



**HAL**  
open science

## Caractérisation de couches minces ferroélectriques en topologie coplanaire

Kevin Nadaud, Raphaël Gillard, Caroline Borderon, Erwan Fourn, Raphaël Renoud, Hartmut Gundel

► **To cite this version:**

Kevin Nadaud, Raphaël Gillard, Caroline Borderon, Erwan Fourn, Raphaël Renoud, et al.. Caractérisation de couches minces ferroélectriques en topologie coplanaire. 13èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Mar 2014, Nantes, France. pp.24 - 26. hal-01092460

**HAL Id: hal-01092460**

**<https://hal.science/hal-01092460>**

Submitted on 12 Jan 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 de couches minces ferroélectriques en topologie coplanaire

Kevin NADAUD<sup>1</sup>, Raphaël GILLARD<sup>2</sup>, Caroline BORDERON<sup>1</sup>, Erwan FOURN<sup>2</sup>, Raphaël RENOUD<sup>1</sup> et Hartmut W. GUNDEL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IETR UMR CNRS 6164, Lunam Université, Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 3, France

<sup>2</sup>IETR UMR CNRS 6164, INSA Rennes 20 avenue des Buttes de Coësmes CS 70839 35708 Rennes Cedex 7

kevin.nadaud@etu.univ-nantes.fr

**Résumé**— Cette étude présente une nouvelle topologie de mesure pour la caractérisation des couches minces de forte permittivité. La structure de mesure est constituée d'une capacité coplanaire insérée entre deux lignes de transmission. Cette méthode est utilisée ici pour la caractérisation de la permittivité et de l'accordabilité d'une couche mince ferroélectrique.

**Mots clés**— CPW, caractérisation, couche mince, ferroélectrique.

## I- INTRODUCTION

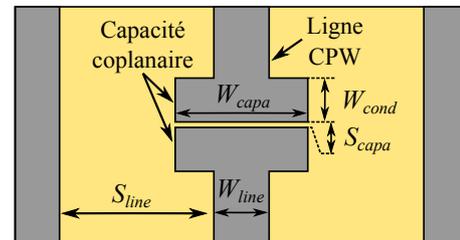
Actuellement, les couches minces ferroélectriques sont largement étudiées car elles permettent la réalisation de capacités accordables. Celles-ci peuvent être utilisées dans les dispositifs microondes tels que les antennes, les filtres ou les déphaseurs dans lesquels l'agilité et la reconfigurabilité sont de plus en plus recherchées. Selon l'architecture globale du dispositif, la réalisation du matériau peut être soit sur un substrat conducteur soit sur un substrat isolant. Sachant que la croissance cristalline, et donc les propriétés des couches minces, dépendent fortement de la nature du substrat, il est nécessaire de disposer d'une méthode de caractérisation correspondant à la même topologie que le dispositif.

Les condensateurs de type MIM (Métal Isolant Métal) sont couramment utilisés pour la caractérisation diélectrique de couches minces [1–4]. Cependant, à hautes fréquences ou dans le cas de permittivités élevées, des phénomènes de propagation apparaissent et réduisent la permittivité apparente. Pour remédier à ce problème, des électrodes de faibles diamètres peuvent être utilisées mais le champ de franges sur le contour de la métallisation devient plus important et doit être considéré.

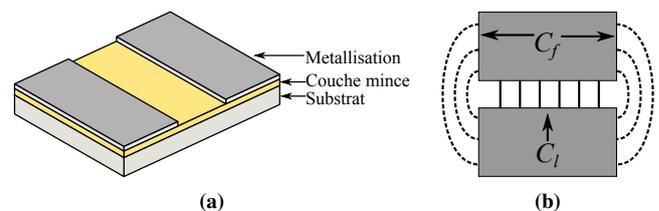
Pour le cas d'une caractérisation en topologie coplanaire, des lignes de transmission sont utilisables. Ces techniques sont basées sur l'estimation de la constante de propagation. La précision obtenue devient assez faible lorsque la distance entre les conducteurs est grande devant l'épaisseur du matériau. Obtenir un gap faible entre les lignes pose cependant des difficultés technologiques sur de longues distances. La topologie de caractérisation proposée ici est une capacité coplanaire avec un gap de petite dimension. La largeur de la capacité étant assez faible, il est plus facile d'obtenir un gap étroit.

## II- STRUCTURE DE MESURE

La topologie de mesure proposée est un condensateur formé par deux plaques de largeur  $W_{capa}$  séparées par un gap  $S_{capa}$  et connectées à des lignes de transmission coplanaire (CPW) (Fig. 1). L'utilisation de lignes permet de mesurer la capacité avec des pointes GSG (Ground Signal Ground). Différentes largeurs de capacité  $W_{capa}$  sont utilisées pour la correction proposée. Les largeurs de la ligne et du gap entre la ligne et la masse, respectivement  $W_{line}$  et  $S_{line}$ , sont conservées pour garder le même circuit de calibration.



**Figure 1.** Topologie proposée pour extraire la permittivité  $W_{line} = 30 \mu\text{m}$ ,  $S_{line} = 150 \mu\text{m}$ ,  $W_{cond} = 30 \mu\text{m}$ ,  $W_{capa} = 60$  à  $150 \mu\text{m}$  et  $S_{capa} = 4$  à  $12 \mu\text{m}$ . L'épaisseur de la couche mince est de  $1 \mu\text{m}$ .

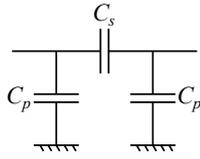


**Figure 2.** Topologie décrite par le modèle de Vendik. Les lignes pleines représentant la capacité linéique  $C_l$  et celles en pointillés les champs de franges  $C_f$  à l'extrémité des plaques.

Pour extraire la permittivité de la couche mince, un modèle mathématique est requis car la capacité entre les deux conducteurs ne peut pas être déterminée aussi facilement que dans le cas d'une topologie MIM. Gevorgian [5] propose un circuit en  $\pi$  équivalent de la discontinuité produite par un gap dans une ligne coplanaire mais suppose l'utilisation d'un substrat d'épaisseur infinie, ce qui n'est pas le cas ici. Dans notre étude nous considérons seulement les deux plaques déposées sur le film, et pas le circuit complet avec la masse. Cette simplification permet d'utiliser des modèles mathématiques plus simples pour extraire la capacité.

Nous n'avons pas choisi le modèle proposé par Gevorgian [7], qui prend en compte le champ de franges à l'extrémité des plaques car il dispose d'un « paramètre d'ajustement ». Ce paramètre est une constante d'intégration qui peut être fixée à n'importe quelle valeur en théorie. En pratique il permet d'adapter le modèle à des résultats de simulation mais il n'a pas de signification physique.

Notre approche est basée le modèle de Vendik [8] qui donne la capacité entre deux conducteurs coplanaire sans tenir compte des discontinuités. Seule la contribution linéique  $C_l$  (Fig. 2) est prise en compte par ce modèle. Il apparaît peu précis mais il a été choisi car nous proposons une correction permettant de retirer la contribution des champs de franges. La capacité linéique donnée par le modèle de Vendik est donnée



**Figure 3.** Circuit équivalent en  $\pi$  de la topologie proposée.

par les équations suivantes :

$$C_{Vendik} = C_l \times W_{capa} \quad (1)$$

$$C_l = \varepsilon_0 \left[ \frac{K(k'_a)}{K(k_a)} + \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_s}{2} \frac{K(k'_f)}{K(k_f)} + \frac{\varepsilon_s - 1}{2} \frac{K(k'_s)}{K(k_s)} \right] \quad (2)$$

$$k_a = \frac{S_{capa}}{l}, \quad k'_a = \sqrt{1 - k_a} \quad (3)$$

$$k_f = \frac{\tanh\left(\frac{\pi S_{capa}}{4h_f}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi l}{4h_f}\right)}, \quad k'_f = \sqrt{1 - k_f} \quad (4)$$

$$k_s = \frac{\tanh\left(\frac{\pi S_{capa}}{4(h_f + h_s)}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi l}{4(h_f + h_s)}\right)}, \quad k'_s = \sqrt{1 - k_s} \quad (5)$$

où  $K$  est l'intégrale complète de première espèce,  $\varepsilon_f$  and  $\varepsilon_s$  sont respectivement les permittivités relatives de la couche mince ferroélectrique et du substrat  $h_f$ ,  $h_s$  font références aux épaisseurs du ferroélectrique et du substrat. Avec  $W_{cond}$  la longueur des plaques, on a  $l = S_{capa} + 2W_{cond}$ . La capacité coplanaire est modélisée par un circuit en  $\pi$  présenté Fig. 3. La mesure des paramètres  $S$  permettent de déterminer la capacité série  $C_s$  et la capacité parallèle  $C_p$  en utilisant la matrice admittance.

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega(C_s + C_p) & -j\omega C_s \\ -j\omega C_s & j\omega(C_s + C_p) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Grâce à (6), on peut extraire les capacités série et parallèle :

$$C_s = \frac{-Y_{12}}{2\pi j f} \quad (7)$$

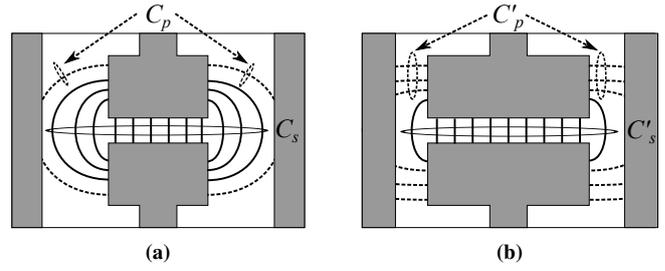
$$C_p = \frac{Y_{11} + Y_{12}}{2\pi j f} \quad (8)$$

### III- SIMULATION DE LA CAPACITÉ

La structure présentée Fig. 1 a été simulée avec le logiciel commercial HFSS. Une attention particulière a été portée sur le maillage de la structure étant donné les contrastes de dimension. Dans notre cas, la structure simulée mesure  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  et le ferroélectrique a une épaisseur de  $1 \mu\text{m}$ . En utilisant les paramètres de maillages par défaut, les résultats ne sont pas corrects. Pour obtenir des résultats reproductibles, le maillage a été renforcé dans la région du condensateur ferroélectrique. Différentes géométries (distances entre les armatures du condensateur  $S_{capa}$  et largeur  $W_{capa}$ ) vont être présentées pour comparer la simulation avec le modèle mathématique.

#### III-1- Sans correction

Fig. 5a montre les résultats de simulations et la capacité calculée avec le modèle mathématiques sans appliquer de correction. La différence entre les deux est très importante, cela indique que la contribution des champs de franges ne doit pas être négligée. Ainsi, sans correction le modèle ne peut pas être utilisé.



**Figure 4.** Les lignes pleines représentent la capacité série  $C_s$  et les lignes en pointillés la capacité avec la masse  $C_p$ . Pour des faibles largeurs, la plus grande partie du champ de frange est entre les plaques (a). Quand la largeur des plaques augmentent ; la masse capte une partie du champ de frange :  $C_s$  diminue et  $C_p$  augmente (b).

#### III-2- Avec correction sans prise en compte de la masse

La correction basique suppose que la capacité de frange  $C_f$ , créée par les extrémités des plaques (Fig. 2b), ne dépend pas de  $W_{capa}$  quand  $W_{cond}$  et  $S_{capa}$  restent constants. La capacité avec la masse est également négligée. Ainsi la capacité série peut être exprimée sous la forme :

$$C_s = C_l \times W_{capa} + C_f \quad (9)$$

En utilisant une régression linéaire sur la capacité série  $C_s$ , l'ordonné à l'origine  $C_f$  peut être extrait à retranché à  $C_s$ . La régression a été faite pour chaque distance entre les conducteur car les champs de franges sont modifiés lorsque le gap  $S_{capa}$  change. Les résultats de correction sont visibles Fig. 5b. L'erreur relative est bien plus faible grâce à cette correction, surtout quand les distances entre les conducteurs sont faibles. Pour le gap le plus faible, l'erreur est de 3% et de 8% pour le gap le plus important. La présence de la masse doit être prise en compte pour améliorer la précision.

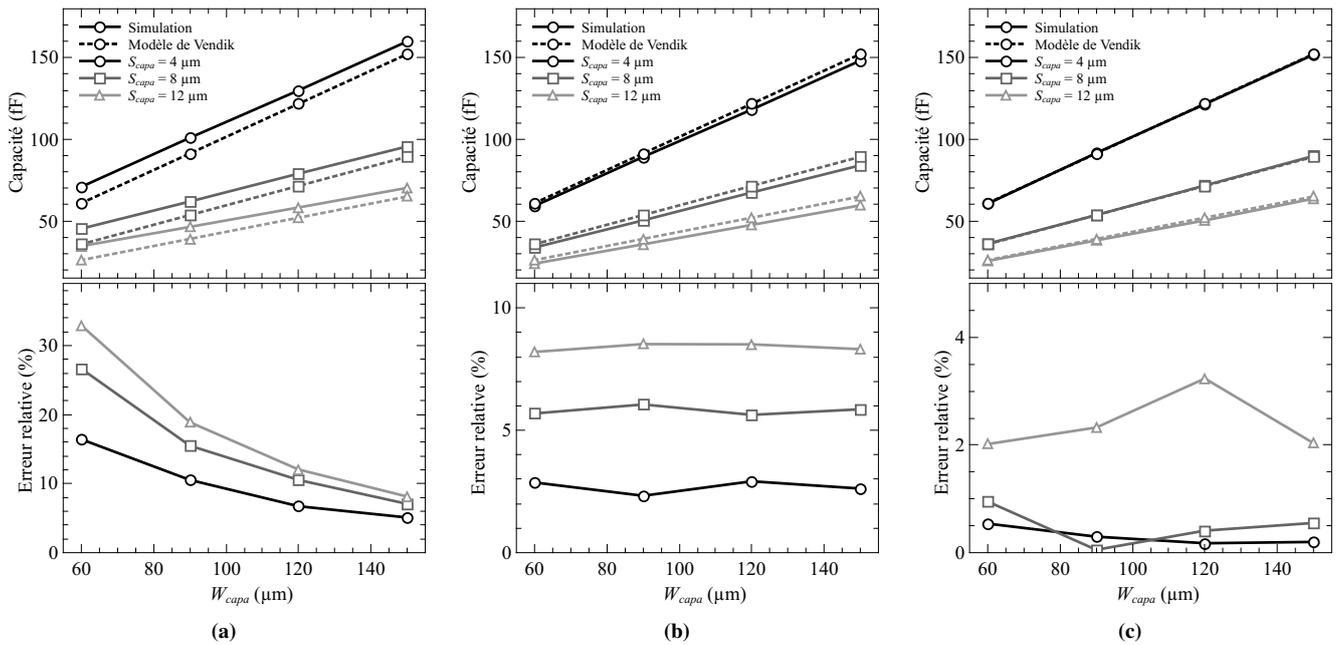
#### III-3- Avec correction et prise en compte de la masse

La correction élaborée consiste à prendre en compte la capacité entre les plaques et la masse. En plus de la capacité série  $C_s$ , la capacité avec la masse  $C_p$  est également extraite (eq. 8). En supposant que la masse ne déforme pas trop les lignes de champs mais les captent : quand  $W_{capa}$  augmente,  $C_f$  diminue et  $C_p$  augmente, cf Fig. 4. La somme  $C_f + \frac{C_p}{2}$  reste constante pour chaque largeur  $W_{capa}$  et désormais la régression linéaire est effectuée sur la quantité  $C_s + \frac{C_p}{2}$ .

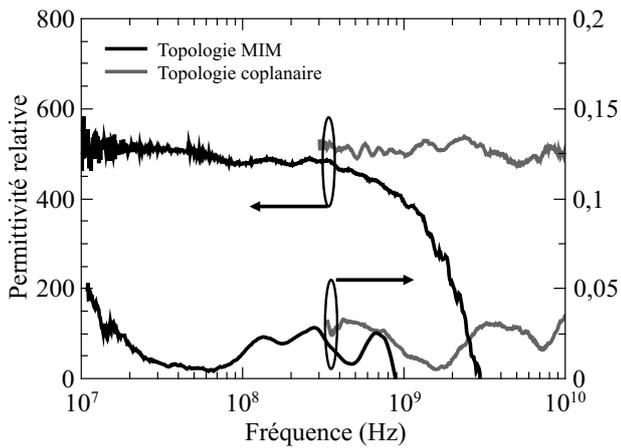
Le résultat de la correction est visible sur la Fig. 5c. L'erreur relative moyenne est de 2,5% pour le gap le plus important (cas le moins favorable) et de moins de 1% pour le gap le plus faible  $S_{capa}$ . Pour la mesure de couche mince il sera intéressant de prendre une distance faible entre les armatures du condensateur et une distance avec la masse importante pour obtenir une plus grande précision du modèle. Dans ce cas, la correction proposée permet de retirer l'effet des champs de franges sur les extrémités du condensateur et ainsi d'utiliser le modèle de Vendik pour extraire la permittivité de la couche mince.

### IV- RÉSULTATS DE MESURE

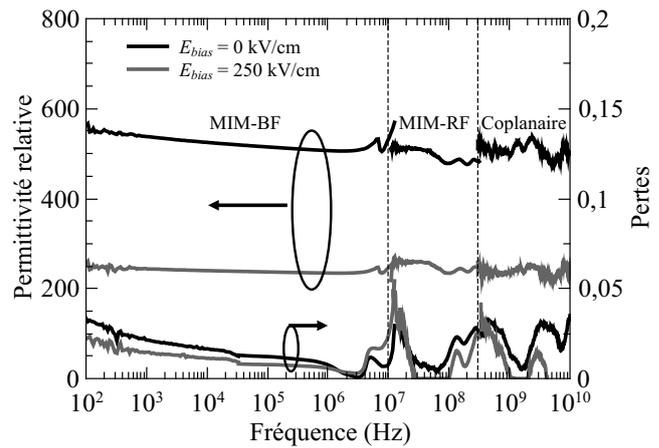
La méthode proposée a été utilisée pour déterminer la permittivité d'une couche mince de  $\text{BaSrTiO}_3$  (BST) déposée par voie chimique sur substrat d'alumine [9]. La couche mince a



**Figure 5.** Comparaison entre le modèle de Vendik et la simulation. Sans correction (a), avec correction mais sans prise en compte de la masse (b), avec correction et prise en compte de la masse (c).



**Figure 6.** Permittivité et pertes mesurées en hautes fréquences en topologie MIM et coplanaire.



**Figure 7.** Permittivité et pertes mesurées sur une large bande en topologie MIM et coplanaire.

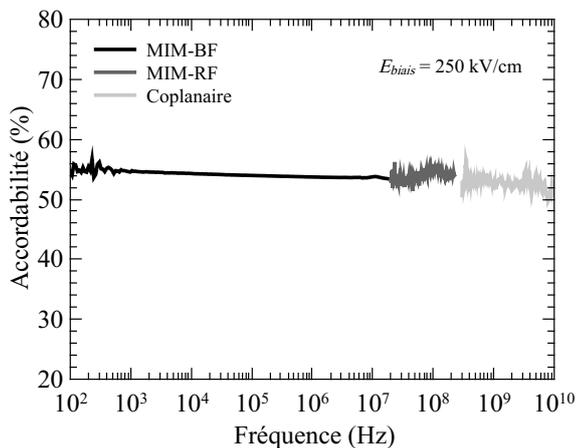
été caractérisée en topologie MIM et en topologie coplanaire afin de comparer les deux techniques. Le circuit de mesure a été réalisé par photolithographie standard. Le gap du condensateur  $S_{capa}$  le plus faible utilisé dans la géométrie coplanaire est de 7 μm. Les mesures hautes fréquences ont été effectuées à l'aide d'un analyseur de réseaux vectoriel. L'effet des lignes de connexions pour la topologie coplanaire est retiré à l'aide d'une calibration TRL (Thru Reflect Line). Les mesures basses fréquences ont été effectuées à l'aide d'un analyseur d'impédance. Pour le moment, la calibration n'est pas parfaite et la correction proposée ne peut pas être appliquée correctement. Seule la correction sans la prise en compte du plan de masse est applicable.

#### IV-1- Mesure de la permittivité

La Fig. 6 montre les résultats de la mesure de la permittivité en fonction de la fréquence. On peut remarquer qu'en topologie MIM, les phénomènes de propagation diminuent la

permittivité apparente et la mesure n'est plus fiable à partir de 300 MHz. Cependant on retrouve la même dépendance en fréquence pour la topologie coplanaire qu'avec la mesure en topologie MIM au-dessous de 300 MHz (fréquence limite en MIM), ce qui conforte la validité de la technique proposée.

Si l'on regarde sur une bande fréquence importante (Fig. 7) l'accord entre la méthode proposée et la mesure en topologie MIM est très bon sur la permittivité. Aux fréquences inférieures à  $10^7$  Hz (MIM-BF), une structure MIM simple a été utilisée ; entre  $10^7$  Hz et  $3.10^8$  Hz, des électrodes circulaires ont été employées (MIM-HF) et au-delà de cette fréquence, les résultats ont été obtenus avec la nouvelle topologie coplanaire. Malgré les discontinuités dues au passage d'une méthode de mesure à une autre, l'accord sur la permittivité sans et avec champ de polarisation reste bon.



**Figure 8.** Permittivité sous biais et accordabilité mesurées en hautes fréquences en topologie MIM et coplanaire.

#### IV-2- Mesure des pertes diélectriques

La méthode de mesure permet également d'extraire les pertes, Fig. 7. Des oscillations sont présentes en hautes fréquences et sont probablement dues à une calibration encore perfectibles. Néanmoins, une valeurs moyennes des pertes en hautes fréquences peut être prise,  $\tan \delta = 0,02$ . Cette valeur correspond aux pertes obtenues en basses fréquences ce qui conforte la validité de la mesure proposée.

#### IV-3- Mesure de l'accordabilité

La topologie coplanaire proposée permet également de polariser la couche mince et de déterminer l'accordabilité du matériau sous champ électrique. La Fig. 8 montre l'accordabilité en fonction de la fréquence. On remarque que l'accord entre les deux topologies est assez bon malgré une permittivité en topologie coplanaire légèrement surestimée. Le champ électrique appliqué de 250 kV/cm correspond à 25 V sur un film mince de 1  $\mu\text{m}$  épaisseur (topologie MIM) et à 175 V sur le gap  $S_{\text{capa}}$  de 7  $\mu\text{m}$  dans le cas de la topologie coplanaire.

#### V- CONCLUSION

La méthode de mesure proposée permet de déterminer la permittivité d'une couche mince en topologie coplanaire. Cette technique permet également de polariser la couche mince, ce qui dans le cas de matériaux ferroélectriques, donne accès

à son accordabilité. Pour le moment, des problèmes de calibrations limitent encore la précision de la méthode proposée, les résultats obtenus restent cependant cohérents avec la mesure en topologie MIM. Les travaux futurs sont orientés vers l'obtention d'une calibration de meilleure qualité afin de pouvoir appliquer la correction proposée de manière complète. Un autre axe d'amélioration est de réduire le gap entre les conducteurs, ce qui permettra de diminuer la tension nécessaire pour la polarisation de la couche mince.

#### RÉFÉRENCES

- [1] Z. Ma, A.J. Becker, P. Polakos, H. Huggins, J. Pastalan, H. Wu, K. Watts, Y.H. Wong, P. Mankiewich, *RF measurement technique for characterizing thin dielectric films*, IEEE Trans. Electron Devices **45** (1998) p. 1811–1816,
- [2] M.P.J. Tiggelman, K. Reimann, J. Liu, M. Klee, W. Keur, R. Mauczock, J. Schmitz, R.J.E. Hueting, *Identifying dielectric and resistive electrode losses in high-density capacitors at radio frequencies* Proc. IEEE ICMTS, (2008) p. 190–195.
- [3] M. P. J. Tiggelman, *Thin film barium strontium titanate capacitors for tunable RF front-end applications*, Thèse de doctorat University of Twente (2009)
- [4] W. Chen, K. G. McCarthy, A. Mathewson, M. Copuroglu, S. O'Brien, and R. Winfield, *Capacitance and S-parameter techniques for dielectric characterization with application to high-k PMNT thin-film layers*, IEEE Trans. Electron Devices, **59** (2012) p. 1723–1729
- [5] S. Gevorgian, A. Deleniv, T. Martinsson, S. Gal'chenko, P. Linnér, I. Vendik, *Cad model of a gap in a coplanar waveguide* Int. J. of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering, **6** (1996) p. 369–377
- [6] A. Deleniv, I. Vendik, S. Gevorgian, *Modeling gap discontinuity in coplanar waveguide using quasistatic spectral domain method* Int. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering **10** (2000) p. 150–158
- [7] S. Gevorgian, *Ferroelectrics in microwave devices, circuits and systems*. Springer, (2009)
- [8] O. G. Vendik, S. P. Zubko, M. A. Nikolskii, *Modeling and calculation of the capacitance of a planar capacitor containing a ferroelectric thin film*, Technical Physics, **44** (1999) p. 349–355
- [9] C. Borderon, D. Averty, R. Seveno, H.W. Gundel, *Influence of the morphology of barium strontium titanate thin films on the ferroelectric and dielectric properties*, Integrated Ferroelectrics, **97** (2008) p. 12–19