

## **ACELERADOR DE CORRIENTE DE HALL PARA LIMPIEZA POR EROSIÓN IÓNICA DE LAS SUPERFICIES DE LOS SUBSTRATOS**

J.A. Vivas Hohl<sup>a</sup>, N. Vershinin<sup>b</sup>, B. Straumaf<sup>c</sup> y A. Sánchez Bolinches<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Universidad Nacional del Comahue, Av. Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina

<sup>b</sup>SONG S.L., P.O. Box 98, 142432 Chernogolovka, Moscow District, Russia

<sup>c</sup>I.V.T. S.L. (Institute for Vacuum Technology), P.O. Box 47, 109180 Moscow, Russia

<sup>d</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia.

### **RESUMEN**

Pulverización de la capa superficial es el método más eficaz de preparación de la superficie de sustrato para deposición de recubrimientos en vacío. En el trabajo presente se describe el acelerador de corriente Hall de abertura larga, diseñado para limpieza por erosión iónica de las superficies de sustratos de vidrio, metal y plástico en forma de láminas con área extensa. El acelerador aquí descrito es capaz de trabajar con argón, oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono. Este acelerador tiene forma de un bucle muy alargado y, por lo tanto, dispone de la abertura larga (1400 mm en vertical). La potencia máxima del acelerador es de 10 kW. Se presentan las características corriente-tensión para la atmósfera de argón que permiten optimizar el régimen de limpieza por erosión, encontrando el máximo de potencia para la descarga estable. Los perfiles de evaporación son dados para vidrio de silicato y polietileno (polimetil metacrilato). La tasa máxima de evaporación es de 7.5 nm/min para vidrio y de 100 nm/min para polietileno (polimetil metacrilato). La limpieza del aluminio por evaporación se caracteriza en términos de resistencia y microvariación de dureza. Se mostró que el calentamiento de la muestra durante la limpieza por evaporación no llega a una disminución notable de la dureza. La calidad de un ataque iónico se demostró con ayuda de espectroscopía electrónica Auger.

### **Palabras claves**

Acelerador de Corriente de Hall, Limpieza por Erosión Iónica, Fuente de Kaufman

### **INTRODUCCIÓN**

El desarrollo de las tecnologías avanzadas de recubrimientos, acompañado por la caída drástica de los costos relacionados, abrió la posibilidad de aplicación de estos recubrimientos fuera de las áreas tradicionales de productos de alto coste, como son los de industrias de microelectrónica, aeronáutica, vuelos espaciales. El proceso de fabricación de estos recubrimientos, ya bastante complejo por si mismo, se complica aun más para el vidrio por necesidad de aplicar las exigencias tales como uniformidad del espesor y ausencia de los defectos a las áreas extensas, típicas de este material. Además, para conseguir buena adherencia del recubrimiento, de la superficie del vidrio deben de ser eliminadas las mínimas huellas de impurezas. Estos requerimientos restringen fuertemente las posibilidades de selección de las técnicas adecuadas de limpieza superficial del vidrio. Y, como las técnicas de

limpieza tienen que ser de alta productividad, compatible con la velocidad de las cadenas de fabricación de vidrio, el número de estas técnicas resulta aun más reducido. Uno de los métodos de limpieza más eficaces es el de eliminación de la capa superficial por erosión. La selección acertada del método de erosión es de importancia especial en el caso de substratos de áreas extensas.

En este trabajo se presenta el acelerador de corriente Hall de abertura larga, que fue diseñado para limpieza por erosión iónica de extensas áreas de substratos de vidrio, metal y plástico. A pesar de que los aceleradores de corriente Hall son menos controlables que las fuentes Kaufman, aquellos primeros se adecuan mejor a las exigencias de la industria [1]. De máxima importancia para la intensidad de corriente de iones es la ausencia de limitación del flujo de la carga espacial. Otra ventaja consiste en la ausencia de componentes delicados como el cátodo o dispositivos de óptica de rejillas. El acelerador de corriente Hall requiere un mantenimiento mínimo y la limpieza por erosión puede efectuarse con gases activos como oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono.

### PARTE EXPERIMENTAL

Una foto y el esquema de acelerador de corriente Hall está representado en la figura 1. El acelerador tiene forma de un bucle muy alargado. Su abertura larga (1400 mm en vertical) permite utilizarlo en la instalación industrial polifuncional "Nikolai" de deposición de recubrimientos sobre las superficies extensas de vidrio, utilizando el arco en vacío [2-4] o la erosión magnetrónica. El tamaño máximo de la superficie a tratar es de 2100x1300 mm. Durante el tratamiento las láminas pasan por delante del acelerador con una velocidad seleccionada. La superficie a limpiar es perpendicular al eje de flujo de los iones. Cambiando la velocidad de desplazamiento y la potencia de acelerador se puede controlar el espesor de la capa eliminada de la superficie. El recubrimiento se deposita inmediatamente después de esta limpieza, con lo que se evita contaminación de la superficie de substrato. La capacidad del equipo para el vidrio es de 30 láminas en un ciclo de trabajo. Por su forma de bucle muy alargado, la fuente dispone de dos brazos paralelos, separados a distancia de 55 mm entre ellos y, por lo tanto, de doble abertura. Su altura es de 1400 mm.

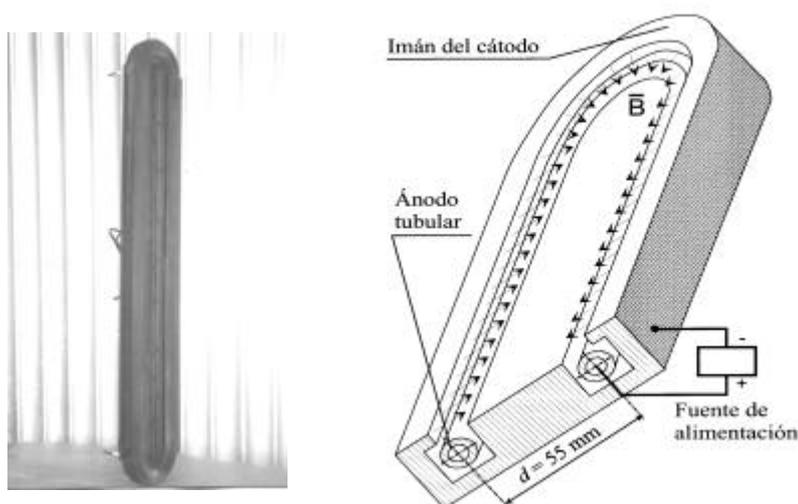


Figura. 1. Acelerador de la corriente Hall y esquema del sección del plano medio. La longitud total o la abertura es de 1400 mm.

El acelerador está compuesto por dos imanes permanentes yuxtapuestos, que al mismo tiempo actúan como cátodo. Dentro del canal, formado por estos dos imanes, se encuentra el ánodo tubular refrigerado con agua. Todo este dispositivo se encuentra dentro de la cámara de vacío en la que se inyecta el gas de erosión (normalmente el argón). La ionización del gas y aceleración posterior de los iones, se realizan por los campos magnético y eléctrico entrecruzados. El campo eléctrico surge por diferencia entre potenciales de ánodo y de cátodo. El campo magnético cuasi uniforme se establece entre dos piezas polares del imán. En presencia de la atmósfera de gas a baja presión y del campo eléctrico de alta tensión se obtiene el plasma de descarga incandescente. El campo magnético atrapa los electrones del plasma y, junto con el campo eléctrico, les pone en el movimiento cicloidial a lo largo de la superficie del ánodo. Durante este movimiento los electrones impactan a los átomos de argón y los ionizan. La alta diferencia de potencial entre ánodo y cátodo acelera los iones de argón en dirección del ánodo hacia fuera de la fuente. Los iones acelerados salen de las aberturas de la fuente y al alcanzar la superficie de vidrio, la limpian por el impacto del bombardeo. Para presión de argón como 0.01 Pa la potencia de fuente es de 6 kV y la intensidad de corriente es de 0.5 A. El haz de iones resultante tiene la energía media de 6 keV. Todo lo arriba expuesto revela un avance en el desarrollo de las fuentes Hall partiendo de la primera realización que dispone de abertura de 10 cm y energía del haz de iones de 50-75 eV [10]. Se ha encontrado [5], que por la forma especial de movimiento de electrones en los aceleradores de corriente Hall, se pueden esperar niveles de energía del haz de iones más altos que de la fuente Kaufman. Las razones de este aumento de energía están en el intercambio de carga y en las fluctuaciones del plasma.

A pesar de que la industria de recubrimientos decorativos sobre el vidrio es menos exigente que la de microelectrónica, se necesita conocer el grado de erosión de la superficie en función de las variables del proceso, incluido su posición respecto al flujo de iones. La distribución espacial no uniforme de energía de los iones dentro del haz iónico provoca la no uniformidad de erosión de la superficie. Evaluar el efecto conjunto de no uniformidad del haz iónico y de la posición relativa de la superficie y del haz permite la así denominada “curva de erosión”, que es la curva de distribución de intensidad de erosión en función de la distancia del punto de la superficie del plano de simetría vertical del acelerador. Esta curva permitiría evaluar el espesor de la capa, eliminada en el proceso industrial de limpieza de la superficie. Para establecer la curva de erosión de la fuente se utilizó el siguiente método simple. Como muestras se utilizaron laminas de vidrio de 200 mm de ancho con marcas verticales, dibujadas en su superficie a una distancia constante entre ellas. Estas muestras se colocaban dentro del equipo entre dos aceleradores, destinados a limpiar las dos caras de una lámina. La posición de la muestra era extrema: a una distancia mínima del acelerador izquierdo y a una máxima, 300 mm, del derecho. El plano de la muestra era perpendicular al eje del haz de iones. La muestra se exponía a la acción del haz solo por el lado marcado, utilizando la fuente lejana, la derecha. Durante exposición la muestra permanecía inmóvil. Las marcas dibujadas protegían la superficie contra erosión. Después del tratamiento, las marcas se eliminaban con alcohol, dejando escalones entre las partes pulverizadas y no pulverizadas. La altura de escalones se medía con el perfilómetro Taylor-Hobson, dando los espesores de capas pulverizadas o las velocidades de erosión. La secuencia de velocidades de erosión en función de la distancia del plano de simetría vertical de la fuente, medida en el plano horizontal, daba la curva de erosión para la exposición utilizada. Estos experimentos fueron realizados con los vidrios silicato y orgánicos (polimetil metacrilato – PMMA).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La correlación corriente-tensión para el argón a presión de  $2.4 \cdot 10^{-2}$  Pa está representada en la figura 2. Usando esta correlación, se puede optimizar el régimen de limpieza por bombardeo iónico encontrando el máximo de potencia para la descarga estable. Se observa que para las tensiones altas la intensidad de corriente varía lentamente con tensión. Si la tensión se hace menos de 3 kV, la intensidad de corriente empieza a decrecer y la descarga se hace inestable. En la figura 3 están representados las curvas de erosión para el vidrio silicato, donde el eje horizontal es de las distancias entre los puntos erosionados de la superficie de la lámina de vidrio y el plano de simetría vertical del haz iónico.

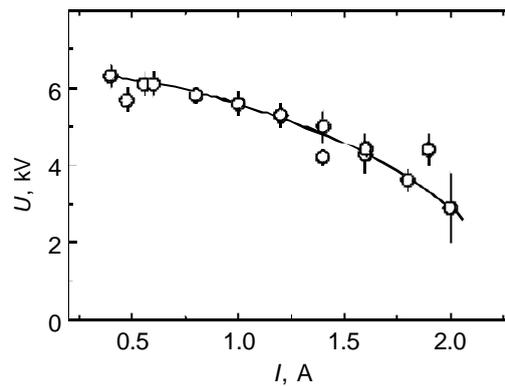


Figura 2. Característica corriente-tensión del acelerador de la corriente Hall con atmósfera de argón a presión  $2.4 \times 10^{-2}$  Pa.

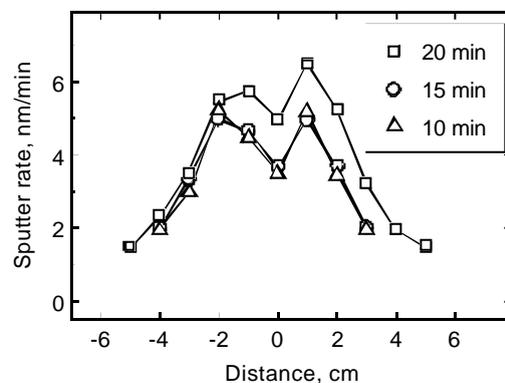


Figura 3. Perfiles de erosión iónica del vidrio silicato para varios tiempos de pulverización.

Las curvas similares para el vidrio orgánico ya fueron publicados anteriormente [6]. Tal como cabía esperar, por el comportamiento muy diferente de los vidrios orgánicos y silicatos durante el tratamiento de erosión, la forma de estas curvas depende del material de sustrato. La velocidad máxima de erosión de PMMA puede alcanzar unos 100 nm/min [6]. Sin embargo, la resistencia térmica de los vidrios orgánicos es más baja que la de los vidrios silicatos. Por esta razón la erosión durante más de 5 min provoca el deterioro de vidrio orgánico. La superficie se cubre con una película de color marrón claro, revelando la realización de reacciones químicas. Esto significa que el proceso de limpieza del vidrio

orgánico se realiza como combinación de erosión y transformaciones químicas. Cabe esperar que las transformaciones de este material se realizan de forma semejante a las transformaciones por radiación ionizante [7]. Las curvas de erosión de los vidrios silicatos (Fig. 3) son mucho más reproducibles en el tiempo que las de vidrios orgánicos. Otra diferencia importante entre estos dos casos está en que las curvas del vidrio silicato tienen dos picos. Estos picos se corresponden con los brazos paralelos del bucle anódico del acelerador (Fig. 1). Así que la doble apertura de la fuente se revela en las curvas para el vidrio silicato. En la región de limpieza más intensa, que es la de doble pico, la velocidad de erosión alcanza 7 nm/min. En primera aproximación la curva de erosión de la fuente puede ser considerada como un perfil de distribución de Gauss doble, con dos picos diferentes. Para una distancia de 300 mm de la superficie hasta la fuente, la distancia entre los picos de esta distribución Gauss resulta de unos 30 mm, lo que es menos que la distancia entre aberturas paralelas del acelerador (Fig. 1). Esto indica que el haz de la fuente es convergente y que la descripción completa del haz debería incluir la deriva de los picos en función de la distancia hasta la fuente. Durante el tratamiento industrial, el substrato de vidrio pasa por delante de la fuente con una velocidad constante, con lo que se asegura una limpieza uniforme. Esta velocidad depende de las posibilidades de la fuente y de los requisitos de la cadena de fabricación. La estimación del espesor pulverizado se puede obtener integrando la curva de erosión, expresada en unidades de velocidad de limpieza, por ejemplo en nm/min, a lo largo de anchura de la fuente. Para las velocidades propias del proceso industrial, la capa pulverizada del vidrio varía entre 0,6 nm para altas velocidades de alimentación y 13 nm para las bajas. Para la velocidad más común el espesor pulverizado es de unos 2 nm.

## CONCLUSIONES

El artículo representa el acelerador de corriente Hall de apertura larga, diseñado y desarrollado para tratamientos de vidrio a escala industrial. Por ausencia de componentes de corto tiempo de vida en su construcción, esta fuente resulta más adecuada para las aplicaciones industriales que una fuente Kaufman. El mantenimiento que necesita este acelerador es mínimo. Siendo utilizado para limpieza por erosión iónica, puede trabajar ya con gases inertes ya con activos, como oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono. Fueron determinadas las curvas de erosión con argón a distancia 300 mm de la fuente para el vidrio silicato. Estas curvas fueron comparadas con las de vidrio orgánico (PMMA). En ambos casos la distribución resultó ser no homogénea, presentando el intervalo estrecho de distancias con máxima intensidad de erosión. La velocidad de erosión del vidrio silicato resultó como 12 veces menos que del PMMA. El aspecto de las curvas de erosión resultó ser algo más complicado para el vidrio silicato: se resuelven dos picos que corresponden con dos aberturas de la fuente. El método, utilizado para caracterizar la erosión, permite estimar el espesor de la capa eliminada por erosión cuando la lámina del vidrio se encuentra en movimiento con una determinada velocidad respecto a la fuente. También se representó la característica tensión-corriente para erosión por bombardeo con iones de argón. Esta característica permite optimizar el régimen de erosión, encontrando el máximo de potencia para la descarga estable.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo constituye una parte de trabajo general, que se está desarrollando bajo financiación del Generalidad Valenciana, de Copernicus Network (Contrato ERB IC 15 CT98 0812) y del IMPIVA (proyecto “Análisis del sector de vidrio hueco en la Comunidad Valenciana”). El inestimable apoyo de la Universidad de Valencia y de la Cancillería de

Cultura, Educación y Ciencia de la Generalitat Valenciana hicieron posible la estrecha colaboración entre los participantes de este grupo.

#### REFERENCIAS

1. H. R. Kaufman, J. J. Cuomo, J. M. E. Harper. Technology and application of broad-beam ion sources used in sputtering. *J. Vac. Sci. Technol.*, 21, 725, 1982.
2. N. Vershinin, B. Straumal, W. Gust. Vacuum arc deposition of Mo films. *J. Vac. Sci. Technol.*, A 14, 3252, 1996.
3. N. F. Vershinin, V. G. Glebovsky, B. B. Straumal, W. Gust, H. Brongersma. Vacuum arc deposition as a complementary technology to laser processing. *Appl. Surf. Sci.*, 437, 109-110, 1996.
4. B. B. Straumal, W. Gust, N. F. Vershinin, M. Friesel, M. Willander. Vacuum arc deposition of Ni-Ti gradient coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 316, 100-101, 1998.
5. H. R. Kaufman, J. M. E. Harper, J. J. Cuomo. Developments in broad-beam ion source technology and application. *J. Vac. Sci. Technol* 21, 764, 1982.
6. N. Vershinin, B. Straumal, K. Filonov, R. Dimitriou, W. Gust, M. Benmalek. Hall current accelerator for the pre-treatment of large area glass sheets. *Thin Solid Films*, 172, 351, 1999.
7. D. Evans, M.A. Crook. Irradiation of plastics: damage and gas evolution. *MRS Bulletin*, 22, 36, 1997.