

DISEÑO DE UN EQUIPO INDUSTRIAL DE ARCO PULSADO PARA LA PRODUCCIÓN DE PELICULAS DELGADAS MEDIANTE PAPVD

RESUMEN

Se ha diseñado un equipo multicátodo de tipo industrial, para la producción de películas delgadas mediante PAPVD, por la técnica de evaporación por arcos eléctricos pulsados. El equipo se compone de una cámara de vacío, con geometría cilíndrica y dimensiones 1 m de diámetro x 1 m de longitud. Las piezas se localizan en un árbol portamuestras intercambiable que tiene movimiento rotacional planetario. La evaporación se realiza simultáneamente en 8 blancos rotatorios, a través de una fuente de potencia controlada con tecnología IGBT. Todas las variables del proceso son controladas automáticamente.

PALABRAS CLAVES: Diseño equipo, PAPVD, arco pulsado.

ABSTRACT

A multi-evaporator equipment for industrial applications has been designed. It is used to produce thin films by means of PAPVD, using pulsed electric arc evaporation technique. This equipment is conformed by a vacuum chamber. It has cylindrical geometry and its dimensions are 1 meter of diameter and 1 meter of length. The pieces to be coated, are localized in an interchangeable sample holder tree. This has a planetary rotatory movement. The evaporation is realized simultanealy in each one of eight rotatory targets, using a controlled power supply, with IGBT technology. All the variables of the process are controlled automatically.

KEYWORDS: Design equipment, PAPVD, arc pulsed.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de las técnicas de procesamiento de materiales por plasma esta expandiéndose continuamente debido a sus ventajas y sus múltiples aplicaciones. Los recubrimientos asistidos por plasma aportan grandes beneficios en industrias como la automotriz, la aeroespacial, la metalúrgica, de la microelectrónica, almacenamiento de datos, y la óptica, entre otras [1,2]. Esto ha generado que se desarrollen un gran número de equipos con diferentes características según el tipo de aplicación, teniendo en cuenta parámetros de diseño como la capacidad para procesar piezas de gran tamaño; la posibilidad de medir y controlar los diferentes parámetros del proceso, la disminución de tiempos y costos de procesamiento [1,3,4]. Una de las aplicaciones específicas de estas técnicas son los recubrimientos duros que en algunos procesos productivos permiten solucionar problemas de corrosión y desgaste, aumentar la vida útil y mejorar el desempeño de herramientas.

En este trabajo se describe una investigación orientada al diseño de un equipo industrial PAPVD por arco pulsado para la producción de películas delgadas, en el cual no solo es posible el procesamiento de piezas industriales sino también la investigación en aplicaciones de las técnicas de plasma. El equipo permite el procesamiento por lotes de piezas de diferentes características y tamaños

Fecha de recepción: 31 Mayo de 2004

Fecha de aceptación: 23 Julio de 2004

GLORIA PATRICIA ESTRADA

Ingeniera Industrial
Laboratorio de Física del Plasma
Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
gpestrada@unalmzl.edu.co

MAURICIO ARROYAVE

Ingeniero Electrónico
Laboratorio de Física del Plasma
Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
marofra@unalmzl.edu.co

ALFONSO DEVIA

Ph.D. en Física
Laboratorio de Física del Plasma
Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
adevia@epm.net.co

produciéndose recubrimientos en monocapas y multicapas. La etapa de diseño involucró parámetros que inciden en la calidad del recubrimiento, como son las variaciones de temperatura, ingreso del flujo de gases, presión en la cámara de vacío, y rotación de portamuestras y los evaporadores. El equipo permite realizar estudios in situ y en tiempo real que permiten conocer las características del plasma y las películas obtenidas. Mediante este equipo se pueden realizar recubrimientos funcionales sobre piezas de uso industrial de diferentes materiales, con morfologías diversas, complejas y de diferentes dimensiones para la solución de problemas de corrosión y desgaste, lográndose el mejoramiento de la adherencia, la reducción de microgotas, la disminución de contaminación, y el mejoramiento en la estequiometría de las películas.

2. DISEÑO DEL EQUIPO PAPVD

El diseño del equipo se determinó de acuerdo a la aplicación de la técnica en recubrimientos duros sobre herramientas y partes de maquinaria utilizados en la industria y a los requerimientos de procesamiento de acuerdo a este tipo de tecnología. Las características específicas del equipo y los rangos de las variables de trabajo se establecieron a partir de las características de

las piezas a procesar, los requerimientos del proceso, las variables manejadas y la calidad requerida.

Considerando estos aspectos generales y después de un estudio de soluciones técnicas existentes, fue diseñado un equipo industrial para la producción de recubrimientos mediante PAPVD por arco pulsado, como muestra la figura 1, que consta de una cámara de vacío, en la que están ubicados un árbol portamuestras, un sistema de evaporación, un sistema de calefacción de muestras. El equipo esta apoyado por un sistema de bombeo compuesto por una bomba mecánica y una bomba difusora; un sistema de alimentación de gases donde se regula el ingreso de gases por medio de controladores de flujo másico; y un sistema de suministro de energía compuesto por una fuente de arcos eléctricos pulsados, una fuente bias y una fuente para iniciar descargas. Los detalles más importantes serán descritos a continuación:

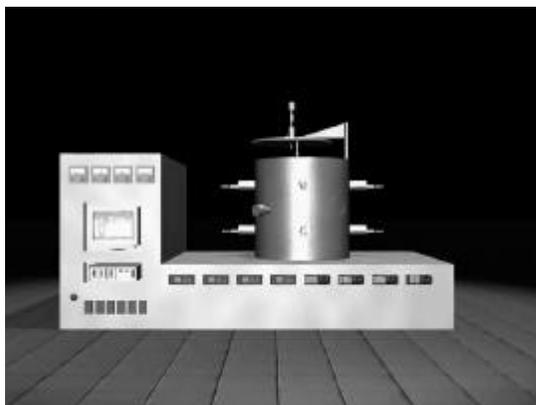


Figura 1. Esquema del equipo industrial

2.1 Cámara de vacío y sistema de bombeo

Es un cuerpo cilíndrico con configuración vertical, construido en acero inoxidable 304, con dimensiones de 1 m de diámetro y 1 m de altura. El acceso a la cámara y el ingreso de las piezas se realizan a través de la parte superior de la cámara, por el desplazamiento horizontal de una tapa en acero inoxidable 304, de 1,1 m de diámetro. Tiene diferentes accesos (Ver Figura 2) para la localización de los componentes y elementos de análisis que son requeridos en el proceso (sensores, sondas, válvulas, conexiones eléctricas). Tiene dos ventanas en cuarzo, con un diámetro de 10 cm, que permiten un monitoreo constante del proceso y proporcionan observación del plasma y del portamuestras para análisis de espectroscopia óptica de emisión. La cámara tiene un diseño modular tal que el arreglo del portamuestras y el número de evaporadores puede ser variado dependiendo de la altura del sustrato o el número de piezas a recubrir.

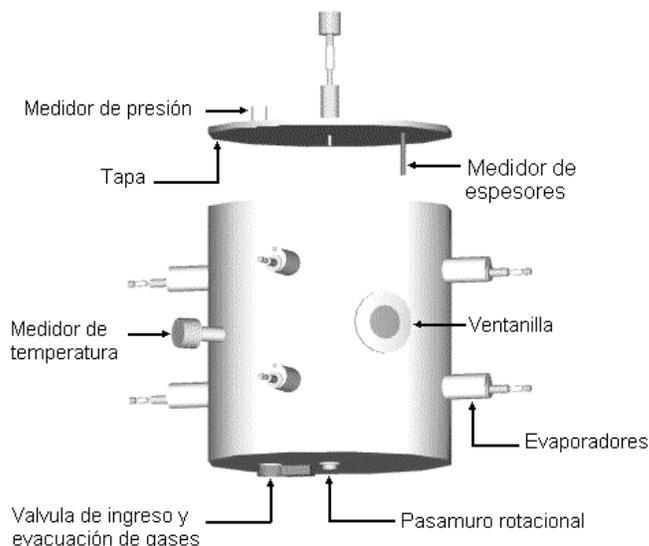


Figura 2. Cámara de vacío con puertos para localización de componentes

La cámara de vacío tiene capacidad para procesar piezas de gran tamaño (hasta 600 x 600 x 500 mm), las características del árbol portamuestras ubicado en la parte inferior de la cámara permiten ubicar piezas de diferentes morfologías. Además del sistema portamuestras la cámara aloja los sistemas de medición de espesores, calefacción de muestras, y evaporación. El sistema de medición de espesores permite monitorear la tasa de crecimiento de las películas a través de una microbalanza de cristales de cuarzo (QCM), que aprovecha las propiedades piezoeléctricas de un cristal (la masa depositada sobre el, al hacer los recubrimientos, afecta la frecuencia de resonancia del cristal de cuarzo).

El sistema de calefacción consiste de 8 lámparas halógenas de 500 Watts, con el fin de elevar la temperatura de los sustratos hasta un máximo de 500° C (dependiendo del tipo de material). El calentamiento de las piezas permite la difusión superficial de las especies que se depositan sobre la película, proporcionando aumento en la dureza, mayor densidad de la película, mejoramiento en la adherencia, y disminución de la porosidad [5], además permite mejorar el proceso de limpieza de las piezas, reducir el stress, y mejorar la estructura de las películas delgadas [6].

En el proceso es necesario alcanzar niveles de presión de alto vacío. Para obtener el vacío requerido en la cámara se tiene un sistema de bombeo compuesto por una bomba mecánica y una bomba difusora, que permiten conseguir una presión hasta 1×10^{-6} mbar, con una velocidad de bombeo hasta de 1200 L/s. Para controlar el caudal de los gases y mantener la presión requerida se utilizan una válvula de mariposa que comunica el sistema de bombeo con la cámara de vacío y una válvula electromecánica.

2.2 Sistema portamuestras

Uno de los principales parámetros de productividad en los equipos industriales PVD es el número de sustratos recubiertos por tiempo de proceso. Esto depende no solo del tamaño de la cámara sino también del diseño del sistema portamuestras. Así mismo, parámetros de calidad de los recubrimientos como la homogeneidad dependen de las condiciones de operación del arreglo portamuestras: número de soportes en el sistema portamuestras, frecuencias de rotación del árbol y los soportes, posiciones de arranque de las caras del sustrato [4, 7-10].

Las piezas a recubrir se ubican en un sistema portamuestras intercambiable (como se muestra en la Figura 3), que tiene un movimiento rotacional planetario de modo que se facilite recubrir las piezas en toda su superficie. La velocidad de rotación del sistema puede variar entre 0 – 60 rpm. El sistema portamuestras está aislado de la cámara y conectado a una fuente bias, para polarizar las muestras.

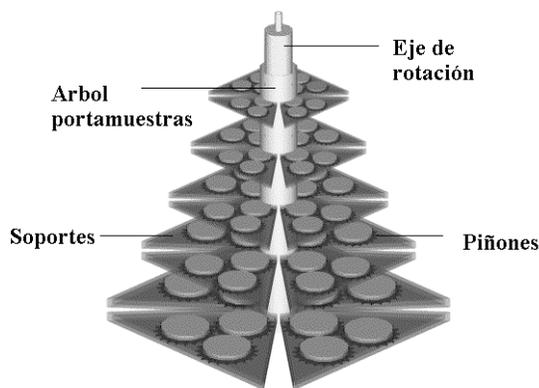


Figura 3. Sistema portamuestras

El portamuestras consta de bandejas de diferentes tamaños acopladas a un eje de rotación formando un árbol. En las bandejas están ubicados platos con diámetros diferentes, y con diversas características (superficies planas, ranuras, agujeros, etc). El número de bandejas del árbol, la distancia entre ellas y platos acoplados a las bandejas, pueden variarse; lo que permite recubrir piezas con geometrías y tamaños muy flexibles.

Tanto el árbol completo como los platos ubicados en las bandejas tienen movimiento rotacional. Para accionar el movimiento de los soportes y permitir que las piezas roten sobre ellos, se tiene un eje de rotación, que ingresa al interior del árbol portamuestras. Este está acoplado en la parte inferior a un pasamuro con tecnología de ferrofluido que permite la rotación en alto vacío. La rotación del árbol es transmitida por engranajes a los platos y la velocidad de rotación es variada por controladores. El uso de rotación durante la deposición produce las condiciones de crecimiento oscilantes en la

superficie de los sustratos, con el propósito de lograr una homogeneidad promedio en la periferia de los recubrimientos [5].

2.3 Sistema de evaporación

El número de evaporadores y su localización determinan la obtención de una tasa de deposición suficientemente alta, un recubrimiento homogéneo, y una buena distribución del espesor [4,6,8,11]. En un equipo de aplicación industrial, donde se realizan los recubrimientos por lotes de producción, permite además que todas las piezas sean recubiertas en toda la superficie. El sistema de evaporación está compuesto por ocho evaporadores rotatorios, distribuidos en dos niveles y ubicados de manera equidistante en la periferia de la cámara, como se muestra en la figura 4. En los evaporadores se forma el arco entre los electrodos, permitiéndose así arrancar iones del blanco metálico.



Figura 4. Ubicación de los evaporadores en la cámara de vacío

Cada evaporador está compuesto por: cátodo, portacátodo, pasamuro móvil, un motor eléctrico, ánodo y trigger, como se muestra en la figura 5. El cátodo además de poseer el material de aporte para producir el recubrimiento, provee el polo negativo de la descarga. El pasamuro móvil es un árbol con tecnología de ferrofluido que permite el sellamiento en sistemas de rotación en alto vacío. Este permite la rotación del cátodo y está acoplado a un motor de corriente continua de 12 V. El ánodo está conectado a la fuente de pulsos y provee el polo positivo de la descarga. El trigger es el ánodo de la fuente de disparo; esta conectada a la fuente de disparo y permite iniciar a través de una chispa, la descarga de arco pulsado.

El movimiento rotatorio por medio del cual se hace girar el cátodo durante el proceso a una velocidad máxima de 400 rpm, permite lograr una evaporación uniforme del cátodo y disminuir la presencia y el tamaño de las microgotas, que son características en la técnica de evaporación por arco [6]. La emisión de microgotas ocasiona un desmejoramiento en el desempeño de las herramientas, comparado con otras tecnologías de deposición [6,12].

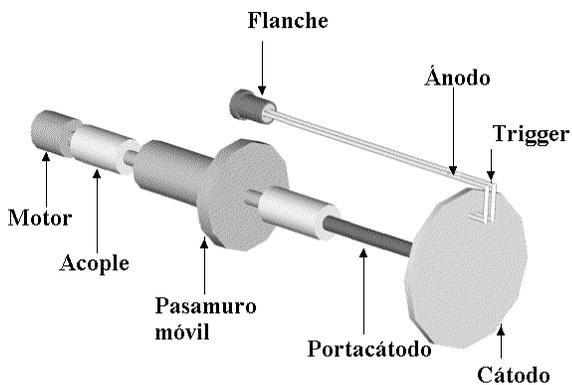


Figura 5. Evaporador

2.4 Sistema de alimentación de gases

Los gases son conducidos a una estación de suministro para dispensarlos y dirigirlos a una cámara de premezcla que permite combinarlos según las condiciones requeridas en el proceso, de modo que se puedan controlar eficientemente las proporciones antes de introducirlos a la cámara de vacío. La razón de flujo que ingresa a la cámara se mide y se controla mediante flujómetros máxicos. Los gases son ingresados a la cámara de vacío por su parte inferior, a través de un ducto y una válvula electromecánica. Este ducto llega hasta el árbol portamuestras. Este árbol tiene orificios y eyectores que permiten direccionar el flujo de gases sobre las piezas. Además cada evaporador tiene un sistema adicional de inyección de gases para proporcionar un ambiente con un flujo concentrado de iones cerca al cátodo.

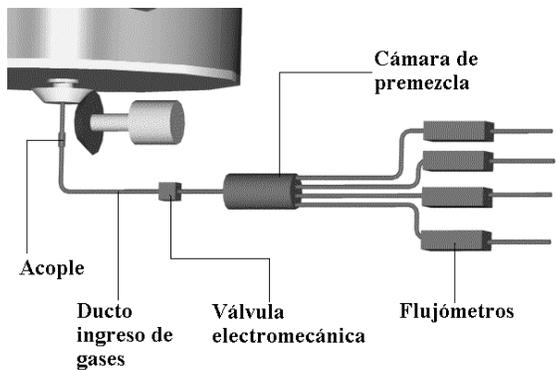


Figura 6. Sistema de alimentación de gases

2.5 Sistema de suministro de energía

Para el suministro de energía al sistema se utilizan una fuente de disparo para iniciar descargas, una fuente de arcos eléctricos pulsados y una fuente bias.

2.5.1 Fuente de disparo para iniciar descargas o Trigger. Es una fuente de pulsos de alto voltaje (20 KV) a baja corriente (< 5 mA), a la que están conectados los Trigger de los evaporadores, como se muestra en la figura 7. En la descarga de esta fuente se produce un corto pulso que inicia la descarga de arco pulsado, rompiendo la rigidez dieléctrica del gas.

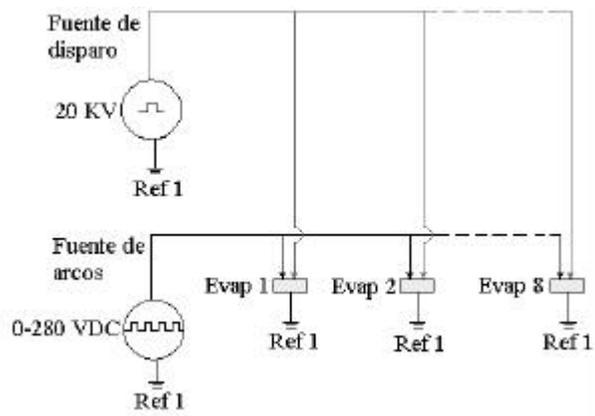


Figura 7. Esquema del sistema eléctrico del trigger y la fuente de arcos eléctricos pulsados

2.5.2 Fuente de arcos eléctricos pulsados. Las ventajas de la operación por arco pulsado son el mejoramiento en las propiedades de la película, la mejor controlabilidad del proceso, y los reducidos requerimientos de enfriamiento porque la energía promedio puede mantenerse baja [2]. Para generar las descargas de arco pulsado, se utiliza una fuente de potencia controlada, la cual consta de un inversor trifásico y tres transistores IGBT de potencia para conformar el pulso de voltaje, ésta va conectada a los ánodos y los cátodos de los evaporadores, como se muestra en la figura 7. La fuente permite el suministro de corriente hasta un valor promedio de 400 A y hace posible el control de diferentes variables tales como voltaje entre electrodos, número de pulsos, tiempo de arco sostenido y de arco inactivo .

2.5.3 Fuente Bias. Polarizar el sustrato negativamente con respecto al potencial del plasma da un aumento al apantallamiento eléctrico del sustrato, el cual actúa en todas las partículas cargadas, permitiendo un mayor aprovechamiento del plasma [2,13,14]. En PVD, esto permite aumentar las tensiones internas (tensiones compresivas), lo que ocasiona una compactación en los átomos depositados y un incremento en la dureza. En el sistema se diseñó una fuente controlada de voltaje variable de 0 a 500 V (- DC), aislada de la fuente de arcos eléctricos pulsados y conectada al sistema portamuestras para polarizar las piezas, como se muestra en la figura 7. Este voltaje negativo permite que las partículas cargadas positivamente sean atraídas hacia el sistema portamuestras. El voltaje bias puede ser ajustado durante el proceso.

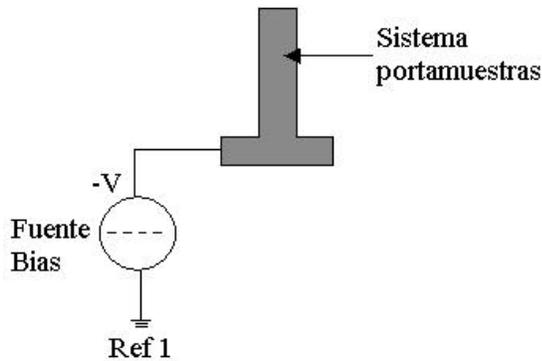


Figura 7. Sistema eléctrico de la fuente bias

2.6 Sistema de control

Permite el manejo del equipo de manera manual o automática, controlando todas las variables del proceso: presión, flujo de gases, voltaje, voltaje bias, corriente, número y tiempo de los pulsos, temperatura, velocidad de rotación del sistema portamuestras y el sistema de multievaporadores. El control se realiza desde una consola de mando, en la que están ubicados un computador personal, los visualizadores de las variables del proceso, los controladores electrónicos, selectores, pulsadores y circuitos. Para el desarrollo de las aplicaciones de automatización y control se utilizó el software LabView.

3. CONCLUSIONES

Los campos más importantes de aplicación de las películas delgadas en los tiempos actuales son reducción del desgaste en herramientas, reducción del desgaste y la fricción en partes de maquinaria, y recubrimientos decorativos usando recubrimientos duros seleccionados. En aplicaciones tribológicas en las cuales es posible disminuir el desgaste adhesivo entre superficies metálicas ofreciendo protección comparado con el desgaste abrasivo, y actuando como una barrera para reducir las tendencias de la mutua disolución y difusión entre las parejas.

El desarrollo de equipos industriales para deposición de películas delgadas requiere de un gran esfuerzo en investigación e ingeniería. Actualmente los esfuerzos son mantenidos para incrementar las aplicaciones en un amplio rango de áreas. El diseño de equipos para procesamiento por plasma debe tener la escalabilidad para su implementación industrial.

Por medio de este equipo, se espera variar y controlar diferentes variables como son voltaje de arco, voltaje bias, presión, flujo de gases, temperatura, velocidades de rotación, para mejorar las características de las películas.

Agradecimientos

Los autores agradecen por su cooperación financiera y técnica a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas” (COLCIENCIAS) y al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Regional Caldas, bajo el proyecto RC 566-2002.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Balzers and Leybold Holding AG, Hofwiesenstrasse 135. Status of vacuum and plasma technology. Surf. Coat. Technol. 112 (1999) 324-338.
- [2] David M. Sanders, André Anders. Review of cathodic arc deposition technology at the start of the new millennium. Surf. Coat. Technol. 133-134 (2000) 78-90
- [3] E. Bergmann, G.I. van der Kolk, B. Buil, T. Hurkmans. The next generation of deposition equipment for wear protection coatings. Surf. Coat. Technol. 114 (1999) 101-107.
- [4] B. Engers, H.U. Bauer. Cost-effective PVD coatings in batch systems. Surf. Coat. Technol. 116-119 (1999) 705-710.
- [5] Rodrigo, Adolfo. Procesamiento de materiales por plasma: conceptos introductorios. Departamento de materiales. Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) (2002).
- [6] B. Engers, H. Fuchs, J. Schultz, E. Hettkamp, H. Mecke. Comparison of substrate temperature and deposition rate between modified pulsed arc process and d.c. arc process. Surf. Coat. Technol. 133-134 (2000) 121-125.
- [7] B. Rother, G. Ebersbach, H.M. Gabriel. Substrate-rotation systems and productivity of industrial PVD processes. Surf. Coat. Technol. 116-119 (1999) 694-698.
- [8] Raymond L. Boxman, Philip J. Martin, David M. Sanders. Handbook of vacuum arc science and technology – Fundamentals and applications. (1995)
- [9] G. Ebersbach, D. Fabian and others. Substrate rotation in PVD processes and effects on the performance of coated tools. Surf. Coat. Technol. 74-75 (1995) 654-657.
- [10] B. Rother, H.A. Jehn, H.M. Gabriel. Multilayer hard coatings by coordinated substrate rotation modes in industrial PVD deposited systems. Surf. Coat. Technol. 86-87 (1996) 207-211.

- [11] T.S. Sudarshan, M. Jeandin, J.J. Stiglich. Surface modification technologies. (1999)
- [12] Messier, R., Giri, A.P., and Roy, R.A., J. Vac. Sci. Technol. A2:500-503. (1984)
- [13] Sung-Yong Chun, Akiyoshi Chayahara, Yuji Horino. Negative bias effect on film growth using pulsed vacuum arc plasma for multilayers. Surf. Coat. Technol.136 (2001) 285-289.
- [14] Li Zhengyang, Zhu Wubiao, and others. Effects of superimposed pulse bias on TiN coating in cathodic arc deposition. Surf. Coat. Technol.131 (2000) 158-161.