

# NOUVELLE TECHNIQUE DE MESURE DE LA PUISSANCE RÉELLE ABSORBÉE PAR UN PLASMA LASER CRÉÉ PAR DÉCHARGE RADIOFRÉQUENCE

Rabah TADJINE et Hadj LAHMAR

*Centre de Développement des Technologies Avancées,  
Cité du 20 Août 1956, B.P. 17, Baba-Hassen, 16303 Alger, Algérie*  
E-mail : [rtadjine@cdta.dz](mailto:rtadjine@cdta.dz)

**RÉSUMÉ** : Un dispositif expérimental a été mis au point pour la mesure de la puissance absorbée par un plasma radiofréquence (RF) à couplage capacitif. Il est constitué d'une station courant tension (I-V) non intrusive et à haute résolution, d'un oscilloscope numérique à très forte fréquence d'échantillonnage (5Gcycles/s). L'utilisation de la théorie des réseaux électriques et la méthode Bloomfield de lissage permet d'éliminer les erreurs liées aux éléments électriques parasites de la chambre d'ionisation. Ces éléments sont dus à la nature même du couplage, qui est fortement capacitif. La méthode permet aussi de pallier à la distorsion et aux fluctuations des signaux électriques mesurés. Bien que le système soit conçu pour un plasma 13,56 Mhz pour le traitement de surface, il peut être appliqué pour les lasers à gaz excités en RF (1-100 MHz), moyennant un calibrage dans cette gamme de fréquence.

**MOTS-CLÉS** : RF plasma laser, CCP, diagnostique, caractérisation électrique, sonde courant-tension

## 1. Introduction

Les décharges radiofréquences ont largement été utilisées dans l'industrie des semi-conducteurs pour la gravure et le dépôt et aussi dans les lasers à gaz [1-2]. Le couplage capacitif du plasma (CCP) est utilisé pour exciter de tels lasers. D'ailleurs un RF CCP a été utilisé pour la première fois en 1960 pour obtenir un milieu actif pour le laser CO<sub>2</sub>-He-Ne [3]. L'avantage de l'utilisation de l'excitation RF est qu'avec de très faible distance inter-électrode vous pouvez allumer le plasma avec de très faibles tensions comparé à l'excitation en courant continu (DC) qui nécessite de très large ballastes pour stabiliser la décharge. Le calcul de la puissance RF absorbée par le plasma ou son impédance électrique équivalente passe par la mesure des signaux électriques (courant et tension) de la décharge prélevés au niveau de l'électrode excitatrice. Il est très difficile de mesurer avec précision ces signaux électriques [4,5]. Donc utiliser des sondes de tension et de courant traditionnelles aussi performantes soient-ils n'exclut pas les erreurs pour la mesure de puissance absorbée ou de l'impédance équivalente du plasma. Le but de notre travail est de présenter une technique de mesure de la puissance, nettement plus fiable et plus précise. Elle repose principalement sur trois points cruciaux: calibration de la station de mesure I-V, L'identification et la mesure des paramètres électriques parasites moyennant un modèle électrique approprié grâce à l'utilisation de la théorie des réseaux électrique et le lissage par la méthode de Bloomfield des signaux électrique.

## 2. Dispositif Expérimental

La figure (1) montre le schéma du dispositif expérimental. La chambre d'ionisation est constituée de deux électrodes de même diamètre de 100mm et séparée de 20mm de distance. Le courant et la tension RF sont prélevés par la station (fig.2), qui est la combinaison d'une sonde courant et d'une sonde tension place l'une à côté de l'autre pour minimiser les erreurs liées au déphasage. Les signaux ainsi collectés par un oscilloscope numérique (TDS4054)

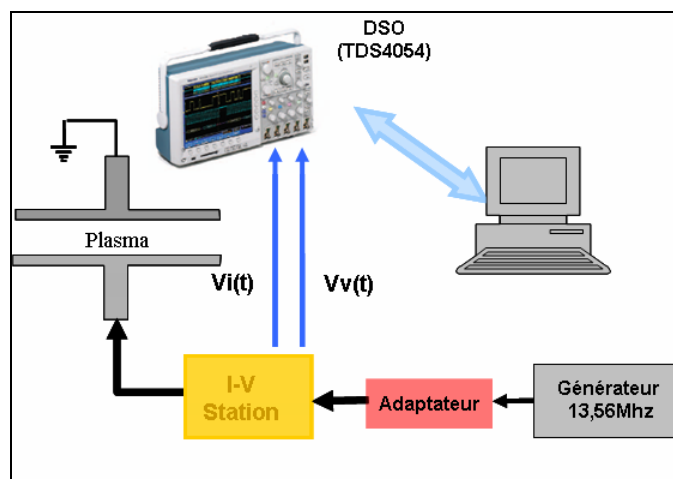


Figure 1 : Dispositif expérimental

sont transférés vers un Pc où un programme a été élaboré pour le lissage des signaux électriques, calcul de puissance absorbée par le plasma et son impédance équivalente, en tenant compte des éléments parasites introduit par la chambre d'ionisation et la connectique.

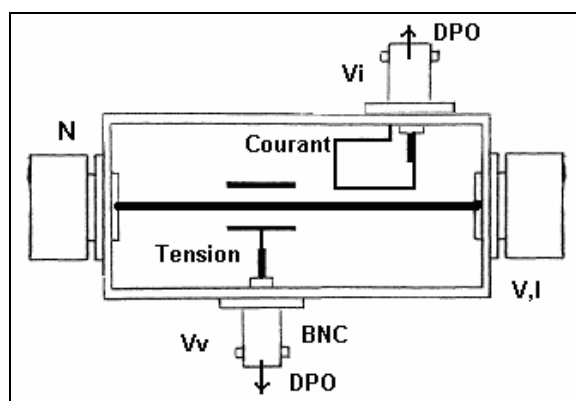


Figure 2: Schéma de la station V-I

### 3. Théorie

Basé sur la théorie des circuits électrique, la puissance moyenne  $P$  sur une période  $T$  est donnée par:

$$P = \frac{1}{T} \int V(t) \cdot I(t) \cdot dt \quad (1)$$

Avec  $V(t)$  et  $I(t)$  tension et courant instantanés

Et pour des signaux sinusoïdaux l'équation (1) devient alors

$$P = V_p \cdot I_p \cdot \cos(\varphi) \quad (2)$$

Avec  $V_p$  et  $I_p$  courant et tension crête avec un déphasage  $\varphi$  entre eux.

Il existe principalement trois méthodes pour calculer la puissance  $P$ . Equation (1) est directement intégrée numériquement, alors que la transformée de fourrier discrète (DFT) et la méthode de lissage des moindres carrés sont utilisées pour déterminer  $V_p$ ,  $I_p$  et  $\varphi$  de l'équation (2). Pour notre expérimentation c'est l'équation (2) avec lissage qui est utilisée. La différentiation de cette équation donne :

$$\frac{\Delta P}{P} = \tan(\varphi) \cdot \Delta\varphi \quad (3)$$

Dans le couplage capacitif, comme c'est notre cas, le déphasage  $\varphi$  entre le courant de décharge  $I$  et la tension  $V$  est très proche de  $\pi/2$ . Donc une erreur très faible sur  $\varphi$  produit une valeur inacceptable de la puissance  $P$  (équ. 3).

#### 4. Principe de mesure de la station I-V

La station I-V est une combinaison d'une sonde de courant (SI) et d'une sonde de tension (SV) (Fig.2). La sonde IS mesure un signal  $V_i$  proportionnel au courant  $I$ , mais aussi un signal dû à l'interférence du potentiel  $V$ . La sonde SV est un diviseur capacitif, elle donne un signal  $V_v$  proportionnel à la tension appliquée  $V$ . L'impédance introduite par la distance entre le point de sortie  $V$  et l'emplacement de la sonde SV affecte aussi  $V_v$ . Donc le système d'équations est :

$$V_v = a \cdot V + b \cdot I \quad (4)$$

$$V_i = c \cdot V + d \cdot I \quad (5)$$

On utilise la technique De-embedding et Unterminating de Bauer R. et Penfield P. [6], pour extraire les paramètres cascade (a, b, c, d) définissant la station. Pour cela on a utilisé une série de charges capacitives  $Z_i$  (tableau 1), mesurées à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA). Les charges  $Z_i$  sont placées à la sortie de la station. Celle-ci est alimentée par un générateur de fonction d'une grande précision et stabilité en fréquence. Les signaux  $V_v$  et  $V_i$  numérisés par le DPO sont transférés vers le Pc pour en extraire leurs module et déphasage grâce à un algorithme de lissage par méthode itérative des moindres carrés [7]. Des équations (4) et (5) on déduit l'équation suivante (avec  $Z_i = V/I$ ):

$$\frac{V_v}{V_i} = \frac{\frac{a}{d} Z_i + \frac{b}{d}}{\frac{c_p}{d_p} Z_i + 1} \quad (6)$$

**Tableau 1: Charges réactives  $Z_i$  (module et phase en degrés) mesurés à l'aide d'un VNA**

Charge	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$
Module	446	306	182	134	106	90	67
Argument	-90	-89,8	-89,9	-90	-89,9	-89,8	-89,8

Le tableau (2) donne les valeurs des paramètres (a, b, c, d) de la station obtenue par résolution des équations (4), (5) et (6), avec les charges listés dans le tableau (1). Le lissage de la courbe des valeurs  $(V_v/V_i, Z_i)$  (Fig.3) donne une équation de la forme :

$$V_v/V_i = 0,06 Z_i \quad (7)$$

Avec  $R^2 = 0,9998$

**Tableau 2 : Les paramètres de la station I-V**

	magnitude	Phase angle°
a	0,0112	-124,26
b	0,0384	-34,83
c	3,35E-04	-70,27
d	0,1799	-154,89

Si on compare les équations (7) et (8), les paramètres **b** et **c** peuvent être négligés. On déduit que la sonde de courant SI n'est pas affecté par le potentiel V et que la sonde de tension SV n'est pas éloignée de la sortie de la station. La connaissance des paramètres (**a**, **b**, **c**, **d**), de  $V_i$  et de  $V_v$  permettent de déterminer V et I.

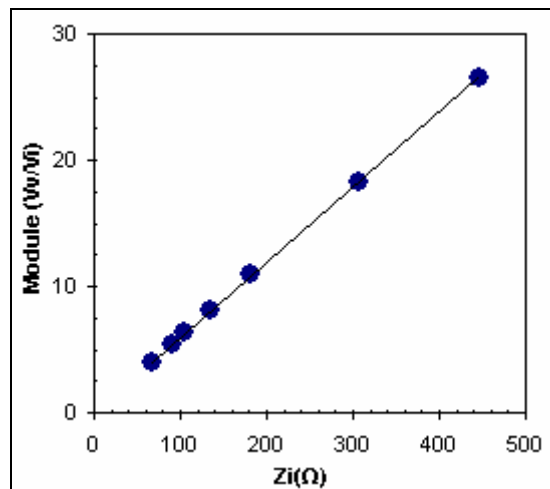


Figure 3 : Lissage des couples de données ( $V_v/V_i$ ) et  $Z_i$

### 5. Détermination des éléments parasites de la chambre d'ionisation

Non seulement les dimensions de la chambre d'ionisation ont une influence sur les caractéristiques du plasma, mais aussi elles affectent la valeur des signaux électriques ( $I_k$ ,  $V_k$ ) au niveau de la cathode en contact direct avec le plasma. Ces valeurs sont largement différentes de celles mesurées par la station ( $V$ ,  $I$ ). La chambre est représentée par un modèle de circuit électrique (fig.4) contenant une self  $L$  pour la connexion électrique et une capacité  $C$  pour l'isolation entre cathode et son blindage [5].

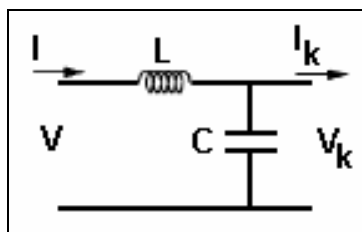


Figure 4 : Modèle de circuit équivalent entre le point de mesure de la station ( $I, V$ ) et la surface de la cathode  $k$  en contact avec le plasma ( $I_k, V_k$ )

L'équation de son impédance équivalente à l'entrée est donnée par :

$$V/I = |Z_c| = L\omega - 1/C\omega \quad (8)$$

L'impédance d'entrée de la chambre d'ionisation  $Z_c$  a été déterminée expérimentalement à l'aide du VNA sur une large gamme de fréquence (1 à 100Mhz) dont les résultats sont montrés sur la figure (5). Le lissage de cette courbe à l'aide de l'équation (8) donne les valeurs pour  $L=28,48nH$  et  $C=133,5pF$ . Il est intéressant de noter que la chambre a une fréquence de résonance autour de  $F_0=81.39Mhz$ .

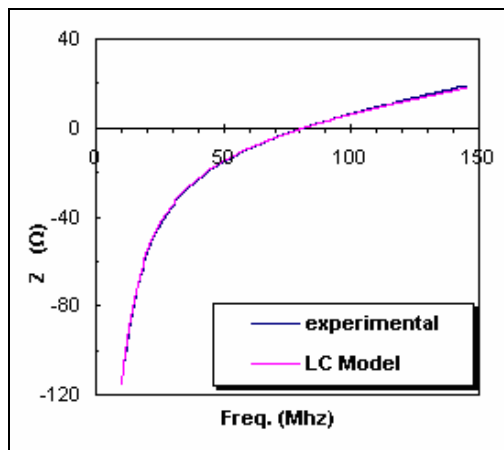


Figure 5 : Impédance d'entrée de la chambre mesurée par VNA

### 6. Calcul de la puissance absorbée par le plasma et son impédance équivalente

La décharge peut être représentée par un circuit électrique constitué d'une résistance R en série avec une capacité X. R représente le chauffage des électrons et X la gaine ionique en contact avec l'électrode.

Les mesures électriques ont été effectuées dans une décharge d'argon, pour des pressions variant de 50mtorr à 300mtorr et une puissance incidente allant de 20 à 100Watt. Il faut rappeler que la technique de mesure de la puissance dans cet article est appliquée pour un plasma argon basse pression à 13.56Mhz. Mais elle est toute à fait pratique et applicable pour un laser à gaz tel que le Laser CO2, pour des fréquences allant jusqu'à 100Mhz. La puissance absorbée par le plasma ( $P_p = I_k \cdot V_k$ ) et son impédance ( $Z_p = V_k / I_k$ ) sont calculées en utilisant le produit matricielle (équ.9) de celle du circuit équivalent de la cathode et celle de la station I-V

$$\begin{bmatrix} V_k \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_p & b_p \\ c_p & d_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_k & b_k \\ c_k & d_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_v \\ V_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

La puissance absorbée par le plasma Pabs (fig.6) évolue avec le potentiel  $V_k$  suivant La loi  $P_{abs} \propto V_k^2$ , ce qui représente une caractéristique du chauffage stochastique a haute tension [8]. Le courant plasma  $I_k$  évolue avec  $V_k$  suivant la loi  $I_k \propto V_k$ . Cela peut être observe par le non changement de boutons de réglage de l'adaptateur durant l'expérience.

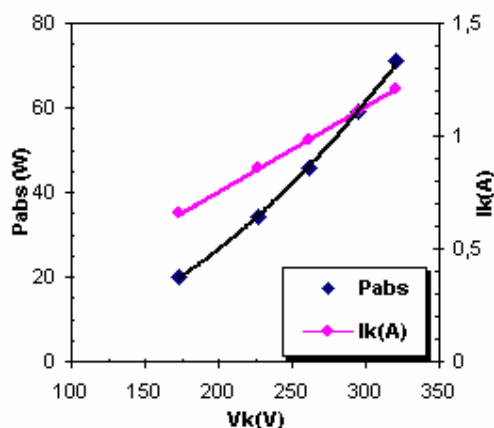


Figure 6 : Puissance absorbée par le plasma Pabs et courant  $I_k$  en fonction du potentiel cathode  $V_k$ , pour la pression de 100mtorr dans un plasma argon 13,56Mhz

La figure (7) reflète l'évolution macroscopique des paramètres de la décharge en fonction de la pression. La décroissance de X est liée au fait que la gaine ionique diminue avec la pression, alors que la diminution de R est due à l'accroissement de la densité électronique avec la pression.

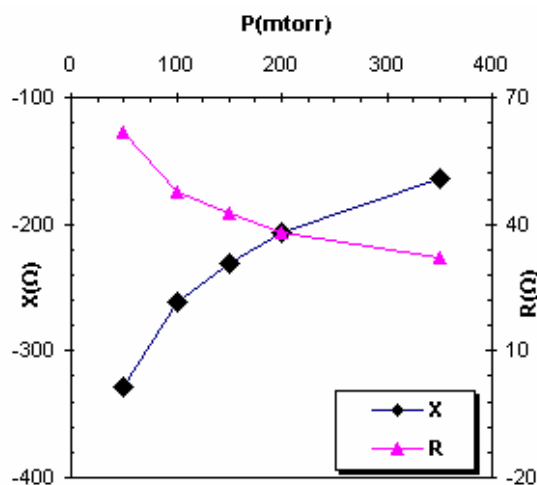


Figure 6: Resistance Plasma R et Reactance X en fonction de la pression (Pinc=60Watt; gaz: Argon)

## 7. Conclusion

Une décharge RF d'argon a été caractérisée en utilisant un système de mesure constitué d'une station I-V. Ce système fournit une mesure in situ et avec précision de la puissance absorbée par le plasma et son impédance équivalente, sans interruption du plasma. Or ces deux grandeurs sont affectées par la température, d'où l'utilité de cette technique pour le suivi et le contrôle de la température qui a un effet néfaste dans le rendement des lasers à gaz.

## References

- [1] van Roosmalen A J, van den Hoek W G M and Kalter H.; *J. Appl. Phys.* **58** 653 (1985)
- [2] Mentel J, Reich N, Mizeraczyk J, Grozeva M and Sabotinov N; *Gas Laser—Recent Development and Future Prospects* p55 (1996)
- [3] Javan A., Bennett W.R., Herriot D.R.; *Phys. Rev. Lett.*, Vol. **6**, p106 (1961).
- [4] Hargis P. J., et al. ; *Rev. Sci. Instrum.* **65**, 140 (1994).
- [5] Sobolewski M. A., *J. Vac. Sci. Technol.*; **A10**, 3550 (1992)
- [6] Bauer R. and Penfield P., "De-embedding and Unterminating," *IEEE Trans. MTT.*, **22**, 282 (1974).
- [7] Bloomfield, P, "Fourier analysis of time series: an introduction" John Wiley & Sons, (1976)
- [8] Godyak VA, Piejak RB, Alexandrovich BM. *IEEE Trans Plasma Sci*; **19**, 660 (1991)