



Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of some Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author's version published in: <https://oatao.univ-toulouse.fr/17802>

To cite this version :

Laquerbe, Vincent and Pascaud, Romain and Callegari, Thierry and Liard, Laurent and Pascal, Olivier Modélisation et caractérisation expérimentale d'un résonateur microruban reconfigurable en fréquence par décharge plasma. (2017) In: 20ème Journées Nationales Microondes, JNM 2017, 16 May 2017 - 19 May 2017 (Saint-Malo, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator:

tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Modélisation et caractérisation expérimentale d'un résonateur microruban reconfigurable en fréquence par décharge plasma

V. Laquerbe¹, R. Pascaud¹, T. Callegari², L. Liard², O. Pascal²

¹Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-SUPAERO), Université de Toulouse, 31055 TOULOUSE Cedex 4

² Université de Toulouse, CNRS, UPS, INP, LAPLACE, Toulouse, France.
vincent.laquerbe@isae.fr

Résumé — Dans ce papier, la reconfigurabilité en fréquence d'un résonateur microruban par décharge plasma est démontrée. Des simulations plasma (prenant en compte la dynamique des fluides, l'électrostatique, etc.) sont considérées afin d'intégrer un modèle de plasma réaliste dans les simulations électromagnétiques du résonateur. Les résultats de simulation sont cohérents avec la mesure et rendent prometteur cette technique d'intégration de plasma volumique dans des circuits microondes.

1. Introduction

La recherche de compacité et de simplicité dans les systèmes de communications favorise l'émergence de nouvelles solutions reconfigurables permettant un fonctionnement multibandes. D'un point de vue pratique, l'agilité en fréquence peut être réalisée à l'aide d'éléments localisés (diodes PIN, varactors, etc.) ou l'utilisation de matériaux reconfigurables (cristaux liquides, ferroélectriques, etc.) [1].

Parmi les nouvelles technologies étudiées, le plasma possède des caractéristiques intéressantes [2]. En effet, il s'agit d'un milieu dispersif dont la permittivité diélectrique relative peut prendre des valeurs inférieures à 1. Contrairement à ce qui est proposé dans [3] où le plasma est considéré comme un élément localisé, nous suggérons d'implémenter un plasma volumique dans un résonateur microruban pour contrôler sa fréquence de résonance.

Dans ce papier, nous présentons en premier lieu une modélisation originale couplant des outils de simulation plasma et électromagnétique pour la simulation de ce problème multi-physiques [4]. Les résultats numériques sont ensuite confrontés à des mesures réalisées sur un prototype pour différentes pressions et gaz [5].

2. Principe théorique

Un plasma est un milieu neutre dans lequel interagissent des particules chargées (électrons et ions) et des particules neutres. Dans notre application, nous considérons des plasmas non-magnétisés froids et hors équilibre thermodynamique. La permittivité relative de ces plasmas est généralement représentée par le modèle de Drude [6] :

$$\varepsilon_p(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu)}, \quad \omega_p^2 = \frac{e^2 n_e}{m_e \varepsilon_0} \quad (1)$$

où ν , ω_p , e , n_e , m_e et ε_0 sont respectivement la fréquence de collision (pertes), la fréquence angulaire du plasma, la charge électrique élémentaire, la densité électronique, la masse de l'électron et la permittivité du vide.

Le contrôle de la densité électronique n_e permet donc de modifier ε_p et ainsi d'obtenir, par exemple, des constantes diélectriques comprises entre 0 et 1. L'idée proposée ici est de générer puis contrôler un plasma dans la cavité d'un résonateur microruban afin de modifier sa fréquence de résonance.

3. Description du dispositif

La Figure 1 présente le système complet composé de deux lignes microruban 50 Ω imprimées sur un substrat d'une épaisseur de 813 μm et de constante diélectrique 3.55. Les deux lignes sont montées en série avec un résonateur circulaire de rayon $r = 10$ mm. Afin d'optimiser l'allumage du plasma, la cavité plasma a été agrandie et une troisième électrode, qui fait office de cathode, a été ajoutée au circuit. La tension DC est appliquée entre le patch circulaire et la cathode de la partie inférieure. Une décharge est ainsi générée dans la cavité plasma ($h_{\text{cavité}} = 10$ mm) puis diffuse à l'intérieur de la cavité microonde au travers du plan de masse par une grille de trous usinée à cet effet. Enfin, deux fentes ont été ajoutées au résonateur afin de réduire sa fréquence propre à vide, ce

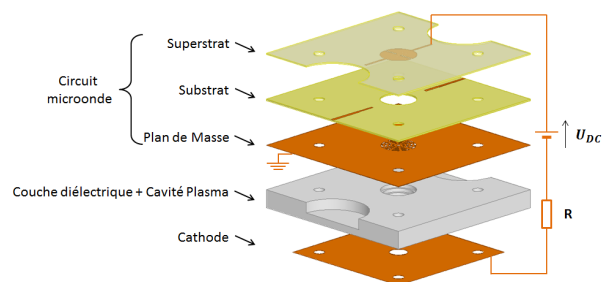


Figure 1. Vue éclatée du système complet constitué du circuit microonde et de la géométrie additionnelle permettant l'allumage du plasma.

qui permettra en théorie, et d'après l'équation (1), d'élargir la plage de valeur prise par la permittivité relative au sein du plasma, et donc d'augmenter l'agilité en fréquence du résonateur.

Ce système est ensuite placé dans une enceinte sous vide dans laquelle on injecte un gaz à une pression contrôlée, comme le montre la Figure 2. La tension U_{DC} est apportée sur le résonateur circulaire par l'ajout d'un té de polarisation en série avec le dispositif sous test.

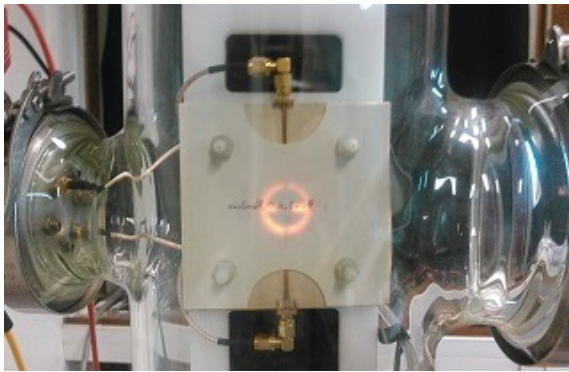


Figure 2. Vue de dessus du système complet placé sous vide lorsqu'un plasma d'argon est allumé dans la cavité plasma.

4. Modélisation numérique

Étant donné que le plasma est un milieu fortement hétérogène, sa répartition spatiale au sein de la géométrie considérée a été étudiée avec le code numérique 2D GD-Sim (*Glow Discharge SIMulation*) [7]. Ce code permet de modéliser une décharge plasma DC à plusieurs électrodes afin d'obtenir des paramètres plasmas (densité électronique, courant d'ionisation, etc.) réalistes et cohérents avec la géométrie du dispositif, le gaz et la pression considérés pour la décharge. Ces simulations ont permis d'extraire des profils de densité électronique 2D au sein de la cavité, comme présentés sur la Figure 3.

Pour chaque paramètre d'excitation (tension et courant d'ionisation fixés), on modélise ensuite le milieu plasma par 5 contours géométriques dans lesquels la densité (et donc la constante diélectrique) est supposée constante. Ces profils sont ensuite extrapolés de manière à les adapter à la cavité 3D du résonateur réel et notamment à la géométrie complexe de la grille de diffusion. Cette extrapolation permet de prendre en compte les gaines qui sont générées entre le plasma et les autres interfaces : la grille de diffusion, le résonateur et le substrat. Cette nouvelle représentation 3D est enfin importée dans le logiciel Ansys HFSS afin de simuler les paramètres S du résonateur chargé par ce plasma non uniforme.

La Figure 4 présente les contours de densité électronique obtenus en simulation 2D pour une tension d'entrée donnée, ainsi que le modèle HFSS à 5 couches associé. La discrétisation 3D a été limitée à 5 couches afin de réduire les ressources informatiques nécessaires lors de la simulation électromagnétique.

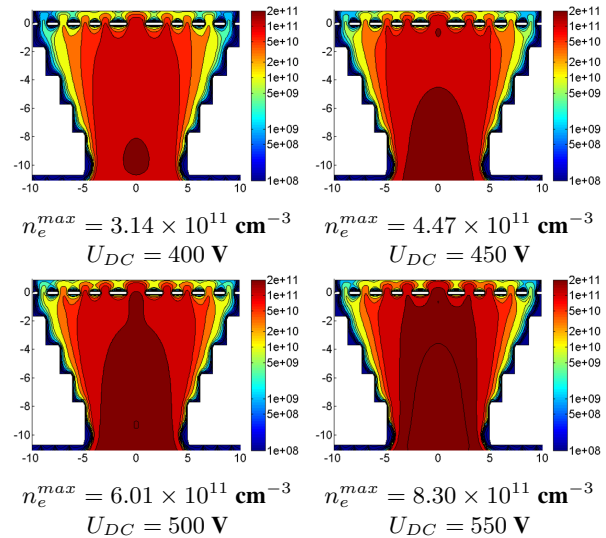


Figure 3. Densité électronique 2D simulée dans la cavité plasma et microonde pour différentes tensions.

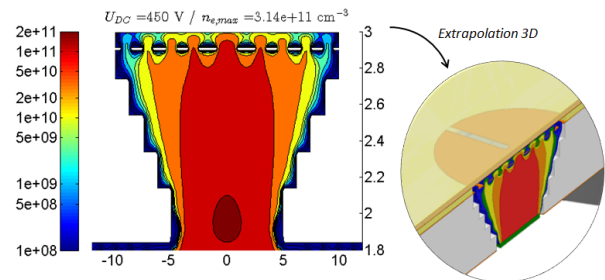


Figure 4. Cartographie 2D de densité électronique pour $U_{DC} = 400$ V et l'extrapolation 3D correspondante.

5. Résultats numériques et expérimentaux

Une première série d'expériences a été réalisée en faisant varier le courant I_{DC} dans la décharge en considérant de l'argon à 2 Torr (environ 2.67 mbar). A cette pression, la fréquence de collision est estimée à $\nu \approx 3$ GHz (valeur calculée avec BOLSIG+ [8]).

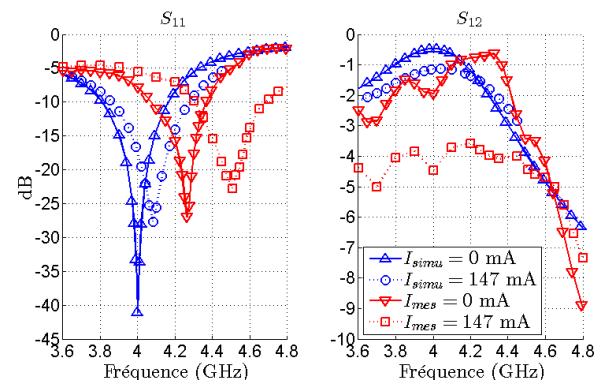


Figure 5. Paramètres S mesurés et simulés lorsque $I_{DC} = 0$ mA et $I_{DC} = 147$ mA.

La Figure 5 présente les paramètres S simulés et mesurés du système pour deux courants I_{DC} . On remarque un décalage entre la fréquence de résonance à vide (obtenue sans plasma) mesurée et simulée, principalement due aux tolérances de fabrication du prototype (alignement des cavités et valeur de la permittivité des substrats notamment).

On observe par ailleurs sur la Figure 5 que la présence du plasma dans la cavité permet d'augmenter la fréquence de résonance. Un décalage de 231 MHz, soit 5.5 %, a été observé pour un courant d'ionisation de 147 mA. Plus le courant augmente, plus la densité électronique dans la cavité augmente et donc plus le décalage en fréquence est important. Les variations du courant d'ionisation I_{DC} permettent a priori un contrôle linéaire de la fréquence de résonance. Cette dynamique est représentée sur la Figure 6 où l'on a tracé l'agilité en fréquence du résonateur en fonction du courant I_{DC} pour le prototype expérimental et pour le modèle simulé sous Ansys HFSS.

Malgré une tendance linéaire assez proche, on remarque que la simulation minimise l'agilité en fréquence du résonateur. L'extrapolation du profil 2D simulé n'étant pas immédiate à cause de la complexité de la grille de diffusion, les profils 3D considérées en simulation sous-estiment vraisemblablement la densité électronique dans la dimension orthoradiale, ce qui conduit à cet écart entre la simulation et la mesure.

6. Etude de l'influence du gaz

Plusieurs décharges ont également été étudiées expérimentalement dans de l'argon et du néon, pour différentes pressions. Les Figures 7 et 8 présentent l'agilité en fréquence et les pertes d'insertion relatives (c'est-à-dire normalisé au cas sans plasma) en fonction du courant dans la décharge.

L'agilité en fréquence varie linéairement avec le courant I_{DC} ce qui permet une reconfigurabilité directe du résonateur. En fonction du gaz et de la pression considérés, l'agilité diffère néanmoins. De la même manière, les pertes d'insertion relatives augmentent de manière linéaire avec I_{DC} .

Dans l'argon, augmenter la pression conduit en théorie à une augmentation de la densité électronique, et donc de l'agilité en fréquence, alors que la mesure produit l'effet inverse. Cela peut s'expliquer par le phénomène de diffusion à travers la grille qui n'est pas le même lorsque la

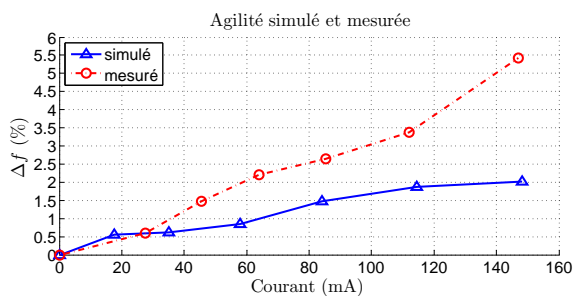


Figure 6. Agilité en fréquence mesurée et simulée en fonction du courant.

pression change. En particulier, à $P = 5$ Torr, il a été observé expérimentalement que la décharge ne parvient pas à diffuser à travers tous les trous de la grille, ce qui explique au final une densité moyenne dans la cavité microonde plus faible, mais une pression plus élevée. Ce phénomène explique par ailleurs la similitude entre les différentes pertes d'insertion mesurées. Malgré un plus forte pression, la densité est moins importante et donc le plasma génère moins de pertes.

Toutefois, à 5 Torr, le plasma à base de néon produit un meilleur décalage en fréquence du fait de la diffusion plus efficace de la décharge. La densité électronique dans la cavité est plus grande et l'agilité en fréquence aussi. De plus, comme le néon génère moins de perte que l'argon à ces pressions [6], les pertes d'insertion ne sont pas plus importantes que dans l'argon.

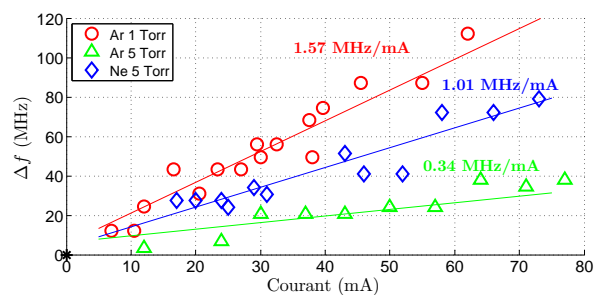


Figure 7. Agilités en fréquence mesurées pour différentes valeurs de courant I_{DC} et de pression dans l'argon et le néon.

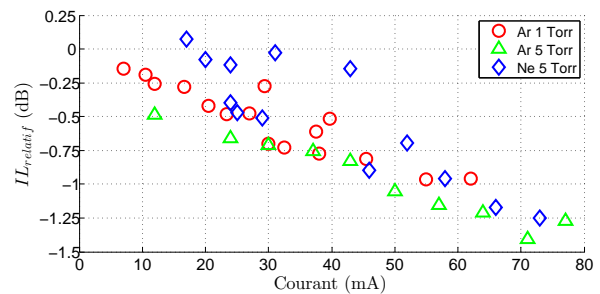


Figure 8. Pertes d'insertion relatives mesurées pour différentes valeurs de courant I_{DC} et de pression dans l'argon et le néon.

Afin de mieux comparer les performances de chaque gaz, il est plus pratique de normaliser l'agilité en fréquence obtenue par les pertes qu'elle génère. On définit ainsi un facteur de mérite (FdM) propre à chaque configuration (pression et type de gaz).

Le Tableau 1 présente le facteur de mérite obtenu pour les mesures des Figures 7 et 8. L'argon à 1 Torr apparaît être la meilleure solution. Lorsque la pression augmente, ses performances diminuent grandement et le néon a un facteur de mérite deux fois plus grand. Il serait intéressant de considérer le cas du néon à 1 Torr mais aucune décharge n'a été allumée à cette pression pour des tensions

inférieures à 600 V, qui est la limite du té de polarisation utilisé dans le montage expérimental.

	Agilité (MHz/mA)	$IL_{relative}$ (dB/mA)	FdM (MHz/dB)
Ar 1 Torr	1.57	-0.015	106
Ar 5 Torr	0.34	-0.011	30
Ne 5 Torr	1.01	-0.017	61

Tableau 1. Performances du résonateur à plasma pour différents gaz et pression.

Enfin, des simulations numériques à l'aide du logiciel commercial Ansys HFSS ont permis d'estimer les densités moyennes $\langle n_e \rangle$ à l'intérieur de la cavité microonde qu'il aurait été nécessaire d'avoir pour générer un décalage en fréquence donné. La Figure 9 représente les valeurs de $\langle n_e \rangle$ obtenues pour les trois cas précédents. Les densités moyennes estimées sont cohérentes avec ce qui est normalement atteint avec des plasmas DC.

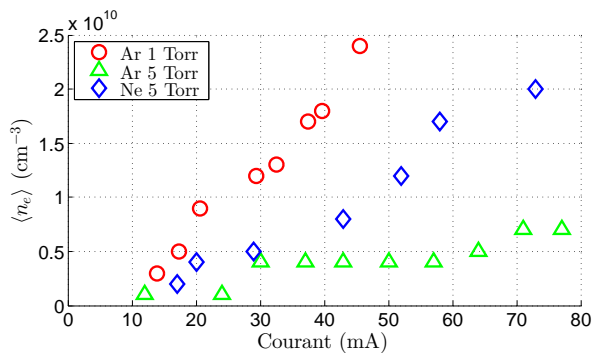


Figure 9. Estimation du $\langle n_e \rangle$ dans la cavité requis pour obtenir le même décalage en fréquence, d'après les simulations électromagnétiques.

Néanmoins, si $\langle n_e \rangle$ augmente, alors l'agilité en fréquence devient plus large. Dans ce contexte, d'autres types de décharges plasma pourraient permettre d'obtenir des densités plus grandes. Les plasmas RF ou pulsés seraient dans cette optique une alternative intéressante pour générer des décharges à 1 Torr dans le néon, ce qui devrait permettre d'atteindre des valeurs de FdM plus importantes.

7. Conclusion

Un concept innovant de résonateur microonde par cavité plasma reconfigurable a été proposé. L'intégration d'une décharge plasma dans cette cavité permet de modifier la constante diélectrique du gaz et autorise ainsi l'agilité en fréquence. Des études plasma 2D ont permis de modéliser l'hétérogénéité du plasma dans ces configurations (densité électronique non uniforme, présence de gaine aux parois, etc.). Les simulations électromagnétiques intégrant

ces modélisations réalistes sont cohérentes avec la mesure et confirment la capacité de cette solution à modifier la fréquence de résonance de résonateurs microruban à plasma.

L'étude expérimentale de l'influence du gaz utilisé pour la décharge et de sa pression a mis en évidence des comportements spécifiques permettant de générer une agilité en fréquence de plusieurs %. L'estimation de la densité électronique moyenne dans la cavité microonde laisse supposer que cette technique peut être améliorée en utilisant des décharges plasma à plus fortes densités électroniques, ce qui est par exemple le cas pour des sources RF ou microondes.

8. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la DGA pour son soutien financier ainsi que O. Pigaglio et son équipe pour la fabrication des circuits.

Références

- [1] A. Petosa, "An overview of tuning techniques for frequency-agile antennas," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 271–296, Oct 2012.
- [2] J. Sokoloff, O. Pascal, T. Callegari, R. Pascaud, F. Pizarro, L. Liard, J. Lo, and A. Kallel, "Non-thermal plasma potentialities for microwave device reconfigurability," *Comp. Rendus Phys.*, vol. 15, no. 5, pp. 468–478, May 2014.
- [3] A. Semnani, D. Peroulis, and S. O. Macheret, "Plasma-enabled tuning of a resonant rf circuit," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 44, no. 8, pp. 1396–1404, Aug 2016.
- [4] V. Laquerbe, R. Pascaud, T. Callegari, L. Liard, and O. Pascal, "Modeling and experimental measurements of a tunable microstrip resonator using plasma discharges," in *IEEE Int. Microw. Symp.*, Jun. 2017.
- [5] —, "Frequency-agile microstrip resonator using dc plasma discharge," *Electron. Lett.*, vol. 53, no. 6, pp. 415–417, Mar. 2017.
- [6] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. John Wiley and Sons, 2005.
- [7] J. P. Boeuf and L. C. Pitchford, "Two-dimensional model of a capacitively coupled rf discharge and comparisons with experiments in the gaseous electronics conference reference reactor," *Phys. Rev. E*, vol. 51, 1995.
- [8] G. J. M. Hagelaar and L. C. Pitchford, "Solving the boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models," *Plasma Sources Science Technology*, vol. 14, no. 4, pp. 722–733, 2005.