



HAL
open science

Intégration de zones dopées distribuées pour la réalisation d'un filtre accordable en bande passante

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

► To cite this version:

Rozenn Allanic, Yves Quéré, Cédric Quendo, Denis Le Berre, David Chouteau, et al.. Intégration de zones dopées distribuées pour la réalisation d'un filtre accordable en bande passante. 22èmes journées nationales microondes (JNM 2022), Jun 2022, Limoges, France. hal-03699804

HAL Id: hal-03699804

<https://hal.science/hal-03699804>

Submitted on 1 Jul 2022

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.

Intégration de zones dopées distribuées pour la réalisation d'un filtre accordable en bande passante

R. Allanic¹, D. Le Berre¹, Y. Quéré¹, C. Quendo¹, D. Chouteau², V. Grimal², D. Valente², J. Billoué²

¹ Univ Brest, Lab-STICC, CNRS, UMR 6285, F-29200 Brest, France

²Laboratoire GREMAN, UMR 7347, Université de Tours, CNRS, INSA CVL, Tours 37071, France

Rozenn.Allanic@univ-brest.fr

Résumé – Ce papier présente un filtre accordable en bande passante à éléments d'accord intégrés dans le substrat. Ce filtre est le résultat d'une co-conception des éléments actifs et des lignes de transmission. En effet, l'idée est d'utiliser un substrat semi-conducteur afin de dessiner en même temps les lignes de transmission et les zones dopées distribuées servant de switches électriques dans le substrat. Cette méthode offre une flexibilité dans le dimensionnement et le positionnement des zones dopées permettant de choisir les bandes passantes des deux états de fonctionnement (états OFF et ON). Les simulations et les mesures d'un filtre à 5 GHz dont la bande passante commute de 50 % à 70 % valident cette méthode de co-conception.

1. Introduction

L'arrivée de la 5G et bientôt la 6G engendre de plus en plus de contraintes pour les concepteurs de systèmes communicants. Ils doivent être toujours plus performants, moins coûteux et plus petits. Ainsi, au lieu d'utiliser un composant par norme [1] pour faire fonctionner de plus en plus d'applications dans un même système, une solution consiste en l'utilisation de composants agiles grâce aux diodes PIN [2], aux MEMS [3] ou aux transistors FET [4]. Cependant, ces composants actifs sont associés aux lignes de transmission pour la conception de dispositifs accordables ; la différence de taille entre les deux parties provoque des désadaptations entraînant des pertes. Ainsi, pour s'affranchir de ces composants reportés, une solution de conception globale d'une fonction hyperfréquence accordable existe et consiste en l'utilisation d'un substrat semi-conducteur pour la réalisation à la fois des lignes de transmission et de la (ou des) zone(s) dopée(s) distribuées servant de switches électriques dans le substrat. Cette méthode offre une flexibilité dans le dimensionnement, le positionnement et la forme de la zone dopée [5].

A partir de cette méthode, l'idée de cet article est d'utiliser un substrat silicium afin de concevoir un filtre accordable en bande passante à éléments d'accord intégrés dans le substrat. Ainsi, la deuxième partie de cet article présente la synthèse de filtre à stubs accordable en bande passante dans les deux états de fonctionnement. Ensuite, dans une troisième partie, le dessin et la méthode de simulation d'un filtre d'ordre 4 sont présentés. Ce démonstrateur a été fabriqué et mesuré, ainsi, dans une quatrième partie, les étapes de fabrication sont décrites et les mesures sont analysées et comparées aux simulations.

2. Synthèse du filtre accordable

La Figure 1 présente un filtre accordable en bande passante utilisant des composants actifs pour le passage de résonateurs à stubs demi-onde en circuit ouvert (Figure 1 (a)) à des résonateurs à stubs quart-d'onde en court-circuit (Figure 1(b)).

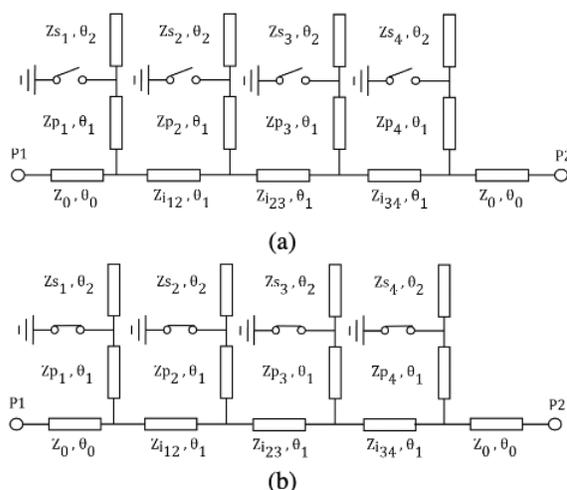


Figure 1. Représentations idéales d'un filtre d'ordre 4 accordable. (a) à l'état OFF avec des résonateurs $\lambda/2$ en circuit-ouvert. (b) à l'état ON avec des résonateurs $\lambda/4$ en court-circuit.

Dans son livre, Matthaei [6] propose une synthèse de filtre passe bande à stubs court-circuités ainsi que celle d'un filtre passe bande à stubs demi-onde à saut d'impédance terminés par des circuits-ouverts. La première synthèse permet de déterminer les longueurs électriques, θ_1 , les admittances des inverseurs et les admittances des résonateurs en fonction de la bande passante ω_1 désirée, lorsque les stubs sont en court-circuit. Grâce à la deuxième synthèse, l'idée est de pouvoir également contrôler la deuxième bande passante, i.e. ω_2 lorsque les stubs sont en circuits-ouverts. Ainsi, l'équation (1) permet de calculer les admittances des résonateurs en court-circuit, l'équation (2) les admittances de la deuxième partie des résonateurs en circuits ouverts, ceci, avec les paramètres a_k de l'équation (3) offrant un degré de liberté dans le choix des bandes passantes en fonction des impédances désirées par rapport à la

technologie utilisée. Les paramètres α_k sont calculés à partir de la synthèse présente dans [6].

$$Y'_k|_{k=1 \text{ to } n} = Y_k \left(\frac{a_k \tan^2 \theta_1 - 1}{\tan^2 \theta_1 (a_k + 1)} \right) \quad (1)$$

$$Y'_k|_{k=1 \text{ to } n} = a_k Y'_k \quad (2)$$

$$a_k|_{k=1 \text{ to } n} = \left(\frac{\tan^2 \theta_2 \alpha_k + \alpha'_k}{\tan^2 \theta_2 (\alpha'_k - \alpha_k)} \right) \quad (3)$$

3. Filtre accordable en bande passante

3.a. Conception

Un filtre de fréquence centrale 5 GHz, dont la bande passante commute de 50% à l'état OFF à 70% à l'état ON, a été choisi comme démonstrateur. Pour la réalisation de ce filtre (Figure 2), l'idée est de choisir un substrat semi-conducteur afin de pouvoir dessiner des zones dopées distribuées, servant d'éléments actifs intégrés, en même temps que les lignes de transmission. Le substrat choisi est un substrat silicium haute résistivité ($\rho = 2500 \Omega \cdot \text{cm}$) afin de minimiser les pertes, avec un dopage de type P (dopé au Bore) et une épaisseur de $675 \mu\text{m}$. Le substrat est dopé P⁺ sur la totalité de la face arrière afin d'améliorer la résistivité dans la jonction à l'état ON et les zones dopées sur le dessus sont dopées N⁺. Ces zones dopées forment ainsi des jonctions N⁺PP⁺ agissant comme des circuits ouverts à l'état OFF et des court-circuits dans l'épaisseur du substrat à l'état ON.

Les dimensions des lignes d'accès, des inverseurs, des stubs et des zones dopées sont données dans le Tableau 1.

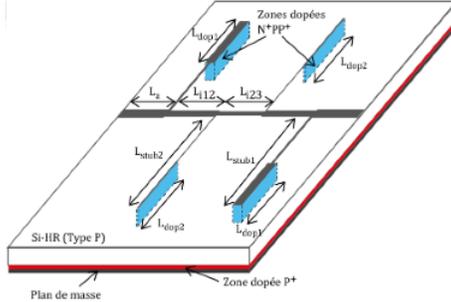


Figure 2. Dessin du filtre accordable à éléments d'accord intégrés.

Tableau 1. Dimensions du filtre d'ordre 4 à bande passante accordable

Accès	$L_a = 3.98 \text{ mm}$	$W_a = 0.56 \text{ mm}$
Inverseur 12 = Inverseur 34	$L_{i12} = L_{i34} = 5.5 \text{ mm}$	$W_{i12} = W_{i34} = 0.42 \text{ mm}$
Inverseur 23	$L_{i23} = 5.32 \text{ mm}$	$W_{i23} = 0.3 \text{ mm}$
Stub 1 = Stub 4	$L_{p1} = L_{p4} = 5.62 \text{ mm}$	$W_{p1} = W_{p4} = 0.13 \text{ mm}$
	$L_{s1} = L_{s4} = L_{dop1} = 5.31 \text{ mm}$	$W_{s1} = W_{s4} = W_{dop1} = 0.85 \text{ mm}$
Stub 2 = Stub 3	$L_{p2} = L_{p3} = 5.31 \text{ mm}$	$W_{p2} = W_{p3} = 0.18 \text{ mm}$
	$L_{s2} = L_{s3} = L_{dop2} = 5.28 \text{ mm}$	$W_{s2} = W_{s3} = W_{dop2} = 0.62 \text{ mm}$

W_x et L_x représente respectivement la largeur et la longueur de chacun des éléments.

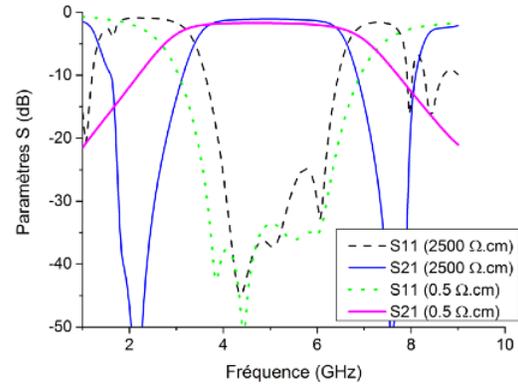


Figure 3. Résultats de simulation du filtre accordable dans les deux états de fonctionnement.

3.b. Simulations électromagnétiques

Ce filtre a été modélisé et simulé sous le logiciel HFSSTM de Ansys dans les deux états de fonctionnement. Les éléments actifs sont modélisés par des parallélépipèdes rectangles. La commutation est prise en compte en modifiant la tangente de pertes dans la zone dopée en tenant compte d'une résistivité égale à $2500 \Omega \cdot \text{cm}$ à l'état OFF et $0.5 \Omega \cdot \text{cm}$ à l'état ON dans l'équation (4). Les épaisseurs et conductivités des zones dopées sont négligées.

$$\tan \delta = \frac{1}{\rho \omega \epsilon_0 \epsilon_r} + 0.0018 \quad (4)$$

La Figure 3 présente les résultats des simulations du filtre à 5 GHz accordable en bande passante. A l'état OFF, la bande passante est de 50% avec des pertes d'insertion égales à 1,1 dB. Elle passe à 70% à l'état ON avec des pertes de 1,7 dB. L'adaptation est supérieure 25 dB sur toute la bande passante et dans les deux états de fonctionnement.

4. Réalisation d'un démonstrateur

4.a. Fabrication

Un démonstrateur a été réalisé avec des étapes classiques de fabrication de composants semi-conducteurs, avec seulement deux niveaux de masquage photolithographie. Le premier masque est nécessaire pour les zones dopées face avant et le deuxième masque pour la métallisation (Figure 4). La zone dopée P⁺ a été réalisée par implantation d'atomes de Bore avec une concentration de l'ordre de 10^{19} atomes/cm³ en surface et une épaisseur de $3 \mu\text{m}$. Le dopage N⁺ face avant a été obtenu quant à lui par une technique de dépôt d'une solution de sol-gel dopée au phosphore, afin d'obtenir la même concentration et la même profondeur de dopage que le dopage P⁺.



Figure 4. Masques (a) Dopage. (b) Métallisation.

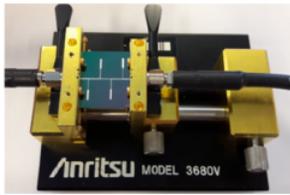


Figure 5. Photographie du démonstrateur dans la cellule de mesure.

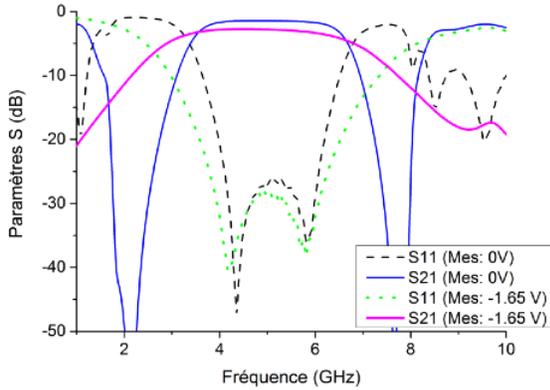


Figure 6. Résultats de mesure du filtre accordable à l'état OFF et à l'état ON.

4.b. Mesures

La Figure 5 présente le filtre positionné dans une cellule de mesure Anristu 3680V afin de pouvoir le mesurer à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel ZVA 67 de R&S®. La tension DC a été appliquée en même temps que le signal RF avec une source de tension continue directement connectée à l'analyseur. Une calibration de type short open load through (SOLT) a été effectuée afin d'éliminer les pertes liées aux câbles. La Figure 6 présente les résultats mesurés du filtre dans les deux états de fonctionnement. A l'état OFF, avec une tension de polarisation de 0 V, la bande passante mesurée est de 50 % et passe à 70 % à l'état ON avec une tension de polarisation de -1,65 V. Les pertes d'insertion sont respectivement de 1,45 dB et 2,75 dB. Ces pertes comprennent les pertes du dispositif ainsi que les pertes liées à la cellule de mesure. L'adaptation est supérieure à 25 dB dans les deux états de fonctionnement.

4.c. Analyse

Les Figures 7 et 8 comparent les résultats simulés à ceux mesurés dans les deux états de fonctionnement. Globalement, un bon accord est obtenu malgré un niveau de pertes d'insertion supérieur à ceux attendus. A l'état OFF, le niveau de pertes d'insertion mesuré est supérieur de 0,35 dB par rapport à celui simulé, ceci est dû à la cellule de mesure dont les pertes ne sont pas enlevées lors de la calibration ainsi qu'aux incertitudes sur la résistivité du substrat (résistivité donnée par le fabricant comprise entre 500 Ω.cm et 10 kΩ.cm). A l'état ON, la différence du niveau de pertes entre simulation et mesure est de 1,05 dB. Ainsi, aux pertes et approximations identiques à l'état OFF, s'ajoute à l'état ON les approximations sur la forme et la résistivité dans la jonction. En effet, la jonction est approximée par un parallélogramme rectangle avec une

résistivité homogène de 0,5 Ω.cm. De nouvelles simulations ont été effectuées (Figure 9) ; une résistivité de l'ordre de 2 Ω.cm permet d'obtenir un bon accord avec la mesure. Afin d'améliorer les performances à l'état ON, il faudrait soit augmenter les quantités de dopants des zones dopées, soit réaliser des membranes sous les zones dopées afin d'affiner localement le substrat et ainsi diminuer la résistivité.

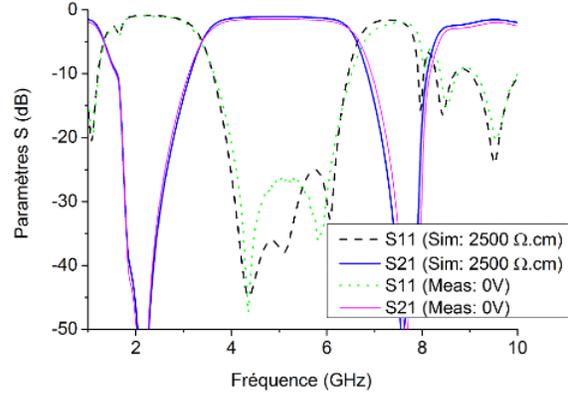


Figure 7. Comparaison simulation / mesure à l'état OFF.

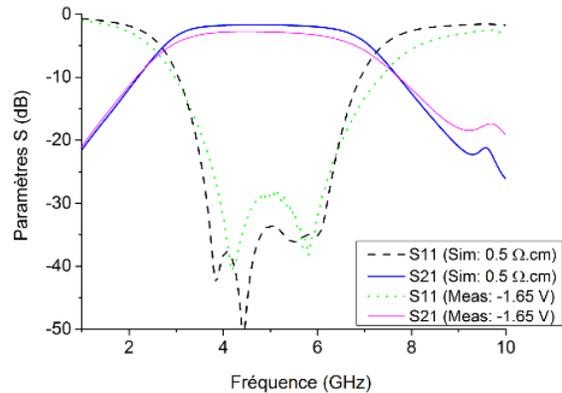


Figure 8. Comparaison simulation / mesure à l'état ON.

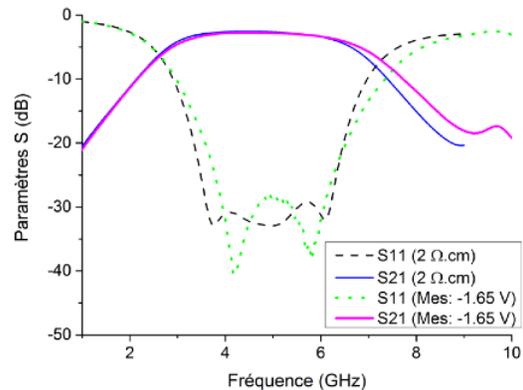


Figure 9. Comparaison retro-simulation / mesure à l'état ON.

Tableau 2 Comparaison avec l'état de l'art

Réf.	Ordre du filtre	F0 (GHz)	Bande Passante (GHz)			Pertes d'insertion (dB)			Éléments actifs	Nb d'états	Nb d'éléments actifs	Facteur de Qualité		
			BP0	BP1	BP2	BP0	BP1	BP2				BP0	BP1	BP2
[7]	3 / 1	1,5	50 %	29 %		0,9	1,1		Diodes p-i-n	2	1	29	14	
[8]	2	10	4.5 %	8.6 %		2,2	3,3		Diodes p-i-n	2	1	88	31	
[9]	4	10	15 %	5 %		≈ 2,5	≈ 4,5		Diodes p-i-n	2	8	46	77	
[10]	3	5,7	34.8 %	48.4 %	56.5 %	1,4	1,4	1,4	Diodes p-i-n	3	4	27	19	16
[11]	2	1,9	35 %	16.3 %		0,4	4,17		Diodes p-i-n	2	4	62	13	
[11]	2	1,9	37.4 %	27.8 %		0,43	0,73		Diodes p-i-n	2	4	54	43	
Ces travaux	4	5	50 %	70 %		1,45	2,75		Jonctions intégrées	2	4	24	9	

Le Tableau 2 propose une comparaison des performances du filtre accordable en bande passante proposé et des filtres accordables en bande passante issus de l'état de l'art avec des fréquences centrales relativement proches de celui proposé dans ce papier. Le filtre proposé présente ainsi des performances comparables à l'état de l'art.

5. Conclusion

Dans cet article, un filtre accordable en bande passante a été présenté. Les jonctions N⁺PP⁺, i.e. éléments d'accord, intégrées dans le substrat réalisent l'accord de 50 % à 70 % de la bande passante. Le co-design des lignes de transmission et des zones dopées permettent d'optimiser les performances globales d'un filtre accordable en choisissant la taille, les dimensions et les positions des zones dopées. Les performances, notamment les pertes à l'état ON, pourraient être améliorées par des membranes (amincissement local de l'épaisseur du substrat) sous les zones dopées.

6. Remerciements

Les auteurs remercient les plateformes TECHYP (cluster de calcul du Lab-STICC) et CERTeM, le réseau RENATECH et le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche et de la région Bretagne, à travers du projet CPER SOPHIE / STIC & Ondes.

Références

[1] D. Packiaraj et al., "Electronically switchable suspended substrate stripline filters," 2004 RF and Microwave Conference, Malaysia, 2004, pp. 64-66.
 [2] Z. Brito-Brito et al., "Microstrip Switchable Bandstop Filter using PIN Diodes with Precise Frequency and Bandwidth Control," in *38th European Microwave Conference*, 2008, pp. 1707-1710.
 [3] A. Pothier et al., "Low-loss 2-bit tunable bandpass filters using MEMS DC contact switches," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 53, no. 1, pp. 354-360, Jan. 2005.

[4] J. Lee et al., "A Band-Pass Filter-Integrated Switch Using Field-Effect Transistors and Its Power Analysis," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2006, pp. 768-771.
 [5] R. Allanic et al., "Three-State Microwave Tunable Resonator Integrating Several Active Elements on Silicon Technology in a Global Design," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 28, no. 2, pp. 141-143, 2018.
 [6] G. L. Matthaei et al., "Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures", *Volume 1*. 1964.
 [7] W.-H. Tu, "Compact Low-Loss Reconfigurable Bandpass Filter With Switchable Bandwidth," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 20, no. 4, pp. 208-210, Apr. 2010.
 [8] C. Lugo and J. Papapolymerou, "Single switch reconfigurable bandpass filter with variable bandwidth using a dual-mode triangular patch resonator," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2005., pp. 779-782.
 [9] C. Rauscher, "Reconfigurable bandpass filter with a three-to-one switchable passband width," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 51, no. 2, pp. 573-577, Feb. 2003.
 [10] T. Cheng and K.-W. Tam, "A Wideband Bandpass Filter With Reconfigurable Bandwidth Based on Cross-Shaped Resonator," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 27, no. 10, pp. 909-911, Oct. 2017.
 [11] A. Miller and Jia-Sheng Hong, "Wideband Bandpass Filter With Reconfigurable Bandwidth," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 20, no. 1, pp. 28-30, Jan. 2010.