

## Estudio del plasma dentro de un filtro magnético en vacío

H. KELLY<sup>1</sup>, A. MARQUEZ<sup>1</sup> y M. PIRRERA<sup>2</sup>

Instituto de Física del Plasma, CONICET-Dpto. de Física, FCEN, UBA

<sup>1</sup> Miembro del CONICET, <sup>2</sup> Becaria APCyT

Ciudad Universitaria Pab. 1, (1428) Ciudad de Buenos Aires

*e-mail: pirrera@tinfipl.fip.uba.ar*

Este trabajo presenta una caracterización del flujo iónico generado por un arco continuo filtrado magnéticamente y operado en vacío. El equipo incluye una cámara de descarga (donde se genera un plasma metálico), acoplada a una cámara de deposición (donde se coloca un sustrato) mediante un filtro magnético en forma de cuarto de toroide. El arco se realiza entre un cátodo cilíndrico y un ánodo anular refrigerados con agua, ambos de Cobre, con una corriente continua de 100 A. El filtro consiste en un cilindro de acero inoxidable doblado a 90° y con paredes corrugadas, de 500 mm de largo y 100 mm de diámetro interno, rodeado de bobinas generadoras de campo magnético. La intensidad de este campo es suficiente para magnetizar los electrones pero no los iones, y su máximo valor es ~ 260 G en el codo del filtro. Además el sistema cuenta con la posibilidad de polarizar el filtro toroidal mediante una fuente d-c independiente. Se presentan las mediciones de los potenciales flotantes del filtro y del plasma, y la corriente iónica colectada por sondas en diferentes posiciones en función del campo magnético y del potencial de polarización del filtro.

This work presents an ion flux characterization generated by a magnetically filtered d-c vacuum arc. The device includes a metallic plasma-generating chamber coupled to a substrate chamber through a quarter-torus magnetic filter. The arc is produced between a cylindrical cathode and an annular anode (both copper water-cooled electrodes), and it is operated at a current level of 100 A. The filter consists in a stainless steel cylinder 500 mm length and 100 mm inner diameter with a 90° bending angle and corrugated lateral wall, surrounded by a magnetic field generating coil. The magnetic field intensity is enough high so as to magnetize the electrons but not the ions, and its maximum value is ~260 G at the knee of the filter. The system has the possibility of biasing the toroidal filter by using an independent d-c source. The floating potentials of the filter and the plasma, and the ion current collected by probes located at different positions as functions of the magnetic field intensity and the bias filter potential are reported.

### Introducción

La descarga tipo arco en vacío (DAV) es una técnica que se usa para la deposición de recubrimientos metalúrgicos y de alta dureza, metalización de cobre en microelectrónica, etc [1]. Los depósitos generados a través de este tipo de descarga, tienen las virtudes de ser de alta densidad, alta adhesión y de tiempos rápidos de deposición.

El problema que este método presenta es la producción de macropartículas (MP). Las MP son gotas de metal fundido, generadas por los spots del cátodo e incorporadas en los depósitos. Dependiendo de su aplicación tecnológica, las MP deterioran la calidad de los depósitos.

Para eliminar las MP, se emplean sistemas de filtrado basados en la aplicación de un campo magnético [2]. Este campo permite deflectar el plasma a lo largo de un conducto curvo, mientras el flujo de MP no es desviado y por lo tanto no alcanza la salida del conducto.

El filtro más estudiado es el cuarto de toro (QT) con un campo magnético  $\mathbf{B}$  paralelo a su superficie [2, 3, 4]. El material de la pared del tubo es generalmente conductor, así es posible polarizarlo y

mejorar la eficiencia del mismo [5]. El principio básico de este tipo de filtrado es que el movimiento transversal al campo de las partículas cargadas es circular con un radio de giro de Larmor,  $R_L = mv/qB$ , donde  $v$  es la componente de la velocidad perpendicular al campo  $\mathbf{B}$  de la partícula de masa  $m$  y carga  $q$ . Para  $B > 10$  G, el  $R_L$  de los electrones es mucho menor que el radio del QT (del orden de la decena de cm), por lo que éstos se consideran magnetizados.

Por otro lado, también se usan tubos de pared lateral rugosa, de manera tal de minimizar la salida de MP por reflexión en las paredes internas del tubo.

### Experimentación

Para el estudio del plasma se utilizó el equipo DFC2 del INFIP, que se esquematiza en la Figura 1. El equipo se compone de una cámara de descarga (donde se genera el plasma metálico); acoplada a la cámara de deposición (donde se ubica la sonda colectora), por un tubo de acero inoxidable corrugado doblado a 90°.

El dispositivo cuenta con un sistema de vacío formado por una bomba mecánica que asiste a dos bombas difusoras, una de ellas conectada a la

cámara de descarga y la otra a la cámara de deposición. Este sistema permite que se trabaje bajo bombeo a presiones del orden de  $1.10^{-4}$  mbar.

En la cámara de descarga se encuentran un cátodo cilíndrico de 6 cm de diámetro y un ánodo anular que permite el pasaje del flujo del plasma hacia el interior del filtro. Ambos electrodos (de cobre) están refrigerados con agua, y fueron sujetos en este trabajo a una corriente continua de 100 A. El circuito de descarga consiste en una fuente de corriente (150 A, 18 kW) en paralelo con un banco de capacitores (65 mF) conectada a los electrodos a través de un bobinado en serie (18 mH) con el fin de lograr un arco estabilizado.

Acoplado a la cámara de descarga, a través de una pieza externa aislante de poloricloruro de vinilo (PVC) y un cilindro interno aislante de tela de vidrio silanizado con resina de silicona (G7), se encuentra el filtro corrugado de acero inoxidable (ver Fig. 1). Alrededor del filtro se enrolló un bobinado que genera el campo magnético. Dicho bobinado fué alimentado por una fuente d-c, con la posibilidad de variar la corriente, y así el valor del campo magnético. La intensidad de este campo varía a lo largo del filtro, y para una corriente en el bobinado de 80 A, alcanza un valor máximo de  $B_{\text{filtro}} = (250 \pm 10)$  G, medido con una sonda Hall en el codo del toroide,. A la salida y a la entrada del filtro, el campo cae a un 10% de su valor en el codo, debido a la configuración de las líneas de campo. En la Figura 2 se esquematiza un gráfico cualitativo de las líneas de campo del filtro, realizadas con el software ViziMag [5].

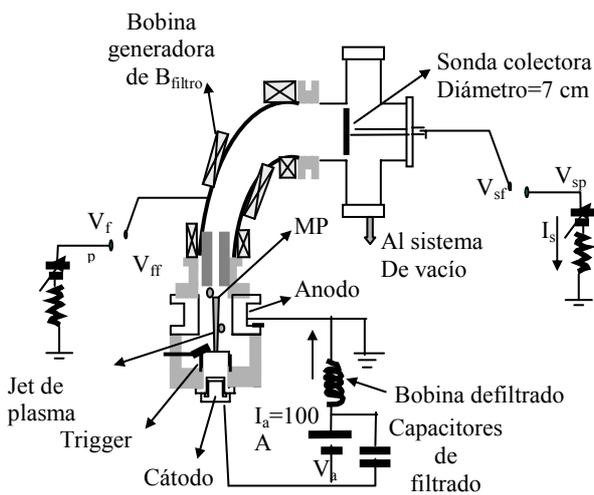


Figura 1: Esquema del equipo de descarga arco en vacío filtrado magnéticamente.

El diseño del equipo permite que el filtro se pueda mantener a un potencial electrostático flotante ( $V_{\text{ff}}$ ), o bien se pueda polarizar ( $V_{\text{fp}}$ ), mediante una

fuentes d-c independientes. En las mediciones de potencial flotante se adquirió el valor de dicho potencial a través de un divisor de tensión de elevada impedancia ( $\cong 15 \text{ M}\Omega$ ) conectado a un osciloscopio variando el campo magnético del filtro  $B_{\text{filtro}}$ . En otras mediciones el filtro fue polarizado a una tensión dentro del rango de 0-20 V con una fuente de tensión de corriente máxima de 18 A.

A la salida del filtro se acopla, a través de una pieza aislante de PVC, la cámara de deposición. La misma tiene forma de cruz, y cuyos cuatro extremos se conectan, uno al filtro, el segundo al sistema de vacío, en el tercero se ubica el portasubstrato y en el cuarto se usa como un puerto de diagnóstica de presión.

Para caracterizar el plasma se utilizó un electrodo plano de sección circular cuyo diámetro es  $(7.0 \pm 0.1)$  cm. El mismo tiene la posibilidad posicionarse en tres posiciones distintas, a la entrada del filtro (posición A), cercano al codo del toroide (posición B) y a la salida (posición C); tal como se esquematiza en la Figura 2.

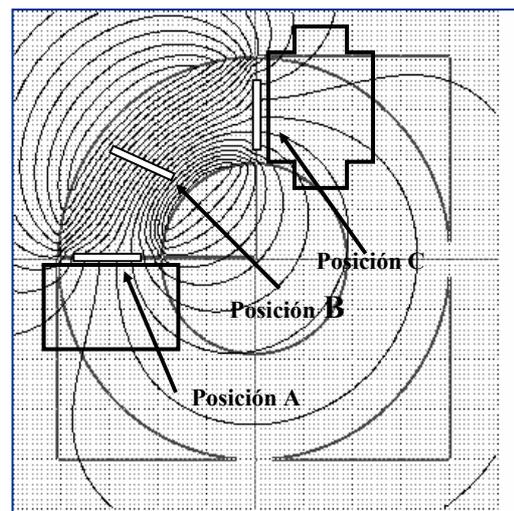


Figura 2: Esquema de las posiciones de electrodo y de las líneas de campo magnético del filtro. La posición A corresponde a la salida de la cámara de descarga, y la posición C a la entrada de la cámara de deposición.

El electrodo puede mantenerse a potencial electrostático flotante ( $V_{\text{sf}}$ ) o bien polarizado a un potencial fijo ( $V_{\text{sp}}$ , usualmente negativo para coleccionar iones). Para medir  $V_{\text{sf}}$  se usa el divisor de tensión usado para medir  $V_{\text{ff}}$  conectado al osciloscopio. Para polarizar la sonda se usó una fuente de tensión de corriente máxima de 1.5 A con  $V_{\text{sp}} = (-70 \pm 1)$  V.

Para la adquisición de los datos se usó un osciloscopio digital de cuatro canales, (250 Ms/s con un ancho de banda analógico de 500 MHz).

## Resultados

En la Figura 3 se muestra  $V_{ff}$  como función de  $B_{filtro}$  para las tres posiciones del electrodo. Cada punto de la figura representa el promedio de 50 puntos del archivo de datos original, y con una barra de error correspondiente a dispersión evaluada sobre los datos originales.

En la Figura 4 se presenta  $V_{sf}$  como función de  $B_{filtro}$ , con el filtro a potencial flotante y para las tres posiciones (A, B y C) del electrodo.

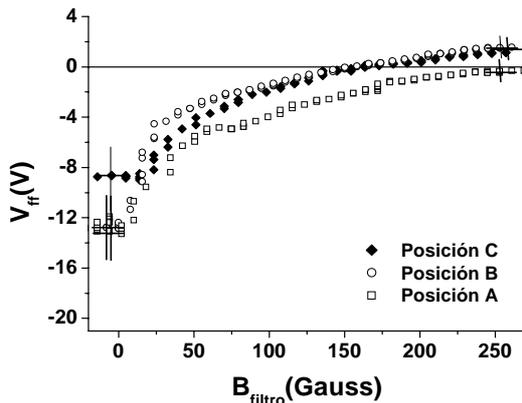


Figura 3: Potencial flotante del filtro como función del campo magnético del filtro, para las tres posiciones del electrodo.

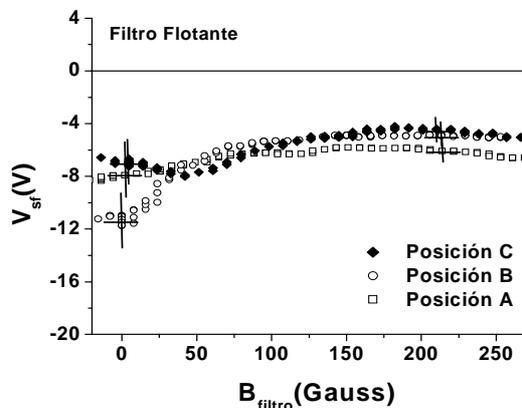


Figura 4: Potencial flotante del electrodo en las posiciones A, B y C como función del campo magnético del filtro (con el filtro flotante).

En la Figura 5 se presenta  $V_{sf}$  (en A, B y C) como función de  $V_{fp}$  para  $B_{filtro} = (250 \pm 10)$  G.

En la Figura 6 se muestra  $V_{sf}$  (posición C) vs.  $V_{fp}$  para diferentes valores de  $B_{filtro}$ .

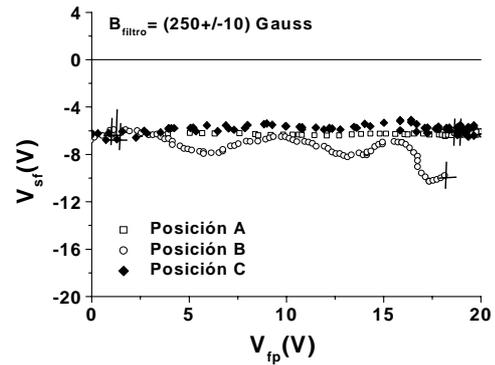


Figura 5: Potencial flotante del electrodo como función del potencial de polarización del filtro con  $B_{filtro} = (250 \pm 10)$  G.

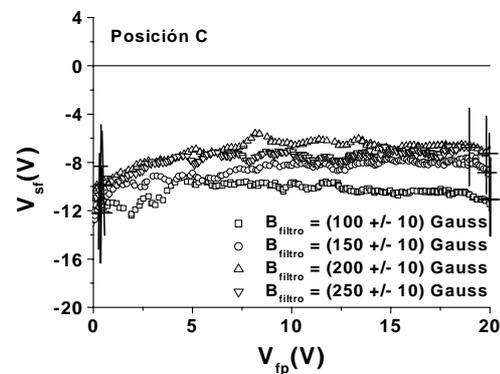


Figura 6: Potencial flotante del electrodo en la posición C, en función del potencial de polarización del filtro a diferentes intensidades de  $B_{filtro}$ .

Con el electrodo polarizado negativamente (para coleccionar iones) se midió la corriente iónica ( $I_s$ ) en A, B y C como función de  $B_{filtro}$ , con  $V_{ff}$ . Las curvas se muestran en la Figura 7.

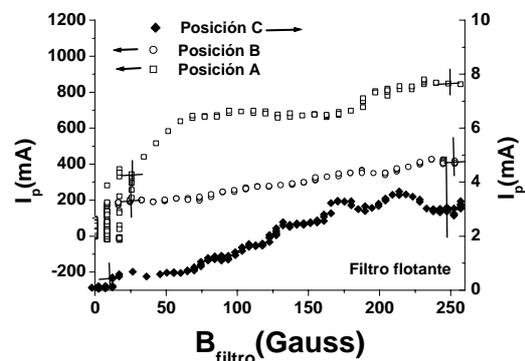


Figura 7: Corriente iónica en función del campo magnético con filtro flotante en A, B y C.

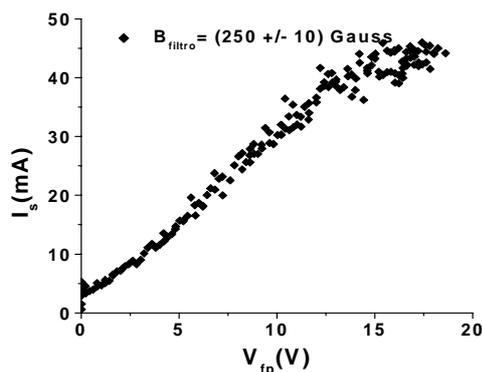


Figura 8: Corriente iónica en función del potencial de polarización del filtro en la posición C con  $B_{\text{filtro}} = (250 \pm 10)$  G..

Con el fin de optimizar la corriente iónica a la salida del filtro, se midió  $I_s$  con el máximo valor de campo posible  $B_{\text{filtro}} = (250 \pm 10)$  G, variando  $V_{fp}$ , tal como se muestra en la Figura 8.

### Discusión y conclusión

De la Figura 3 se puede ver que  $V_{ff}$  aumenta con  $B_{\text{filtro}}$  debido a la magnetización de los electrones, haciéndose del orden del potencial del ánodo para  $B_{\text{filtro}} \sim 150$  G.

El  $V_{sf}$  no presenta variaciones significativas con el cambio de  $B_{\text{filtro}}$  y  $V_{fp}$ , tal como muestran las Figuras 4 y 5. Como para campo nulo  $V_{sf}$  difiere del potencial de plasma en una cantidad proporcional a la temperatura electrónica, esta independencia indica que el potencial de plasma no es afectado por el campo magnético ni por la polarización del filtro. Además, a diferencia de lo ocurrido con  $V_{ff}$ ,  $V_{sf}$  se mantiene siempre negativo. Nótese que las líneas de campo magnético son mayoritariamente tangenciales al filtro (tal como muestra el esquema de la Figura 2), mientras que son perpendiculares al electrodo, por lo que el confinamiento de los electrones es muy inferior en este último caso.

Se observa el crecimiento de  $I_s$  con  $B_{\text{filtro}}$ , lo que indica una disminución de las pérdidas electrónicas en la superficie lateral del filtro, debido a la mayor magnetización (confinamiento) electrónica.

Definiendo la eficiencia  $\epsilon$  del filtro como el cociente entre la  $I_s$  de salida y la de entrada, entonces  $\epsilon \sim 0.003$  cuando el filtro está flotante. En cambio, manteniendo  $B_{\text{filtro}} = 257$  G y polarizando el filtro se observa que aumenta sustancialmente la corriente a la salida del filtro, lográndose una  $I_{s,\text{máxima}} \sim 45$  mA para  $V_{fp} > 15$  V ( $\epsilon \sim 0.045$ ). Con el

filtro polarizado la corriente resulta 15 veces superior al valor obtenido con filtro flotante.

En conclusión el equipo DFC2 opera óptimamente con  $B_{\text{filtro}} = 257$  G y  $V_{fp} > 15$  V, valores para los cuales se logra la mayor corriente iónica sobre el sustrato. En el futuro inmediato se adicionará un campo magnético de focalización a la entrada del filtro para mejorar la entrada de iones al filtro y así mejorar la eficiencia final.

### Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento por el apoyo económico brindado para este trabajo a: la Agencia de Promoción Científica y Tecnológica, proyecto PICT 03-09491, a la UBA, proyectos PID X111 y PID X146, y al CONICET PIP 02239 y PEI 6011.

### Referencias

- 1- R. L. Boxman, D. M. Sanders y P.J. Martin, Handbook of Vacuum Arc Science and Technology, Fundamentals and Applications, Park Ridge, NJ: Noyes, 1995.
- 2- I.I. Aksenov, V. A. Belous, V. G. Padalka y V.M.Khoroshikh; Sov.J.Plasma Phys. 4,425 (1978)
- 3- A. Anders and S. Anders , I. Brown; Plasma Source Sci. Technol.4, 1 (1995).
- 4- R. L. Boxman, V. N. Zhitomirsky, B. Alterkop, E. Gidalevich, M. Keidar and S. Goldsmith; Surf. Coat. Technol. 86-87, 243 (1996).
- 5- www.Vizimag.com