

Antenne Plasma Miniature en Bande VHF/UHF *Electrically Small Plasma-Based Antenna in VHF/UHF Band*

R. Pascaud¹, V. Laquerbe^{1,2}, A. Laffont^{1,2,3}, M. Juste^{1,2,3}, C. Cailhol¹, G. Hagelaar², T. Callegari², L. Liard², O. Pascal², R. Maisonny³, S. Vauchamp³, C. Pouant³, J.-P. Adam³ et P. Pouliguen⁴

¹ISAE-SUPAERO, Université de Toulouse, France, romain.pascaud@isae-superaero.fr

²LAPLACE, Université de Toulouse, France

³CEA, Gramat, France

⁴DGA, AID, France

Mots clés : Plasma, Antenne, Plasmonique – Plasma, Antenna, Plasmonic.

Résumé/Abstract

Une antenne plasma miniature en bande VHF/UHF est présentée. Cette antenne consiste en une sonde coaxiale électriquement petite placée au-dessus d'un plan de masse et entourée d'une décharge plasma hémisphérique d'un rayon bien inférieur à la longueur d'onde de fonctionnement. La décharge plasma, alimentée par radiofréquences (RF), se comporte comme un résonateur à permittivité diélectrique négative associé à un rayonnement électromagnétique intense malgré sa petite taille électrique. Plus particulièrement, un phénomène d'adaptation d'impédance est observé avec un rayonnement omnidirectionnel à polarisation linéaire pour un gain maximal proche de 0 dBi.

A gaseous plasma-based electrically small antenna (ESA) in the VHF/UHF band is presented. This antenna consists of an electrically small coaxial probe placed above a ground plane and surrounded by a hemispherical plasma discharge of radius much smaller than the operating wavelength. The radio-frequency (RF)-driven plasma discharge behaves as a negative dielectric permittivity resonator associated with intense electromagnetic radiation despite its small electrical size. More particularly, an impedance matching phenomenon is observed with a linearly polarized omnidirectional radiation and a maximum gain approaching 0 dBi.

1 Introduction

Le plasma est un gaz contenant des électrons et des ions dans des proportions telles qu'il reste globalement électriquement neutre. Sa permittivité relative ϵ_p est généralement décrite par le modèle de Drude [1]

$$\epsilon_p = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu)}, \quad \text{avec } \omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \quad (1)$$

où ω_p est la fréquence angulaire du plasma, ν la fréquence de collision électron-neutre, e la charge de Coulomb, n_e la densité électronique, m_e la masse de l'électron et ϵ_0 la permittivité du vide.

Le plasma a déjà montré des caractéristiques prometteuses pour la conception d'antennes radiofréquences et micro-ondes [2-10]. Dans ce contexte, le plasma est généralement utilisé comme un bon conducteur électrique [2-7], ou comme un milieu diélectrique de permittivité relative comprise entre 0 et 1 [8-10]. En négligeant les collisions, ces deux comportements du plasma sont obtenus lorsque $\omega \ll \omega_p$ ou $\omega > \omega_p$, respectivement.

Récemment, une antenne plasma miniature basée sur le concept théorique suggéré dans [11] et [12], a été proposée et étudiée expérimentalement dans la bande VHF/UHF [13]. Dans ce cas, le plasma ne se comporte ni comme un bon conducteur électrique ni comme un diélectrique, mais plutôt comme un mauvais conducteur électrique également appelé matériau à permittivité négative (*i.e.*, ENG pour Epsilon NeGative). L'antenne consiste alors en une sonde coaxiale électriquement petite couplée à une décharge plasma hémisphérique de dimensions inférieures à la longueur d'onde qui joue le rôle de résonateur ENG. L'intensification du rayonnement électromagnétique de cette antenne miniature a bien été mise en évidence expérimentalement et associée à un phénomène de résonance du plasma [13].

Si quelques antennes miniatures similaires ont été étudiées numériquement [14-17] et expérimentalement [18]-[22], aucun de ces travaux n'a fourni de résultats de mesure des performances réelles de l'antenne (*i.e.*, adaptation d'impédance, diagrammes de rayonnement, polarisation, gain et efficacité).

Cette communication présente les premières caractéristiques jamais mesurées pour une telle antenne.

2 Prototype

La Figure 1 présente le prototype réalisé. Il se compose d'une décharge plasma d'une dimension inférieure à la longueur d'onde dans la bande VHF/UHF, couplée à une sonde coaxiale elle aussi électriquement petite. Le plasma est confiné dans une cloche en verre hémisphérique de rayon intérieur de $102,5\text{ mm}$ et d'épaisseur de $5,5\text{ mm}$. Il est généré dans un mélange de néon avec 1% de xénon à une pression de 10 mTorr (i.e., $1,33\text{ Pa}$). Une pression de gaz aussi faible permet de réduire les pertes dans le plasma en diminuant la fréquence de collision électron-neutre. La sonde coaxiale, de rayon $0,8\text{ mm}$ et de longueur 50 mm , permet le couplage du signal micro-onde VHF/UHF avec la décharge. Le plan de masse circulaire possède un rayon de 1 m .

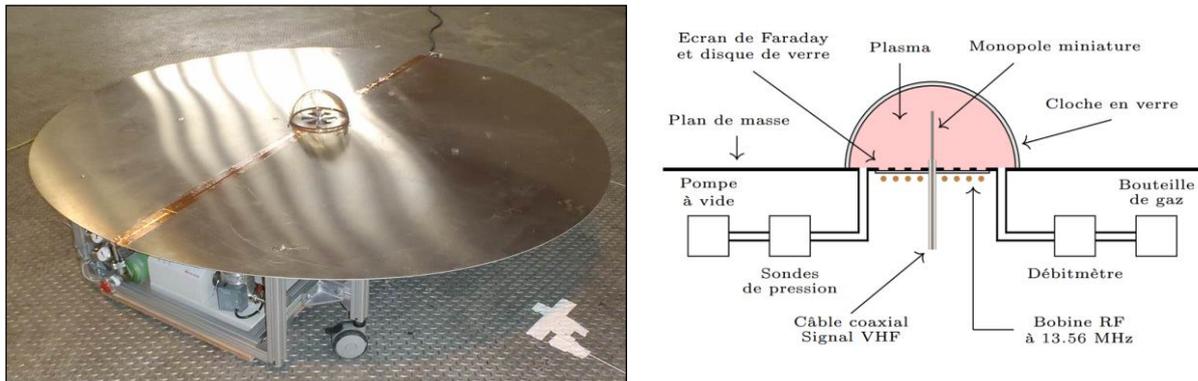


Figure 1 : Photo (plasma éteint) et schéma du prototype de l'antenne plasma miniature

Outre l'antenne, le système expérimental comprend également plusieurs dispositifs permettant d'allumer et d'entretenir le plasma. Ces dispositifs sont répartis sous le plan de masse circulaire. Ainsi, la décharge est allumée et entretenue par couplage inductif à $13,56\text{ MHz}$ à l'aide d'une bobine RF en spirale placée sous le plan de masse métallique [23]. Un écran de Faraday a été usiné dans le plan de masse pour permettre un couplage inductif efficace entre la bobine RF et la décharge plasma [24]. Sa conception radiale, utilisant des fentes sub-longueur d'onde, empêche la perturbation des courants d'antenne induits dans le plan de masse puisqu'ils restent parallèles aux fentes.

Au final, le système de contrôle du gaz et la source d'allumage du plasma sont placés sous le plan de masse de l'antenne, contrairement à d'autres mises en œuvre proposées dans la littérature [20]. Il convient de noter qu'une utilisation opérationnelle d'une telle antenne nécessitera à terme une enceinte en verre hémisphérique scellée remplie d'un gaz donné à une pression spécifiée, comme c'est le cas dans les lampes fluorescentes par exemple.

3 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de cette antenne miniature plasma repose sur le concept de résonance plasmonique de surface localisée (LSPR en anglais). Cette résonance est un phénomène physique qui peut se produire pour des objets conducteurs très petits par rapport à la longueur d'onde de l'excitation électromagnétique incidente [25]. En optique, la LSPR est obtenue avec des nanoparticules métalliques et parfois utilisée pour construire des antennes optiques [26].

Habituellement, la condition de résonance est déterminée en résolvant un problème de diffusion électromagnétique dans l'approximation quasi-statique, soit pour des objets dont la taille électrique tend vers 0. Pour une particule sphérique sans perte, on obtient sa résonance plasmonique lorsque sa permittivité relative est exactement égale à -2 , soit un milieu faiblement conducteur [25].

Bien que ce modèle quasi-statique fournisse des informations sur le comportement global de la LSPR, il le fait avec une vue macroscopique du problème en utilisant des paramètres globaux tels que la permittivité relative ϵ_p . On perd alors la signification physique de cette résonance. Nous avons donc proposé un modèle d'oscillateur harmonique pour étudier l'intensification du rayonnement produit par une sphère de plasma gazeux sub-longueur d'onde [17]. Malgré sa simplicité, ce modèle permet de comprendre la dynamique des électrons du plasma à l'échelle mésoscopique lors de la résonance et, ainsi, d'apporter une nouvelle perspective au développement d'antennes plasmas miniatures efficaces. Les principaux résultats obtenus avec ce modèle sont rappelés ici.

- Dans une décharge plasma de dimension inférieure à la longueur d'onde, des oscillations collectives de ses électrons libres apparaissent lorsqu'ils sont soumis à un champ électromagnétique incident.

- Le phénomène de résonance plasmonique de surface localisée est plus particulièrement une résonance de ces oscillations collectives qui conduit à un courant électrique volumique important et donc à un champ électromagnétique rayonné intense malgré la petite taille électrique du plasma.
- La fréquence de résonance dépend principalement de la densité d'électrons n_e et des pertes dans le plasma ν . Dans le cas particulier d'une sphère de plasma homogène de taille électrique nulle, la condition de résonance est

$$\omega = \frac{\omega_p^2}{3} \left(\frac{\omega_p^2}{3} - \nu^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

soit $\omega = \omega_p/\sqrt{3}$ pour $\nu = 0$ Hz. En combinant les équations (2) et (1), on retrouve la condition de résonance $\epsilon_p = -2$ pour un milieu décrit par le modèle de Drude.

- La fréquence de résonance est également fonction de la géométrie du plasma et des propriétés du champ électromagnétique incident.
- Le champ électromagnétique rayonné est plus faible lorsque les pertes dans le plasma ν augmentent en raison de la dissipation d'énergie dans le plasma.
- La résonance tend à disparaître pour une grande taille électrique du plasma car les électrons n'y oscillent plus de manière cohérente.

En pratique, le plasma n'est pas uniforme en densité électronique et la condition $\omega \approx \omega_p/\sqrt{3}$ donne ainsi une estimation de la densité d'électrons nécessaire pour observer le phénomène LSPR sur une gamme de fréquences. Le prototype d'antenne plasma miniature a été dimensionné de manière à ce que ses fréquences de résonance se situent entre 200 et 400 MHz.

4 Résultats de mesure

Pour mesurer avec précision les performances de rayonnement d'une antenne, celle-ci est généralement placée dans une chambre anéchoïque. Cependant, en raison de la taille et du poids du prototype, cette option n'était pas réalisable avec nos installations d'essai. L'antenne a donc été caractérisée dans un bâtiment aux murs en bois et au sol métallique. L'antenne et son plan de masse circulaire ont été placés sur le sol métallique à une hauteur de 41 cm pour répartir les équipements associés à l'antenne sous son plan de masse. A noter que l'ensemble peut tourner autour de son axe grâce à une plaque tournante reliée à l'antenne et au sol.

Tout au long des mesures de rayonnement, l'antenne a été alimentée par un analyseur de réseau vectoriel (VNA en anglais). Un capteur de champ électrique triaxial monté sur un mât télescopique a été utilisé pour mesurer le signal reçu dans le champ lointain et évaluer ainsi le diagramme de rayonnement dans son plan d'élévation. La mesure du gain de l'antenne a été effectuée avec la méthode des trois antennes.

La Figure 2 montre par exemple le module du coefficient de réflexion mesuré, ou paramètre $|S_{11}|$, en fonction de la fréquence pour l'antenne avec et sans plasma. Lorsque le plasma est éteint, l'antenne est totalement désadaptée. Cependant, lorsqu'un plasma est allumé, l'adaptation d'impédance est observée avec un paramètre $|S_{11}|$ inférieur à -10 dB entre 240 et 304 MHz.

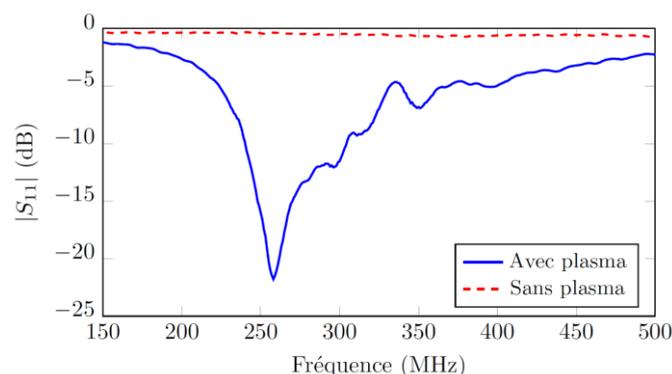


Figure 2 : Coefficient de réflexion mesuré de l'antenne plasma miniature

Ce comportement de résonance plasmonique est théoriquement associé à un rayonnement omnidirectionnel à polarisation linéaire par rapport à l'axe de la sonde coaxiale électriquement petite insérée dans le plasma [11,12,17]. La Figure 3 montre donc la mesure des diagrammes de rayonnement normalisés par rapport au maximum d'intensité à 300 MHz. Dans le plan azimutal, on peut observer la symétrie du diagramme de rayonnement ainsi que la polarisation linéaire. Quelques ondulations inférieures à 1.5 dB sont observées, certainement dues à des imperfections de mesure. En ce qui concerne le diagramme de rayonnement normalisé dans le plan d'élévation, on peut observer l'influence du plan de masse fini de la petite antenne électrique à base de plasma. En effet, la discontinuité entre le plan de masse et le sol métallique du bâtiment induit des ondulations sur les diagrammes.

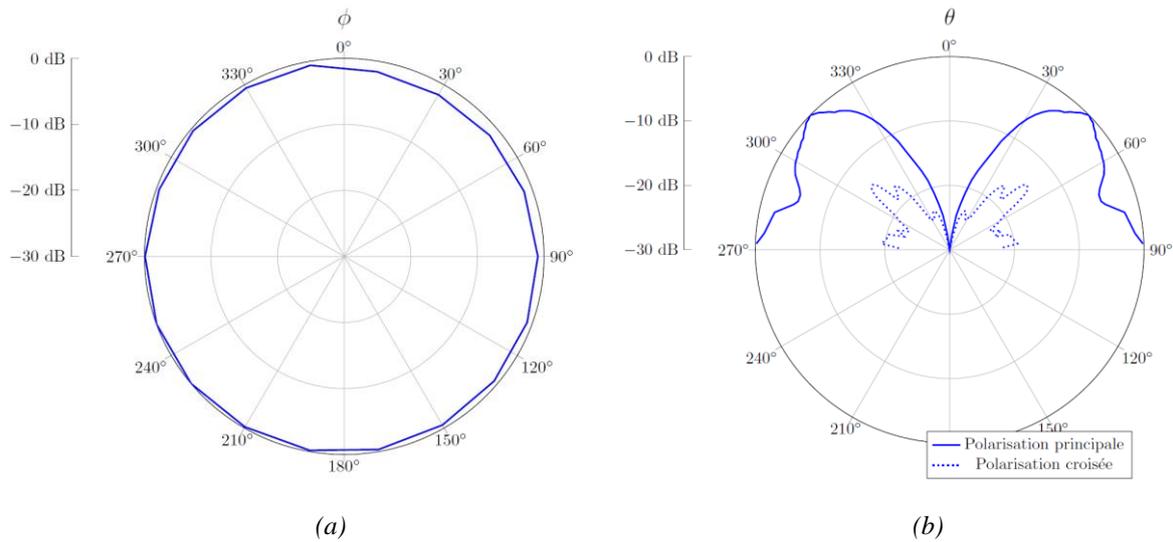


Figure 3 : Diagrammes de rayonnement normalisés par rapport au maximum d'intensité mesurés à 300 MHz de l'antenne plasma miniature dans les plans (a) d'azimut et (b) d'élévation

La Figure 4 montre le gain maximal mesuré en fonction de la fréquence. Il convient de noter que l'angle d'élévation θ pour lequel le gain est maximal dépend de la fréquence en raison des effets de diffraction sur le bord du plan de masse de l'antenne. Le gain de l'antenne est proche de 0 dBi entre 320 et 390 MHz. Par rapport au cas sans plasma, une augmentation du gain de plus de 15 dB est observée entre 214 et 391 MHz.

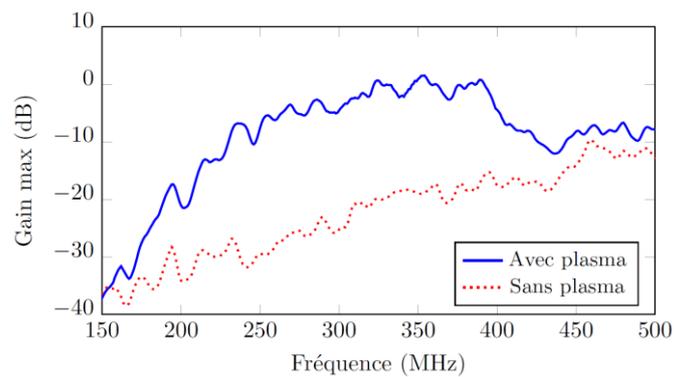


Figure 4 : Gain mesuré de l'antenne plasma miniature

Enfin, la Figure 5 montre l'efficacité du rayonnement η_{ray} de l'antenne en fonction de la fréquence.

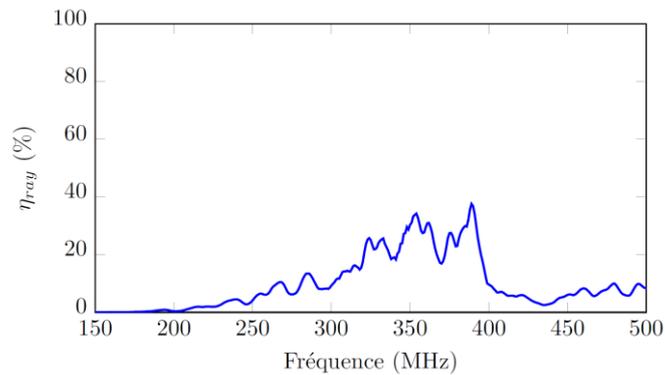


Figure 5 : Efficacité de rayonnement mesurée de l'antenne plasma miniature

Les résultats présentés mettent en évidence la capacité de rayonnement de cette antenne. Cependant, on peut remarquer que les fréquences auxquelles le gain est maximal ne correspondent pas aux fréquences pour lesquelles l'amplitude de son coefficient de réflexion est minimale. En effet, le paramètre $|S_{11}|$ est inférieur à -10 dB entre 240 et 302 MHz, alors que le gain maximal est d'environ 0 dBi entre 320 et 390 MHz. Dans cette dernière bande de fréquences, le paramètre $|S_{11}|$ est seulement inférieur à -4 dB, une valeur pour laquelle seulement 60 % de la puissance incidente aux bornes de l'antenne lui est effectivement transmise.

En comparant les paramètres η_{ray} et $|S_{11}|$, on constate que l'efficacité de rayonnement commence à croître dès que le coefficient de réflexion diminue. Par exemple, pour le coefficient de réflexion minimum observé à 258 MHz, une efficacité de rayonnement inférieure à 10 % est calculée. Elle augmente ensuite pour des fréquences légèrement plus élevées, et devient supérieure à 15 % sur la quasi-totalité de la bande de fréquence comprise entre 320 et 396 MHz. Dans cette bande de fréquences, le coefficient de réflexion ne descend pas en dessous de -7 dB tandis que l'efficacité approche 35 % à 354 MHz et 40 % à 389 MHz. L'analyse de ces résultats nous permet de confirmer que les fréquences auxquelles l'antenne rayonne le plus efficacement ne correspondent pas à celles où elle est le mieux adaptée en impédance. Ce résultat peut être dû au fait que le couplage entre la sonde coaxiale et le résonateur plasma n'est pas optimal.

5 Conclusion

Dans cette communication, les propriétés de rayonnement d'une antenne plasma miniature sont mesurées et présentées. En particulier, ses diagrammes de rayonnement ont été mesurés. Ils attestent du rayonnement omnidirectionnel avec polarisation linéaire de cette antenne. Il a également été montré que le gain maximal est proche de 0 dBi entre 320 et 390 MHz.

Bien que ces résultats démontrent les capacités de rayonnement de cette antenne, on peut observer que les fréquences associées au minimum de coefficient de réflexion ne correspondent pas à celles où le gain est maximal. Une optimisation du dispositif est encore nécessaire, mais elle nécessite le développement d'un modèle numérique fiable.

Au final, ces résultats confirment le potentiel de cette antenne plasma miniature, tant pour son intérêt scientifique que pour le développement de nouvelles antennes à base de plasma aux propriétés singulières.

6 Remerciements

Ce travail a été soutenu par la Direction Générale de l'Armement (DGA), l'Agence de l'Innovation de Défense (AID) et la Région Occitanie.

Références bibliographiques

- [1] Y. P. Raizer, Gas Discharge Physics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991.
- [2] G. G. Borg, J. H. Harris, N. M. Martin, D. Thorncraft, R. Milliken, D. G. Miljak, B. Kwan, T. Ng, and J. Kircher, "Plasmas as antennas: Theory, experiment and applications," Phys. Plasmas, vol. 7, no. 5, pp. 2198–2202, 2000.
- [3] J. P. Rayner, A. P. Whichello, and A. D. Cheetham, "Physical characteristics of plasma antennas," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 32, no. 1, pp. 269–281, 2004.

- [4] I. Alexeff, T. Anderson, E. Farshi, N. Karnam, and N. R. Pulasani, "Recent results for plasma antennas," *Phys. Plasmas*, vol. 15, no. 5, p. 057104, 2008.
- [5] Y. Brelet, A. Houard, G. Point, B. Prade, L. Arantchouk, J. Carbonnel, Y.-B. André, M. Pellet, and A. Mysyrowicz, "Radiofrequency plasma antenna generated by femtosecond laser filaments in air," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 26, p. 264106, 2012.
- [6] M. T. Jusoh, O. Lafond, F. Colombel, and M. Himdi, "Performance and radiation patterns of a reconfigurable plasma corner-reflector antenna," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 1137–1140, 2013.
- [7] J. Zhao, S. Wang, H. Wu, Y. Liu, Y. Chang, and X. Chen, "Flexible plasma linear antenna," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 110, no. 9, p. 094108, 2017.
- [8] P. Linardakis, G. Borg, and N. Martin, "Plasma-based lens for microwave beam steering," *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 5, pp. 444–446, 2006.
- [9] J. Sokoloff, A. Kallel, and T. Callegari, "Beam-scanning using leaky-wave plasma antenna: First experimental results," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2016.
- [10] T. Tang, M. Xu, M. M. Olaimat, M. Aldhaeabi, R. Wang, M. Zhu, and O. M. Ramahi, "Enhancing the directivity of antennas using plasma rings," *IEEE Transactions on Plasma Science*, pp. 1–7, 2022.
- [11] H. R. Stuart and A. Pidwerbetsky, "Electrically small antenna elements using negative permittivity resonators," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, pp. 1644–1653, 2006.
- [12] R. W. Ziolkowski and A. Erentok, "Metamaterial-based efficient electrically small antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 7, pp. 2113–2130, 2006.
- [13] V. Laquerbe, R. Pascaud, A. Laffont, T. Callegari, L. Liard, and O. Pascal, "Towards antenna miniaturization at radio frequencies using plasma discharges," *Phys. Plasmas*, vol. 26, no. 3, p. 033509, 2019.
- [14] C. C. Lin and K.-M. Chen, "Improved radiation from a spherical antenna by overdense plasma coating," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 17, no. 5, pp. 675–678, Sep. 1969.
- [15] X. Gao, C. Wang, B. Jiang, and Z. Zhang, "A physical model of radiated enhancement of plasma-surrounded antenna," *Phys. Plasmas*, vol. 21, no. 9, p. 093301, 2014.
- [16] C. Wang, H. Liu, X. Li, and B. Jiang, "The mechanism of the effect of a plasma layer with negative permittivity on the antenna radiation field," *Phys. Plasmas*, vol. 22, no. 6, p. 063501, 2015.
- [17] A. Laffont, R. Pascaud, T. Callegari, L. Liard, O. Pascal, and J.-P. Adam, "A harmonic oscillator model to study the intensification of microwave radiation by a subwavelength uniform plasma discharge," *Phys. Plasmas*, vol. 28, no. 3, p. 033503, 2021.
- [18] A. M. Messiaen and P. E. Vandenplas, "Theory and experiments of the enhanced radiation from a plasma-coated antenna," *Electron. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 26–27, Jan. 1967.
- [19] K. M. Chen and C. C. Lin, "Enhanced radiation from a plasma-embedded antenna," *Proc. IEEE*, vol. 56, no. 9, pp. 1595–1597, Sep. 1968.
- [20] F.-R. Kong, Y.-F. Sun, S. Lin, Q.-Y. Nie, Z. B. Wang, Z.-L. Zhang, B. W. Li, and B.-H. Jiang, "Experimental studies on radiation intensification in gigahertz radio frequency band by subwavelength plasma structures," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, no. 3, pp. 381–387, Mar. 2017.
- [21] F. Kong, Q. Nie, S. Lin, Z. Wang, B. Li, S. Zheng, and B. Jiang, "Studies on omnidirectional enhancement of giga-hertz radiation by sub-wavelength plasma modulation," *Plasma Sci. Technol.*, vol. 20, p. 014017, 2018.
- [22] F. Kong, Q. Nie, G. Xu, X. Zhang, S. Lin, and B. Jiang, "Experimental and numerical studies on the receiving gain enhancement modulated by a sub-wavelength plasma layer," *Plasma Sci. Technol.*, vol. 20, p. 095504, 2018.
- [23] J. A. Hopwood, "Review of inductively coupled plasmas for plasma processing," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 109–116, 1992.
- [24] P. Chabert and N. Braithwaite, *Physics of Radio-Frequency Plasmas*. Cambridge University Press, 2011.
- [25] S. A. Maier, *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. Springer, 2007.
- [26] M. Agio and A. Alù, *Optical Antennas*. Cambridge University Press, 2013.