



**HAL**  
open science

## Résonateur reconfigurable à base de lignes couplées à éléments d'accord intégrés sur substrat silicium

Y Amara, R Allanic, D Le Berre, C Quendo, E Fourn

► **To cite this version:**

Y Amara, R Allanic, D Le Berre, C Quendo, E Fourn. Résonateur reconfigurable à base de lignes couplées à éléments d'accord intégrés sur substrat silicium. XXIIèmes Journées Nationales Microondes (JNM 2022), Jun 2022, LIMOGES, France. hal-03995019

**HAL Id: hal-03995019**

**<https://hal.science/hal-03995019>**

Submitted on 17 Feb 2023

**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.

## Résonateur reconfigurable à base de lignes couplées à éléments d'accord intégrés sur substrat silicium

Y. Amara<sup>1</sup>, R. Allanic<sup>1</sup>, D. Le Berre<sup>1</sup>, C. Quendo<sup>1</sup>, E. Fourn<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univ Brest, Lab-STICC, CNRS, UMR 6285, F-29200 Brest, France

<sup>2</sup>Univ Rennes, INSA Rennes, IETR, UMR CNRS 6164, F-35000 Rennes

youcef.amara@univ-brest.fr

**Résumé** – Ce papier présente une technique particulière de reconfiguration de résonateurs à lignes couplées. La reconfigurabilité est obtenue par le dopage d'une ou plusieurs parties du substrat silicium situées au niveau des lignes couplées, créant ainsi une ou plusieurs diodes distribuées. L'intégralité du circuit passe par une co-conception offrant une grande flexibilité et une réduction considérable des pertes liées à l'interconnexion entre l'élément passif et actif. Un premier résonateur deux états est présenté, il possède une fréquence de résonance proche de 2,5 GHz à l'état OFF et une fréquence de 1,5 GHz à l'état ON ; cette dernière étant ajustable en fonction de la position de la zone dopée. Un deuxième résonateur trois états est également présenté, sa fréquence de résonance commute de 2,5 GHz à l'état OFF, à 1,62 GHz à l'état ON<sub>1</sub> puis à 2,13 GHz à l'état ON<sub>2</sub>.

### 1. Introduction

Dans une course vers des systèmes de plus en plus performants et miniatures, les circuits électroniques d'aujourd'hui doivent répondre à ces besoins par une flexibilité plus importante. L'intérêt des circuits reconfigurables est ainsi de plus en plus important.

Les circuits réadaptables à base de diodes PIN [1][2] et de MEMS [3][4] ont fait leurs preuves. Cependant, ces éléments présentent tout de même des inconvénients, à savoir, l'intégrabilité des MEMS et les pertes dans les diodes PIN. De plus, ces deux éléments présentent des effets parasites liés au report de l'élément d'accord et à la discontinuité avec le circuit passif. Une solution à ce problème consiste en l'utilisation d'éléments d'accords intégrés distribués tels que les diodes intégrées dans un substrat silicium co-conçues en même temps que le circuit à accorder [5].

Le substrat silicium utilisé présente de nombreux avantages, tels que la simplicité de fabrication puisqu'on n'a besoin que de deux masques et une meilleure gestion de la profondeur des jonctions ce qui est compliqué et plus contraignant avec un fondeur conventionnel. De plus la permittivité élevée du substrat utilisé ( $\epsilon_r = 11,8$ ) permet d'augmenter le facteur de qualité des circuits étudiés.

Dans ce papier, deux résonateurs accordables sont

présentés. Le substrat utilisé est du silicium de permittivité égale à 11,8 et d'une épaisseur égale à 350  $\mu\text{m}$ . Un premier résonateur deux états fonctionnant à la fréquence 2,47 GHz à l'état OFF (sans polarisation) et à une fréquence comprise entre 1,52 GHz et 1,64 GHz à l'état ON. Pour aller plus loin et montrer la flexibilité de conception, le deuxième résonateur possède trois états, un état OFF et deux états ON. Comme les dimensions du deuxième résonateur sont les mêmes que les dimensions du premier résonateur, la fréquence à l'état OFF ne change pas, à savoir 2,47 GHz. La fréquence de résonance de l'état ON<sub>1</sub> est de 1,62 GHz contre 2,13 GHz pour l'état ON<sub>2</sub>.

### 2. Résonateur deux états reconfigurable sur substrat silicium

#### 2.a. Modèle et design du résonateur

Le résonateur étudié ici reprend l'architecture présentée dans [6]. Le modèle électrique proposé dans cette référence est à base d'éléments localisés à cause de la présence de blindages "shields" qui sont des éléments discrets. Ici, on propose un nouveau modèle à base d'éléments distribués. La disposition des lignes et les faibles distances qui les séparent induisent des couplages entre ces dernières. Il en résulte le modèle électrique à lignes couplées de la Figure 1.

Deux paires de lignes couplées sont mises en parallèles via un stub (Figure 2). L'une des deux paires se termine par une ligne micro-ruban qui court-circuite les deux lignes couplées. Dans cette configuration, la largeur des rubans est égale à  $W_{ind} = 0,14$  mm. La largeur relativement faible des rubans apporte un effet inductif [4] à cette dernière. L'autre paire correspond à deux lignes couplées classiques avec une largeur de  $W_{capa} = 0,84$  mm. Un effet capacitif domine pour cette paire dont la largeur des rubans non court-circuités est relativement élevée. Les dimensions du résonateur sont les suivantes :  $L_{accs} = 4,86$  mm,  $L_{stub} = 2$  mm,  $L_{capa} = 3,36$  mm,  $L_{ind} = 3,64$  mm,  $L_{cc} = 1,08$  mm et  $L_{co} = 0,38$  mm.

Les dimensions des lignes ont été choisies de telle manière à ce qu'il y ait une différence importante entre les la largeur de la ligne couplée court-circuitée et la largeur de la ligne en circuit ouvert. Les longueurs des lignes ont été choisie de telle manière à ce que le résonateur

fonctionne à la fréquence WIFI (2,45GHz) à l'état OFF. Les états ON1 et ON2 fonctionnent à d'autres fréquences.

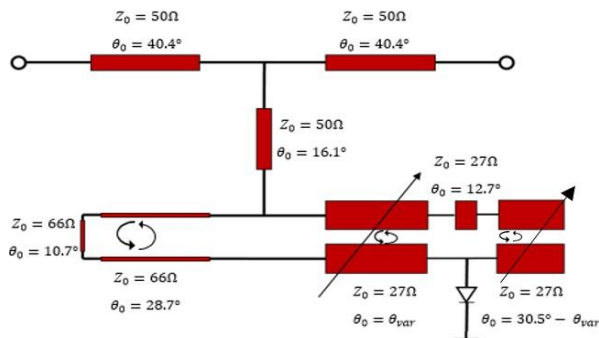


Figure 1. Schéma équivalent du résonateur.

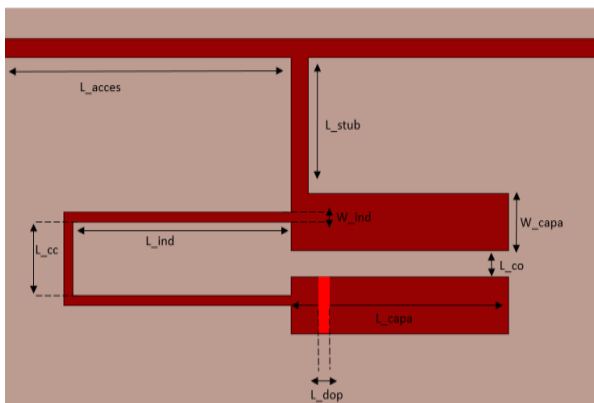


Figure 2. Vue de dessus du résonateur.

La résistivité de ce dernier est de 2500  $\Omega$ . On vient doper le substrat avec des atomes donneurs du type  $N^+$  d'une part et des atomes accepteurs du type  $P^+$  de l'autre (Figure 3).

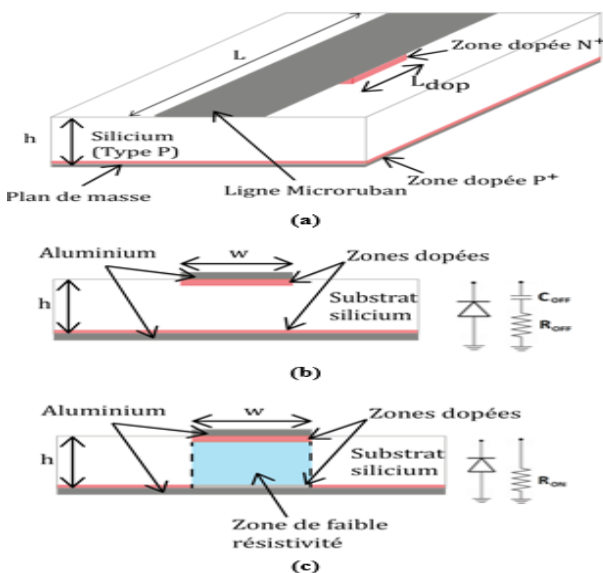


Figure 3. Création d'une diode distribuée grâce au dopage d'un substrat silicium : (a) Vue 3D d'une ligne micro ruban sur substrat silicium de type P avec dopage de type  $N^+$  sous le ruban signal et de type  $P^+$  sur le plan de masse ; (b) Vue en coupe, état OFF ; (c) vue en coupe, état ON.

Les dopages  $N^+$  (en dessous du ruban conducteur) et  $P^+$

(au-dessus du plan de masse) ont une épaisseur d'environ 6  $\mu m$ . La longueur  $L_{dop} = 0,5$  mm de la zone dopée qui est constante doit être assez large afin de minimiser les pertes conductrices. L'équation (1) montre la relation qui relie la résistance de la jonction à l'état ON en fonction de la résistivité, la hauteur du substrat, la largeur de la zone dopée et la longueur  $L_{dop}$  qui doit être assez grande.

$$R_{ON} = \rho \frac{h}{w \times L_{dop}} \quad (\Omega) \quad (1)$$

Le résonateur possède alors un premier état (état OFF), sans polarisation de la zone dopée  $N^+$ , les caractéristiques du substrat restent inchangées entre les zones dopées  $N^+$  et  $P^+$  (Figure 3). Le second état (état ON) est obtenu lorsque la jonction  $N^+P^+$  est polarisée en direct créant ainsi un court-circuit ayant une résistivité de 0.05  $\Omega.cm$  entre la ligne micro- ruban et la masse. La flexibilité apportée par la co-conception est montrée ici car il est ainsi possible de faire varier la position de la zone dopée, i. e. du court-circuit parallèle, comme illustré dans la Figure 1.

## 2.b. Résultats des simulations électrique et électromagnétique

Le modèle du résonateur présenté dans la Figure 1 a été simulé grâce au logiciel ADS<sup>®</sup> de Keysight Technologies. Le design du résonateur (Figure 2) a été simulé grâce au logiciel HFSS<sup>™</sup> de chez ANSYS. Dans les deux cas, l'élément actif (diode distribuée) est assimilé à un court-circuit parfait à l'état ON et à un circuit-ouvert parfait à l'état OFF. Les résultats des simulations électrique et électromagnétique sont présentés sur la Figure 4.

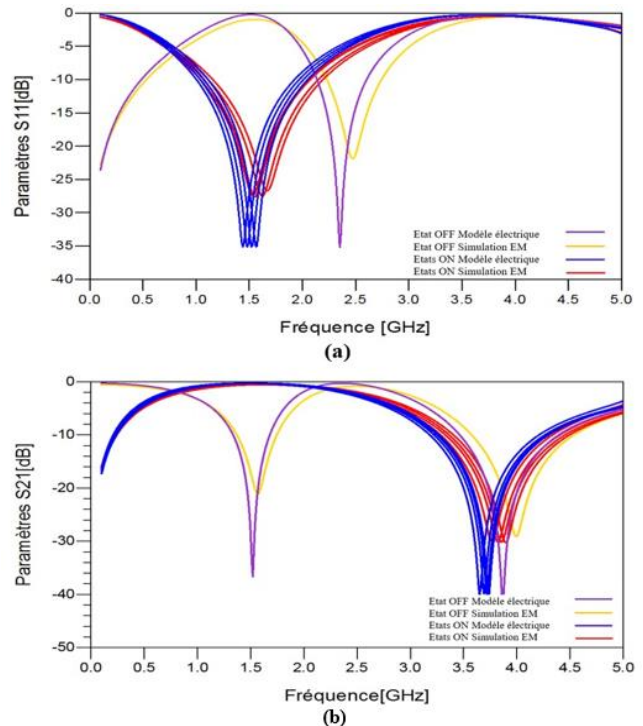
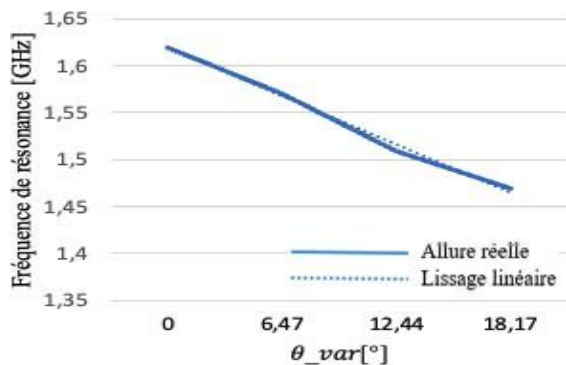


Figure 4. (a) Paramètres de réflexions (S11) ; (b) Paramètres de transmissions (S21).

A l'état OFF, le circuit résonne à  $F_{rOff} = 2,47$  GHz.

Le paramètre de transmission  $S_{21}$  à cette fréquence vaut -0,39 dB. A l'état ON, le circuit résonne à une fréquence comprise entre  $F_{rON\_min} = 1,52 \text{ GHz}$  et  $F_{rON\_max} = 1,64 \text{ GHz}$  correspondant à  $\theta_{var\_max} = 30,5^\circ$  et  $\theta_{var\_min} = 0^\circ$ , respectivement, i.e.  $L\_min = 0,5 \text{ mm}$  et  $L\_max = 3,31 \text{ mm}$ . Les pertes d'insertion sont de l'ordre de 0,5 dB. On peut alors tracer la fréquence de résonance en fonction de la position de la zone dopée (Figure 5).



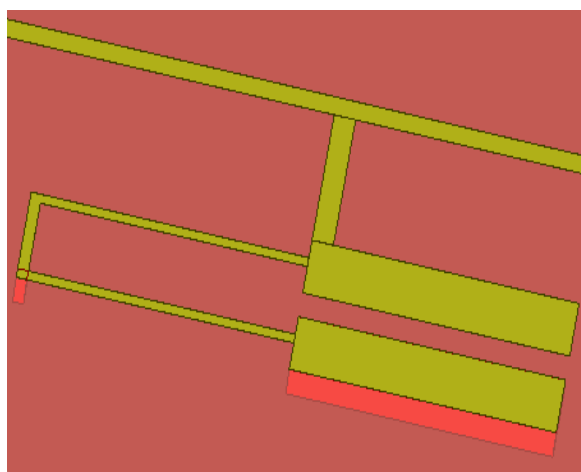
**Figure 5. Évolution de la fréquence de résonance en fonction de la longueur électrique de la ligne dopée.**

Cette courbe permet de visualiser l'impact de la position de la zone dopée le long de la ligne couplée sur la fréquence de résonance du résonateur. On remarque que la fréquence de résonance suit une loi linéaire décroissante en fonction de la position de la zone dopée.

### 3. Résonateur trois états reconfigurable sur substrat silicium

#### 3.a. Design du résonateur

Le résonateur trois états (Figure 6) reprend la même architecture que le résonateur deux états. Cependant, deux zones dopées sont présentes dans le substrat au lieu d'une seule.



**Figure 6. Vue 3D du résonateur 3 états**

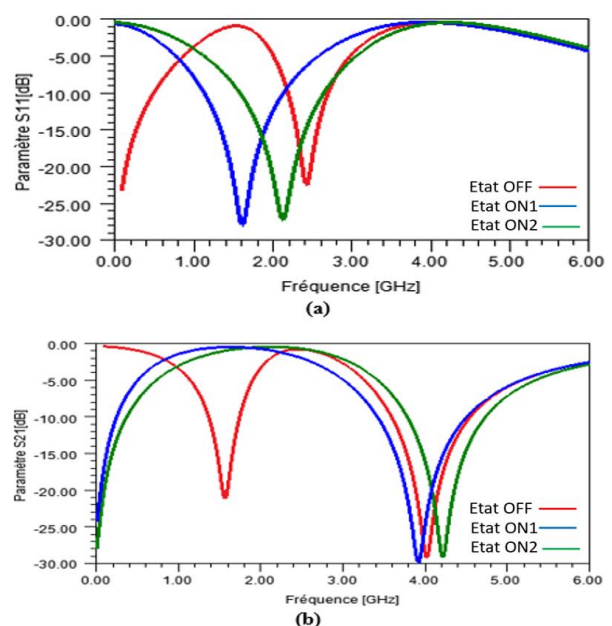
Les dimensions des zones dopées ont été choisies de telle manière à ce que le rapport entre leurs surfaces respectives soit assez grand (dans les centaines). Ceci permet d'obtenir un écart suffisamment important entre les résistances de chaque zone dopée. La première zone dopée a une surface de  $2,94 \text{ mm}^2$  et la deuxième une

surface de  $0,019 \text{ mm}^2$ . Le Tableau 1 résume les valeurs des résistances de chaque surface en fonction de la tension de polarisation. R1 représente la résistance de la petite zone dopée tandis que R2 représente la résistance de la grande zone dopée.

**Tableau 1. Résistance de chaque zone dopée en fonction de la résistivité.**

Etat	Résistivité [kΩ.cm]	R1 [Ω]	R2 [Ω]
OFF	25	4,46E+06	3,22E+04
ON1	0,02	3,57E+02	2,48E+00
ON2	0,0005	8,93E+00	6,20E-02

On remarque qu'à l'état OFF les deux résistances des deux zones dopées sont grandes. La résistance de la petite zone dopée (S1) est de  $4,46 \text{ M}\Omega$  et la résistance de la grande zone dopée (S2) est de  $32,2 \text{ k}\Omega$ . Ceci se traduit par un circuit ouvert entre le ruban du signal et le plan de masse. La réponse du résonateur trois états est alors la même que la réponse du résonateur deux états dans ce cas. L'état ON1 est obtenu pour une tension de polarisation de  $-0,8 \text{ V}$ . Il se caractérise par une valeur de résistance de la grande surface dopée (S1) égale à  $2,48 \Omega$  qui est petite par rapport à la valeur de la résistance de la petite surface dopée (S2) égale à  $357 \Omega$ . Ceci se traduit par un court-circuit entre le ruban signal et le plan de masse au niveau de la surface S1 et un circuit ouvert entre le ruban signal et le plan de masse au niveau de la surface S2. L'état ON2 est obtenu pour une tension de polarisation de  $-1,6 \text{ V}$ . Dans ce cas, deux valeurs de résistances assez petites pour les deux zones dopées sont obtenues :  $0,062 \Omega$  et  $8,93 \Omega$  pour les surface S1 et S2 respectivement. Ceci se traduit par un court-circuit entre le ruban signal et le plan de masse au niveau des deux zones dopées. La réponse du résonateur 3 états est présentée sur la Figure 6.



**Figure 6. Signature du résonateur 3 états : (a) paramètre de réflexion, (b) paramètre de transmission.**

Le résonateur trois états fonctionne à trois fréquences différentes,  $2,47 \text{ GHz}$  à l'état OFF où le paramètre de

transmission  $S_{21}$  à cette fréquence vaut - 0,83 dB, 1,62 GHz à l'état ON1 où le paramètre de transmission  $S_{21}$  à cette fréquence vaut - 0,53 dB et 2,13 GHz à l'état ON2 où le paramètre de transmission  $S_{21}$  à cette fréquence vaut - 0,51 dB.

#### 4. Conclusion

Une structure simple de résonateur reconfigurable est présentée ici. La reconfiguration est obtenue par l'insertion de zones dopées dans le substrat silicium. La co-conception des parties passives et actives offrent beaucoup de simplicité et de possibilité. La modélisation du circuit proposée apporte une compréhension de son fonctionnement. Ce modèle nous permet aussi de simuler notre circuit plus rapidement en utilisant ADS au lieu de HFSS.

Deux démonstrateurs ont été présentés. Le premier résonateur à deux états permet de passer d'un état OFF (sans polarisation) à un état ON avec un décalage des fréquences de résonances ajustable avec la position de la zone dopée choisie. Le second résonateur à trois états présente trois fréquences de fonctionnement, une à l'état OFF et deux aux états ON1 et ON2. Ceci est possible en s'assurant d'un ratio assez important entre les deux surfaces des deux zones dopées. Le résonateur 3 états proposé est très original de par la simplicité et l'unicité de la commande nécessaire à la commutation des états ainsi qu'à son architecture compacte. Les mesures qui seront faites prochainement seront comparées aux résultats de simulations des deux circuits présentés.

#### 5. Remerciements

Les auteurs remercient la région Bretagne qui a financé en partie cette thèse ainsi que le Label CominLabs qui à son tour a financé l'autre partie de la thèse à travers le projet DATERAC. Nous remercions aussi les plateformes TECHYP (cluster de calcul du Lab-STICC) et le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique.

#### Références

- [1]S. Nikolaou, *et al*, «*Pattern and frequency reconfigurable annular slot antenna using PIN diodes*» IEEE Transactions on Antennas and Propagation , 2006, Vol. 54, Issue 2
- [2] Abdel-Fattah Sheta and Samir F. Mahmoud, Life Senior Member, IEEE «*A Widely Tunable Compact Patch Antenna* » IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 7, 2008
- [3] Mojtaba Safari, Cyrus Shafai, Senior Member, IEEE, and Lotfollah Shafai, Life Fellow, IEEE «*X-Band Tunable Frequency Selective Surface Using MEMS Capacitive Loads*», IEEE Transactions On Antennas and Propagation, Vol. 63, No. 3, March 2015
- [4] R. Brown, Senior Member IEEE, «*RF-MEMS Switches for Reconfigurable Integrated Circuits* », IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, 1998, Vol. 46, No: 11

[5]R. Allanic, *et al* «*Intrinsically microwave tunable resonator designed on silicon*» Electron. Lett, vol. 52, no. 20, pp. 1697–1699, Sep. 2016

[6]A. Saadi, *et al*, «*Millimeter-wave Resonator Based on High Quality Factor Inductor and Capacitor based on Slow-Wave CPS*», 2020 IEEE/MTT-S IMS