



HAL
open science

Antenne imprimée reconfigurable en fréquence par décharge plasma

Romain Pascaud, Francisco Pizarro, Thierry Callegari, Laurent Liard, Olivier
Pascal, Olivier Pigaglio

► **To cite this version:**

Romain Pascaud, Francisco Pizarro, Thierry Callegari, Laurent Liard, Olivier Pascal, et al.. Antenne imprimée reconfigurable en fréquence par décharge plasma. 19ème Journées Nationales Microondes, JNM 2015, Jun 2015, Bordeaux, France. pp.1-4. hal-04103273

HAL Id: hal-04103273

<https://hal.science/hal-04103273>

Submitted on 23 May 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.



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

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID : 14001

To cite this version : Pascaud, Romain and Pizarro, Francisco and Callegari, Thierry and Liard, Laurent and Pascal, Olivier and Pigaglio, Olivier [Antenne imprimée reconfigurable en fréquence par décharge plasma](#). (2015)
In: 19ème Journées Nationales Microondes, JNM 2015, 2 June 2015 - 5 June 2015 (Bordeaux, France)

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Antenne imprimée reconfigurable en fréquence par décharge plasma

Romain Pascaud¹, Francisco Pizarro², Thierry Callegari³, Laurent Liard³, Olivier Pascal³, Olivier Pigaglio³

¹ISAE-DEOS, Université de Toulouse, 10 avenue Edouard Belin, BP54032, 31055 Toulouse Cedex 4, France

²Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Valparaíso, Chili

³LAPLACE, UPS, INPT, Université de Toulouse, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 9, France
romain.pascaud@isae.fr

Résumé

Un nouveau concept d'antenne imprimée reconfigurable en fréquence est présenté. Il repose sur l'utilisation d'un plasma froid non magnétisé dans une cavité créée entre le plan de masse et le conducteur principal d'une antenne imprimée. Le contrôle de la permittivité diélectrique de ce milieu plasma par la puissance électrique qui lui est injectée permet le changement de la fréquence de résonance de l'antenne.

1. Introduction

Les concepts d'antennes reconfigurables en fréquence représentent des solutions particulièrement intéressantes pour faire face à la multiplication des standards utilisés dans les terminaux de communication. Ces antennes intègrent généralement des éléments localisés actifs (e.g. diodes PIN, MEMS RF, ...) ou des matériaux reconfigurables (e.g. ferrites, cristaux liquides, ...) pour permettre le contrôle de leur bande-passante instantanée [1]. Néanmoins, la plupart de ces solutions ne sont pas applicables lorsque les puissances micro-ondes en jeu sont trop importantes. Pour remédier à ce problème, l'utilisation de décharges plasma est aujourd'hui envisagée pour la reconfigurabilité dans le domaine des micro-ondes [2, 3].

Un plasma est un gaz ionisé, macroscopiquement neutre, dont la permittivité diélectrique est complexe et fonction de la fréquence [4]. En pratique, la permittivité du milieu plasma peut être modifiée en contrôlant certains paramètres associés à la création de la décharge plasma (i.e., type de gaz, pression du gaz, puissance injectée à la décharge, ...). Ainsi, lorsque la décharge plasma est éteinte, le milieu gazeux se comporte du point de vue électromagnétique comme du vide. En revanche, lorsque la décharge plasma est allumée, elle peut, sous certaines conditions, se comporter comme un milieu diélectrique dont la constante diélectrique est négative (i.e., un conducteur électrique), nulle ou comprise entre 0 et 1.

Les solutions d'antennes reconfigurables à base de plasma rencontrées dans la littérature utilisent principalement des décharges confinées dans des longs tubes en verre pour modifier la fréquence de résonance ou le diagramme de rayonnement d'antennes filaires dans les bandes VHF ou UHF [5]. Dans ce cas, ce sont les pro-

priétés conductrices du plasma qui sont mises à profit pour créer par exemple des éléments réflecteurs contrôlables au voisinage d'une antenne monopole [6]. Quelques travaux ont aussi utilisé le comportement purement diélectrique du plasma, et plus particulièrement le contrôle de son gradient de permittivité dans des enceintes de grandes dimensions, que ce soit pour la réalisation d'antennes lentilles à gradient d'indice [7] ou d'antennes à ondes de surface [8].

Dans cette communication, le premier concept d'antenne imprimée reconfigurable en fréquence utilisant les propriétés diélectriques d'un plasma est proposé.

2. Modèle électromagnétique d'un plasma

D'un point de vue électromagnétique, un plasma froid non magnétisé peut être modélisé comme un milieu diélectrique dont la permittivité complexe relative suit le modèle de Drude [5] :

$$\begin{aligned}\epsilon_p &= \epsilon_r(1 - j \tan \delta) \\ &= \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_p^2}\right) \left(1 - j \frac{\nu_p}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_p^2 - \omega_p^2}\right)\end{aligned}\quad (1)$$

où ω représente la pulsation de l'onde électromagnétique interagissant avec le plasma et ν_p la fréquence de collision qui dépend principalement du type de gaz et de sa pression. La pulsation plasma ω_p est définie comme :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}\quad (2)$$

avec n_e la densité électronique du plasma, e la charge de l'électron, ϵ_0 la permittivité diélectrique du vide et m_e la masse de l'électron.

D'après l'équation (1), on observe que la constante diélectrique ϵ_r du plasma peut être négative, nulle ou comprise entre 0 et 1 selon les paramètres du plasma (i.e., ω_p et ν_p) et la pulsation ω de l'onde électromagnétique qui interagit avec celui-ci. De plus, cette constante diélectrique peut être modifiée en contrôlant la densité électronique n_e du plasma comme le suggère l'équation (2). En pratique, ceci est rendu possible par le contrôle de la puissance électrique communiquée à la décharge.

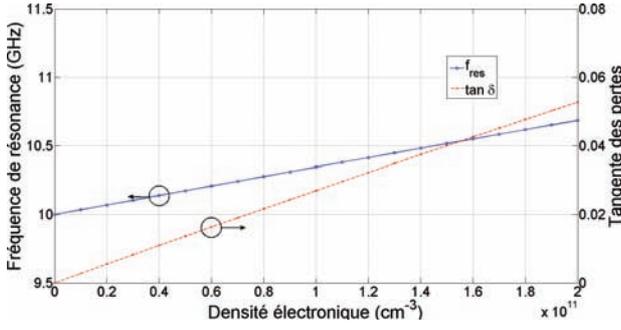


Figure 1. Fréquence de résonance du mode TM_{10} de la cavité remplie d'un milieu plasma homogène en fonction de la densité électronique ($\nu_p \simeq 25 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$).

3. Analyse modale de l'antenne

3.a. Modèle de la cavité

Dans un premier temps, le modèle de la cavité est utilisé pour appréhender le comportement d'une antenne imprimée chargée par un plasma. Ce modèle permet de déterminer entre autres les fréquences de résonance de l'antenne [9]. Il consiste à représenter cette dernière comme une cavité remplie d'un milieu diélectrique et fermée par deux conditions de conducteurs électriques parfaits sur les faces inférieure et supérieure et par des conditions de conducteurs magnétiques parfaits pour les faces latérales. Dans notre cas, la cavité considérée est rectangulaire et remplie d'un plasma. La pulsation de résonance ω_{res} du mode fondamental de l'antenne, à savoir le mode TM_{10} , est alors donnée par :

$$\omega_{res} = \frac{c\pi}{L\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c\pi}{L\sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_{res}^2 + \nu_p^2}}} \quad (3)$$

En faisant l'hypothèse que le plasma généré présente une constante diélectrique comprise entre 0 et 1 pour les pulsations ω considérées, on obtient l'équation suivante :

$$\omega_{res}^4 + \left(\nu_p^2 - \omega_p^2 - \frac{c^2\pi^2}{L^2}\right)\omega_{res}^2 - \left(\frac{c\pi\nu_p}{L}\right)^2 = 0 \quad (4)$$

qui possède quatre solutions dont une seule est purement réelle et positive. Cette solution représente la pulsation de résonance ω_{res} de la cavité chargée par le milieu plasma.

3.b. Résultats de l'analyse modale

Pour la suite de cette étude, on considère une décharge plasma générée dans de l'Argon à 5 torr (i.e., 667 Pa), soit une fréquence de collision ν_p estimée à $25 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ [4]. La valeur de la densité électronique n_e est de son côté conditionnée par la structure de génération de la décharge plasma. Dans notre cas, la densité électronique n_e maximale est estimée à $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$.

La cavité considérée pour cette analyse modale possède une hauteur de 0,813 mm, une largeur de 20 mm et une longueur de 15 mm. Sans plasma, cette cavité a une fréquence de résonance de 10 GHz pour le mode TM_{10} .

La Figure 1 présente la fréquence de résonance f_{res} du mode TM_{10} de la cavité calculée à partir de l'équation (4)

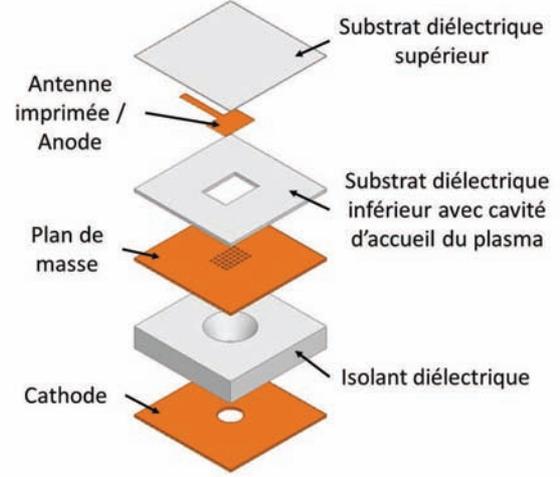


Figure 2. Vue éclatée d'une antenne imprimée reconfigurable en fréquence par décharge plasma.

en fonction de la densité électronique n_e du plasma. On observe qu'il est théoriquement possible de contrôler la fréquence de résonance de la cavité, et donc de l'antenne, en faisant varier la densité électronique du plasma. Toutefois, comme l'illustre la Figure 1, l'augmentation de la densité électronique entraîne aussi une forte augmentation de la tangente des pertes $\tan \delta$ du milieu plasma, et donc potentiellement une diminution du gain d'antenne. Un moyen de diminuer les pertes dans le plasma consiste à choisir un gaz avec une fréquence de collision plus faible comme un mélange de Néon-Xénon (e.g., $\nu_p \simeq 6,5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ à 5 torr).

4. Principe de mise en œuvre

La Figure 2 présente une vue éclatée du principe de mise en œuvre d'une antenne imprimée reconfigurable en fréquence par décharge plasma. Plusieurs couches sont ainsi assemblées les unes avec les autres. On peut distinguer deux parties de part et d'autre du plan de masse de l'antenne. Une première partie sous ce plan de masse (i.e., la cathode et l'isolant diélectrique) qui est nécessaire pour la génération du plasma. Une seconde partie au-dessus du plan de masse qui constitue l'antenne imprimée où est située la cavité d'accueil du plasma.

La génération du plasma dans la cavité repose sur une structure à deux électrodes du type MHCD (Micro-Hollow Cathode Discharge) [10]. Lorsqu'une tension continue suffisamment importante est appliquée entre la cathode et l'antenne imprimée (i.e., l'anode), un plasma est créé entre ces deux électrodes. L'expansion de la décharge plasma au sein de la cavité sous l'antenne imprimée est rendue possible par la présence de trous réalisés dans le plan de masse de l'antenne. La densité électronique n_e du plasma, et par conséquent ses propriétés diélectriques, sont alors contrôlées à partir de la puissance électrique qui lui est délivrée.

En pratique, la distance entre la cathode et l'anode (i.e., l'antenne imprimée) est choisie en accord avec la loi de Paschen qui définit une valeur optimale pour le produit

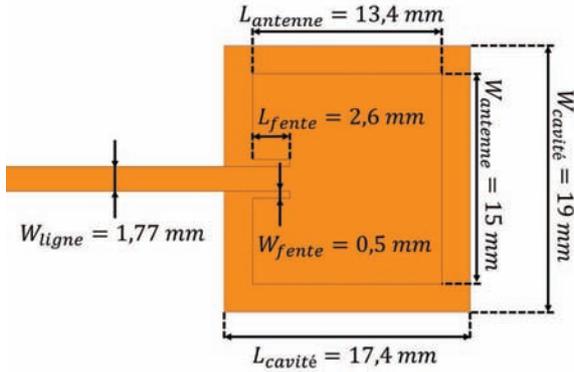


Figure 3. Dimensions du prototype d'antenne imprimée reconfigurable en fréquence par décharge plasma.

entre la pression du gaz P et la distance inter-électrodes afin de minimiser la tension de claquage V_b pour un gaz donné [4]. C'est cette condition qui empêche l'utilisation directe du plan de masse comme cathode pour déclencher un plasma à basse pression dans la cavité. La distance entre le plan de masse et le motif imprimé de l'antenne (i.e., la hauteur du substrat diélectrique inférieur sur la Figure 2) est insuffisante.

Cette intégration originale d'une structure MHCD avec un plan de masse à trous fournit un dispositif de génération d'un plasma stable tout en s'affranchissant d'électrodes à proximité de l'antenne qui perturberaient potentiellement le comportement nominal de l'antenne.

5. Caractérisation expérimentale d'un prototype en bande X

5.a. Dimensionnement du prototype

La Figure 3 présente les dimensions de l'antenne imprimée et de la cavité d'accueil du plasma. La structure générale a été optimisée pour obtenir une fréquence de résonance de l'antenne égale à 10 GHz sans plasma.

Comme illustré sur la Figure 2, l'antenne résulte de la superposition de deux substrats diélectriques, à savoir un substrat inférieur Rogers RO4003C ($\epsilon_r = 3,55$ et $\tan \delta = 0,0027$) de 0,813 mm d'épaisseur qui accueille la cavité pour le plasma, et un substrat supérieur Arlon MultiClad HF ($\epsilon_r = 3,7$ et $\tan \delta = 0,0045$) de seulement 89 μm d'épaisseur sur lequel l'antenne est imprimée. La Figure 3 ne montre pas ce substrat supérieur qui occulte en réalité la cavité et l'antenne. Le plan de masse de l'antenne est constitué d'une plaque de cuivre de 1 mm d'épaisseur dans lequel une grille de 5×7 trous a été usinée. Ces trous ont un diamètre de 1 mm et ils sont séparés d'une distance de 2 mm ce qui permet d'obtenir une surface de la grille quasi-équivalente à celle de l'antenne imprimée. La cathode est aussi fabriquée à partir d'une plaque de cuivre de 1 mm d'épaisseur. Enfin, l'isolant diélectrique utilisé entre la cathode et le plan de masse est du Macor de 10 mm d'épaisseur. Le trou dans cette partie possède un diamètre de 10 mm côté cathode et 20 mm côté plan de masse. Au final, la structure a la forme d'un carré de 100 mm de côté pour une épaisseur d'environ 13 mm.

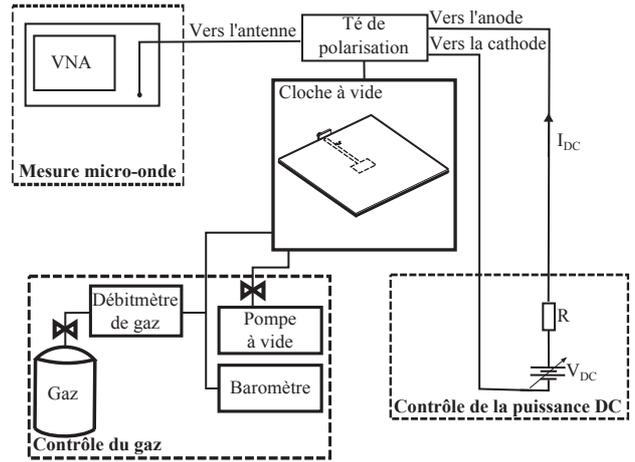


Figure 4. Dispositif expérimental.

5.b. Dispositif de caractérisation expérimentale

Un dispositif de caractérisation spécifique a été mis en œuvre. Comme le montre la Figure 4, l'antenne sous test est placée dans une enceinte en Pyrex connectée à trois unités différentes.

La première unité concerne le contrôle dans l'enceinte du type de gaz et de sa pression. Une pompe est tout d'abord utilisée pour faire le vide dans l'enceinte avant l'injection du gaz à une certaine pression P .

La deuxième unité permet la régulation de la puissance électrique utilisée pour déclencher et contrôler la décharge plasma. Une source délivre ainsi une tension continue entre les électrodes du système. La résistance $R = 5 \text{ k}\Omega$ sert à limiter le courant I_{DC} injecté à la décharge de façon à éviter la transition du plasma vers l'arc. L'apport de cette puissance électrique continue se fait au moyen d'un té de polarisation connecté sur l'accès de l'antenne imprimée.

Enfin, la troisième unité consiste en un analyseur de réseau vectoriel connecté au té de polarisation et permettant de caractériser le coefficient de réflexion de l'antenne.

En résumé, ce dispositif expérimental permet le contrôle du type de gaz, de sa pression et de la puissance injectée à la décharge, tout en effectuant des mesures micro-ondes. Si ce dispositif est adapté à la caractérisation de l'impédance de l'antenne, la présence de la cloche en Pyrex ne permet pas en revanche une mesure précise de son rayonnement. Afin de remédier à ce problème, il est envisagé d'encapsuler cette antenne dans un radôme où le type de gaz et la pression sont fixés.

5.c. Résultats de mesure

La caractérisation expérimentale du prototype d'antenne imprimée reconfigurable en fréquence par décharge plasma a été effectuée en considérant le dispositif expérimental de la Figure 4 et de l'Argon à différentes pressions.

La Figure 5 présente le coefficient de réflexion mesuré en fonction de la fréquence et du courant I_{DC} injecté à la décharge plasma pour de l'Argon à 5 torr. Le module du paramètre S_{11} issu de la simulation avec Ansys HFSS de l'antenne sans plasma et en espace libre est aussi représenté. On observe en l'occurrence un décalage de la fré-

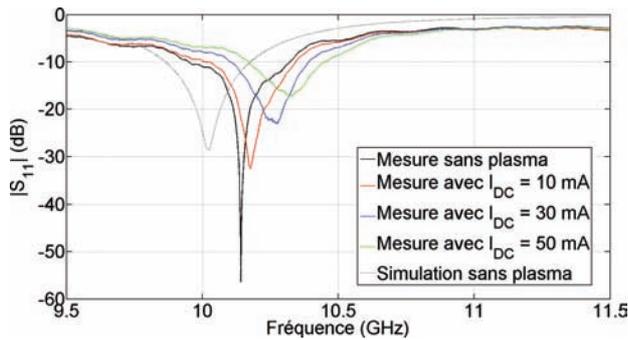


Figure 5. $|S_{11}|$ de l'antenne mesuré en fonction de la fréquence et du courant I_{DC} injecté dans la décharge pour de l'Argon à 5 torr.

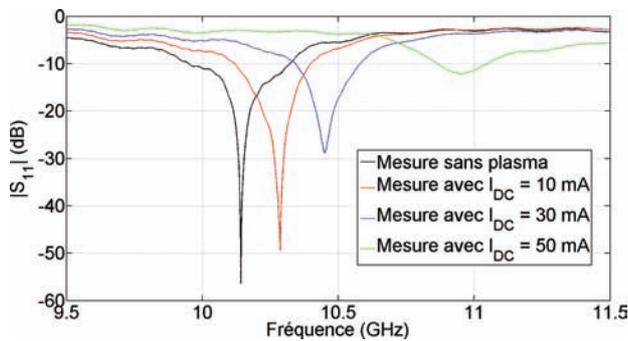


Figure 6. $|S_{11}|$ de l'antenne mesuré en fonction de la fréquence et du courant I_{DC} injecté dans la décharge pour de l'Argon à 20 torr.

quence de résonance mesurée pour l'antenne sans plasma de 1,2 % vis-à-vis de la simulation numérique. Ce décalage est attribué aux tolérances de fabrication du prototype puisqu'aucun changement significatif n'a été observé sur le paramètre S_{11} mesuré à l'extérieur et à l'intérieur de l'enceinte en Pyrex. La bande-passante relative du prototype sans plasma est égale à 3 %.

D'autre part, on constate bien sur les mesures une augmentation de la fréquence de résonance de l'antenne lorsque le courant I_{DC} augmente. Cette variation de 2,4 % dans ce cas précis est plus faible que celle donnée par le modèle de cavité et représentée sur la Figure 1. Ces différences peuvent s'expliquer par une distribution non-uniforme du plasma dans la cavité et par une densité électronique moyenne inférieure à celle escomptée.

Des mesures complémentaires tendent à confirmer l'influence néfaste de la distribution non-uniforme du plasma dans la cavité. En effet, nous avons observé un changement significatif dans la distribution du plasma dans la cavité lorsque la pression du gaz atteignait 20 torr. Comme on peut le voir sur la Figure 6, l'excursion en fréquence du paramètre S_{11} devient alors bien plus importante (i.e., 8,2 %). Cette montée en pression s'accompagne cependant d'une augmentation des pertes dans le plasma, ce qui aura certainement pour effet de diminuer l'efficacité d'antenne.

6. Conclusion

Un nouveau concept d'antenne imprimée reconfigurable en fréquence a été proposé. Il repose sur le contrôle des propriétés diélectriques d'un plasma localisé dans une cavité entre les deux conducteurs de l'antenne. La caractérisation expérimentale d'un prototype en bande X a mis en évidence une excursion en fréquence de 2,5 %.

A court terme, les enjeux principaux concernent d'une part la génération à basse pression d'un plasma plus uniforme dans la cavité, et d'autre part l'encapsulation de l'antenne pour pouvoir caractériser expérimentalement ses performances en rayonnement.

A plus long terme, cette stratégie originale d'intégration d'une décharge plasma dans un circuit imprimé permet d'envisager l'utilisation d'autres propriétés diélectriques du plasma comme la permittivité nulle ou faiblement négative pour des applications en lien avec les matériaux.

7. Remerciements

Ce travail a été financé par l'Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées et la Région Midi-Pyrénées.

Références

- [1] A. Petosa, "An overview of tuning techniques for frequency-agile antennas," *Antennas Propag. Mag.*, Vol. 54, No. 5, pp. 271-296, Oct. 2012.
- [2] F. Pizarro, R. Pascaud, O. Pascal, T. Callegari, L. Liard, "Evaluation of microplasma discharges as active components for reconfigurable antennas," in *Proc. 6th Eur. Conf. Antennas Propag.*, pp. 117-119, Mar. 2012.
- [3] J. Sokoloff, O. Pascal, T. Callegari, R. Pascaud, F. Pizarro, L. Liard, J. Lo, A. Kallel, "Non-thermal plasma potentialities for microwave device reconfigurability," *C. R. Phys.*, Vol. 15, No. 5, pp. 468-478, May 2014.
- [4] Y. P. Raizer, *Gas Discharge Physics*,
- [5] T. Anderson, *Plasma Antennas*, Artech House, 2011.
- [6] M. T. Jusoh, O. Lafond, F. Colombel, M. Himdi, "Performance and radiation patterns of a reconfigurable plasma corner-reflector antenna," *Antennas Wireless Propag. Lett.*, Vol. 12, pp. 1137-1140, 2013.
- [7] P. Linardakis, G. Borg, N. Martin, "Plasma-based lens for microwave beam steering," *Electron. Lett.*, Vol. 42, No. 8, pp. 444-446, Apr. 2006.
- [8] A. Kallel, J. Sokoloff, T. Callegari, "Leaky-wave plasma antenna with tunable radiation angle," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, Vol. 56, No. 11, pp. 2601-2604, Nov. 2014.
- [9] P. Bhartia, I. Bahl, R. Garg, A. Ittipiboon, *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, 2001.
- [10] K. H. Schoenbach, A. El-Habachi, W. Shi, M. Ciocca, "High-pressure hollow cathode discharges," *Plasma Sources Sci. Technol.*, Vol. 6, No. 4, pp. 468-477, Nov. 1997.