HAL
open science

Co-conception de résonateurs hyperfréquences accordables à éléments d'accord intégrés dans un substrat silicium (résonateurs trois états à accord discret et résonateur continu)

Rozenn Allanic, Yves Quéré, Denis Le Berre, Cédric Quendo, David Chouteau, Virginie Grimal, Damien Valente, Jérôme Billoue

To cite this version:

Rozenn Allanic, Yves Quéré, Denis Le Berre, Cédric Quendo, David Chouteau, et al.. Co-conception de résonateurs hyperfréquences accordables à éléments d'accord intégrés dans un substrat silicium (résonateurs trois états à accord discret et résonateur continu). 20èmes Journées Nationales Microondes, May 2017, Saint-Malo, France. hal-01697963

HAL Id: hal-01697963

https://hal.science/hal-01697963

Submitted on 25 Nov 2018

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.

Co-conception de résonateurs hyperfréquences accordables à éléments d'accord intégrés dans un substrat silicium (résonateurs trois états à accord discret et résonateur continu)

R. Allanic[1], Y. Quéré[1], D. Le Berre[1], C. Quendo[1], D. Chouteau[2], V. Grimal[2], D. Valente[2], J. Billoué[2]
[1]*Université de Brest ; CNRS, UMR 3192 Lab-STICC, 6 avenue Le Gorgeu, CS93837, 29238 Brest cedex 3*
[2]*Université de Tours, Laboratoire GREMAN, 16 rue Pierre et Marie Curie 37071 TOURS cedex 2*
Rozenn.Allanic@univ-brest.fr

Résumé

Cet article présente trois résonateurs accordables à accord discret (avec trois fréquences de résonance) et à accord continu (dont la variation de fréquence de résonance atteint 50 %). Cette méthode de co-conception permet de concevoir les résonateurs en même temps que les éléments actifs et offre une flexibilité d'accordabilité induite par le choix du dimensionnement des zones dopées. La nouveauté réside dans le fait que les résonateurs trois états à accord discret utilisent deux diodes de taille différente qui commutent de l'état bloqué à l'état passant, et cela avec une source de polarisation unique mais des valeurs de tension différente. Le résonateur à accord continu utilise la variation de la largeur de la zone dopée pour faire évoluer sa fréquence de résonance de 2,24 GHz à 3,3 GHz.

1. Introduction

Les performances électriques, la taille et le coût font l'objet des principaux compromis à trouver dans la conception de dispositifs hyperfréquences accordables. A l'heure actuelle, pour ces fonctions en technologie planaire, l'élément d'accord (diode PIN [1], diode varactor [2] ou transistor FET [3]…) est reporté sur un substrat à faibles pertes. La dimension des éléments actifs, la nécessité de percer et de métalliser des vias, les effets parasites liés aux interconnexions sont autant de facteur qui limite la montée en fréquence et la flexibilité de conception. Pour pallier ces problèmes, une précédente étude [4-5] montre la faisabilité de co-conception d'un dispositif passif associé à son élément d'accord sur un substrat semi-conducteur. Le composant actif est basé sur l'utilisation de jonctions semi-conductrices fonctionnant en mode ON / OFF à partir d'une faible tension de polarisation.

Dans cet article, nous présentons deux nouveaux résonateurs hyperfréquences accordables à trois états, ainsi qu'un nouveau résonateur à accord continu.

2. Résonateur trois états

2.a. Concept

Le fonctionnement du résonateur trois états est basé sur l'étude du résonateur accordable sur silicium [6]. Par commutation de la jonction du mode OFF (diode bloquée) au mode ON (diode passante), le résonateur passe d'un circuit-ouvert (CO) à son extrémité à un court-circuit (CC), faisant ainsi varier sa fréquence de résonance.

Le résonateur trois états (Figure 1) utilise deux diodes de dimensions différentes et intégrées dans le substrat. La Figure 2 présente le résonateur avec les modèles électriques simplifiés des diodes, et cela avec et sans tension de polarisation. Sans tension de polarisation le schéma équivalent de la diode correspond à une capacité C_{OFF} en série avec une résistance R_{OFF}. La valeur de la capacité est liée à la zone de charge d'espace de la jonction formant la diode, et la résistance est proportionnelle à l'épaisseur et la résistivité du substrat. En polarisation directe, la diode est représentée par une résistance calculée à partir de la relation suivante :

$$R_{ON_i} = \rho \frac{h}{S_i} \ (\Omega) \qquad (1)$$

où h correspond à l'épaisseur du substrat, S_i est la surface de la diode i, et ρ est la résistivité en (Ω.cm) dans la jonction ; cette dernière dépend de la tension de polarisation. Ainsi, pour court-circuiter le résonateur la valeur de la résistance équivalente de la diode en polarisation directe doit être faible. Celle-ci dépend non seulement de la résistivité (liée à la tension appliquée) mais également de la surface de la diode. L'idée est d'utiliser deux diodes de surfaces différentes (S_1 et S_2) afin d'avoir deux valeurs de résistances différentes (R_{ON1} et R_{ON2}) avec une même tension de polarisation. Avec une faible tension de polarisation directe, la résistance de la diode la plus grande (diode 1) va pouvoir être assimilée à un CC (mode ON1) (Figure 3). Si la tension augmente légèrement, la diode 2 (présentant une surface S_2 plus petite) va à son tour être considérée comme un CC (mode ON2).

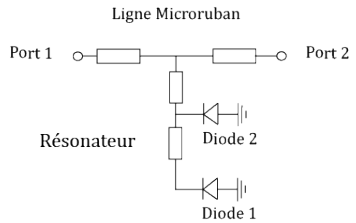

Fig. 1. Schéma du résonateur accordable à trois états.

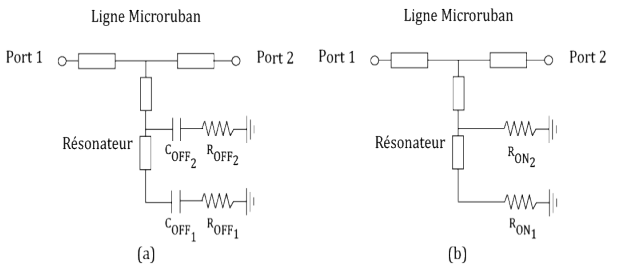

Fig. 2. Schéma du résonateur accordable à trois états avec les modèles de diodes simplifiés. (a) Sans tension de polarisation. (b) Avec une tension de polarisation.

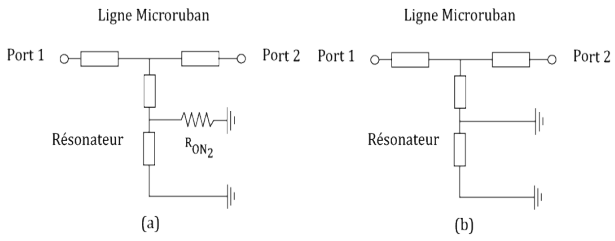

Fig. 3. Schéma simplifié du résonateur accordable à trois états. (a) Avec une faible tension de polarisation. (b) Avec une tension de polarisation légèrement plus élevée.

2.b. Démonstrateur 1 : Design

Le design d'un premier démonstrateur à accordabilité discrète est présenté Figure 4. Le substrat choisi est un substrat de type P (dopé au Bore), de résistivité 2500 Ω.cm (forte résistivité afin de minimiser les pertes liées au substrat) et d'épaisseur 675 µm. La largeur de la ligne microruban est w = 560 µm afin d'avoir une impédance caractéristique de la ligne égale à 50 Ω. Les éléments d'accord sont réalisés à partir de jonctions N^+PP^+, avec des profondeurs de jonctions de 5 µm. Les concentrations de dopants à la surface des zones N^+ et P^+ sont respectivement de 3.10^{19} atomes/cm³ et 2.10^{19} atomes/cm³. La zone dopée la plus grande ($S_1 = L_{dop1}$ x w_{dop1} = 3 mm x 3 mm) commute avec une plus faible tension de polarisation que la plus petite des zones dopées ($S_2 = L_{dop2}$ x w_{dop2} = 0,2 mm x 0,2 mm). Cette dernière est quant à elle court-circuitée avec une tension de polarisation un peu plus élevée. Les dimensions de la ligne de transmission sont w = 0,56 mm et L = 20 mm. La longueur du stub, de même largeur que la ligne, est L_{stub} = 18 mm.

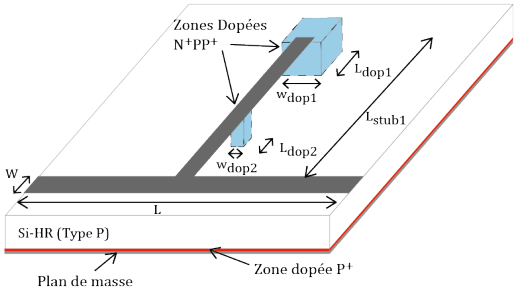

Fig. 4. Démonstrateur 1 : Résonateur trois états. L = 20 mm, w = 0,56 mm, L_{stub1} = 18 mm, L_{dop1} = w_{dop1} = 3 mm, L_{dop2} = w_{dop2} = 0,2 mm.

2.c. Démonstrateur 1 : Simulations et mesures

Ce résonateur a été conçu pour avoir une fréquence de résonance égale à 2,15 GHz (λ/2) en mode OFF (0 V) lorsque le stub est en CO. L'augmentation de la tension de polarisation entraine la diminution de la résistivité dans les zones dopées, l'extrémité du résonateur passe d'un CO à un CC (mode ON1) ; la fréquence de résonance est alors de 1,55 GHz (λ/4). Si la tension de polarisation augmente encore légèrement, la résistivité dans les zones dopées décroît et la résistance R_{ON2} devient suffisamment faible pour court-circuiter le résonateur en son milieu (mode ON2). La fréquence de résonance est alors de 2,7 GHz (λ/4 au milieu du stub). La Figure 5 montre les résultats de simulation électromagnétique HFSS™ et de mesure dans les trois états de fonctionnement. La résistivité simulée des zones dopées des modes OFF, ON1 et ON2 est considérée homogène dans toute l'épaisseur du substrat, elle est respectivement de 2500 Ω.cm, 2 Ω.cm, 0,05 Ω.cm. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un analyseur de réseau E8364A (Agilent Technologies) et d'une cellule de mesure Wiltron 3680K. La calibration a été réalisée avec un kit de calibration TRL (Thru Reflect Line). La fréquence de résonance commute de 2,15 GHz (0 V), à 1,44 GHz (-0,8 V), puis à 3,3 GHz (- 1,6 V). Les pertes d'insertion sont comprises entre 1,4 dB et 1,5 dB pour les trois modes de fonctionnement.

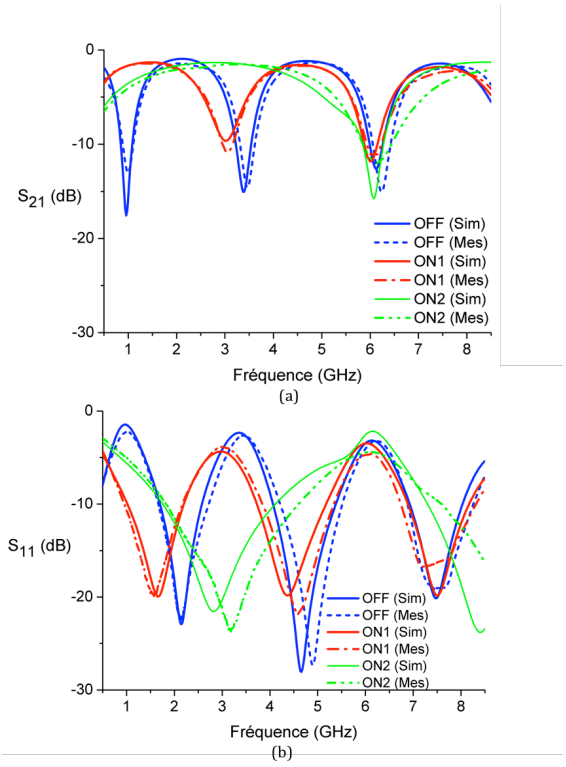

Fig. 5. Démonstrateur 1 : Simulations HFSS™ et mesures du résonateur accordable dans les 3 états de fonctionnement. (a) Paramètres S_{21} (dB). (b) Paramètres S_{11} (dB).

2.d. *Discussion*

En mesure, le résonateur accordable à trois états possède une variation de sa fréquence de résonance conforme aux résultats de simulation HFSS™. On note de faibles différences entre simulations et mesures sur les modes ON1 et ON2 liées à la technologie (Figure 6).

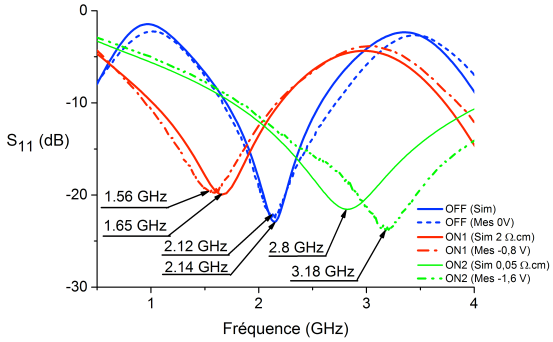

Fig. 6. Démonstrateur 1 : Simulations HFSS™ et mesures du résonateur accordable dans les 3 états de fonctionnement. Paramètres S_{11} (dB).

2.e. *Démonstrateur 2 : Design*

Un second résonateur accordable à trois états est présenté sur la Figure 7. Les jonctions ont les mêmes caractéristiques que celles du circuit précédent. La zone dopée la plus petite S_2 est située à une distance de 6 mm de la ligne microruban ($L_{stub2}/3$). Ses dimensions (L_{dop2} x w_{dop2} = 0,2 mm x 0,2 mm) sont identiques au résonateur précédent. Située à l'extrémité du résonateur, la zone dopée la plus grande a une surface S_1 = 18 mm² ($S_1 = L_{dop1}$ x w_{dop1} = 6 mm x 3 mm).

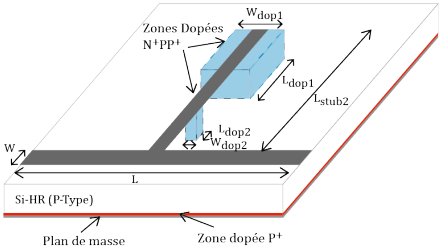

Fig. 7. Démonstrateur 2 : Résonateur accordable trois états. L = 20 mm, w = 0,56 mm, L_{stub2} = 18 mm, L_{dop1} = 6 mm, w_{dop1} = 3 mm, L_{dop2} = w_{dop2} = 0,2 mm

2.f. *Démonstrateur 2 : Simulations et mesures*

Ce résonateur a été dimensionné pour avoir respectivement une fréquence de résonance dans les états OFF, ON1 et ON2 égale à 2,46 GHz, 2,21 GHz et 3,85 GHz. La Figure 8 présente les résultats de simulation HFSS™ et de mesure. On constate ainsi que les fréquences de résonance commutent de 2,56 GHz, à 2,28 GHz et 4,6 GHz respectivement pour des tensions de polarisation de 0 V, - 1,1 V et – 1,65 V.

2.g. *Discussion*

Ces deux démonstrateurs à accord discret sont présentés pour montrer la flexibilité de conception. En effet, la position et le dimensionnement des zones dopées permettent de choisir aisément les fréquences de fonctionnement de chacun des résonateurs.

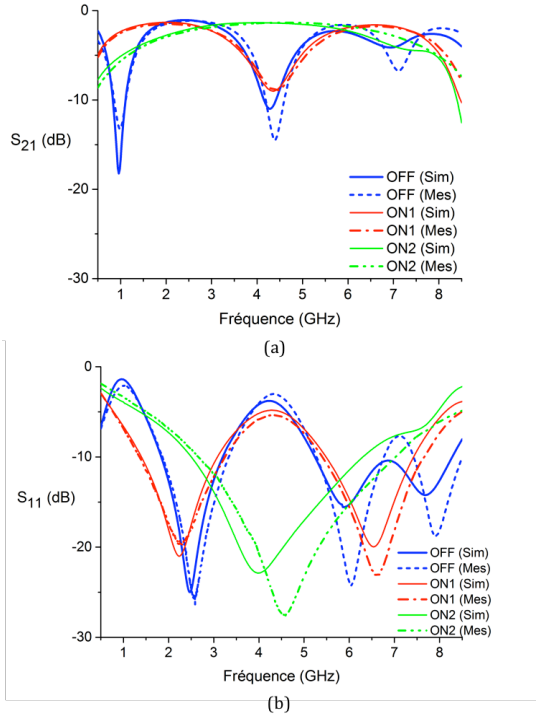

Fig. 8. Démonstrateur 2 : Simulations HFSS™ et mesures du résonateur accordable dans les 3 états de fonctionnement. (a) Paramètres S_{21} (dB). (b) Paramètres S_{11} (dB).

3. Résonateur à accord continu

3.a. *Concept*

Le résonateur trois états valide la possibilité d'utiliser différentes tailles de zones dopées sur un même résonateur pour faire varier la fréquence de résonance du circuit. L'idée du résonateur à accord continu (Figure 9) est d'avoir une zone dopée très longue et une largeur qui décroit progressivement pour un déplacement continu du plan de CC et ainsi une variation continue de la fréquence de résonance. Ce résonateur a été réalisé avec les mêmes caractéristiques de substrat que le précédent. Les dimensions de la ligne de transmission sont W = 0,54 mm et L = 20 mm, et celles du stub sont W_{stub} = 2,6 mm et L_{stub} = 18 mm. La zone dopée est de forme triangulaire avec une hauteur L_{dop} = 12 mm et la base située à l'extrémité du résonateur est égale à la largeur du résonateur (W_{stub} = 2,6 mm).

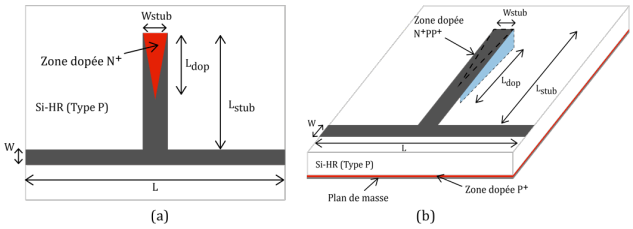

Fig. 9. Résonateur à accord continu. (a) Vue de dessus. (b) Vue 3D.

3.b. *Simulations et mesures*

Ce circuit a été mesuré avec la même méthode de mesure que les résonateurs trois états précédents. La zone dopée est simulée avec une résistivité comprise entre 5 Ω.cm et 0,1 Ω.cm (Figure 10). Ainsi en simulation, la fréquence de résonance varie continument entre 2,35 GHz et 3,3 GHz. En mesure (Figure 11), elle présente une variation continue comprise entre 2,24 GHz et 3,3 GHz pour une tension de polarisation comprise entre - 0,7 V et - 1,3 V.

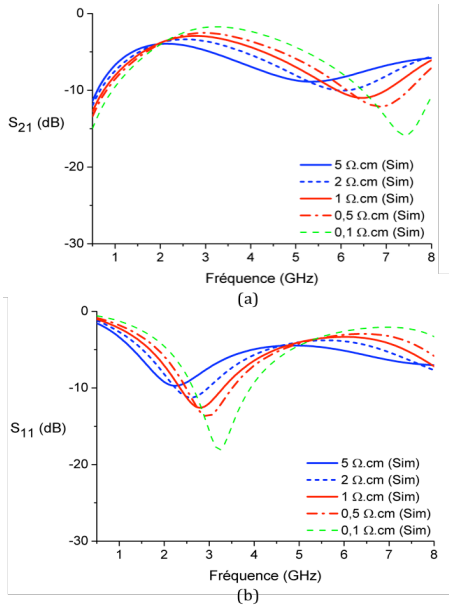

Fig. 10. Résonateur à accord continu. Simulations HFSS™ (a) Paramètres S_{21} (dB). (b) Paramètres S_{11} (dB).

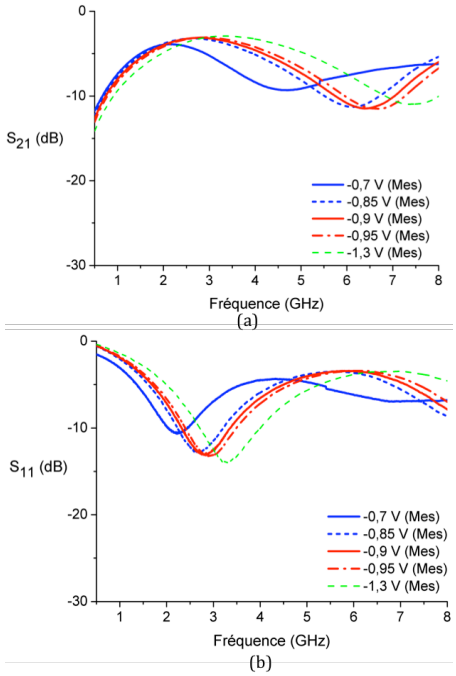

Fig. 11. Mesures du résonateur à accord continu. (a) Paramètres S_{21} (dB). (b) Paramètres S_{11} (dB).

4. Conclusion

Dans cet article, trois résonateurs hyperfréquences accordables ont été présentés. Les éléments d'accord sont réalisés en même temps que les résonateurs et sont directement intégrés dans le substrat. La méthode de co-conception mise en œuvre offre une flexibilité en termes de positionnement, afin de choisir les fréquences de fonctionnement, et de dimensionnement des zones dopées pour la multiplication des fréquences de résonance. Associé à la souplesse de conception, les nouvelles topologies proposées permettent de réaliser les fonctions accordables de manière complètement originale. Les simulations en accord avec les mesures montrent de bonnes performances, telles qu'une grande accordabilité (50 % dans le cas du résonateur à accord continu) et des pertes d'insertion constantes dans les différents modes de fonctionnement des résonateurs trois états.

5. Remerciements

Tous les calculs ont été réalisés sur le cluster de calcul hautes performances WINCHYPS1. Ce cluster est géré par la plateforme TecHyp du Lab-STICC.

Références

[1] S. Sirci, J. D. Martinez, and V. E. Boria, "Low-loss 3-bit tunable SIW filter with PIN diodes and integrated bias network," in 2013 European Microwave Conference, 2013, pp. 1211–1214.

[2] A. R. Brown and G. M. Rebeiz, "A varactor-tuned RF filter," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 48, no. 7, pp. 1157–1160, Jul. 2000.

[3] H. Mizutani, N. Iwata, Y. Takayama, and K. Honjo, "Design Considerations for Traveling-Wave Single-Pole Multithrow MMIC Switch Using Fully Distributed FET," *IEEE Trans. Microw. Theory* Tech., vol. 55, no. 4, pp. 664–671, Apr. 2007.

[4] R. Allanic, Y. Quéré, D. Le Berre, and C. Quendo, "A Novel Approach to Co-Design microwave Devices with Distributed Switches," in Microwave Conference Proceedings (APMC), Asia-Pacific, 2016.

[5] C. Quendo, R. Allanic, D. Le Berre, and Y. Quéré, "Novel Approaches to Design Tunable Devices," in Wireless and Microwave Technology Conference, IEEE WAMICON, USA, April 2017.

[6] R. Allanic, Y. Quéré, D. Le Berre, and C. Quendo, "Intrinsically microwave tunable resonator designed on silicon," Electron. Lett., vol. 52, no. 20, pp. 1697–1699, Sep. 2016.