

TP Mesure de grandeur électrique d'une décharge RF

Garrett Curley, ingénieur de recherche, IEMN

Introduction :

On cherche à mesurer plusieurs grandeurs électriques dans le circuit d'une décharge RF

- La tension, $V_{rms} = V_{rf}/\sqrt{2}$
- Le courant, $I_{rms} = I_{rf}/\sqrt{2}$
- La phase entre la tension et le courant, θ
- La puissance, P_{rf}
- L'amplitude des harmoniques.
- L'impédance du circuit, $Z = R + jX$

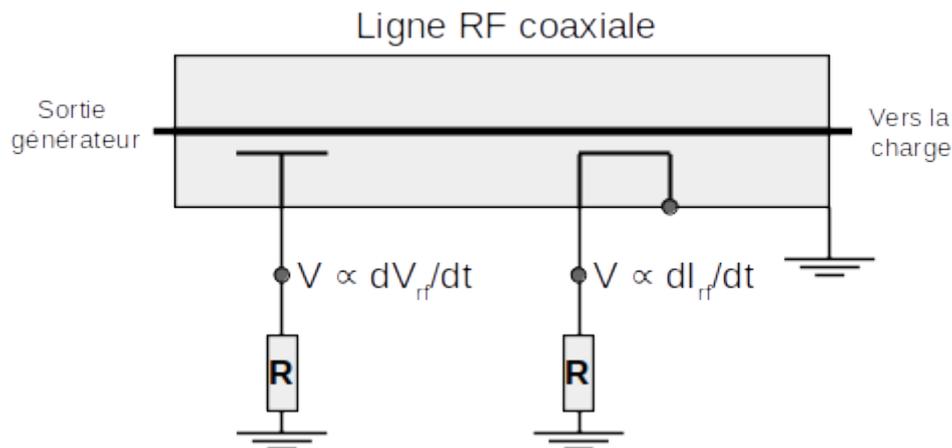
Grâce à ces informations, on peut aussi estimer

- la densité de courant ionique, J_i
- la tension d'autopolarisation, V_{bias}

On va utiliser une sonde commerciale, l'Octiv Suite, de la société Impedans

Principe de mesure

La plupart des sondes courant-tension RF sont basées sur le principe suivant :

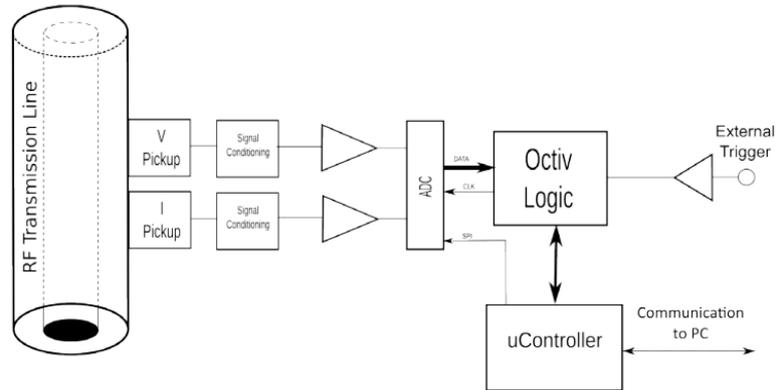


La mesure de la tension se fait par un capteur capacitif associé à un diviseur de tension. La résistance peut être interne à la sonde ou externe, en utilisant l'entrée 50 ohms d'un oscilloscope par exemple. Le couplage capacitif induit un courant $C.dV/dt$ dans le capteur. Le signal mesuré est donc proportionnel à la dérivée de la tension RF.

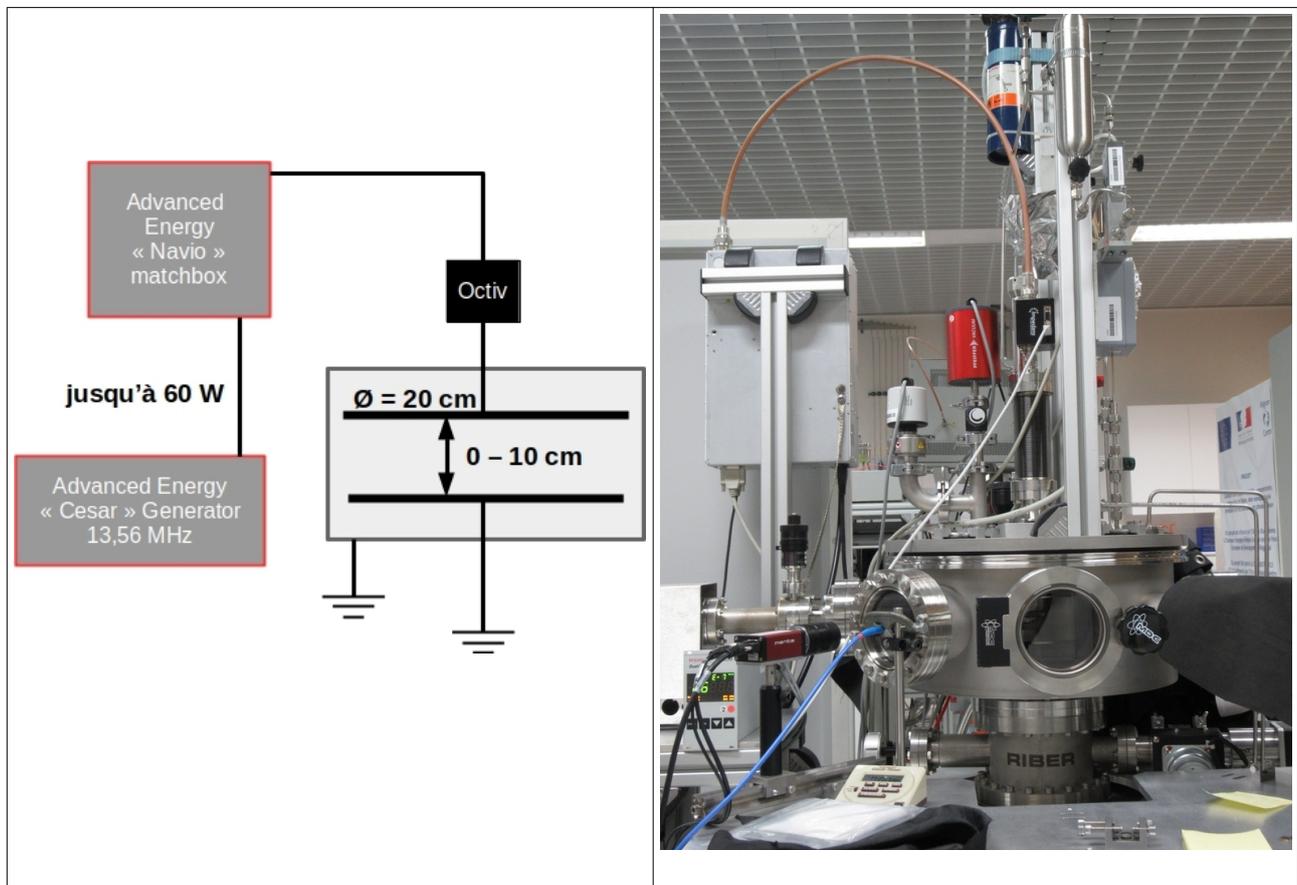
La mesure du courant se fait par un capteur inductif (boucle). Le couplage inductif induit un courant $M.dI/dt$ dans le capteur. Le signal mesuré est donc proportionnel à la dérivée du courant RF.

Spécificité de la sonde Octiv Suite

La sonde Octiv analyse les signaux avec une transformation de Fourier rapide (FFT) afin de convertir les signaux du domaine temporel vers le domaine spectral. À partir de cette information, elle isole et moyenne jusqu'à 5 fréquences fondamentales et leurs harmoniques. L'information sur la phase entre les harmoniques est aussi retenue, permettant la reconstruction de la forme d'onde.



Le bâti



Avant ou après la boîte d'accord ?

La boîte d'accord (« matchbox » ou « matching unit » en anglais) modifie l'impédance du circuit total (câbles, réacteur, plasma) pour qu'elle soit égale à l'impédance de sortie du générateur. La puissance RF peut donc être transmise efficacement dans tout le circuit.

Exercice

1. Comparer les grandeurs rf avant et après la boîte d'accord.

Calcul de la tension d'autopolarisation

Théorie

On suppose que la surface de l'électrode de puissance est petite par rapport à la surface à la masse en contact avec le plasma. Dans ce cas, le potentiel plasma est peu modifié par la RF. A l'état stable, le courant électronique intégré sur une période doit être égal au courant ionique. Une tension négative se forme naturellement sur l'électrode afin de limiter le flux d'électrons pendant les phases positives du cycle et attirer les ions positifs en continu (car les ions ne suivent pas les cycles RF). On peut démontrer que cette tension d'autopolarisation (ou « bias voltage ») est donnée par :

$$V_{\text{bias}} \approx - \left(V_{\text{rf}} - \frac{T_e}{2} \ln \left(\frac{2\pi V_{\text{rf}}}{T_e} \right) \right)$$

La deuxième partie à droite de cette équation est de l'ordre de 10 V, donc pour V_{rf} très grand :

$$V_{\text{bias}} \approx V_{\text{rf}}$$

Exercices

1. Calculer la valeur de V_{bias} à 10, 30 et 60 W
2. Comparer les valeurs avec celles données par le générateur/boîte d'accord
3. Comment la boîte d'accord mesure la V_{bias} ?
4. Discuter des différences entre les valeurs.
5. Est-ce que l'électrode peut être pulvérisée (gravée) par les ions ?

Calcul et mesure du courant ionique

Théorie (méthode Impedans)

On suppose que la majorité de la puissance RF est absorbée par la gaine devant l'électrode afin d'accélérer les ions vers celle-ci.

La densité de courant ionique est donc :

$$J_i = \frac{P_G}{V_B A}$$

Ou P_G est la puissance dissipée dans la gaine, V_B est la chute de potentiel à travers la gaine ($\approx V_{\text{bias}}$) et A est la surface de l'électrode.

La puissance totale : $P_T = VI\cos\theta$

La puissance (résistive) dissipée dans le circuit entre la sonde et l'électrode : $P_0 = I^2R_0$, ou R_0

La tension à travers le plasma, pour une pression donnée, reste relativement constante (voir *Godyak 1990*). On peut donc estimer la puissance dissipée à travers le plasma : $P_P = I \times k_p$, ou

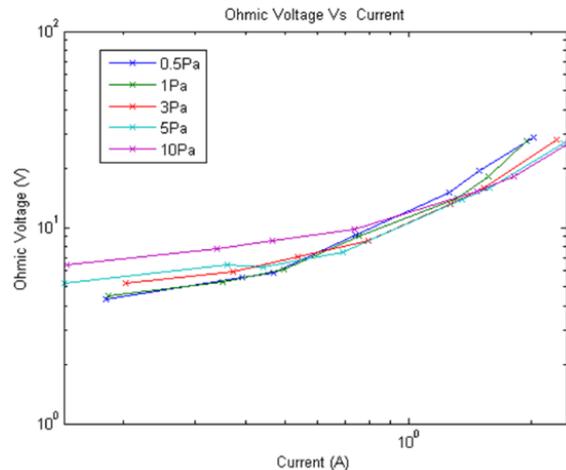
La puissance dissipée dans la gaine est donc $P_G = P_T - P_0 - P_P$

• Voltage Drop

The voltage dropped across the resistance of the bulk plasma. This is a pressure dependent quantity and will become more pronounced at higher pressure where ohmic plasma heating becomes important. The value of this quantity will be different for different reactors.

The method for evaluating this quantity at a given pressure is as follows.

- Ignite the discharge and apply an rf bias to the electrode.
- Record the discharge current flowing through the electrode (I) and the Ohmic Voltage ($V\cos\theta$).
- Gradually reduce the applied rf voltage to reduce the discharge current while recording the Ohmic Voltage at each point.
- The data should follow a trend similar to the graph shown below.
- At low currents the Ohmic voltage will settle to a constant value. This value is k_p and is inserted into the Voltage Drop input in the GUI. The values of k_p found in this example range from 4 to 6 of the pressure range investigated.



Exercises

1. Calculer P_0 en mesurant le composant réel de l'impédance sans plasma
2. Calculer k_p pour deux ou trois pressions différentes
3. Mesurer le courant ionique pour les différentes pressions.

Bibliographie / Lecture

Electrical Characteristics of Parallel-Plate RF Discharges in Argon, Valery Godyak et al., IEEE Trans. Plasma Science, **19**, 660 (1991)

Current and Voltage Measurements in the Gaseous Electronics RF Reference Cell, Mark A. Sobolewski, J. Res. Natl. Inst. Stand. Tech., **100**, 341 (1995)

Dynamic model of the electrode sheaths in symmetrically drive rf discharges, Valery Godyak et al., Phys. Rev. A, **42**, 2299 (1990)

Experimental setup and electrical characteristics of an inductively coupled plasma, Valery Godyak et al., J. Appl. Phys., **85**, 703 (1999)

A simple analysis of an inductif RF discharge, Robert Piejak et al., **1**, 179 (1992)

Measuring the ion current in electrical discharges using radio-frequency current and voltage measurements, Mark A. Sobolewski, Appl. Phys. Lett. **72**, 1146 (1998)

Measuring Current, Voltage and Impedance in RF Plasmas, David Vender, Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics IV, March 2001.