



**HAL**  
open science

## Cellule triple-fente active pour application réseau réflecteur

Kevin Nadaud, Raphaël Gillard, Erwan Fourn, Caroline Borderon, Hartmut  
W. Gundel

► **To cite this version:**

Kevin Nadaud, Raphaël Gillard, Erwan Fourn, Caroline Borderon, Hartmut W. Gundel. Cellule triple-fente active pour application réseau réflecteur. 19èmes Journées Nationales Microondes, Jun 2015, Bordeaux, France. pp.396-399. hal-01279694

**HAL Id: hal-01279694**

**<https://hal.science/hal-01279694>**

Submitted on 26 Feb 2016

**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.

## Cellule triple-fente active pour application réseau réflecteur

Kevin Nadaud<sup>1</sup>, Raphaël Gillard<sup>2</sup>, Erwan Fourn<sup>2</sup>, Caroline Borderon<sup>1</sup> et Hartmut W. Gundel<sup>1</sup>

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

<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** Une cellule déphaseuse active pour réseau réflecteur avec une fréquence de fonctionnement à 5,5 GHz est présentée dans cette communication. Elle utilise trois fentes couplées dans un plan de masse, l'une étant chargée par une capacité ferroélectrique pour obtenir l'agilité en phase. L'utilisation de plusieurs fentes permet d'obtenir des états de phase relativement linéaires. Les pertes dans la bande passante de la cellule sont de 6 dB au maximum et la gamme de phase accessible est de 270° en simulation.

### 1. Introduction

Actuellement, les réseaux réflecteurs sont très étudiés car ils combinent les avantages des réseaux imprimés et la simplicité d'alimentation des antennes à réflecteur. Pour les versions actives, ils offrent en plus de nombreuses options de reconfiguration. Pour les rendre actifs, les diodes PIN, varicap et les MEMS sont généralement utilisés. Les matériaux fonctionnels commencent à faire leur apparition, notamment les ferroélectriques comme le BST (Titanate de Baryum et de Strontium) [1] et les cristaux liquides [2].

Pour réduire les pertes et obtenir des bandes passantes plus importantes, des cellules avec plusieurs résonateurs couplés sont souvent utilisées en mettant en œuvre des structures multicouches [3] ou de préférence simple couche [4].

Dans [5], le principe d'une cellule simple fente active à base de ferroélectrique a été montré. Cependant, les pertes de cette cellule sont importantes car la résonance est trop marquée. Une version améliorée avec trois fentes a été proposée dans [4] et validée sur un démonstrateur passif. Dans ce papier, nous proposons d'évaluer les performances atteignables en actif avec une capacité ferroélectrique.

### 2. Les matériaux ferroélectriques

Les matériaux ferroélectriques sont des matériaux non linéaires, anisotropes qui ont la propriété d'avoir une permittivité diélectrique dépendante du champ statique appliqué. Les ferroélectriques permettent ainsi de fabriquer des capacités variables. Ces dernières peuvent être intégrées dans des dispositifs hyperfréquences afin de les rendre reconfigurables. Pour les applications microélectroniques, les couches minces sont privilégiées car elles permettent

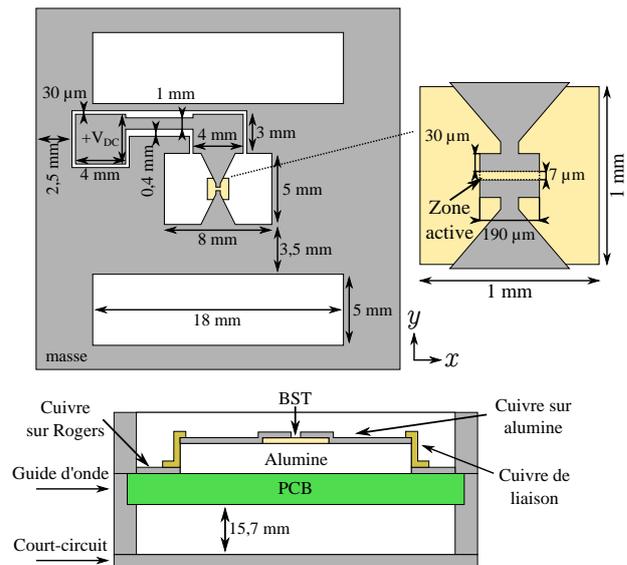


Figure 1. Topologie de la cellule proposée.

d'appliquer des tensions plus faibles pour modifier les propriétés du matériau. Le matériau choisi ici est le BST car son accordabilité est relativement élevée et ses pertes diélectriques modérées. De plus, l'effet d'hystérésis sur la permittivité est faible car son champ coercitif est petit. Cela permet d'avoir une valeur de permittivité bien définie pour une valeur de champ donnée. Un avantage des matériaux ferroélectriques est que le courant de polarisation est nul. Il y a consommation seulement lors du changement de permittivité de la capacité ferroélectrique (charge et décharge d'un condensateur).

Le dépôt est réalisé par une méthode sol-gel [6] sur des substrats d'alumine. L'avantage de cette méthode est son faible coût de mise en œuvre et les performances obtenues pour le matériau sont relativement bonnes. La solution précurseur est déposée par centrifugation sur le substrat et un recuit à 750 °C pendant 15 minutes est effectué pour cristalliser le matériau. L'opération est répétée plusieurs fois pour obtenir l'épaisseur de matériau voulu (14 fois pour 0,85 µm). Plus de détails sur le dépôt et sur la caractérisation du matériau sont donnés dans [7]. Un dopage avec 1% de manganèse a été utilisé afin de réduire les pertes à basses et hautes fréquences [8]. Pour la simulation, les valeurs suivantes sont adoptées pour la couche

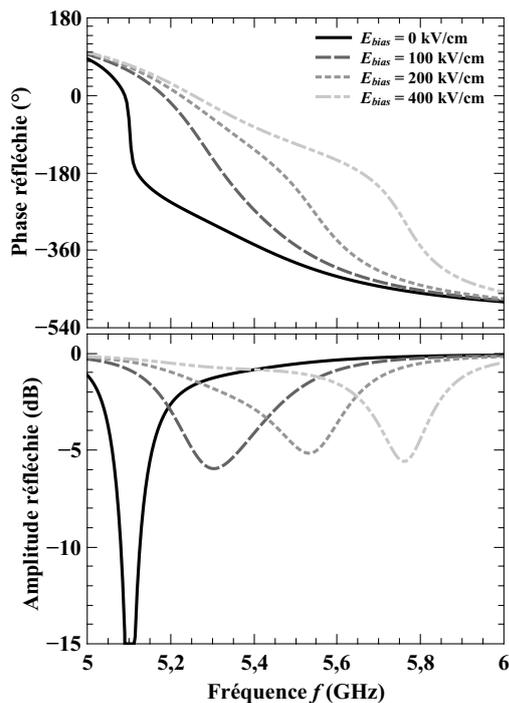


Figure 2. Coefficients de réflexion simulés pour différents champs appliqués.

mince :  $\epsilon_r = 350$  (sans champ appliqué),  $\tan \delta = 0,02$  et accordabilité de 60 % sous 400 kV/cm.

### 3. Conception de la cellule

La cellule proposée est constituée de trois fentes dans un plan de masse comme indiqué sur la Figure 1. Les deux fentes externes ont la même longueur afin de garder le maximum de symétrie. Elles permettent de réduire la dispersion en fréquence et ainsi les pertes en ajoutant une seconde fréquence de résonance [4]. La longueur électrique de la fente centrale contrôle la phase réfléchie par la cellule. En chargeant cette fente par un condensateur ferroélectrique, il est possible de modifier dynamiquement cette longueur et donc la phase réfléchie.

Les longueurs et largeurs des fentes ont été optimisées afin d'obtenir des états de phase les plus linéaires possibles et une gamme de phase suffisante. La distance entre les fentes contrôle le couplage mutuel et a aussi été choisie pour minimiser la pente de phase tout en conservant de la place pour le circuit de polarisation.

Le matériau ferroélectrique est déposé sur un substrat d'alumine ( $25,4 \times 25,4 \text{ mm}^2$ , épaisseur  $508 \mu\text{m}$  et  $\epsilon_r = 9,8$ ). Pour limiter les pertes, le BST est gravé sur une grande partie du substrat et seul un carré de  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  est conservé pour accueillir les armatures du condensateur. Ensuite, la métallisation est déposée par pulvérisation et le motif de la cellule est réalisé par photolithographie standard. Le substrat d'alumine est finalement reporté sur un substrat de Rogers (épaisseur 1,6 mm,  $\epsilon_r = 2,17$ ) lui-même localisé 15,7 mm au dessus du plan de masse arrière. La cellule est mesurée dans un guide d'onde de section carrée de  $35 \times 35 \text{ mm}^2$ . La Figure 1 montre le placement de la cellule dans le guide.

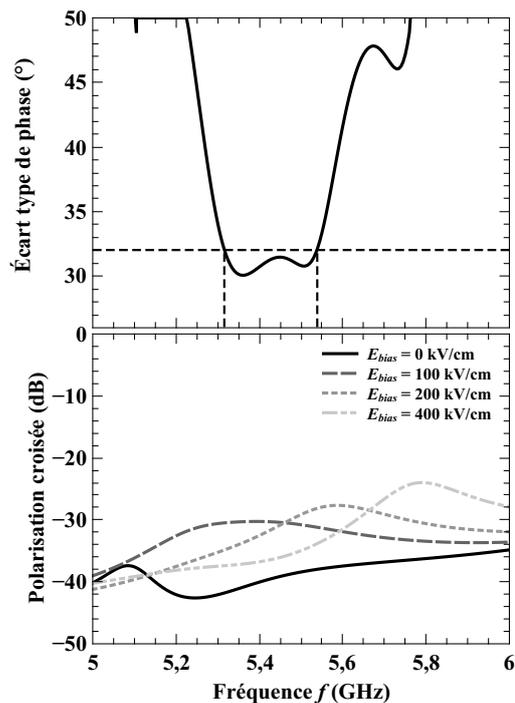


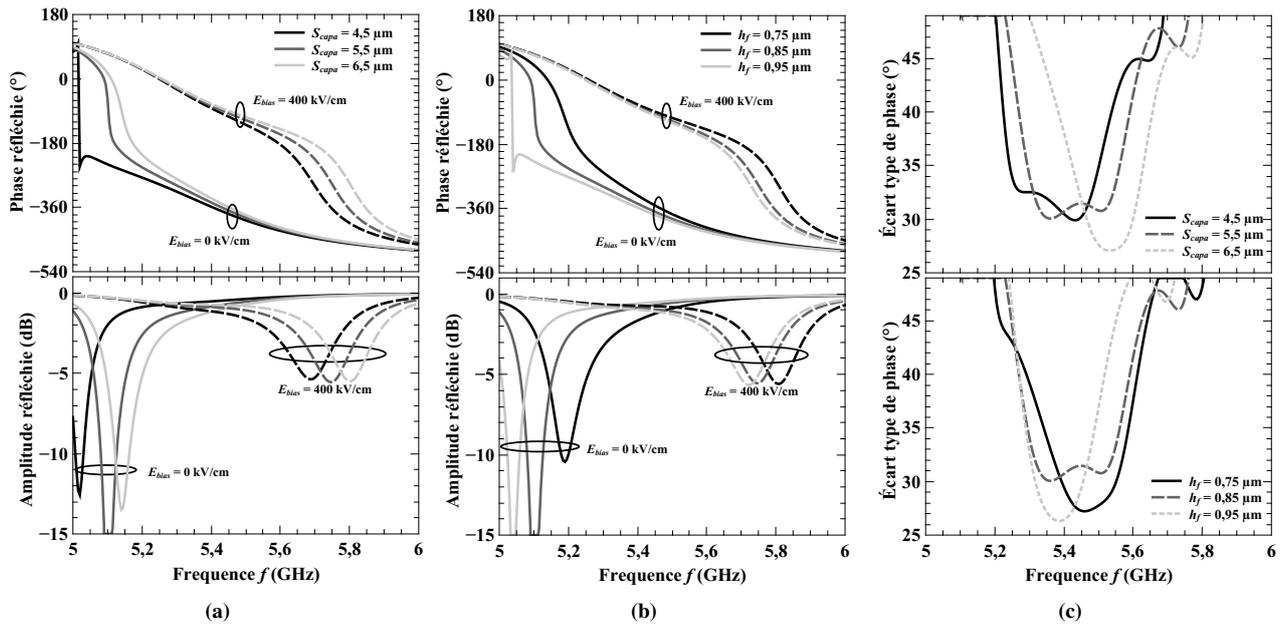
Figure 3. Écart type de phase et polarisation croisée pour différents champs appliqués.

Le condensateur ferroélectrique est constitué de deux armatures déposées sur le matériau ferroélectrique et séparées de  $5,5 \mu\text{m}$ . Le circuit de polarisation met en œuvre un filtre passe-bas distribué pour augmenter le découplage entre les signaux RF et DC.

### 4. Simulations

La simulation de la cellule unitaire a été faite avec le logiciel commercial HFSS<sup>TM</sup>. Le mode excité est le  $\text{TE}_{10}$  (en accord avec les axes de la Figure 1). La permittivité du matériau a été modifiée de 350 à 140, ce qui correspond à un champ appliqué de 0 kV/cm à 400 kV/cm. Les résultats de simulation sont montrés Figure 2. L'utilisation de plusieurs résonateurs est bien visible car la phase évolue lentement avec la fréquence, contrairement à ce qui avait été obtenu avec une cellule à un seul résonateur [5]. Les pertes restent relativement importantes (6 dB sur la bande utile, telle que définie dans le paragraphe suivant) mais sont plus faibles que ce qui a été fait précédemment (11 dB pour une simple fente) [1,5] pour des matériaux similaires.

L'estimation de la bande passante de la cellule a été faite en choisissant 4 états (correspondant à 4 valeurs de champ appliqué) et en calculant l'écart type de phase [9]. Bien que la cellule soit à phase continue, un nombre limité d'états a été considéré. En effet, lors de l'association de nombreuses cellules sur un réseau réflecteur complet, la commande du déphasage sera numérisée. Le critère d'écart type de phase [9] permet de définir une bande dans laquelle les différents états de phase restent bien séparés les uns des autres (idéalement parallèles entre eux). La valeur obtenue est inférieure à  $32^\circ$  dans une bande de 220 MHz (Figure 3) ce qui correspond à un déphaseur de 1,70 bit.



**Figure 4.** Coefficients de réflexion simulés pour différentes largeurs du gap dans la capacité ferroélectrique  $S_{capa}$  (a) et pour différentes épaisseurs du matériau actif  $h_f$  (b). Écart type de phase calculé pour 4 états pour les différentes valeurs de  $S_{capa}$  et  $h_f$ .

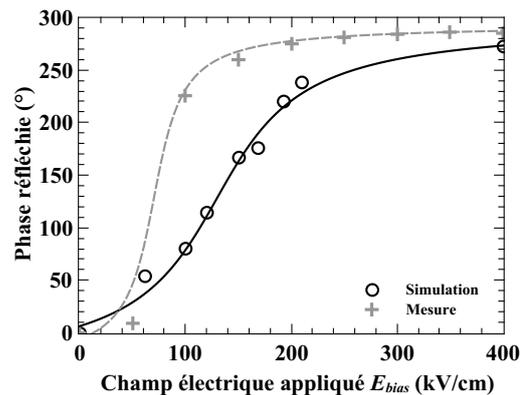
Malgré la dissymétrie (due au circuit de polarisation), la polarisation croisée (mode  $TE_{01}$  en accord avec les axes de la Figure 1) reste inférieure à  $-28$  dB dans la bande considérée (Figure 3) ce qui indique que le circuit de polarisation ne perturbe pas trop le rayonnement.

## 5. Étude de sensibilité

La sensibilité de la cellule aux tolérances de fabrication a été vérifiée en simulation. Les deux paramètres les plus critiques sont le gap entre les deux armatures de la capacité ferroélectriques  $S_{capa}$  et l'épaisseur du matériau ferroélectrique  $h_f$ .

La dimension du gap a été modifiée en simulation de  $4,5 \mu\text{m}$  à  $6,5 \mu\text{m}$  et les résultats sont présentés Fig. 4a. Cela correspond aux incertitudes présentes lors de la gravure du cuivre qui permet de réaliser la métallisation supérieure. Une variation de gap introduit une variation de la fréquence de fonctionnement de la cellule. Cela est logique car le gap conditionne la valeur de la capacité qui charge la fente. L'épaisseur du matériau actif a également été modifiée de  $0,75 \mu\text{m}$  à  $0,95 \mu\text{m}$  et les résultats sont présentés Fig. 4b. La modification de l'épaisseur du matériau a un effet similaire sur la réponse en phase de la cellule car l'épaisseur contrôle la part du matériau dans la permittivité effective et donc dans la capacité. Pour toutes les variations des différents paramètres, la gamme de phase accessible est proche de  $270^\circ$ .

Pour compléter l'étude de sensibilité, l'écart type de phase a été calculé pour les différentes variations des paramètres et les résultats sont visibles Fig. 4c. L'incertitude sur l'une des deux dimensions introduit une variation de la fréquence centrale ainsi qu'une légère modification de la bande passante de la cellule. Néanmoins, les performances



**Figure 5.** Déphasages simulé et mesuré en fonction du champ appliqué.

de la cellule restent très similaires à celles de la cellule avec les dimensions optimisées.

## 6. Mesures

La cellule décrite précédemment a fait l'objet d'une première réalisation. Les déphasages obtenus en simulation et en mesure sont montrés sur la Figure 5. L'agilité en phase est clairement démontrée, néanmoins, la phase varie plus brutalement en mesure. Cela est dû à un problème de rugosité de la métallisation déposée sur alumine qui se traduit également par des pertes plus importantes qu'en simulation. Le procédé technologique est actuellement en cours d'amélioration pour corriger ce défaut.

## 7. Conclusion

Une cellule déphaseuse active basée sur trois fentes couplées a été présentée dans ce papier. Le contrôle de la

phase à l'aide d'une capacité ferroélectrique unique a été évalué en intégrant l'effet du circuit de polarisation. La gamme de phase accessible est de  $270^\circ$  avec 60 % d'accordabilité sur la permittivité du matériau, ce qui permet d'avoir facilement 4 états de phase équirépartis. Le circuit de polarisation ne perturbe pas le rayonnement. Les mesures de la cellule sont actuellement en cours.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le CNRS et la région Pays de la Loire pour leur soutien financier.

## Références

- [1] Y. Shen, S. Ebadi, P. Wahid, and X. Gong, "Tunable reflectarray unit cell element using BST technology," in *IEEE Radio and Wireless Symp. (RWS)*, 2012, pp. 43–46.
- [2] G. Perez-Palomino, P. Baine, R. Dickie, M. Bain, J. Encinar, R. Cahill, M. Barba, and G. Toso, "Design and experimental validation of liquid crystal-based reconfigurable reflectarray elements with improved bandwidth in F-band," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 4, pp. 1704–1713, 2013.
- [3] J. Encinar, M. Arrebola, M. Dejus, and C. Jouve, "Design of a 1-metre reflectarray for dbS application with 15 % bandwidth," in *6<sup>th</sup> European Conf. on Antennas and Propag. (EUCAP)*, 2006, pp. 1–5.
- [4] T. Makdissy, R. Gillard, E. Fourn, E. Girard, and H. Legay, "Triple-slot phase-shifting cell loaded with one variable capacitance for reflectarray applications," *Electronics Letters*, vol. 48, no. 21, pp. 426–427, Oct. 2012.
- [5] K. Nadaud, R. Gillard, E. Fourn, H. Gundel, and C. Borderon, "A simple Phase-Shifting cell for reflectarray using a slot loaded with a ferroelectric capacitor," in *Loughborough Antennas and Propagation Conference*, 2014, pp. 214–217.
- [6] C. Borderon, "Développement et étude des matériaux ferroélectriques accordables en vue d'une application pour les antennes intelligentes," Ph.D. dissertation, Université de Nantes, Octobre 2008.
- [7] K. Nadaud, C. Borderon, R. Renoud, H. W. Gundel, R. Gillard, and E. Fourn, "Caractérisation de couches minces ferroélectriques de BaSrTiO<sub>3</sub> pour applications microondes reconfigurables," in *Journées Nationales Micro-ondes*, 2015.
- [8] K. Nadaud, C. Borderon, R. Renoud, and H. W. Gundel, "Effect of manganese doping of BaSrTiO<sub>3</sub> on diffusion and domain wall pinning," *Journal of Applied Physics*, vol. 117, no. 8, p. 084104, 2015.
- [9] R. Pereira, R. Gillard, R. Sauleau, P. Potier, T. Dousset, and X. Delestre, "Dual linearly-polarized unit-cells with nearly 2-bit resolution for reflectarray applications in x-band," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 12, pp. 6042–6048, 2012.