



HAL
open science

Filtre Passe-Bande Intégrant un Atténuateur à Haute Dynamique sur Substrat Semiconducteur

Corentin Le Lez, Rozenn Allanic, Denis Le Berre, Cédric Quendo, Rose Marie Sauvage, Aude Leuliet, Thomas Merlet, Douglas Silva de Vasconcellos, Virginie Grimal, Damien Valente, et al.

► **To cite this version:**

Corentin Le Lez, Rozenn Allanic, Denis Le Berre, Cédric Quendo, Rose Marie Sauvage, et al.. Filtre Passe-Bande Intégrant un Atténuateur à Haute Dynamique sur Substrat Semiconducteur. Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Antibes Juan les Pins, France. hal-04636551

HAL Id: hal-04636551

<https://hal.science/hal-04636551v1>

Submitted on 5 Jul 2024

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.

Filtre Passe-Bande Intégrant un Atténuateur à Haute Dynamique sur Substrat Semiconducteur

Corentin Le Lez¹, Rozenn Allanic¹, Denis Le Berre¹, Cédric Quendo¹, Rose-Marie Sauvage², Aude Leuliet³, Thomas Merlet³, Douglas Silva de Vasconcellos⁴, Virginie Grimal⁴, Damien Valente⁴, Jérôme Billoué⁴

¹ Lab-STICC, Université de Bretagne Occidentale, 6 Avenue Le Gorgeu, 29200 Brest

² Direction Générale de l'Armement, 60 Boulevard du Général Martial Valin, 75509 Paris

³ Thales LAS, 2 Avenue Gay Lussac, 78990 Elancourt

⁴ GREMAN, Université de Tours, 20 Avenue Monge, 27200 Tours

corentin.lelez@univ-brest.fr

Résumé – Dans cet article, un filtre passe-bande en bande X intégrant une fonction d'atténuation est présenté. La forte réjection de l'atténuateur à commande analogique est obtenue grâce à des diodes intégrées dans un substrat silicium. Ces diodes, i.e. jonctions N^+PP^+ , intégrées réalisent les éléments résistifs accordables. Un premier filtre à 6 diodes intégrées présente des pertes d'insertion de 2,8 dB et une dynamique d'atténuation de 42 dB. Ce filtre permet un contrôle précis sur la puissance transmise par le dispositif dans un contexte de forte intégration. Une variante de ce filtre n'utilisant que 2 diodes est présentée afin de proposer des pistes d'adaptation de la topologie aux besoins spécifiques du concepteur. Une amélioration de la précision de simulation est proposée grâce à des rétro-simulations couplant physique des semi-conducteurs et électromagnétisme.

1. Introduction

La maîtrise de la puissance au cours d'une chaîne de transmission-réception est cruciale dans diverses applications tels que les systèmes RADAR, par exemple. En effet, les équipements de détection possèdent une plage de sensibilité optimale limitée alors que la puissance reçue par l'antenne peut varier de plusieurs ordres de grandeur. De tels systèmes intègrent couramment des filtres passe-bande pour le traitement analogique du signal.

Généralement, les filtres passe-bande et les atténuateurs sont conçus séparément puis assemblés en cascade. En concevant un dispositif intégrant les deux fonctions, le concepteur gagne en encombrement et en pertes d'insertion liées aux interconnexions supprimées en réduisant le nombre de composants distincts nécessaires. Une telle approche a déjà été explorée dans [1]-[3], offrant une variété de compromis entre intégrabilité, performance de filtrage et dynamique d'atténuation.

Les diodes distribuées se sont avérées être des éléments d'accord flexibles et performants pour diverses applications comme des filtres [4], des switches [5] ou encore des antennes [6]. Leur utilisation tire parti de la surface relativement grande du filtre pour dissiper l'énergie dans un volume plus important qu'une diode reportée, tout en rendant possible la fabrication du filtre dans un procédé type CMOS. De plus, les performances

électriques de ces diodes permettent une montée en fréquence sans effets parasites liés aux composants reportés apportant une grande flexibilité de conception.

La section 2 expose la méthodologie de conception du dispositif ainsi que les simulations, puis la section 3 présente les résultats expérimentaux ainsi que plusieurs éléments de discussion.

2. Co-conception du filtre-atténuateur

2.a. Topologie

La bande passante a été choisie autour de 10% pour permettre un filtrage efficace tout en modérant les pertes liées au facteur de qualité des filtres planaires sur semi-conducteurs en bande X. Une vue de principe du dispositif est présentée sur la Figure 1.

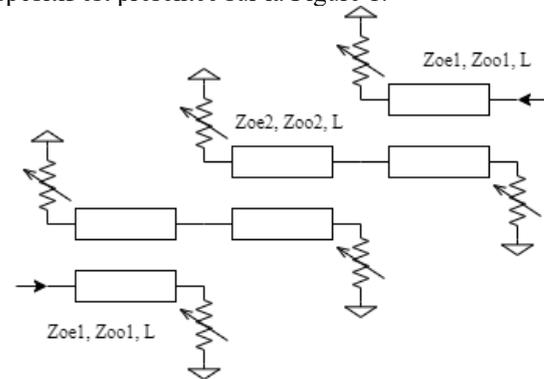


Figure 1. Vue de principe du dispositif

La topologie utilisée est basée sur un filtre passe bande à lignes couplées quart d'onde en terminaisons circuit ouvert d'ordre 2. L'objectif est de concevoir un filtre passe-bande planaire à bande étroite avec de nombreuses terminaisons réfléchissantes sur lesquelles seront placées des éléments absorbants aux maximums de champ électrique. Chaque ligne étant chargée par une résistance accordable à chaque extrémité, leur fréquence de résonance ne change pas au cours de la dynamique d'atténuation.

2.b. Implémentation des diodes intégrées

Dans cet article, une approche de co-conception basée sur des diodes intégrées dans un substrat silicium permet

de créer des résistances accordables intégrées commandées en tension (Figure 2). Ces diodes intégrées sont réalisées à partir de jonctions N⁺PP⁺. Le fait d'appliquer une tension de polarisation directe entre la zone dopée N⁺ en face avant et le plan de masse réduit progressivement la résistivité du canal, ce qui permet un contrôle analogique simple et précis de l'absorption de l'atténuateur.

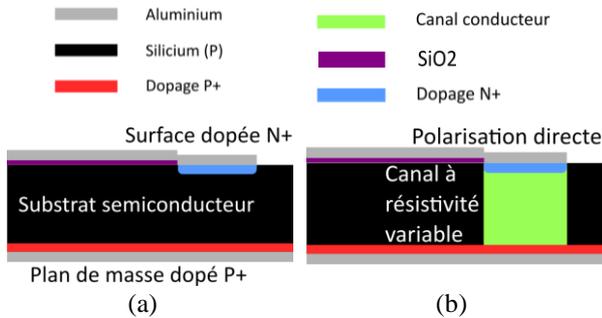


Figure 2. Diodes parallèles intégrées dans leurs états (a) circuit ouvert et (b) résistif

2.c. Résultats de simulation

Les dimensions du dispositif sont présentées sur la Figure 3 et sur le Tableau 1. Une résistivité variable dans le canal est utilisée pour modéliser l'influence de la résistance accordable sur les pertes d'insertion, comme le montre la Figure 4. Le facteur de perte $\tan \delta$ du substrat entre les zones dopées et le plan de masse est calculé en fonction de la résistivité ρ à l'aide de (1). À 10 GHz et pour $\rho = 2500 \Omega \cdot \text{cm}$, $\tan \delta$ est égal à $8,8e-2$.

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

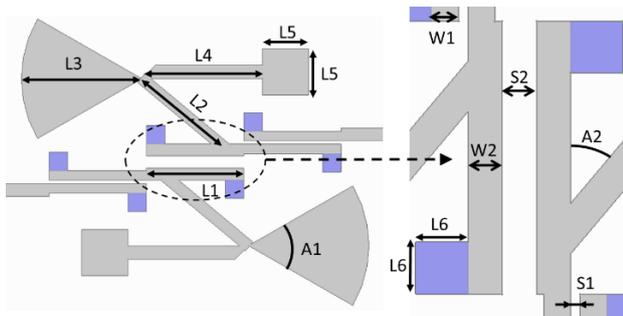


Figure 3. Vue d'ensemble du dispositif, les surfaces dopées N⁺ sont surlignées en bleu

L1	L2	L3	L4	L5	L6
2100	2600	2600	2600	1000	400
W1	W2	S1	S2	A1	A2
208	262	72	264	60°	50°

Table 1. Dimensions du dispositif en μm

Les simulations électromagnétiques effectuées sous HFSS montrent une fréquence centrale de 10,6 GHz, avec une bande passante fractionnelle de 12 % et des pertes d'insertion de 1,3 dB. En diminuant progressivement la résistivité du canal entre les zones dopées, l'absorption peut atteindre 29 dB, ce qui permet un contrôle efficace de la puissance transmise tout en maintenant les niveaux de pertes d'insertion en dessous de -10 dB. En diminuant

encore la résistivité, la résistance des zones dopées distribuées devient inférieure à la charge adaptée et la réflexion augmente à mesure que la résistance se rapproche d'un court-circuit, réduisant l'efficacité de l'atténuation. Les diodes sont polarisées grâce aux accès RF pour les deux diodes extérieures et grâce à des plots de polarisation DC, des stubs radiaux d'isolation et une source DC externe pour les quatre autres diodes. Les six diodes sont alimentées en même temps pour permettre à toutes les diodes de commuter simultanément.

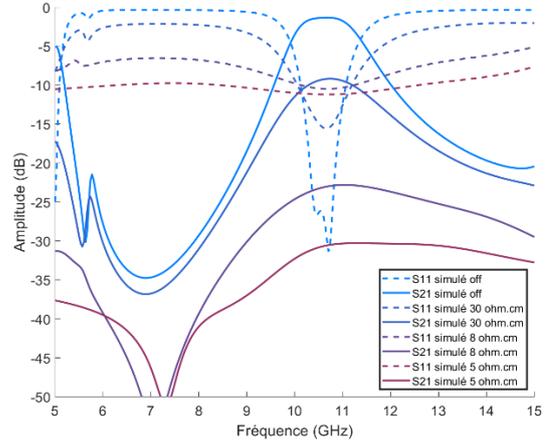


Figure 4. Réponse en paramètres S pour différentes résistivités de canal

2.d. Variante à 2 jonctions

Un filtre possédant des diodes intégrées uniquement sur sa section centrale a également été conçu afin d'améliorer l'intégrabilité et de simplifier la connectique avec les composants autour du filtre (Figure 5). De plus, réduire le nombre de diodes réduit la puissance DC totale nécessaire à leur polarisation. La Table 2 résume ses dimensions en suivant la nomenclature de la Figure 3.

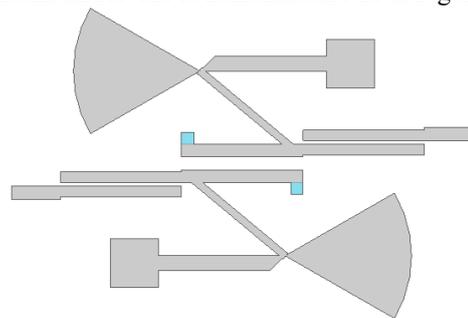


Figure 5. Vue d'ensemble du dispositif à 2 diodes, les surfaces dopées N⁺ sont surlignées en bleu

L1	L2	L3	L4	L5	L6
2100	2500	2500	2600	1000	250
W1	W2	S1	S2	A1	A2
220	256	80	264	60°	50°

Table 2. Dimensions du dispositif à 2 diodes en μm

La réponse en paramètres S simulée est présentée sur la Figure 6. Dans la bande passante du filtre, les performances en transmission sont similaires entre les deux topologies, mais la réjection en basse fréquence et l'adaptation sont moins bien conservées avec deux diodes par rapport au filtre précédent à six diodes.

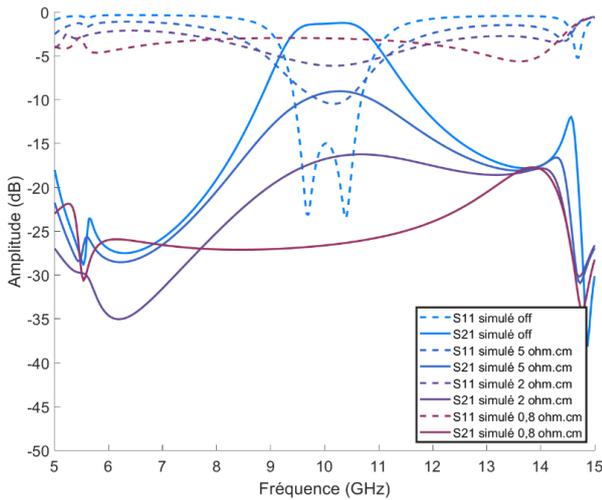


Figure 6. Réponse en paramètres S du dispositif à 2 diodes pour différentes résistivités de canal

3. Résultats de mesure

Les dispositifs ont été fabriqués au laboratoire GREMAN à Tours, sur un wafer de silicium de type P haute résistivité ($\rho = 2500 \Omega \cdot \text{cm}$) et de $350 \mu\text{m}$ d'épaisseur. Le procédé de fabrication présente une faible complexité pour créer les éléments actifs ; seuls deux masques sont nécessaires pour la photolithographie, un pour les zones dopées et un pour la couche métallique, ce qui réduit le temps et le coût de fabrication. Le dispositif a ensuite été mesuré à l'aide d'une station sous pointes et d'un analyseur de réseau vectoriel R&S® ZVA 67.

3.a. Filtre à 6 diodes

Le dispositif fabriqué et les performances mesurées sont présentés Figure 7. La Figure 8 présente quant à elle les paramètres S en transmission. Les pertes d'insertion mesurées à 2,8 dB dépassent le niveau attendu mais la fréquence centrale, la bande passante et les pertes par réflexion sont proches des résultats simulés. Toutefois, les mesures de la Figure 8 montrent que dans des conditions de polarisation élevée la plage d'atténuation s'étend jusqu'à 42 dB contre 29 dB en simulation.

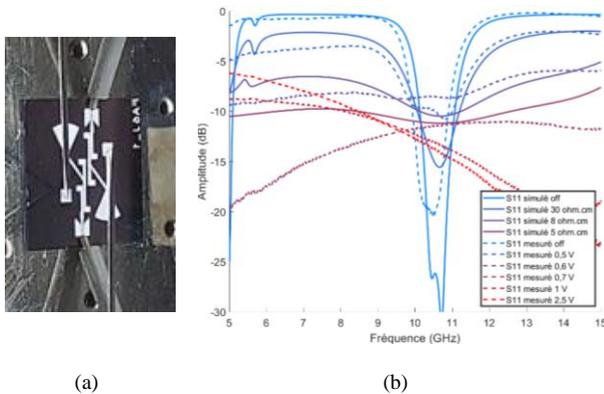


Figure 7. (a) Photographie du filtre. (b) Performance S11 simulée (trait plein) et mesurée (pointillés) lors de la commutation progressive des diodes.

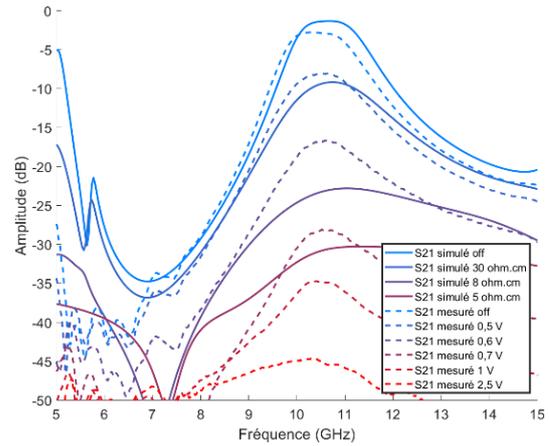


Figure 8. Réponse S21 simulée (trait plein) et mesurée (pointillés)

3.b. Filtre à 2 diodes

Les performances en paramètres S mesurées du filtre à 2 diodes sont présentées Figures 9 et 10 et comparées aux résultats de simulation. De manière similaire au filtre à 6 diodes, l'atténuation maximale est étendue jusqu'à 37 dB. Il est aussi constaté que le S11 redescend après avoir atteint un maximum à -5 dB contrairement aux simulations.

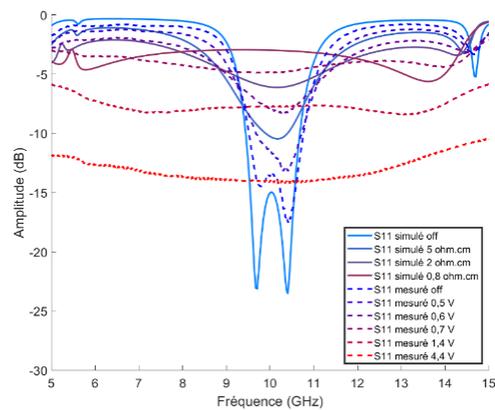


Figure 9. Performance S11 simulée (trait plein) et mesurée (pointillé) lors de la commutation progressive des diodes.

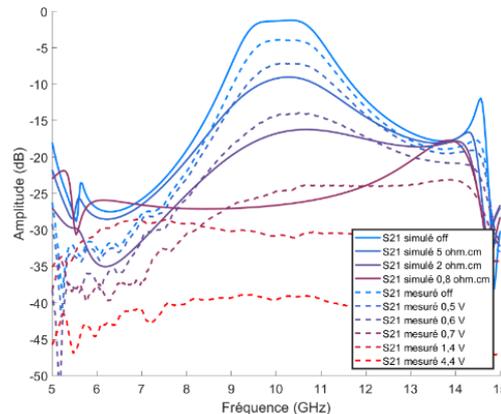


Figure 10. Performance S21 simulée (trait plein) et mesurée (pointillé) lors de la commutation progressive des diodes.

Afin de comparer les performances en termes d'efficacité des deux dispositifs, l'atténuation en fonction de la puissance DC appliquée est présentée sur la Figure 11. A faible puissance (< 10 mW), le filtre à 2 diodes permet de réaliser une atténuation efficace à puissance DC plus faible par rapport au filtre à 6 diodes. Pour une atténuation équivalente, sa consommation DC est 5 à 10 fois plus faible. Cependant le phénomène s'inverse à forte polarisation (> 100 mW) et le filtre à 6 diodes devient plus efficace à atténuation constante. Il convient donc au concepteur de choisir la topologie la plus pertinente à son cas d'application.

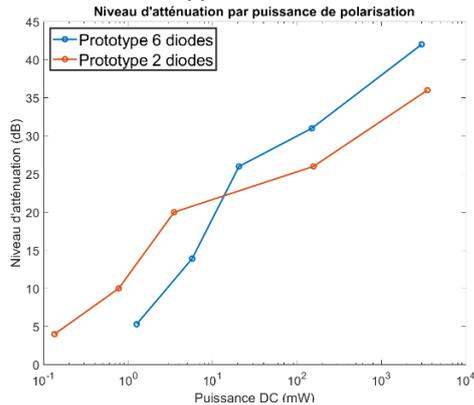


Figure 11. Niveau d'atténuation selon la puissance de polarisation pour chaque filtre

4. Discussion

L'écart entre les performances simulées et mesurées peut s'expliquer par le fait que les canaux des diodes ont été simulés comme un volume constant et homogène, dont seule la résistivité varie avec la tension de polarisation. Les diodes modélisées sur un simulateur de physique des semi-conducteurs tel que COMSOL Multiphysics présentent des variations spatiales de résistivité, comme le montre la Figure 12 (a). En couplant le module semi-conducteur et le module RF, on obtient les résultats présentés à la Figure 12 (b). Cette approche améliore considérablement l'estimation de la plage d'atténuation.

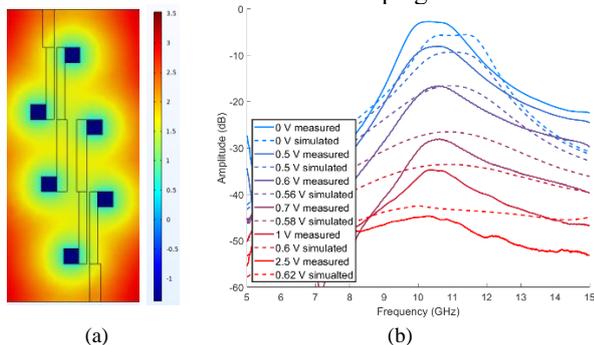


Figure 12. (a) Résistivité en surface du substrat en $\Omega.cm$ pour $U=0,7$ V, échelle logarithmique. (b) Réponse S_{21} mesurée (trait plein) et rétro-simulée sur COMSOL (trait pointillé) pour plusieurs états

Néanmoins, nous pouvons conclure que les variations volumiques en 3 dimensions du champ de résistivité permettent d'expliquer l'extension de la plage d'atténuation au-delà de 29 dB attendus en utilisant un modèle homogène sur HFSS, jusqu'à 42 dB tel que

mesuré. Le tableau 3 résume les principales performances par rapport à d'autres filtres-atténuateurs.

Référence	Fréquence (GHz)	Bande passante (%)	Dynamique (dB)	Pertes min. (dB)
[1]	44	36	8	4,4 – 5,9
[2]	2 – 3	15	6	1,5 – 1,7
[3]	2,4	17	27	3,8
6 Diodes	10,6	12	42	2,8
2 Diodes	10,6	12	37	3,1

Table 3. Comparaison avec des dispositifs similaires

5. Conclusion

Un filtre passe-bande intégrant une fonction d'atténuation à forte dynamique a été présenté à travers sa conception, simulation, mesure et rétro-simulation. Le dispositif présente des caractéristiques compétitives en termes de fréquence de fonctionnement, de performances de filtrage et de dynamique d'atténuation, tout en utilisant un processus de fabrication intégré de faible complexité permettant une grande souplesse de conception.

6. Remerciements

Les auteurs remercient TECHYP, la plateforme HPC du Lab-STICC pour l'accès aux ressources de simulation. Ces travaux ont été partiellement soutenus par la plateforme technologique CERTeM, l'Union Européenne à travers le fond de développement régional Européens (ERDF), le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche et la région Bretagne à travers le projet CPER SOPHIE / STIC & Ondes. Ces travaux ont été partiellement financés par l'AID dans le cadre du programme de thèse CIFRE Défense.

Références

- [1] J. Bae et C. Nguyen, "A 44 GHz CMOS RFIC Dual-Function Attenuator with Band-Pass-Filter Response," dans *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, no. 4, pp. 241-243, Avril 2015.
- [2] C. Fan, B. Wu et S. Sun, "Controllable Design of Filtering Attenuators Based on Graphene Integrated Dual-Mode Microstrip Resonator," *IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology*, 2021, pp. 833-835
- [3] B. Pal, M. K. Mandal, M. Kahar et S. Dwari, "Filtering Attenuator with Electronically Tunable Attenuation," *IEEE MTT-S Int. Microw. and RF Conf.*, 2021, pp. 1-4
- [4] R. Allanic *et al.*, "Frequency Reconfigurable Interdigital Filter Using Semi-conductor Distributed Doped Areas," *IEEE Asia-Pacific Microw. Conf.*, 2019, pp. 974-976
- [5] R. Allanic *et al.*, "A Novel 5-GHz SPDT Switch Using Semiconductor Distributed Doped Areas," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 4, pp. 421-424, Avril 2020,
- [6] R. Allanic *et al.*, "A Fully Integrated Frequency Reconfigurable Antenna Co-Designed as a Whole Circuit on Silicon," in *Asia-Pacific Microw. Conf.*, 2018, pp. 1256-1258