

Aplicaciones de la física de plasmas en la industria

Erich Saettone Olschewski

Universidad de Lima

Ingeniería Industrial n° 28, 2010, ISSN 1025-9929, pp. 195-210

Recibido: 27 de abril del 2010 / Aprobado: 23 de junio del 2010

RESUMEN: Se presentan las características y propiedades del estado ionizado de la materia, conocido como “plasma”, así como la clasificación, ventajas y beneficios que esta tecnología proporciona en diversas aplicaciones industriales. También se describen los reactores más utilizados para estos procesos: los de evaporación iónica (*sputtering*) de tipo *glow discharge* y los de resonancia ciclotrónica electrónica (ECR).

Palabras clave: física de plasmas / tecnología de plasma / reactor de plasma PVD / reactor de plasma CVD

Plasma physics applications in industry

ABSTRACT: There are presented the characteristics and properties of the ionized state of the matter, called “plasma”, its classification, advantages and benefits that this technology provides for many industrial applications. There are also described the most used reactors for these processes: the glow discharge plasma sputtering and the electron cyclotron resonance (ECR).

Keywords: Plasma physics / Plasma technology / PVD Plasma reactor / CVD Plasma reactor

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de plasma jugará un rol muy importante en un futuro próximo para la producción de bienes más duraderos y para la protección ambiental, como objetivos primordiales de la sociedad. Los procesos y dispositivos relacionados con el plasma no solo alcanzan importantes resultados industriales de forma más eficiente y efectiva que los mismos que no involucran plasma, sino que también pueden alcanzar estos resultados reduciendo los costos de producción al no generar productos indeseables, materiales de desecho, residuos tóxicos ni contaminantes del ambiente.

Estos beneficios se deben a que los plasmas ofrecen dos características principales para las aplicaciones industriales: pueden obtenerse temperaturas y densidades de energía mucho mayores que las alcanzadas por medios químicos u otros conocidos, y pueden producir especies activas energéticas como rayos ultravioleta, luz visible, partículas cargadas (electrones e iones), radicales libres, átomos reactivos (O, F), estados atómicos excitados y fragmentos moleculares reactivos, que permiten cambios físicos o químicos que serían imposibles o muy difíciles de que ocurran a través de reacciones químicas ordinarias. Como consecuencia, en un reactor de plasma las reacciones químicas se aceleran y los procesos que suceden en varias etapas se pueden alcanzar en una sola etapa. En resumen, los plasmas permiten procesar materiales más allá de las posibilidades de un tratamiento puramente químico.

Para tener una mejor idea del potencial que presentan los procesos con plasma se muestra como ejemplo el proceso de cloración para el tratamiento de 120 toneladas de ropa de lana teñida. Utilizando un proceso de plasma alternativo al tradicional se ahorran 27.000 m³ de agua, 44 toneladas de hipoclorito de sodio, 16 toneladas de bisulfito de sodio, 11 toneladas de ácido sulfúrico y 685 MWh de energía eléctrica, evitándose además la producción de toneladas de productos tóxicos y accidentes de trabajo por intoxicación. Respecto a la energía, tratar 1 kg de lana genera un consumo de 7 kWh/kg en el proceso de cloración tradicional, frente a los 0,3-0,6 kWh/kg consumidos por el proceso con plasma.

2. ¿QUÉ ES PLASMA?

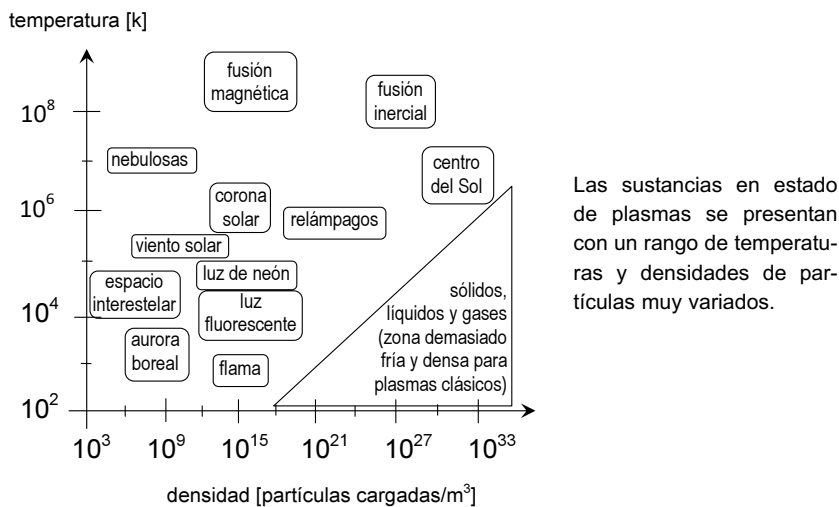
La materia alcanza su estado de plasma cuando se encuentra ionizada, es decir, compuesta por partículas con cargas eléctricas positivas y negativas, que forman un gas de carga eléctrica total nula que presenta un comportamiento colectivo debido a las interacciones eléctricas simultáneas entre las partículas. La formación del plasma se puede entender desde el punto de vista de la energía interna de la materia. Así, la energía interna de una sustancia en estado líquido es mayor que en estado sólido, y en estado gaseoso mayor que en líquido. Sin embargo, si se aumentara paulatinamente su energía interna, las moléculas del gas se disocian en átomos y estos a su vez en electrones e iones positivos, es decir, se ionizan.

Una vez que el número de partículas ionizadas es suficientemente grande, el comportamiento dinámico del sistema queda determinado por fuerzas electromagnéticas (de largo alcance) y no por colisiones binarias entre partículas neutras (como en los gases reales). A pesar de considerarse un nuevo estado de la materia, no existe una transición de fase. En general, a energías internas equivalentes a temperaturas mayores de 10.000°C, todas las sustancias conocidas se encuentran en este estado.

Dependiendo de su energía, distinguimos entre plasma caliente y plasma frío. El primero está fuertemente ionizado y solo está formado por electrones e iones positivos. El segundo, débilmente ionizado, además de electrones e iones, también contiene átomos y moléculas en su estado fundamental de energía o estados excitados. Sea fuerte o débilmente ionizado, el plasma presenta nuevos fenómenos y características imposibles de observar en los otros estados de la materia; por ejemplo, estos son gases de alta conductividad eléctrica y térmica, forman regiones laminares ricas en iones, tienen alta difusión de partículas, transmite ondas electromagnéticas y mecánicas, emite radiación y partículas. Todas estas propiedades son aprovechadas en la industria.

En la figura 1 se muestran algunos ejemplos de formación de plasmas en la naturaleza y otros creados por el hombre.

Figura 1



Fuente: Bittencourt 1986.
Elaboración propia.

3. ¿CÓMO SE OBTIENE?

Para que la materia alcance el estado de plasma se pueden utilizar diversas técnicas que le transfieran energía, las cuales utilizan diferentes procesos físicos. Es posible generar plasma, por ejemplo, estableciendo intensos campos eléctricos o por interacción con ondas electromagnéticas de radiofrecuencia (RF), por absorción de microondas, por interacción con ondas de choque y láseres, por colisiones con haces de partículas de alta energía, con vapores a altas temperaturas, por arcos eléctricos, etcétera, y a su vez, cada técnica presenta diversas variantes. Un ejemplo son los reactores de plasma para procesamiento de materiales donde pueden utilizarse campos eléctricos constantes o variables (este último con frecuencias desde los 100 kHz, en la zona de baja frecuencia, 13,56 MHz en el rango de radiofrecuencia, hasta 2,45 GHz en el de las microondas), los que primero ionizan el átomo y luego aceleran los electrones e iones positivos. La transferencia de energía de los electrones a las partículas pesadas (iones, átomos o moléculas) vía colisiones es muy lenta debido a la gran diferencia de masa. Sin embargo, si se confina un gas en una cámara a baja presión,

se tiene una menor frecuencia de colisión, lo que implica un mayor recorrido en promedio, de forma que los electrones pueden acumular suficiente energía para producir, por choques, la ionización y la excitación energética de las partículas más pesadas. De esta forma es posible generar un plasma con partículas ionizadas (las que pueden ser químicamente muy reactivas) que luego intervienen en procesos físicos y químicos al interactuar con el material que se desea procesar.

4. EJEMPLOS DE APLICACIONES INDUSTRIALES

A pesar de que en nuestro país es aún poco conocida, salvo para labores de corte y soldadura en la industria metalmeccánica, la tecnología de plasma es un tema muy amplio, resultado de décadas de investigación en ciencia básica. El desarrollo de esta “nueva” tecnología ha permitido aplicaciones muy variadas para la industria, donde es utilizada en los países más industrializados desde la década de 1960. Para tener una idea del amplio espectro de aplicaciones además de su empleo en la industria, la tecnología de plasma se usa en áreas muy variadas, por ejemplo, para la generación de energía en reactores de fusión nuclear, que se encuentra en investigación hace más de 50 años; en el desarrollo de materiales que tornan las fuentes de energías alternativas más eficientes, y para mejorar procesos para la obtención de combustibles en el caso de las fuentes de energía no renovables; también se utiliza como apoyo en la medicina para la esterilización de material quirúrgico en frío así como en el desarrollo de biomateriales para injertos y prótesis; auxilia en la restauración y conservación de piezas arqueológicas; permite producir materiales, equipos y hasta procesos que minimizan el daño al medio ambiente en minería, metalurgia y petróleo; se han desarrollado técnicas con plasma para procesamiento de basura y desechos peligrosos, sean sólidos, líquidos o gaseosos; posibilita la separación de materiales, principalmente metales, para su posterior reciclaje; en el campo de la electrónica es actualmente indispensable para la fabricación de microchips y baterías recargables; con esta tecnología es posible el crecimiento de estructuras moleculares utilizadas en nanotecnología, cuyas aplicaciones, se estima, revolucionarán la industria dentro de algunas décadas; inclusive la óptica e iluminación han sido beneficiados con procesos más eficientes para el mejoramiento de lentes, leds, etcétera; el estudio de la ionosfera (formada por partículas con carga eléctrica, es decir plasma)

han permitido el progreso de las telecomunicaciones y la tecnología de lanzamiento de cohetes; algunas de las técnicas más avanzadas con las que actualmente cuenta la química analítica se basan en la tecnología de plasma, como los LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*) y el ICP (*Induced Coupled Plasma*); y así se pueden seguir mencionando muchos más casos. Asimismo, es posible aplicar la tecnología de plasma en diversas áreas de la industria. Algunos ejemplos de ello serán descritos a continuación.

En la *industria aeroespacial* las aplicaciones son variadas. Actualmente se investigan los sistemas de propulsión a plasma, basados en la conversión de energía eléctrica en energía cinética. Fueron utilizados por primera vez por los soviéticos para la orientación y corrección de órbitas de sus naves y satélites, que a pesar de desarrollar menos empuje, se pueden aplicar durante largos periodos de tiempo. También, por medio de grandes fuentes de plasma es posible la construcción de cámaras simuladoras de reentrada atmosférica, que permiten obtener las condiciones críticas a las que están sometidos los sistemas de protección térmica de los vehículos espaciales al retornar al planeta. Inclusive, los propios materiales de protección, como el N_2-O_2 , también son fabricados utilizando tecnología de plasma.

Por otro lado, los “plasmatrones” o antorchas de plasma son reactores que permiten concentrar una enorme cantidad de energía en un pequeño volumen, calentando gases a temperaturas de entre 7.000 y 10.000 K (aproximadamente 3 veces más que la flama más caliente) en un periodo de décimas y hasta milésimas de segundo. No existe sólido alguno que resista estas temperaturas. Por consiguiente, este tipo de reactores han permitido desarrollar nuevas tecnologías para la *industria metalmeccánica*, en lo que se refiere a soldaduras y corte de los materiales más termorresistentes como gruesas láminas de acero.

Otra aplicación de la tecnología de plasma en esta industria es en el endurecimiento de superficies, que mejora la resistencia al desgaste y a la corrosión de herramientas, matricería y piezas que requieren una alta resistencia al desgaste, a la corrosión y un bajo coeficiente de fricción. Estos procesos son conocidos en física como *procesamiento de materiales* y se refiere a las técnicas que permiten modificaciones superficiales o volumétricas de los materiales, como la nitruración, la carburación, la limpieza superficial y el control de topografía superficial. De esta forma se mejora la resistencia a las altas temperaturas, al ata-

que químico y al desgaste por abrasión en diversos objetos (engranajes, soportes, cierres, partes automotores, discos duros y todo tipo de herramientas de corte como brocas, cuchillas, discos de corte, sierras, alicates, etcétera). Para esto se forman recubrimientos ultradelgados de pocos micrómetros sobre el objeto con materiales como TiN, TiC, TiCN, TiAlN, HfN, HfC o Al₂O₃. Por ejemplo, para mejorar la resistencia al desgaste por corrosión se utiliza TiN, BN, CrN o TiB, aspecto importante si se considera que la corrosión es la causa de pérdidas económicas por alrededor del 3,5% del PBI en el mundo. Para mejorar la compatibilidad fisicoquímica entre distintos materiales se utilizan recubrimientos de titanio o ZrO₂, e incluso para mejorar su apariencia estética, su composición química o su lubricación, entre otros. Según las características del plasma y de la técnica utilizada, es posible controlar los atributos de los recubrimientos, tales como adherencia, dureza, espesor, tensiones internas, densidad, estructura y tamaño de grano, orientación cristalográfica dominante, etcétera, pudiéndose optimizar las propiedades del recubrimiento. Por ejemplo, actualmente se estudian las fibras reforzadas de PET (tereftalato de polietileno) con PMMA (poli metil metacrilato) tratadas con plasma para las *industrias automovilística* y *aeronáutica* por ser materiales poco quebradizos, estables y de alta resistencia mecánica.

Las técnicas de plasma para la *industria metalúrgica* están bastante desarrolladas y representan una alternativa rentable frente a los métodos electroquímicos, hidro- y piro-metalúrgicos utilizados en la actualidad. Se aplican a los procesos de disociación, cloración, oxidación, reducción, sublimación y refinado. Así como en la industria metalmeccánica, este éxito también depende de la potencia y eficiencia de las antorchas de plasma que componen los hornos de plasma, los cuales son capaces de operar con gases inertes o también químicamente activos (oxígeno, hidrógeno, cloro, gas natural, etcétera), a temperaturas de alrededor de 20.000 K, en un rango de presiones que van desde los 10⁻² Pa hasta 10⁷ Pa. Esta técnica abre una amplia variedad de procesos antes no imaginados porque proporciona altísimas concentraciones de energía térmica y acelera las reacciones metalúrgicas básicas (las tasas de reacciones aumentan de una a varias órdenes de magnitud).

La industria metalúrgica apunta hacia la adopción de los procesos tratados con plasmas por diversos motivos, principalmente el económico y el ecológico (son inherentemente limpios). Teniendo en cuenta

que la industria metalúrgica es la que consume la mayor parte de la energía que se produce, necesita cubrir esta demanda con la combustión de combustible fósil, lo que obliga a las empresas a invertir aún más en el tratamiento de los agentes contaminantes que son desechados a la atmósfera.

Por otro lado, la extracción y tratamiento del gas natural para la metalurgia requiere de inversiones millonarias. Actualmente, muchas empresas están cambiando los procesos piro-metalúrgicos por los electroquímicos debido al creciente aumento de los precios del petróleo, medida que no soluciona el reto de problemas que implica una industria metalúrgica. Se cree que la industria metalúrgica cambiará radicalmente con la adopción de hornos a plasma, que permiten alcanzar altas temperaturas con una amplia colección de partículas activas (excitadas, disociadas o ionizadas) que aumentan considerablemente la tasa de reacciones metalúrgicas, a pesar de que utilizan dispositivos y maquinaria pequeños (pequeñas plantas metalúrgicas cerca de las zonas industriales), baratos y relativamente simples, que pueden ser operados continuamente sin perjudicar la productividad. Por ejemplo, el consumo de energía para la producción de carburo de calcio por medio de plasma se reduce en un 40% frente a la producción por medio de grandes hornos de arco eléctrico. Se utiliza este compuesto para la desulfuración del acero, la fundición de hierro y la producción de acetileno y cianuro, entre otros. Otro ejemplo que se encuentra en desarrollo es la utilización de los hornos de plasma para la separación del oro de sus sulfuros, minimizando el problema de la separación de los materiales tóxicos o el fuerte consumo de energía, según sea el proceso hidro- o piro- utilizado.

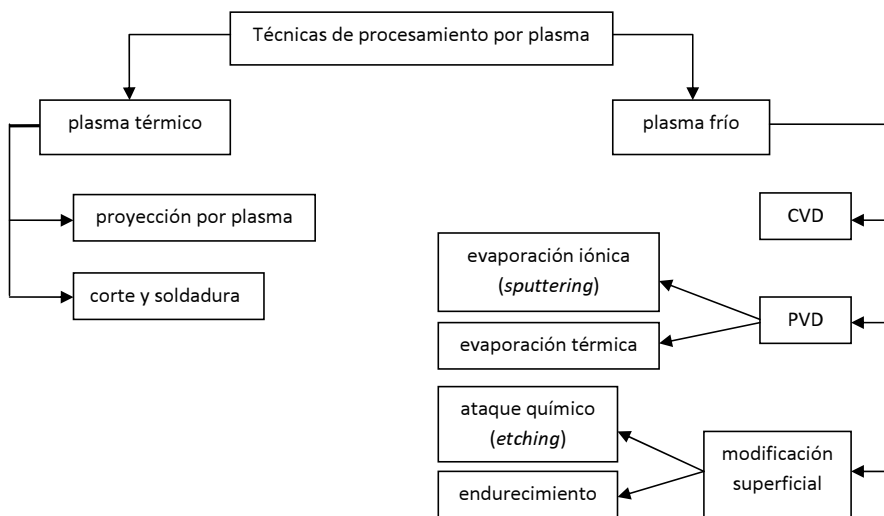
En la *industria alimentaria*, el plasma se aplica para la polimerización como recubrimiento protector de los empaques de alimentos, y también en la esterilización de las botellas tipo PET. En la *industria textil* permite mejorar los procesos para el tratamiento de telas de algodón y seda con el fin de convertirlas en hidrofóbicas (repelentes de agua), para obtener telas antiarrugas, antiestáticas, antiencogimiento, además de permitir también efectos estéticos y decorativos, todos conseguidos sobre la base de recubrimientos del tejido con diferentes polímeros.

En diversas industrias la presentación del producto tiene una gran importancia. El tratamiento por plasma permite hacer recubrimientos que mejoran la apariencia de utensilios de cocina, bandas y pulseras de relojes, marcos para anteojos, joyería, adornos y accesorios de automóviles, etcétera, cuyo acabado llega a semejarse al de los metales preciosos. Así, por ejemplo, el recubrimiento con TiN y ZrN es muy parecido al oro; el de TiCN es de color azul oscuro, el de TiAlN semeja al bronce, el de AlTiN es negro y el de CrN es similar a la plata. También es posible hacer recubrimientos de oro y plata sobre cualquier metal, así como la metalización de cerámicas, plásticos y vidrios.

5. ALGUNAS TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO POR PLASMA

Las técnicas de procesamiento por plasma son muy variadas pero es posible clasificarlas en dos grandes grupos según la energía interna que requiere el plasma (figura 2). Así, los “plasmas térmicos” son los que poseen una alta densidad de partículas cargadas (es decir formadas por electrones, iones positivos y en menor cantidad de átomos excitados) y los “plasmas fríos” poseen una densidad baja (por lo que el plasma está formado no solo de iones positivos y electrones sino también átomos neutros y moléculas). Cada uno de estos agrupa una cantidad de técnicas de plasma que se aplican en diversos procesos de la industria. En el caso de los plasmas fríos, las técnicas se pueden subdividir además en plasmas PVD (*Physical Vapor Deposition*) y plasmas CVD (*Chemical Vapor Deposition*), ambos son bastante utilizados para la formación de recubrimientos sobre materiales (sustratos) con aplicaciones en la industria metalmecánica, aeroespacial, automovilística, energética, entre otras. Si el recubrimiento se produce por evaporación o por bombardeo dentro del plasma, se trata del primero (PVD), pero si el recubrimiento se forma por reacciones químicas con el sustrato, se trata del segundo (CVD). En este grupo también se encuentran los plasmas para modificación superficial, donde las nuevas características del material se deben al recubrimiento y al mismo tiempo al diseño o figura impresa sobre el sustrato, técnica fundamental para el desarrollo de la microelectrónica (proceso también conocido como “plasma *etching*”).

Figura 2
Clasificación de las técnicas de plasma según su energía interna

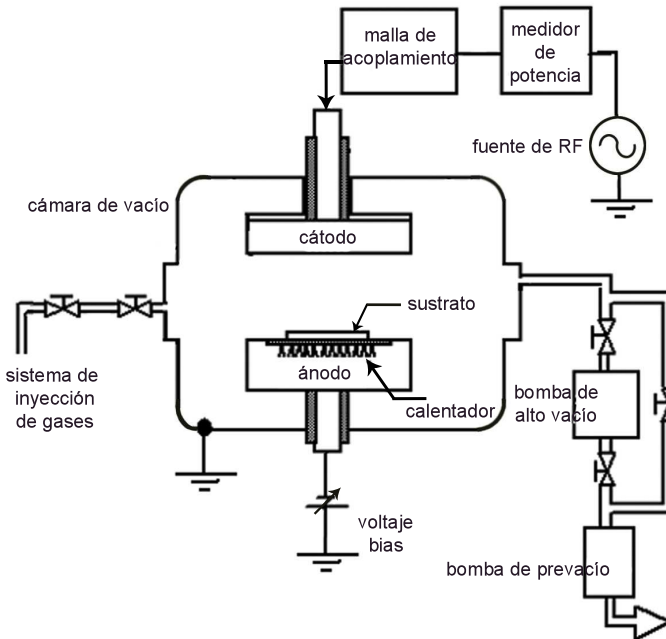


Fuente: Comisión Nacional de Energía Atómica 2003.

Por otro lado, las técnicas con plasma PVD y CVD son básicamente: (i) evaporación térmica, en la cual la vaporización es producida por transferencia de calor al sólido fuente y, (ii) evaporación iónica (o *sputtering*), en la cual la vaporización es producida por transferencia de momento lineal (colisiones) de un flujo de iones de alta energía al material fuente. Para la segunda técnica se utilizan reactores de “descarga brillante” (*glow discharge*), como el mostrado en la figura 3, o los de resonancia ciclotrónica electrónica (ECR), mostrado en la figura 4.

Básicamente, los reactores como el mostrado en la figura 3 están formados por una cámara de alto vacío, por lo general de acero inoxidable, acoplado a una bomba difusora o una turbo molecular que a su vez opera con una bomba mecánica de prevacío. En esta cámara se crea una presión menor a 10^{-3} Pa y luego se inyecta un flujo constante de un gas inerte (generalmente Ar o N_2) hasta que la cámara alcanza una presión interna constante entre 0,1 Pa y 1 Pa. Se establece luego un campo eléctrico por medio de una fuente de voltaje continuo, alterno o de radiofrecuencia (RF) y, generalmente, una baja intensidad de co-

Figura 3
Esquema de un reactor RF de evaporación iónica (*sputtering*) para producir recubrimientos de películas delgadas por procesos PVD o CVD



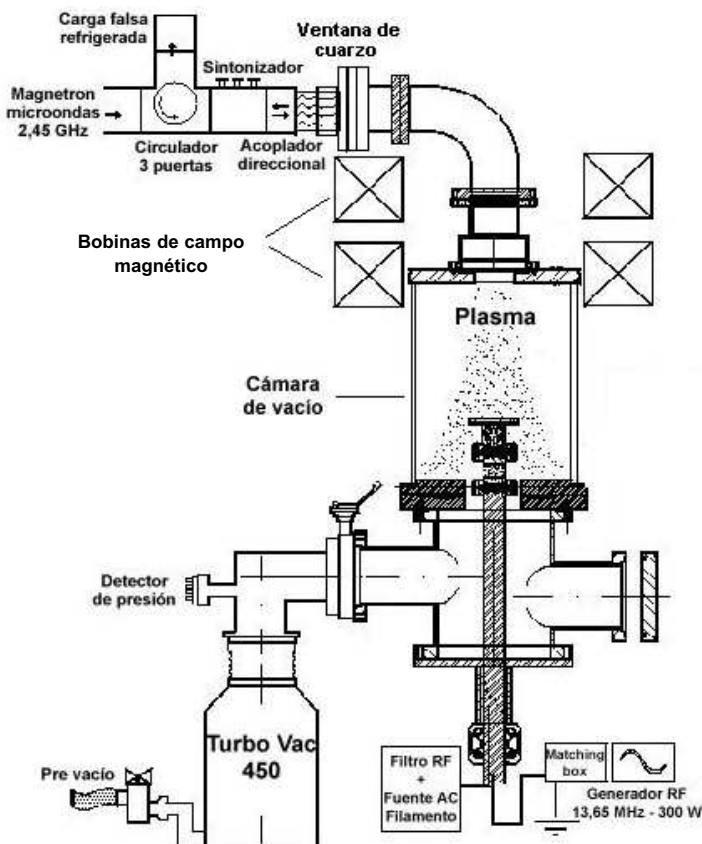
Elaboración propia.

riente (entre 100 mA y 500 mA); en caso de emplear fuentes de RF, además debe utilizarse una malla de acople para maximizar la potencia absorbida por el plasma. Este último permite obtener plasmas más estables en áreas mayores para procesos a bajas temperaturas.

El proceso físico que sucede se explica de la siguiente forma: el campo eléctrico ioniza algunos átomos de argón, separándolos en electrones e iones positivos de Ar. Los electrones son acelerados por este mismo campo eléctrico y por colisiones con los átomos de Ar, logran ionizarlo muy rápidamente por “efecto avalancha” formando una “nube” de plasma. La aplicación de una diferencia de potencial permite acelerar el Ar ionizado hacia el cátodo (blanco o *target*) de tal forma que los átomos del blanco son extraídos y se mezclan con el gas inerte, formando una nube de plasma compuesto por átomos del gas y del blanco y sus combinaciones (por ejemplo, si el blanco es de titanio y el gas inerte es nitrógeno, se formará una nube de plasma formada por

electrones, N^+ , Ti^+ , TiN , TiN^+ , etcétera). Finalmente, este plasma es direccionado hacia el sustrato, que es el objeto que se desea recubrir, de forma que se condense sobre su superficie (en el ejemplo, se formaría un recubrimiento de nitruro de titanio, TiN). A veces es necesario aplicar un voltaje adicional (llamado “voltaje *bias*”) y calentar con resistencias al sustrato para mejorar la adherencia. El resultado es superior en uniformidad y adherencia al obtenido por medios químicos, además de que es posible controlar otras características del recubrimiento.

Figura 4
Esquema de un reactor de plasma generado por resonancia ciclotrónica electrónica con microondas de 2,45 GHz



Fuente: Chacón 2007.

Otro tipo de reactores es el que se muestra en la figura 4, el cual permite una razón de ionización 3 órdenes de magnitud mayor que en los reactores de RF y está basado en el principio de la resonancia ciclotrónica electrónica (ECR), que sucede cuando interactúa una onda electromagnética con una partícula con carga eléctrica que se mueve aceleradamente en un campo magnético. Para esto es necesario confinar el gas en una cámara de alto vacío, en cuyo interior además se aplica un campo magnético constante no uniforme y un haz de microondas de 2,45 GHz que viaja por una guía de onda y penetra en la cámara a través de una ventana de cuarzo. En estas condiciones se obtiene la ionización del gas en la región donde el campo magnético en el interior de la cámara alcanza un valor de aproximadamente 0,0875 T, valor en que se produce la máxima transferencia de energía de los microondas a los átomos del gas.

El campo magnético se genera con dos bobinas externas a la cámara, cuya distancia de separación permite modificar la configuración espacial del campo y así poder controlar la región a partir de la cual se forma la nube de plasma. La desventaja de este reactor frente al de *sputtering* es su mayor complejidad y, como consecuencia, el costo. Se puede observar que, aparte del sistema de alto vacío y la fuente para aplicar el voltaje *bias* en el sustrato, que es el mismo en ambos reactores, el reactor ECR adicionalmente requiere de una fuente de alimentación (generalmente de 30 kW) para las bobinas y una fuente de microondas (magnetron de 1,3 kW) que debe operar acompañado de accesorios como un “circulador de tres puertas”, sintonizador, acoplador direccional, guías de ondas y ventanas de cuarzo.

Para tener una idea de la variedad de técnicas con las que se cuenta para las diversas aplicaciones, de las cuales se han descrito solo dos, existen muchas más que operan bajo diferentes principios físicos, como son los “plasma *spray*” y plasma por arcos catódicos usados principalmente en metalmecánica, los “magnetron *sputtering*” que también permiten el procesamiento de materiales, los plasmas por acoplamiento inductivo (ICP) utilizados en hornos para metalurgia y los de menor porte en química analítica, los plasmas por interacción con láseres o haces de partículas usados en electrónica, óptica y análisis químico elemental, entre otros. A su vez, cada uno de estos presenta diversas subdivisiones según aspectos geométricos y de configuración del reactor. Lo interesante de aplicar tecnología de plasma es que en

muchos casos es posible que se obtengan los mismos resultados utilizando una u otra técnica o geometría.

Por supuesto que las técnicas y sus aplicaciones en la industria que han sido mencionadas en este artículo son solo una parte de lo que actualmente existe, y debido al permanente avance de la física de plasmas y su tecnología asociada, en especial para recubrimientos y procesamiento de materiales, sumada a la creciente variedad de áreas de aplicación para la industria, permiten prever un futuro exitoso y un mercado en constante expansión para la utilización de esta tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdenouri, N. et al. (junio de 1999). "Separation of gold from sulfide using a plasma arc fuming process". *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. Vol. XIX, núm. 2. Nueva York: Springer New York Chemistry Editorial.
- Aghamir, F. et al. (noviembre del 2004). "Conversion of methane to methanol in an ac dielectric barrier discharge". *Plasma Sources Science and Technology*. Vol. 13, núm. 4. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- Barros, E. et al. (2001). "Caracterização do sistema de vácuo da câmara para ensaio de materiais de sistema de proteção térmica em ambiente de reentrada". *Livro de Palestras Convidadas e Resumos Estendidos - XXII Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência (XXII CBRAVIC)*. São Paulo: Sociedad Brasileira de Vacío.
- Bittencourt, J. (1986). *Fundamentals of plasma physics*. 1.^a edición. Oxford: Pergamon Press.
- Chacón, Álvaro (2007). "Aplicaciones a la electrónica de los plasmas por resonancia ciclotrónica electrónica (RCE)". *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas*. Vol. I, núm. 9. Cúcuta: Universidad de Pamplona.
- Cioffi, M. et al. (junio del 2003). "Mechanical strength of PET fibers treated in cold plasma and thermal exposed". *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. XII, núm. 3. Nueva York: Springer.

- Comisión Nacional de Energía Atómica (2003). *VI Curso Latinoamericano de Procesamiento de Materiales por Plasma*. Buenos Aires: CNEA.
- Da Matta, José (marzo del 2003). "Description and characterization of an ECR plasma device developed for thin film deposition". *Brazilian Journal of Physics*. Vol. 33, núm. 1. Sao Paulo: Sociedade Brasileira de Física.
- Dembovsky, V. (1985). *Plasma metallurgy. The Principles*. Ámsterdam: Elsevier.
- El-Naas, M.; Munz, R. y F. Ajersch (setiembre de 1998). "Solid-phase synthesis of calcium carbide in a plasma reactor". *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. Vol. XVIII, núm. 3. Nueva York: Springer New York Chemistry Editorial.
- Freyman, C.; Chen, Y. y Yip-Wah Chung (setiembre del 2006). "Synthesis of carbon films with ultralow friction in dry and humid air". *Surface and Coating Technology*. Vol. 201, núms. 1-2. Ámsterdam: Elsevier.
- Gordiets, B. y A. Ricard (agosto de 1993). "Production of N, O and NO in N₂-O₂ flowing discharges". *Plasma Sources Science and Technology*. Vol. II, núm. 3. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- Gupta, R. y M. Srivastava (agosto 2004). "Carbon ion implantation on titanium for TiC formation using a dense plasma focus device". *Plasma Sources Science and Technology*. Vol. XIII, núm. 3. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). "The way of new energy". <<http://www.iter.org>>. [Consulta: 26 de abril del 2010.]
- Koulik, P. (marzo del 2000). "Remarks relative to the use of atmospheric plasma-pulsed discharge for PET bottles instant sterilization". *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. Vol. XX, núm. 1. Nueva York: Springer New York Chemistry Editorial.
- Milántiev, V. y S. Temkó (1987). *Física del plasma*. Traducción al español de Antonio Ballesteros Elías. Moscú: MIR.
- Palmer, R.; Doan, T. y P. Lloyd (setiembre del 2002). "Reduction of TiO₂ with hydrogen plasma". *Plasma Chemistry and Plasma*

- Processing*. Vol. XXII, núm. 3. Nueva York: Springer New York Chemistry Editorial.
- Riccardi, C. et al. (febrero del 2001). "A SF₆ RF plasma reactor for research on textile treatment". *Plasma Sources Science and Technology*. Vol. X, núm. 1. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- Rosnagel, S.; Cuomo, J. y W. Westwood (1989). *Handbook of plasma processing technology*. Nueva York: Noyes Publications.
- Roth, Reece (1995). *Industrial plasma engineering*. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- Rutberg, G. (agosto del 2002). "Some plasma environmental technologies developed in Russia". *Plasma Sources Science and Technology*. Vol. 11, núm. 3A. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- Saettone, Erich et al. (abril del 2003). "Plasma cleaning and analysis of archaeological artifacts from Sipán". *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36, núm. 7. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- Soloshenko, I. et al. (setiembre del 2000). "Sterilization of medical products in low-pressure glow discharge". *Plasma Physics Reports*. Vol. 26, núm. 9. Berlín: Springer.
- Talledo, Arturo (2004). *Tecnología de alto vacío*. Lima: Asamblea Nacional de Rectores.