



**HAL**  
open science

# Caractérisation expérimentale de l'interaction entre une onde électromagnétique RF et une micro-décharge plasma

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

## ► To cite this version:

Francisco Pizarro, Romain Pascaud, Olivier Pascal, Thierry Callegari, Laurent Liard. Caractérisation expérimentale de l'interaction entre une onde électromagnétique RF et une micro-décharge plasma. 18ème Journées Nationales Microondes, JNM 2013, May 2013, Paris, France. hal-00906145

**HAL Id: hal-00906145**

**<https://hal.science/hal-00906145>**

Submitted on 19 Nov 2013

**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.



## Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

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: 10035

**To cite this document:** Pizarro, Francisco and Pascaud, Romain and Pascal, Olivier and Callegari, Thierry and Liard, Laurent *Caractérisation expérimentale de l'interaction entre une onde électromagnétique RF et une micro-décharge plasma*. (2013) In: 18ème Journées Nationales Microondes, JNM 2013, 15 May 2013 - 17 May 2013 (Paris, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@inp-toulouse.fr)

# Caractérisation expérimentale de l'interaction entre une onde électromagnétique RF et une micro-décharge plasma

Francisco Pizarro<sup>1</sup>, Romain Pascaud<sup>1</sup>, Olivier Pascal<sup>2</sup>, Thierry Callegari<sup>2</sup>, Laurent Liard<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISAE-DEOS, Université de Toulouse, 10 avenue Edouard Belin, BP54032, 31055 Toulouse Cedex 4

<sup>2</sup>LAPLACE, UPS, INPT, Université de Toulouse, 118, route de Narbonne 31062 Toulouse Cedex 9

f.pizarro-torres@isae.fr : correspondant principal

## Résumé

Ce papier présente la caractérisation expérimentale de l'interaction entre une onde électromagnétique RF et une micro-décharge plasma à l'aide de deux dispositifs de mesure. Ces dispositifs consistent en l'intégration d'une micro-décharge plasma au sein de différentes lignes de transmission, à savoir une ligne microruban et une ligne microruban inversée. L'influence de la micro-décharge plasma sur les paramètres  $S$  est ainsi mise en évidence, et plus particulièrement certaines propriétés d'absorption mais aussi de déphasage de l'onde RF.

## 1. Introduction

Un plasma est un gaz ionisé, macroscopiquement neutre, dont la permittivité diélectrique est complexe et fonction de la fréquence. En pratique, la permittivité du milieu plasma peut être modifiée en contrôlant certains paramètres associés à la création de la décharge plasma (type de gaz, pression du gaz, puissance injectée à la décharge, ...). Ainsi, lorsque la décharge plasma est éteinte (gaz non ionisé), le milieu se comporte d'un point de vue électromagnétique comme du vide, et lorsque la décharge plasma est allumée, le milieu peut sous certaines conditions avoir des propriétés différentes comme une faible conductivité, une permittivité diélectrique négative ou nulle, ... Quelques dispositifs RF reconfigurables ont d'ailleurs déjà été développés pour exploiter certaines de ces propriétés [1-4].

De par sa petite taille (de l'ordre de quelques millimètres), la micro-décharge MCSD (Micro-Cathode Sustained Discharge) est particulièrement intéressante dans l'optique d'une intégration au sein d'un circuit imprimé [5]. Néanmoins, la caractérisation de l'interaction entre une onde RF et une micro-décharge plasma de type MCSD est un sujet peu traité dans la littérature. Afin d'évaluer cette interaction, deux dispositifs de mesure sont proposés. Ces dispositifs sont en fait basés sur la mesure des paramètres  $S$  de différentes lignes de transmission (ligne microruban et ligne microruban inversée) contenant une micro-décharge plasma de type MCSD dont certains paramètres sont contrôlés (type de gaz, pression du gaz, puissance injectée à la décharge, ...).

## 2. Décharge plasma

### 2.a. Modélisation électromagnétique du plasma

D'un point de vue électromagnétique, le plasma peut être modélisé comme un milieu avec une permittivité relative complexe définie comme :

$$\epsilon_p = 1 - \omega_p^2 / (\omega^2 - j\nu_p \cdot \omega) \quad (1)$$

où  $\omega$  (rad/s) est la pulsation de l'onde électromagnétique interagissant avec le plasma et  $\nu_p$  la fréquence de collision du plasma ( $s^{-1}$ ). La pulsation du plasma  $\omega_p$  (rad/s) est définie comme :

$$\omega_p = \sqrt{n_e \cdot q^2 / (\epsilon_0 \cdot m_e)} \quad (2)$$

avec  $n_e$  la densité électronique,  $q$  la charge de l'électron et  $m_e$  la masse de l'électron. Comme le montre l'équation (1), la permittivité du milieu plasma dépend donc de la densité électronique  $n_e$  et de la fréquence de collision  $\nu_p$ , paramètres qui dépendent en réalité de la puissance injectée à la décharge et de la pression du gaz. Le contrôle de ces paramètres permet ainsi la modification de la permittivité du milieu plasma, et donc de son interaction avec une onde électromagnétique incidente.

### 2.b. Micro-Cathode Sustained Discharge (MCSD)

La MCSD est une structure qui permet la génération d'une décharge plasma localisée [3]. Comme le montre la figure 1, la structure est composée de trois électrodes en cuivre (*Cathode*, *Anode 1* et *Anode 2*) et d'une feuille diélectrique (alumine). Lorsqu'une tension DC suffisante est appliquée entre la *Cathode* et l'*Anode 1*, une décharge plasma apparaît à l'intérieur du trou de diamètre  $\Phi$ . La polarisation DC de l'*Anode 2*, qui est placée à une distance  $d$  de l'*Anode 1*, permet de tirer la décharge plasma initiale à l'extérieur du trou de sorte qu'elle occupe un volume plus important entre l'*Anode 1* et l'*Anode 2*.

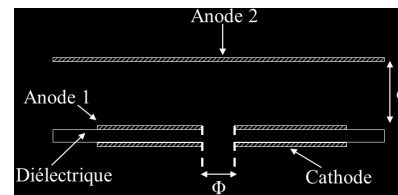


Figure 1. Topologie d'une Micro-Hollow Cathode Sustained Discharge (MCSD).

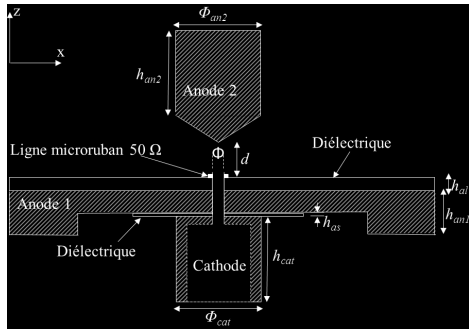


Figure 2. Vue de coupe du dispositif de mesure avec la ligne microruban.

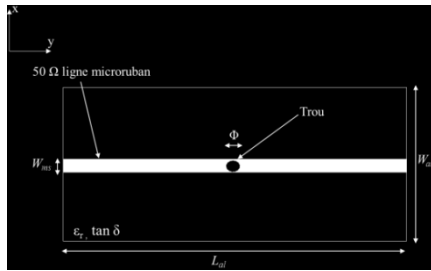


Figure 3. Vue de dessus de la ligne microruban.

La zone située entre l'Anode 1 et l'Anode 2 est utilisée par la suite pour faire interagir une onde électromagnétique avec le milieu plasma.

### 3. Dispositifs de mesure

Les deux dispositifs de mesure proposés permettent d'évaluer l'interaction entre une onde électromagnétique RF et une décharge plasma de type MCS D. La différence principale entre ces deux dispositifs est la présence d'un contraste diélectrique différent entre la région qui contient le plasma (de l'air) et la région qui contient le champ électromagnétique (de l'alumine pour le premier dispositif, et de l'air pour le second).

#### 3.a. Ligne microruban

Le premier dispositif de mesure proposé consiste en une ligne microruban 50 Ω intégrant une MCS D en son centre. Comme le montre la figure 2, on retrouve la structure de type MCS D avec ses trois électrodes (Cathode, Anode 1 et Anode 2) et sa feuille diélectrique.

L'originalité de ce dispositif provient de l'ajout d'une ligne microruban au-dessus de l'Anode 1. Cette ligne microruban possède en son centre un trou cylindrique (cf. figure 3) qui est aligné avec le trou de la structure MCS D. Ainsi, lorsque la décharge plasma est générée, elle remplit ce trou et interagit avec l'onde électromagnétique qui se propage le long de la ligne microruban.

Les différentes dimensions de cette configuration sont :  $\Phi_{cat} = 20$  mm ;  $h_{cat} = 4$  cm ;  $h_{an1} = 11$  mm ;  $h_{as} = 8$  mm ;  $L_{al} = 10$  cm ;  $W_{al} = 5$  cm ;  $h_{al} = 1$  mm ;  $W_{ms} = 0.966$  mm ;  $\Phi = 600$  μm ;  $d = 4,5$  mm ;  $\epsilon_r = 9,9$  ;  $\tan \delta = 2.10^{-4}$  ;  $\Phi_{an2} = 20$  mm ;  $h_{an2} = 4$  cm.

#### 3.b. Ligne microruban inversée

Le second dispositif de mesure proposé est similaire au premier en ce qui concerne la structure MCS D, mais il diffère pour la partie RF de par l'utilisation d'une ligne

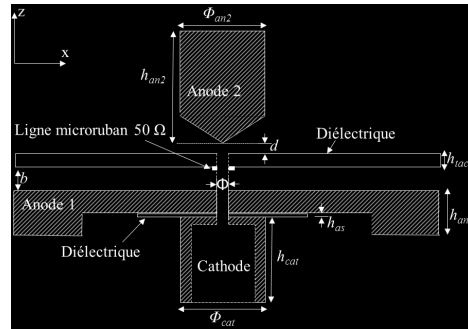


Figure 4. Vue de coupe du dispositif de mesure avec la ligne microruban inversée.

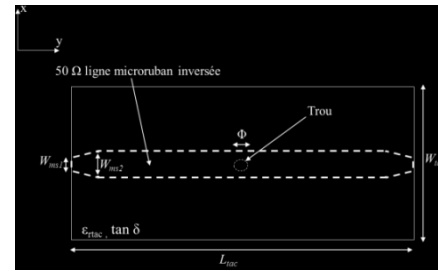


Figure 5. Vue de dessus de la ligne microruban inversée.

microruban inversée 50 Ω (cf. figures 4 et 5).

Les dimensions de cette seconde configuration sont :  $\Phi_{cat} = 20$  mm ;  $h_{cat} = 4$  cm ;  $h_{an1} = 11$  mm ;  $h_{as} = 8$  mm ;  $L_{tac} = 10$  cm ;  $W_{tac} = 5$  cm ;  $h_{tac} = 1,52$  mm ;  $W_{ms1} = 1,28$  mm ;  $W_{ms2} = 4,06$  mm ;  $\Phi = 1$  mm ;  $d = 2$  mm ;  $b = 1$  mm ;  $\epsilon_r = 3,5$  ;  $\tan \delta = 0.0018$  ;  $\Phi_{an2} = 20$  mm ;  $h_{an2} = 4$  cm.

#### 3.c. Protocole expérimental

Au final, pour les deux dispositifs de mesure, l'objectif est d'évaluer l'interaction entre l'onde électromagnétique qui se propage sur la ligne de transmission et le milieu plasma. Ceci est effectué en mesurant les paramètres S des différentes lignes de transmission en fonction des paramètres du plasma (type de gaz, pression du gaz, ...). Ces paramètres sont en pratique contrôlés en insérant les dispositifs dans une chambre à vide.

## 4. Résultats

Plusieurs mesures ont été réalisées avec ces deux dispositifs pour évaluer l'influence de la pression du gaz et du courant injecté à la décharge sur les paramètres S. Le gaz utilisé ici est un mélange de Néon-Xénon. Les résultats présentés ont été obtenus pour des pressions de 5 torr et 50 torr (pression atmosphérique : 760 torr) et des courants injectés à la décharge de 30, 60 et 90 mA. A noter que ce courant est mesuré entre l'Anode 2 et la Cathode une fois la décharge MCS D établie.

#### 4.a. Ligne microruban

Les figures 6 et 7 montrent respectivement les modules des paramètres S<sub>21</sub> et S<sub>11</sub> de la ligne microruban en fonction de la fréquence, du courant injecté à la décharge et de la pression. On constate sur la figure 6 une augmentation des pertes en transmission lorsque le courant injecté à la décharge augmente. On

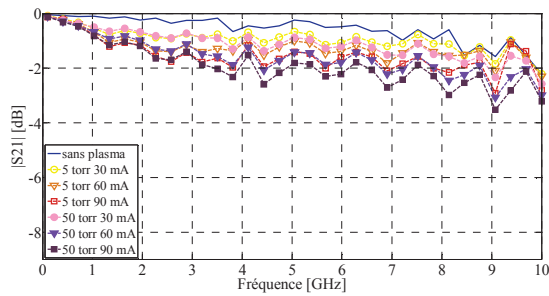


Figure 6.  $|S_{21}|$  de la ligne microruban en fonction de la fréquence, du courant et de la pression.

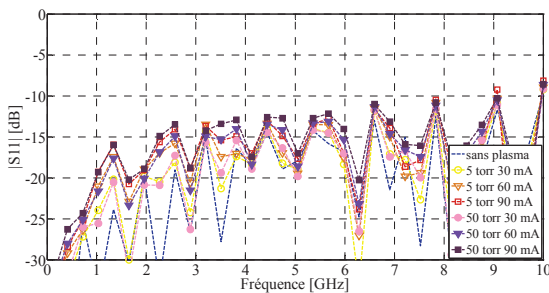


Figure 7.  $|S_{11}|$  de la ligne microruban en fonction de la fréquence, du courant et de la pression.

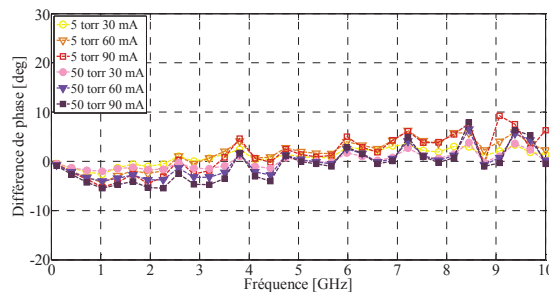


Figure 8. Différence de phase du paramètre  $S_{21}$  de la ligne microruban en fonction de la fréquence, du courant et de la pression.

remarque que cet effet est légèrement plus prononcé à 50 torr. Concernant le paramètre  $S_{11}$  on observe une légère augmentation de la réflexion avec le courant. Pour ce paramètre, il n'y a pas de différences significatives entre les deux pressions.

La figure 8 met en évidence la différence de phase  $\Delta\Phi$  du paramètre  $S_{21}$  de la ligne microruban entre les cas sans plasma et avec plasma ( $\Phi S_{21}$  avec plasma -  $\Phi S_{21}$  sans plasma). On identifie particulièrement deux zones en fonction de la fréquence. La première zone en basse fréquence où la phase de l'onde électromagnétique qui rencontre la décharge est en retard par rapport à l'onde qui se propage dans la ligne sans plasma (i.e. différence de phase  $\Delta\Phi < 0$ ). La deuxième zone concerne des fréquences plus élevées où  $\Delta\Phi > 0$ , soit une onde électromagnétique en avance de phase par rapport au cas sans plasma. On observe que la fréquence de transition

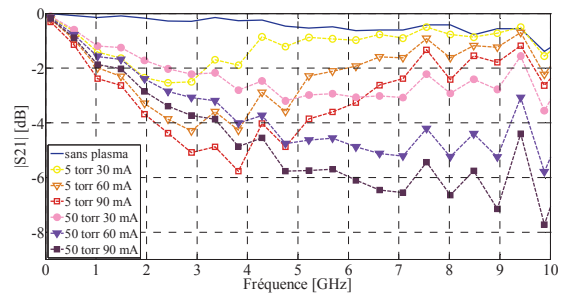


Figure 9.  $|S_{21}|$  de la ligne microruban inversée en fonction de la fréquence, du courant et de la pression.

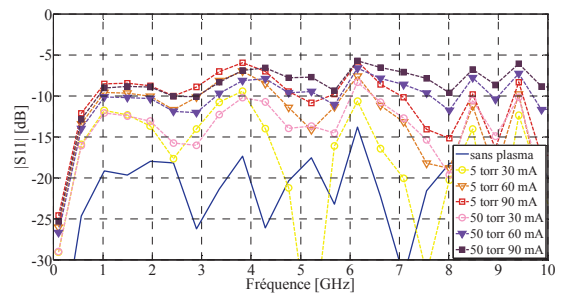


Figure 10.  $|S_{11}|$  de la ligne microruban inversée en fonction de la fréquence, du courant et de la pression.

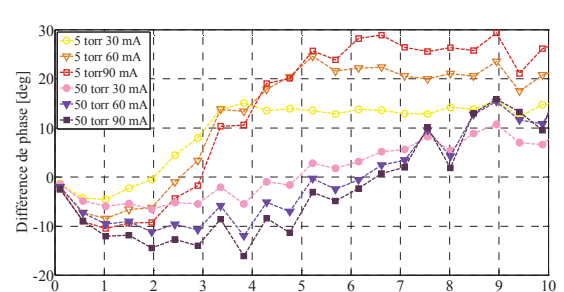


Figure 11. Différence de phase du paramètre  $S_{21}$  de la ligne microruban inversée en fonction de la fréquence, du courant et de la pression.

entre les deux zones dépend du courant. Pour un courant de 90 mA, les valeurs de  $\Delta\Phi$  varient entre -5 et 10 degrés.

#### 4.b. Ligne microruban inversée

La figure 9 montre le paramètre  $|S_{21}|$  en fonction de la fréquence et du courant pour deux valeurs de pression (5 et 50 torr). Dans le cas de la ligne inversée, on observe les mêmes tendances que dans le cas de la ligne microruban, mais avec des effets plus prononcés. On observe entre autre que la fréquence où se trouve la valeur minimale du coefficient de transmission change avec la valeur de la pression.

Les valeurs du paramètre  $|S_{11}|$  en fonction de la fréquence, du courant et de la pression sont exposées sur la figure 10. On constate une augmentation de la



réflexion avec l'augmentation du courant. Dans le cas de la ligne inversée on observe une influence plus importante sur ce paramètre en comparaison avec la ligne microruban classique.

Concernant la différence de phase  $\Delta\Phi$  du paramètre  $|S_{21}|$  (cf. figure 11) on constate les mêmes zones identifiées dans le cas de la ligne microruban classique (zone où  $\Delta\Phi < 0$ , et  $\Delta\Phi > 0$ ). Néanmoins, les valeurs obtenues pour la différence de phase  $\Delta\Phi$  sont plus significatives que dans le cas de la ligne microruban classique. En l'occurrence, un déphasage proche de 30 degrés est obtenu à 9 GHz pour un courant de 90 mA et une pression de 5 torr. Dans ces conditions, les pertes apportées par le plasma ne sont que de 0.5 dB.

De manière générale, on remarque que les résultats obtenus avec la ligne microruban inversée sont plus significatifs que ceux obtenus avec la ligne microruban classique. Cela peut s'expliquer en partie par le fort contraste diélectrique entre la zone d'accueil de la décharge (vide) et le substrat (alumine  $\epsilon_r = 9.9$ ) dans le cas de la ligne microruban classique.

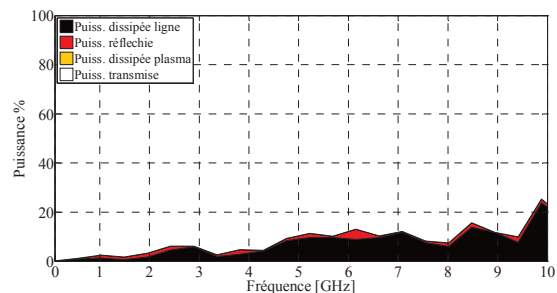
Pour mieux interpréter le comportement du plasma vis-à-vis de l'onde électromagnétique, un bilan de puissance (dérivé à partir des paramètres S) est présenté sur la figure 12 dans le cas de la ligne microruban inversée. Trois cas sont considérés : le cas sans plasma (cf. figure 12.a) le cas avec plasma à 5 torr et 90 mA de courant (cf. figure 12.b) et le cas avec plasma à 50 torr et 90 mA de courant (cf. figure 12.c). En supposant que la décharge ne modifie pas les paramètres intrinsèques de la ligne, on observe principalement un phénomène de dissipation de la puissance de l'onde électromagnétique par la décharge plasma. A noter que ce phénomène est dépendant de la fréquence et de la pression du gaz. La réflectivité associée à la décharge plasma est au final relativement faible.

## 5. Conclusion

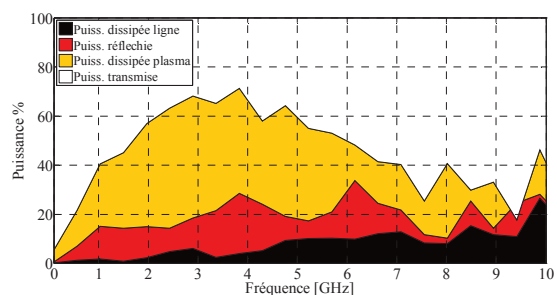
Deux dispositifs qui permettent d'évaluer l'interaction d'une onde électromagnétique avec une décharge plasma sont proposés. Ces deux dispositifs offrent une large liberté en termes de contrôle de paramètres du plasma (type de gaz, pression du gaz et courant injecté à la décharge).

Des mesures effectuées à l'aide de ces deux dispositifs montrent deux effets remarquables. Le premier concerne la dissipation de la puissance de l'onde électromagnétique par le plasma. Cet effet peut atteindre des valeurs significatives (50 % de la puissance dissipée par la décharge) mais il reste dépendant de la fréquence et de la pression du gaz. Le deuxième effet important est le déphasage de l'onde électromagnétique en présence de la décharge plasma qui, dans le cas de la ligne inversée peut atteindre des valeurs autour de 30 degrés à 5 torr sans pertes d'insertion notables, et pour une décharge millimétrique.

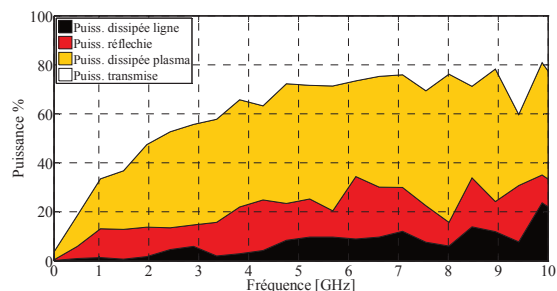
Les travaux futurs ont pour objectif de mettre à profit ces propriétés dans le cadre de composants RF reconfigurables.



a) Sans plasma.



b) Plasma avec un courant de 90 mA à 5 torr.



c) Plasma avec un courant de 90 mA à 50 torr.

Figure 12. Bilan puissance de la ligne inversée en fonction de la fréquence.

## 6. Bibliographie

- [1] T. Anderson, *Plasma Antennas*, Artech House, 2011.
- [2] A. Djermoun, G. Prigent, N. Raveu, T. Callegari, *Widely tunable high-Q SIW filter using plasma material*, IEEE International Microwave Symposium MTT-S 2010, pp.1484-1486, 23-28 May 2010.
- [3] P. Linardakis, G.C. Borg, *Small-Signal Impedance of a Radio Frequency Plasma Capacitor*, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol.17, no.11, pp.763-765, Nov. 2007.
- [4] J. Ouyang, J. Cao, S. Li, Z. Peng, W. Li, W. Ren, *Application of Discharge Plasma as Dynamic Switch in Microstrip Line*, IEEE Electron Device Letters, vol.31, no.12, pp.1491-1493, Dec. 2010.
- [5] K. Makasheva, G.J.M. Hagelaar, J.P. Boeuf, T. Callegari, L.C. Pitchford, *Ignition of Microcathode Sustained Discharge*, IEEE Transactions on Plasma Science, vol.36, no.4, pp.1236-1237, Aug. 2008.