaud K, Borderon C, Renoud R, Gundel HW. Effect of manganese doping of BaSrTiO₃ on diffusion and domain wall pinning. *J Appl Phys* (2015) **117**:084104. doi:10.1063/1.4913694
7. Chiu M-C, Lee Y-C, Shieu F-S. Effect of MgO Dopant on the Microstructure and Dielectric Properties of rf-Sputtered Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃ Thin Films. *J Electrochem Soc* (2005) **152**:F194–F201. doi:10.1149/1.2048167
8. Levasseur D, Bouyssou E, Paolis RD, Rousseau A, Coccetti F, Guegan G, Payan S, Maglione M. Systematic tuning of the conduction mechanisms in ferroelectric thin films. *J Phys Condens Matter* (2013) **25**:495901. doi:10.1088/0953-8984/25/49/495901
9. Nadaud K, Borderon C, Gillard R, Fourn E, Renoud R, Gundel HW. Temperature stable BaSrTiO₃ thin films suitable for microwave applications. *Thin Solid Films* (2015) **591**:90–96. doi:10.1016/j.tsf.2015.08.019
10. Borderon C. Développement et étude des matériaux ferroélectriques accordables en vue d'une application pour les antennes intelligentes. (2008) Available at: <http://www.theses.fr/2008NANT2045> [Accessed November 20, 2019]
11. Pavy S, Borderon C, Baron S, Renoud R, Gundel HW. Study of wet chemical etching of BaSrTiO₃ ferroelectric thin films for intelligent antenna application. *J Sol-Gel Sci Technol* (2015) **74**:507–512. doi:10.1007/s10971-015-3626-3
12. Haskou A, Sharaiha A, Collardey S, Borderon C, Ginestar S, Renoud R, Gundel HW. A reconfigurable miniaturized planar inverted-F antenna with integrated BaSrTiO₃ capacitor. *Microw Opt Technol Lett* (2018) **60**:1511–1515. doi:10.1002/mop.31192
13. Jonscher AK. Dielectric relaxation in solids. *J Phys Appl Phys* (1999) **32**:R57–R70. doi:10.1088/0022-3727/32/14/201