

Plasmas fríos

Los plasmas fríos se encuentran lejos del equilibrio térmico: los electrones, iones y átomos neutros que los constituyen tienen temperaturas diferentes. Esto confiere a los plasmas fríos unas propiedades de gran interés aplicado

Francisco José Gordillo Vázquez

CONCEPTOS BÁSICOS

- Cuando se habla de plasmas —gases de iones, electrones libres y, si la ionización no es perfecta, partículas neutras—, se suele pensar en los sumamente calientes de que están hechas las estrellas. Sin embargo, en los plasmas fríos iones y partículas neutras tienen una temperatura de sólo unas decenas de grados. Los electrones, en cambio, se encuentran a muchos miles de grados.
- Las numerosas aplicaciones industriales de los plasmas fríos sacan partido de la gran diferencia de energía entre las especies que los constituyen.
- La lámparas de bajo consumo, la tinción del algodón, la inscripción de patrones en obleas de silicio o el tratamiento de superficies son algunas de esas aplicaciones.

La primera vez que la palabra *plasma* apareció impresa en un texto científico relacionado con el estudio de las descargas eléctricas en gases data de 1928. Irving Langmuir publicó ese año su artículo *Oscilaciones en gases ionizados* en las Actas de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos. Fue el bautizo del estado de la materia predominante en el universo conocido (se estima que hasta el 99 % de la materia es plasma), aunque no en nuestro planeta, donde las condiciones de presión y temperatura hacen que nos parezcan comunes los estados de la materia —sólido, líquido y gaseoso— que en términos globales son exóticos.

Basta añadir energía al sólido (en forma de calor o de radiación electromagnética) para pasar al estado líquido, a partir del cual se obtiene gas mediante un aporte adicional de energía. Si seguimos añadiendo energía al gas lo ionizaremos parcial o totalmente, esto es, arrancaremos electrones de los átomos o moléculas que lo constituyen. Alcanzamos de esa forma un nuevo estado de la materia, el plasma, constituido por electrones libres, átomos y moléculas (partículas eléctricamente neutras) e iones (dotados de carga eléctrica positiva o negativa).

La energía necesaria para generar un plasma puede suministrarse de varias maneras: mediante el calor originado en un proceso de combustión, mediante la interacción entre radiación láser y un sólido, líquido o gas, o mediante descargas eléctricas en gases, en las que los electrones libres toman energía del campo eléctrico aplicado y la pierden en procesos de excitación e ionización de los átomos y moléculas del gas.

La luz emitida por un plasma, su espectro de emisión característico, viene determinada por el tipo de átomos, moléculas e iones que lo forman. Estos componentes, al desexcitar-

se, emiten radiación electromagnética, visible o no. Una de las peculiaridades de los plasmas es que conducen la electricidad. A escala macroscópica, los plasmas son, no obstante, eléctricamente neutros, ya que el número de cargas positivas y negativas es similar. Así, la llama producida por la combustión de la cera de una vela con el oxígeno del aire —ejemplo habitual de plasma muy poco ionizado— puede conducir la electricidad.

El estudio de fenómenos naturales comunes en nuestro mundo nos ha enseñado que los rayos, las auroras, la ionosfera y las descargas eléctricas recientemente descubiertas en la alta atmósfera (entre 50 y 90 km de altura) son distintos tipos de plasmas naturales presentes en la envoltura gaseosa de nuestro planeta. Más allá de la Tierra, hay plasmas en el Sol y las demás estrellas, en el viento solar, en la cola de los cometas y en el espacio interestelar.

Las primeras observaciones relacionadas con los plasmas se remontan a los experimentos de Georg Christoph Lichtenberg, profesor de la Universidad de Gotinga en el último tercio del siglo XVIII y hoy más recordado como escritor. Al situar un material aislante entre un electrodo puntiforme y una placa metálica, y someterlo a una elevada tensión electrostática, observó unos bellos patrones radiantes con formas arborescentes. Tales patrones obedecían a la ruptura dieléctrica del material. Los primeros intentos de explicar las observaciones de Lichtenberg se deben a Michael Faraday, quien dedicó algunos años de su vida (1816-1819) al estudio de las características de la materia cuando aumentaba su temperatura, aunque no llegó a dilucidar la posible existencia de un nuevo estado de la materia más allá del gaseoso.

Otro físico inglés, William Crookes, descubrió en 1879 una “materia radiante” de color

1. UNA LLAMA ES UN EJEMPLO DE GAS parcialmente ionizado que conduce la electricidad. El color rojo anaranjado se debe a la luz emitida por partículas de ceniza que ascienden por convección; el intenso azul de la base de la llama es consecuencia de procesos de desexcitación radiativa del oxígeno.



2. LOS RAYOS SON PLASMAS FRIOS muy ionizados. En la foto se muestra un rayo negativo, esto es, producido entre una nube con carga eléctrica negativa y el suelo, entre los que llega a existir una diferencia de potencial eléctrico de hasta 100.000 volt. El 95 % de los rayos son de este tipo.

verde, con patrones estriados, que aparecía al aplicar voltajes entre unos electrodos instalados dentro de un tubo de vidrio, relleno sólo con el aire que quedaba tras haber hecho un cierto vacío. Además, cerca del cátodo observó una región oscura, la zona oscura de Crookes. Estas observaciones le llevaron a postular la existencia de un cuarto estado de la materia. Conjeturó que estaba formado por moléculas de gas dotadas de carga eléctrica, es decir, por iones. Antes de estos trabajos, en 1857, Werner von Siemens ya había patentado un proceso industrial que se valía de plasmas para la producción de ozono: un flujo de oxígeno atravesaba una descarga eléctrica anular entre dos electrodos concéntricos, uno de los cuales llevaba adherido un material aislante a modo de barrera dieléctrica. Aunque Siemens ignoraba las razones científicas últimas en las que se basaba su método, le resultó muy eficiente y rentable.

Los trabajos de J. J. Thomson sobre los rayos catódicos en descargas eléctricas en gases y su descubrimiento del electrón en 1897 le

merecieron la concesión del Nobel de física de 1906. La suya fue una contribución notable al conocimiento de la estructura de los átomos (compuestos por un núcleo positivo y electrones cargados negativamente), y con ello ayudó, de paso, a aclarar la naturaleza de los plasmas. El primer intento de dar una visión global de la física de las descargas en gases se debe a Johannes Stark y a su libro titulado *Elektrizität in Gasen*, publicado en Alemania en 1902.

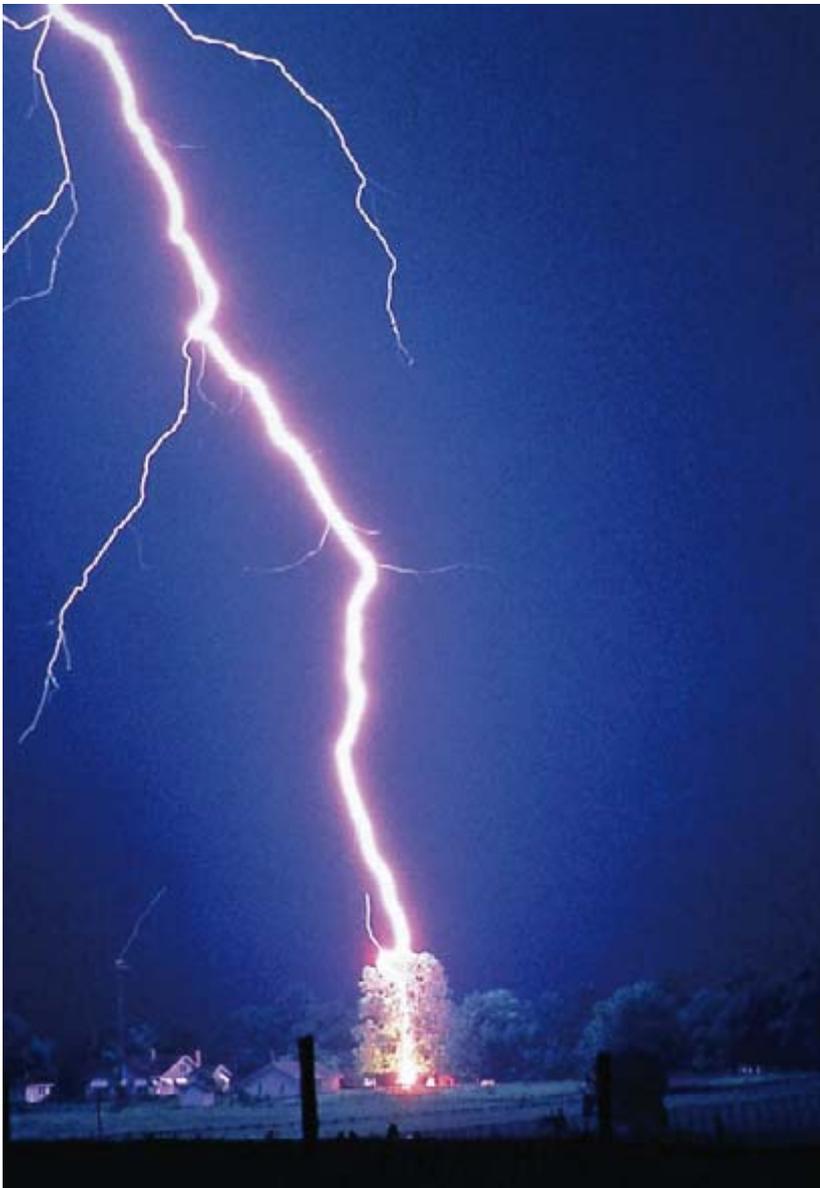
Tipos de plasmas

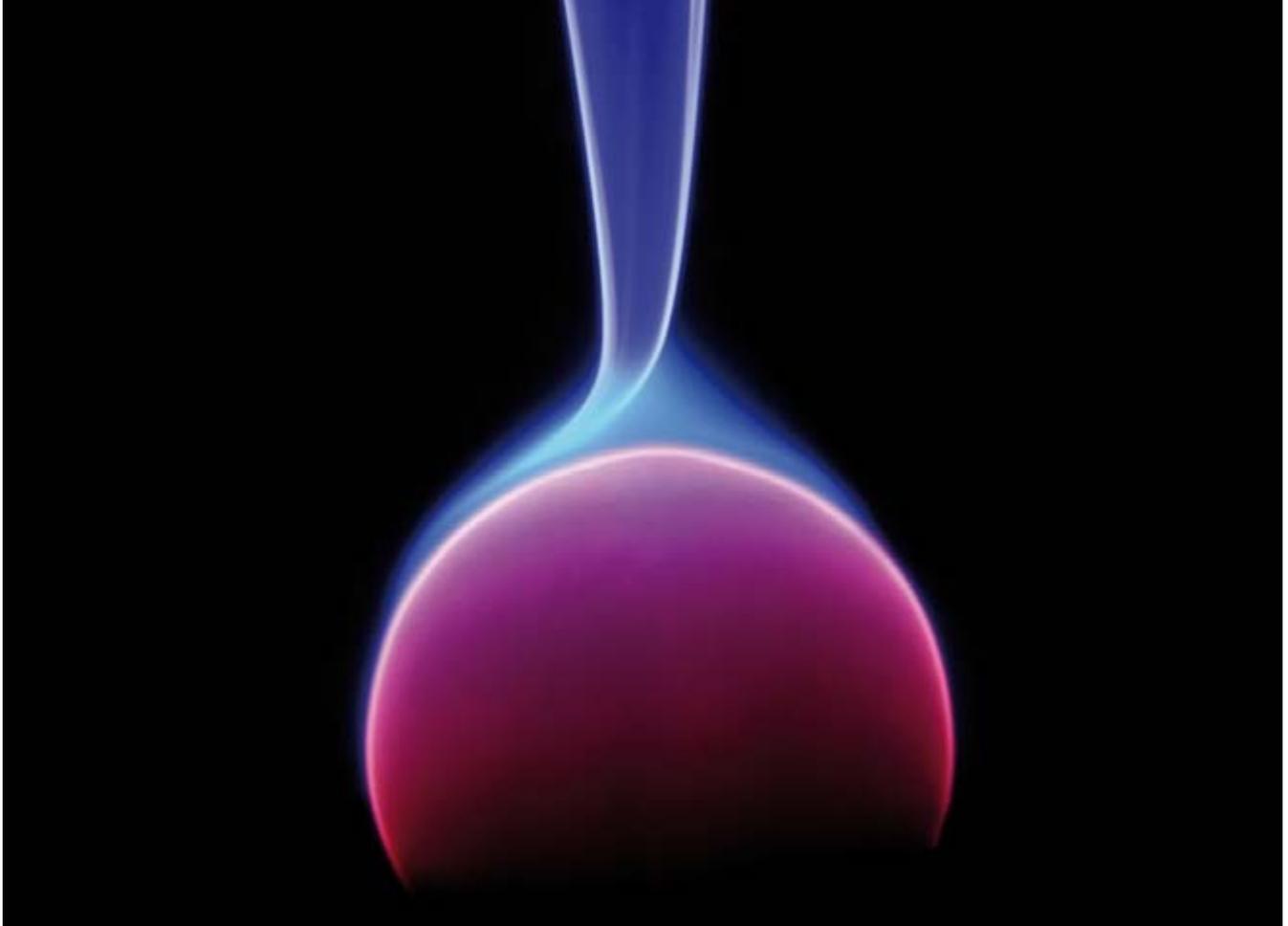
Clasificar la diversidad de tipos de plasmas que existen en la naturaleza o que se pueden generar de forma artificial no es fácil, ya que resulta arriesgado escoger parámetros aislados que nos sirvan de criterio para establecer las diferencias. Pese a tales dificultades, podemos aventurarnos en una primera clasificación de los tipos de plasmas que atienda a su equilibrio térmico, es decir, a si la temperatura o energía media de las partículas que lo forman es o no la misma para cada tipo de partícula.

Todas las partículas tienen la misma temperatura (equilibrio térmico) en el caso del plasma de los interiores estelares o de sus análogos terrestres, los plasmas termonucleares de deuterio, tritio e impurezas de bajo número atómico (carbono) generados en los dispositivos experimentales de fusión nuclear controlada (JET, ITER). El plasma del interior estelar suele estar compuesto por una alta proporción de partículas ionizadas: el número de electrones, y de iones, es similar al de partículas neutras. Estos plasmas reciben también la denominación de *plasmas calientes o térmicos*, ya que la temperatura en su interior llega a alcanzar millones de grados (10^7 - 10^9 grados centígrados), lo mismo para electrones que para especies pesadas.

Hay otro tipo de plasmas térmicos, con ciertas aplicaciones industriales, que se generan a presiones altas, por encima de los 133 milibares (133 mbar), algo más de una décima de atmósfera, si bien sus temperaturas (10^4 - 10^5 grados centígrados) son mucho menores que las de los plasmas de fusión. Las antorchas de plasmas para tratamientos de superficies o las lámparas de plasmas producidos en descargas de alta intensidad para alumbrado público o faros de coches de gama alta son plasmas de ese tipo.

Cuando la presión del gas es baja o la tensión eléctrica aplicada en la descarga alta, los electrones del plasma adquieren, en el tiempo entre colisiones con otras partículas del plasma, unas energías cinéticas superiores a la energía asociada al movimiento térmico aleatorio de las partículas neutras (átomos y moléculas)





del plasma. Podemos entonces atribuir cierto grado de desviación del equilibrio térmico al plasma, ya que los electrones, iones y partículas neutras tienen diferentes “temperaturas” o energías cinéticas medias. (En realidad, sólo tiene sentido hablar de temperatura cuando la distribución de energía de las partículas en cuestión se ciñe a una determinada función estadística, la maxwelliana. No suele ser ése el caso en los plasmas producidos a baja presión y con un grado de ionización pequeño, entre 10^{-6} y 10^{-4} .)

Los plasmas no térmicos, conocidos también por *plasmas fríos*, se caracterizan por el hecho de que la temperatura de las especies pesadas (las partículas neutras y los iones) es cercana a la temperatura ambiente (25-100 grados centígrados). La temperatura electrónica es, en cambio, mucho mayor (entre 5000 y 10^5 grados centígrados). Los plasmas fríos suelen producirse a baja presión ($p < 133$ mbar) en reactores con muy diversas geometrías. Tales reactores generan plasmas mediante sistemas de corriente continua, radiofrecuencia, microondas o en descargas pulsadas.

Existen tipos especiales de plasmas fríos, producidos en descargas llamadas de corona y de barrera dieléctrica, que se generan a *presión atmosférica* mediante la utilización de pulsos de entre 10^{-6} s y 10^{-9} s. En esos tipos de descargas se producen electrones muy energéticos que, debido a la brevedad de los pulsos utilizados, apenas tienen tiempo de intercambiar energía

con su entorno. De ese modo se establece un fuerte gradiente de temperatura entre los electrones y las especies pesadas del plasma.

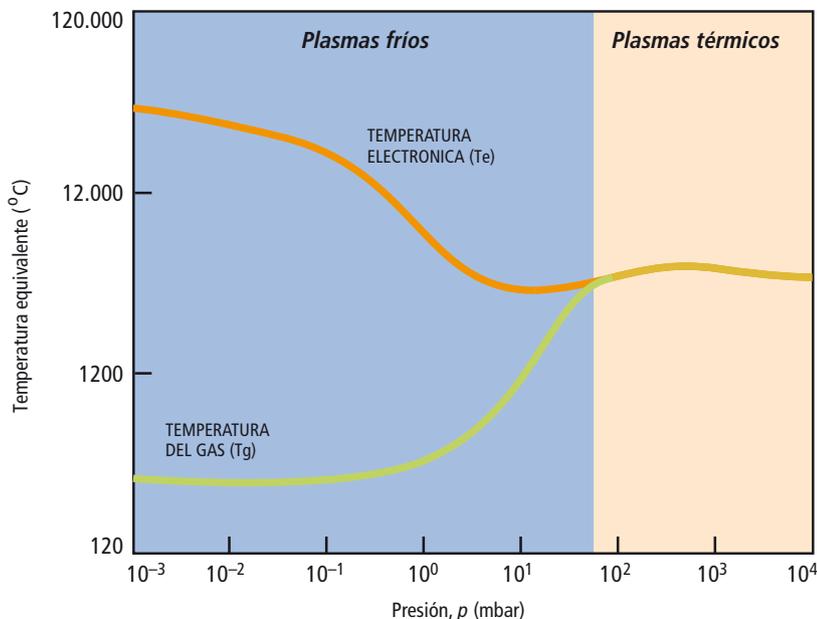
Los valores de la densidad y de la temperatura electrónica, dos de los principales parámetros que caracterizan a los plasmas, cubren un amplísimo espectro. Así, la densidad electrónica varía entre uno y 10^{25} electrones por centímetro cúbico; es decir, llega incluso a superar la concentración de electrones en metales. Por otro lado, el recorrido libre medio de las partículas en un plasma, es decir, la distancia media cubierta antes de colisionar con otra partícula del plasma, puede extenderse desde decenas de millones de kilómetros hasta sólo unas micras.

Plasmas fríos en la industria

Los plasmas fríos resultan muy útiles para muchas aplicaciones técnicas porque, al no encontrarse en equilibrio térmico, es posible controlar la temperatura, por una parte, de las especies iónicas y neutras y, por otra, de los electrones. Sin embargo, la elevada energía de los electrones constituye el genuino factor determinante a la hora de iniciar muchas reacciones químicas que, en medios activados térmicamente, resultarían muy ineficientes, si no imposibles.

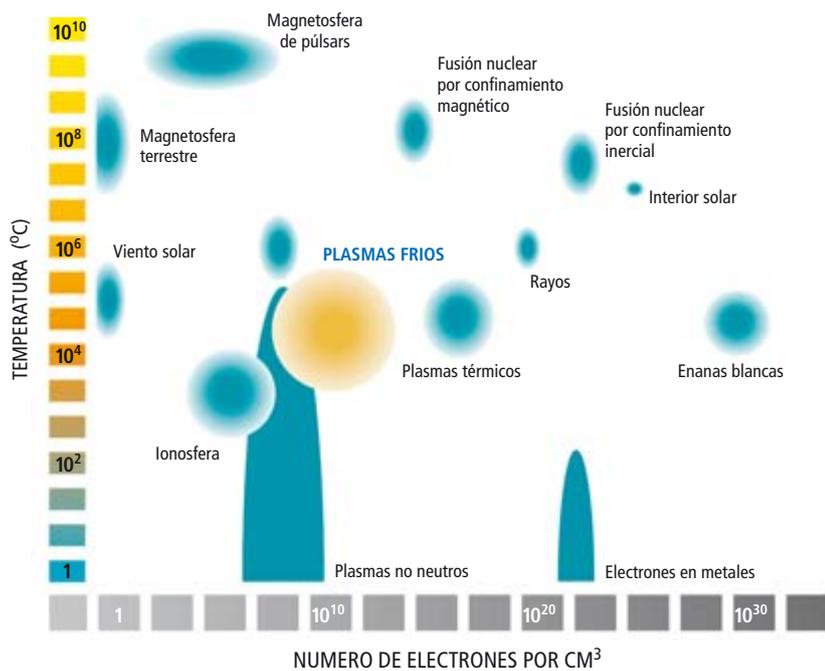
Las aplicaciones industriales de los plasmas fríos conforman una parte muy importante de la infraestructura productiva de los países avanzados. En los plasmas fríos se generan un

3. ELECTRODO CENTRAL de una lámpara ornamental de plasma. El color azulado del plasma se debe a procesos de recombinación radiativa de electrones e iones, así como a la desexcitación radiativa de electrones desde estados atómicos o moleculares excitados hasta niveles con energías inferiores.



4. VARIACION DE LAS TEMPERATURAS equivalentes de los electrones (T_e) y partículas pesadas (T_g) en un plasma de argón en función de la presión. En los plasmas fríos, T_e y T_g son muy distintos; en cambio, en los plasmas térmicos son prácticamente iguales.

gran número y diversidad de especies reactivas muy energéticas que activan procesos físicos y químicos difíciles de conseguir en entornos químicos ordinarios. Entre esas especies se encuentran fotones en el rango visible y en el ultravioleta, partículas cargadas (electrones e iones), especies neutras muy reactivas, como los radicales libres o los átomos de oxígeno, flúor y cloro, especies atómicas y moleculares excitadas, excímeros y monómeros. (Un excímero es una molécula electrónicamente excitada que carece de estado fundamental



5. DISTINTOS TIPOS DE PLASMAS, clasificados por los valores de dos de sus magnitudes más características: el número de electrones por centímetro cúbico y la energía electrónica media (la temperatura electrónica, cuando se trata de plasmas en equilibrio).

estable; un monómero es una subunidad química muy reactiva que puede unirse a otras iguales para formar polímeros.)

Gracias a los plasmas fríos, ciertos procesos industriales se realizan de forma más eficiente y barata, con lo que se reducen la contaminación y los residuos tóxicos generados. Las ventajas del uso industrial de plasmas fríos quedan perfectamente ilustradas en la comparación que W. Rakowski publicó en 1989 entre los recursos necesarios para teñir tejidos de algodón con un método químico corriente, que use cloro, y los que requieren un procedimiento igualmente eficaz, pero que se vale de plasmas fríos a baja presión (2,5-7 mbar). La modificación de 120 toneladas/año de lana mediante el segundo método suponía un ahorro de 27.000 m³ de agua, 44 toneladas de hipoclorito sódico, 16 toneladas de bisulfito sódico, 11 toneladas de ácido sulfúrico y 685 megawatt de potencia eléctrica. Por otra parte, el proceso químico ordinario producía residuos tóxicos causantes de diferentes enfermedades en los trabajadores. La comparación de los costes energéticos de producir un kilogramo de tejidos de lana teñible arrojaba unas cifras de 7 kilowatt/kg para el proceso de clorado tradicional frente a sólo 0,3 o 0,6 kilowatt/kg cuando se recurre al tratamiento con plasmas fríos producidos a baja presión.

Química de plasmas fríos

La química de los plasmas fríos, o *química fría*, así llamada por la baja temperatura (en general inferior a los 100 grados centígrados) de las especies pesadas del plasma, puede ser de tipo homogéneo o de tipo heterogéneo. Será de tipo homogéneo cuando las reacciones se produzcan en fase gaseosa como en la síntesis de ozono o en la eliminación de sulfuros y nitruros presentes en gases residuales. Será de tipo heterogéneo, cuando el plasma interacciona con una superficie sólida o líquida.

En los procesos de interacción plasma-superficie sólida se reconocen tres categorías: erosión, depósito y alteración fisicoquímica. Por erosión se entiende el desgaste asistido por plasma, de una superficie mediante bombardeo iónico simultáneo. Tiene un enorme interés para la industria microelectrónica porque erosiona el material de modo anisótropo, es decir, con una anchura y altura diferentes; lo propio de las técnicas químicas ordinarias es el tallado isótropo. En los procesos de depósito químico en fase vapor asistido por plasma se añade material a la superficie en forma de una capa delgada. Por último, las superficies sólidas tratadas con plasmas experimentan cambios fisicoquímicos como efecto de los procesos

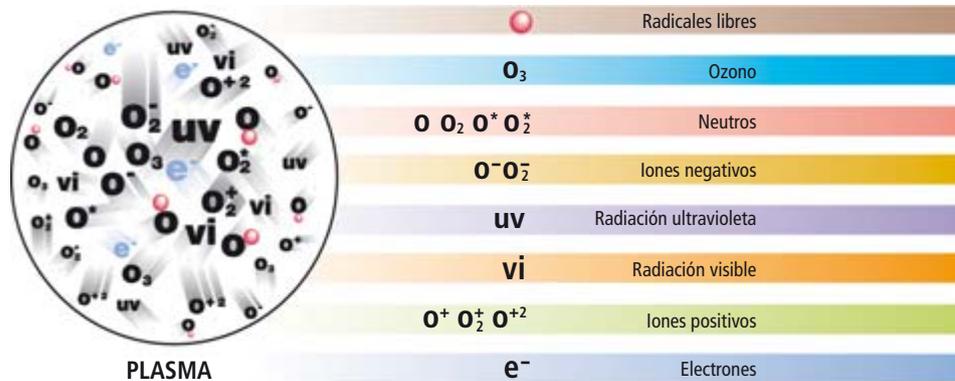
de radiación y de las partículas procedentes del plasma que actúan sobre ella.

El interés científico y técnico por los procesos de interacción plasma-superficie surgió a raíz de un trabajo de Jerome Goodman, publicado en 1960. Exponía que el depósito de una lámina de material a partir de un plasma podía resultar útil y no sólo un residuo molesto. En concreto, Goodman observó que el depósito de una micra de espesor de estireno polimerizado por plasma presentaba propiedades dieléctricas valiosas. Desde ese momento, la síntesis de materiales poliméricos bajo la influencia de plasmas fríos, o polimerización por plasma, dejó de ser un subproducto indeseable, observado ya en 1874 por De Wilde y Thenard, para convertirse en uno de los tratamientos de materiales por plasma con mayor número y diversidad de aplicaciones.

Los plasmas producidos en descargas de tipo corona a presión atmosférica se han utilizado para el tratamiento superficial de materiales, aunque, debido a que son muy inhomogéneos, se los ha ido sustituyendo poco a poco por plasmas generados en descargas luminiscentes a baja presión (entre 0,013 mbar y 13 mbar). Sin embargo, en los últimos quince o veinte años también han empezado a emplearse descargas de barrera y luminiscentes que generan plasma fríos a presiones atmosféricas en régimen homogéneo, lo cual los hace muy prácticos, y económicamente competitivos frente a los producidos a baja presión, en muchos procesos que recurren a los plasmas fríos para el tratamiento de grandes superficies.

Microelectrónica

Desde mediados de los sesenta del siglo xx, la intensa demanda, por la industria microelectrónica, de circuitos con escalas de integración cada vez mayores ha sido el estímulo principal para el desarrollo de los métodos de tratamiento de superficies y de materiales en capa delgada por plasma. Así, el erosionado seco asistido por plasma, que posibilitó la creación masiva de patrones anisótropos sobre obleas de silicio, evolucionó en los años setenta. Además, durante ese mismo decenio empezó a ser común que en las cadenas de producción de circuitos integrados se utilizasen ciertos métodos de diagnóstico del plasma, entre ellos la espectroscopía óptica de emisión, que, con la intención última de controlar y optimizar la fabricación, permitieron profundizar en el conocimiento de la cinética del plasma y de los mecanismos de erosionado y depósito. Las técnicas de diagnóstico del plasma se utilizaron de manera conjunta con las nuevas herramientas que aparecieron por entonces para el análisis de las superficies, como la espectroscopía fo-



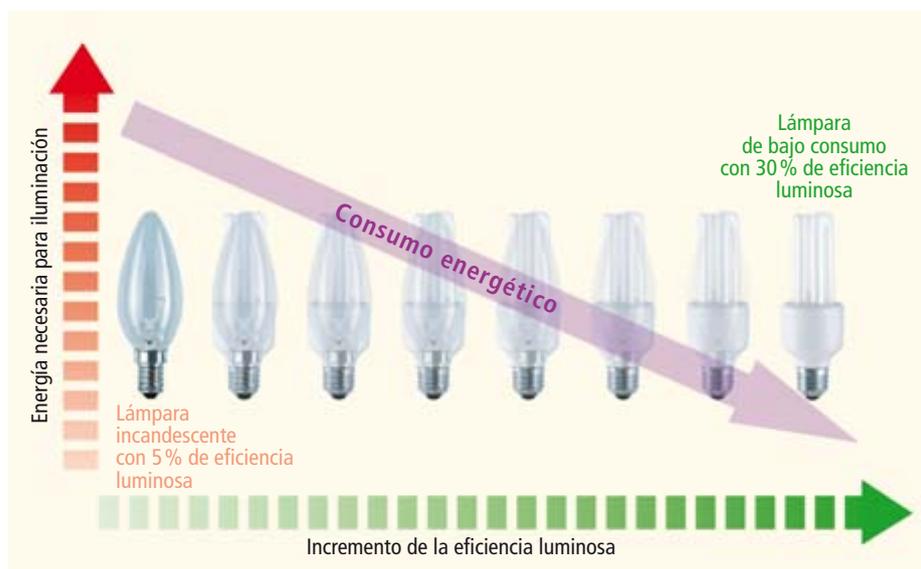
toelectrónica de rayos X o la espectroscopía de electrones Auger.

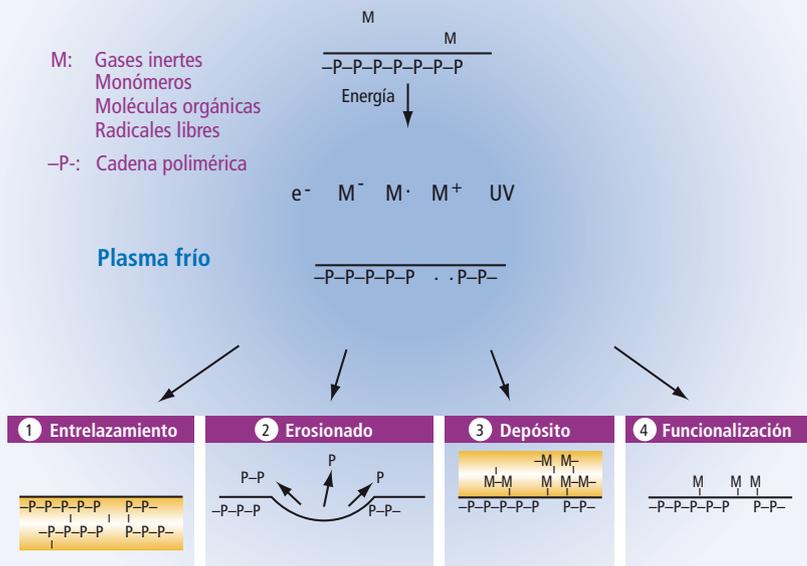
A principios de 2006, Intel anunció la comercialización de un nuevo microprocesador basado en una técnica de integración que ha conseguido dimensiones de sólo 45 nm en los elementos de los circuitos. Tal grado de miniaturización no habría sido posible sin una inversión sustancial en investigación dedicada a optimizar los tres tipos de procesos basados en plasmas fríos antes mencionados. Hoy, hasta dos tercios de las etapas involucradas en el proceso de fabricación de semiconductores se basa en el uso de plasmas fríos. Lejos de alcanzar una situación estable, la tendencia crece a ritmo constante e incluso se extiende a sectores industriales relacionados; por ejemplo, el de la producción de células fotovoltaicas mediante la síntesis de láminas delgadas de silicio amorfo o microcristalino con técnicas de depósito asistido por plasma de láminas finas.

Por otro lado, el uso de microplasmas, como los producidos en microdescargas de cátodo hueco, permite realizar en una hora millones de microagujeros (de unas 50 micras de diámetro) en placas de circuitos integrados;

6. DIBUJO ESQUEMATICO con los diferentes tipos de radiación y de partículas que se pueden encontrar en un plasma de oxígeno, uno de los más utilizados en aplicaciones y en investigación fundamental.

7. EL USO DE LAMPARAS DE PLASMA de última generación supone un importante ahorro de consumo energético.





8. LAS PARTICULAS de un plasma frío pueden interactuar con una superficie polimérica, lo que da lugar a diferentes tipos de tratamientos de la superficie en cuestión.

se aumenta así sensiblemente la densidad de componentes en los circuitos de dispositivos microelectromecánicos.

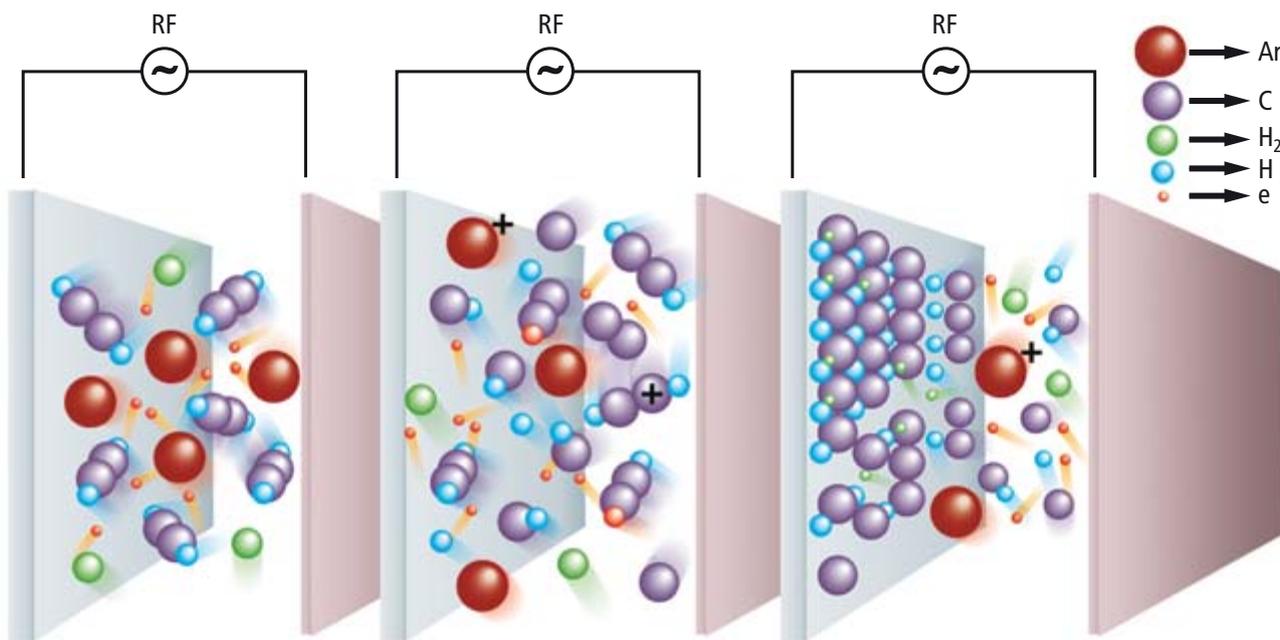
Nuevas fuentes de luz

Las lámparas modernas que iluminan los lugares donde trabajamos y vivimos constituyen un ejemplo brillante del efecto de los plasmas fríos en nuestro entorno inmediato. La luz natural, procedente del plasma solar, es la "mejor" para el ojo humano, que manifiesta su sensibilidad máxima en la zona verde del espectro visible, alrededor de los 555 nm. En

este rango espectral se encuentra también el máximo rendimiento luminoso posible de una fuente de luz blanca que proporcione 683 lúmenes por watt de potencia eléctrica.

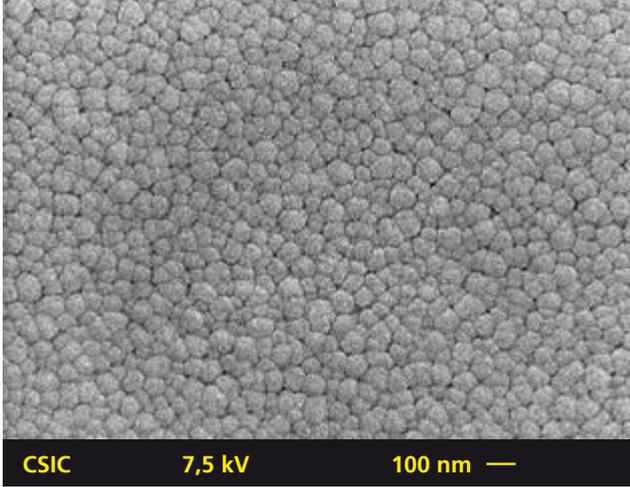
A la luz producida artificialmente se le pide que reproduzca los colores que genera la luz natural. A lo largo de los años se han ido desarrollando diferentes tipos de lámparas con el objeto de alcanzar valores del rendimiento luminoso lo más cercanos posible al valor teórico máximo. En 1938 ya se pensó en aplicar campos eléctricos alternos para generar, con un mínimo consumo energético, descargas eléctricas en un gas fácilmente excitable contenido en un tubo de vidrio. Ese gas mezcla una pequeña cantidad de vapor de mercurio con un gas inerte, casi siempre argón, a una presión que suele ser del 0,5 % de la atmosférica. Sin embargo, los átomos de mercurio excitados emiten sobre todo luz ultravioleta (UV), invisible: por tanto, para conseguir un alumbrado que pueda captar el ojo humano se recubre el interior de los tubos con un material fluorescente que absorbe la radiación UV y emite luz visible. De ahí que este tipo de alumbrado recibe desde entonces el nombre de tubos fluorescentes.

Uno de los mayores avances de las lámparas basadas en plasmas fríos se dio con la aparición de las lámparas de bajo consumo. Eran los años ochenta del siglo xx. A grandes rasgos, se trata de tubos fluorescentes pequeños que incorporan unos convertidores



9. PLASMA FORMADO POR LA MEZCLA de acetileno (C₂H₂), argón (Ar) e hidrógeno molecular (H₂), útil en la síntesis de nanoestructuras de carbono mediante el depósito químico en fase vapor asistido por plasma. De izquierda a derecha se aprecian los

distintos grados de activación del plasma, desde una primera etapa donde los electrones (e) comienzan a ionizar y disociar los átomos y moléculas del plasma, hasta una última secuencia en la que se aprecia el depósito de átomos de carbono sobre un sustrato.



10. IMAGEN TOMADA POR MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO de partículas de carbono sintetizadas en laboratorios del CSIC a partir de un plasma de acetileno (1 %)-argón (95 %)-hidrógeno (4 %) producido en un reactor de radiofrecuencia (13,56 MHz) a 300 W y una presión de 0,015 mbar. Estas nanoestructuras de carbono presentan propiedades parecidas a las del polvo interestelar carbonáceo. De hecho, en ciertas investigaciones sirven de análogos de laboratorio del polvo interestelar.

de voltaje y frecuencia que proporcionan a la lámpara una tensión alterna, de entre 30 y 70 kilohertz, más adecuada para la generación del plasma en el interior de la lámpara. Ni siquiera con tales mejoras, el rendimiento luminoso de las lámparas de bajo consumo de plasma frío supera los 100 lúmenes por watt de potencia eléctrica, es decir, sólo una séptima parte del límite teórico (683 lúmenes/watt), aunque sensiblemente mayor que el de las lámparas incandescentes tradicionales (10-18 lúmenes/watt), sus variantes halógenas (20-25 lúmenes/watt) o el de los tubos fluorescentes (40-70 lúmenes/watt).

La investigación actual en lámparas de plasma frío persigue reducir su consumo energético y hacerlas más compatibles con el ambiente, eliminando el mercurio de su interior. Ya existen lámparas de plasmas fríos sin mercurio; lo sustituyen con un plasma de excímeros. Los excímeros emiten cuando se desexcitan una radiación ultravioleta casi monocromática, con longitudes de onda que van de los 308 nanómetros hasta los 172 nm. Uno de los problemas actuales radica en encontrar el recubrimiento fluorescente adecuado para optimizar la conversión de esta luz ultravioleta en visible. Mientras ese momento llega, las lámparas de excímeros encuentran ya otras muchas aplicaciones, por ejemplo en la fotoactivación química que endurece tintas impresas. Como la iluminación con lámparas de plasmas de excímeros apenas calienta la superficie, resulta compatible con los materiales termosensibles.

Tratamientos superficiales con plasmas fríos

La energía y la carga eléctrica de las partículas que constituyen un plasma cambian bruscamente cuando entran en contacto con superficies sólidas. Se transfiere energía a las superficies. Por una parte, los plasmas pueden activar una superficie, esto es, hacer que las moléculas de ésta se enlacen con componentes moleculares de otras sustancias; por otra, eligiendo adecuadamente los gases con que se generan los plasmas, éstos servirán para

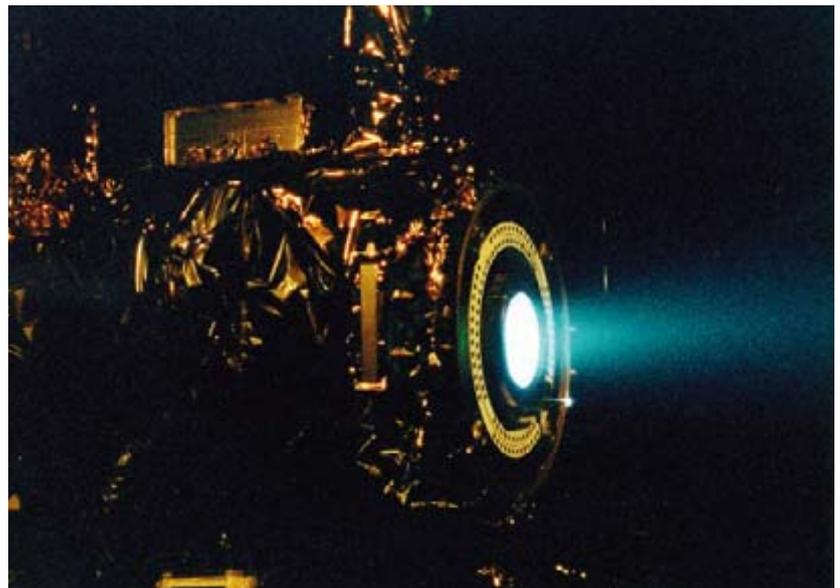
recubrir la superficie con un determinado material.

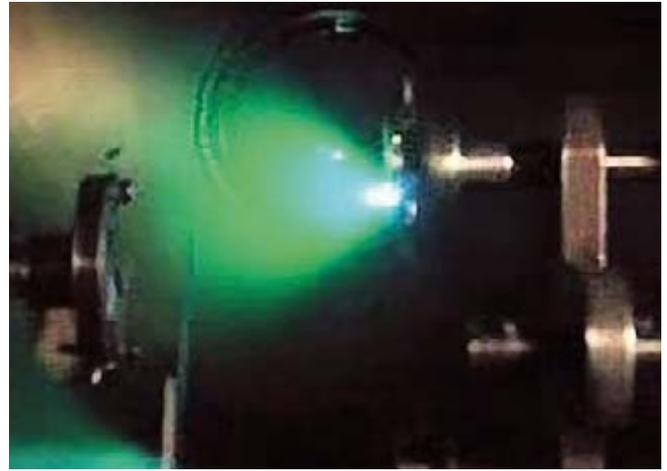
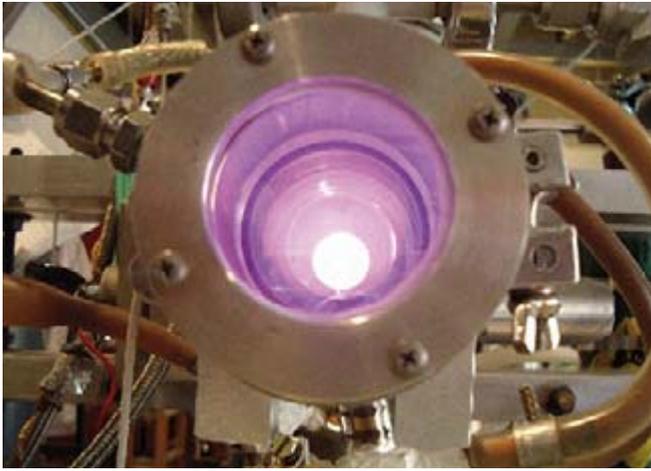
En general, al tratar una superficie con un plasma frío se persigue su activación. Un ejemplo de activación superficial por plasma es la humidificación de fibras de algodón, que mejora la capacidad adhesiva de las moléculas de los tintes, lo cual permite disponer de tejidos con colores de más calidad. Además, la propia tinción se desarrolla con mayor rapidez que a través de métodos químicos ordinarios.

La capacidad que poseen los plasmas fríos de modificar las superficies se debe a varios factores. Uno de ellos es la elevada energía media de los electrones libres presentes en el plasma (1 eV-10 eV), suficiente para romper enlaces químicos. Asimismo, las características únicas de los tratamientos superficiales mediante plasmas fríos dimanar de los efectos producidos sobre la superficie por los fotones y especies activas procedentes del plasma, que sólo penetran hasta una profundidad de entre algunos cientos de ángstroms ($\sim 10^{-10}$ m) y unas 10 micras. Debido a esto, las propiedades del interior del material permanecen inalteradas.

El tratamiento de superficies con plasmas fríos permite una activación funcional, o “funcionalización”, de las superficies, cosa que los

11. MOTOR IONICO utilizado por vehículos espaciales para su correcto posicionamiento en una órbita determinada, el desplazamiento entre órbitas y la propulsión en el espacio interplanetario y profundo. La luz azulada proviene de la desexcitación radiativa de los iones de xenón expulsados por la tobera del motor iónico.





12. PLASMAS PRODUCIDOS EN DIFERENTES institutos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. La foto de la izquierda muestra un plasma de aire generado en el Instituto de Estructura de la Materia mediante una descarga eléctrica de corriente continua a baja presión, de interés para estudios del plasma de la ionosfera terrestre. En la foto de la derecha aparece un plasma producido en el Instituto de Optica mediante la ablación con un láser de excímeros de un blanco de plata. Este plasma se genera durante el proceso de depósito asistido por láser pulsado con que se sintetizan materiales nanoestructurados de utilidad en fotónica.

tratamientos químicos no pueden ofrecer. Un ejemplo: el tratamiento de superficies sintéticas con un plasma de oxígeno puro genera en ella grupos hidroxilos, carbonilos y ésteres. O dicho de otro modo: promueve la formación de grupos moleculares químicamente funcionales que mejoran la adhesión interfacial y, así, la superficie tratada con un plasma de oxígeno será receptiva a posteriores tratamientos.

Estos procesos tienen hoy una importante repercusión económica en muchos sectores. La funcionalización de tejidos técnicos para hacerlos hidrófobos e impermeables a la humedad o al aceite se lleva a cabo mediante plasmas fríos generados a presión atmosférica en descargas de barrera dieléctrica. El aumento mediante plasmas fríos de la energía superficial de materiales poliméricos mejora la adherencia de ciertos recubrimientos, por ejemplo una lámina de material aislante muy fina, de unos 40 nm de espesor, que actúe a modo de barrera contra la penetración de gases y vapores.

Ciertos materiales aislantes de tipo cerámico (SiO_2) o de carbono amorfo hidrogenado reducen la tasa de penetración de gases (como el O_2 o el CO_2) o vapores, con diferentes olores, a través de los materiales poliméricos utilizados en el envasado de alimentos, bebidas o fármacos. Además, si estos plásticos tan comunes en los envases no estuvieran previamente tratados con plasmas fríos, resultaría muy difícil, si no imposible, lograr la impresión de textos o gráficos sobre ellos, ya que la tinta no se fijaría bien.

Aplicaciones médicas y biomédicas

En 1969 el grupo de John R. Hollahan demostró experimentalmente que con plasmas fríos de amoníaco o de mezclas de nitrógeno e hidrógeno se producían grupos amino ($-\text{NH}_2$), que, al adherirse a la superficie de diferentes tipos de polímeros, creaban materiales compatibles con la sangre. Desde entonces

se ha venido investigando el empleo de plasmas fríos para optimizar la interacción entre sistemas biológicos y distintos tipos de materiales, con el objetivo último de conseguir superficies biocompatibles.

El tratamiento con plasmas fríos sólo afecta a la superficie del material tratado. Las propiedades físico-químicas, mecánicas, eléctricas y ópticas del interior del material no se ven alteradas por el plasma frío. En cambio, el uso de diferentes ácidos y disolventes químicos puede dañar la superficie de muchos plásticos y, en caso de ser absorbidos, repercuten en las propiedades del interior del material.

Algunas de las aplicaciones biomédicas de los plasmas fríos tratan de mejorar la adhesión entre dos superficies. En esa labor se requiere la intervención de intensas fuerzas interfaciales, bien a través de compatibilidad química, bien por la generación de enlaces químicos favorecidos por el tratamiento con plasmas fríos. Entre las aplicaciones que suponen una mejora de la adhesión entre dos superficies, destaca el pretratamiento de catéteres, el de componentes de bombas de diálisis y el de plásticos de bolsas de sangre o para envases de determinados fármacos.

Los materiales que están en contacto con la sangre o con proteínas necesitan de tratamientos especiales que mejoren su biocompatibilidad. Los grupos funcionales amino, obtenidos a partir de plasmas fríos de amoníaco, actúan a modo de ganchos que retienen sustancias anticoagulantes, como la heparina, que reducen el riesgo de trombosis.

En protocolos experimentales de manipulación de células y tejidos, se está ya aplicando el depósito químico en fase de vapor asistido por plasmas a sustratos biodegradables. El tratamiento con plasmas fríos del poliestireno (material polimérico del que están hechas las placas de Petri de los cultivos celulares) favorece la adherencia y crecimiento de células. Si ciertas zonas de la superficie de po-

El autor

Francisco José Gordillo Vázquez, doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Sevilla, completó su formación en el Centro de Física de Plasmas y sus Aplicaciones de Toulouse (CNRS), ahora llamada LAPLACE, y en la Universidad del Sur de California en Los Angeles. En la actualidad es científico titular adscrito al Instituto de Optica del CSIC en Madrid. Sus investigaciones se han centrado en el estudio y modelización de la físico-química de plasmas atómicos y moleculares.

lietireno no se tratan, no se les adherirán células y, por consiguiente, no se generarán las estructuras que posibilitarían la formación de tejidos biológicos completos a partir de células semilla.

Se empieza a considerar que los plasmas fríos ofrecen un método alternativo de desinfección y esterilización de material médico. En este sentido, los plasmas fríos permitirían modificar y esterilizar de forma simultánea la superficie del material biomédico. La esterilización por plasma puede ser adecuada en el caso de dispositivos sensibles a la radiación, a las altas temperaturas de las autoclaves de uso médico o cuando intervienen productos químicos agresivos.

Los obstáculos principales contra el uso comercial de plasmas fríos en el sector biomédico derivan de la falta de regulación administrativa y de la escasez de estudios sobre la reproducibilidad y validez a escalas mayores de los efectos biológicos de los plasmas fríos observados en experimentos realizados en laboratorios académicos. En cualquier caso, parece que las ventajas frente a otros métodos compensan las posibles desventajas.

Aplicaciones militares

En cuanto medio ionizado, el plasma es un buen conductor de electricidad. Una de sus aplicaciones militares, entre muchas, consiste en utilizarlo a modo de antena. Las antenas de plasma funcionan igual que las de metal, aunque presentan ciertas ventajas: al desconectarlas tras una transmisión, el plasma se torna gas neutro (argón, neón, vapor de mercurio), con resistencia eléctrica infinita. Pierde así la capacidad de interactuar con señales electromagnéticas. Una vez apagadas las antenas de plasma, ni reflejan ondas de radar (se vuelven “invisibles”), ni absorben radiación de microondas de alta potencia. Se reducen sensiblemente, por lo tanto, los efectos adversos derivados de las contramedidas de guerra electrónica.

Otra peculiaridad de las antenas de plasma estriba en que, al apagarlas, permiten a las antenas cercanas emitir o recibir señales sin las interferencias (sobre todo en transmisiones de alta frecuencia con pulsos muy cortos) causadas por elementos metálicos.

El diseño de las antenas de plasma permite utilizar pulsos extremadamente cortos, de interés en comunicaciones digitales y por radar. Además, al cambiar algunas propiedades del plasma —su densidad iónica, su impedancia o su frecuencia de resonancia—, las antenas de plasma pueden configurarse de forma dinámica en frecuencia, dirección, anchura de banda y ganancia. En general, las antenas de plasma son más pequeñas y ligeras que sus análogos

de metal y, gracias a sus menores pérdidas óhmicas, más potentes y eficientes.

Otra de las aplicaciones militares de los plasmas fríos producidos en descargas eléctricas es la propulsión eléctrica mediante motores iónicos, que se utilizan en los vehículos espaciales para su posicionamiento correcto en una órbita determinada o para desplazarse de una órbita a otra, así como para la propulsión en el espacio interplanetario y profundo. Las primeras ideas sobre este sistema de propulsión las propusieron los pioneros de la exploración espacial Robert Goddard y Hermann Oberth.

En los propulsores químicos la fuerza de impulso se consigue gracias a una expansión hipersónica, a través de las toberas traseras, de una gran masa de gases calientes resultado de la combustión de un cierto combustible (sólido, líquido o híbrido). Los motores iónicos, en cambio, tienen por combustible un gas poco corrosivo, de alto peso molecular y baja energía de ionización, actualmente se usa el xenón, que se inyecta en una cámara; allí recibe una descarga eléctrica, que lo convierte en un plasma con iones de xenón.

Unas rejillas aceleradoras, entre las que se ha establecido una diferencia de potencial de cientos de volt, generan un campo eléctrico que, gracias al ventajoso cociente entre carga y masa de esos iones, los acelera hasta diez veces la velocidad conseguida por los propulsores químicos. Gracias a la mayor velocidad de los iones de los motores iónicos, éstos ejercen fuerzas de empuje igual o superiores a las conseguidas por los cohetes con propulsores químicos, pero con una cantidad de combustible hasta cinco veces menor.

Todo lo anterior redundaba en una mayor vida media del vehículo espacial, una mejor capacidad de maniobra en órbita y la posibilidad de disponer de mayor instrumentación a bordo (más carga útil). La nave *Deep Space 1*, lanzada por la NASA en octubre de 1998, llevaba motores iónicos de xenón como propulsores principales. Entre sus misiones se encontraba la de probar esa forma de propulsión.

Sin embargo, los motores iónicos tienen ciertas limitaciones. Una de ellas, el debilitamiento del flujo iónico por la formación entre las rejillas aceleradoras de carga espacial, se ha superado con los nuevos propulsores iónicos de tipo Hall. La introducción de un campo magnético de unos 100 o 200 gauss crea una corriente de Hall alrededor de las líneas de ese campo. Con ello se impide la formación de carga espacial; aumenta así el tiempo de residencia de los electrones en el propulsor, con lo que aumenta el número de iones disponibles. La consecuencia final es una mejora del rendimiento del motor iónico.

Bibliografía complementaria

GAS DISCHARGE PHYSICS.

Y. P. Raizer. Springer Verlag; Berlín, 1997.

INDUSTRIAL PLASMA ENGINEERING: APPLICATIONS (vol. 2).

J. Reece Roth. Institute of Physics Publishing Ltd., 2001.

TEMPORAL AND SPATIAL EVOLUTION OF THE ELECTRONIC DENSITY AND TEMPERATURE OF THE PLASMA PRODUCED BY LASER ABLATION OF LINBO₃.

F. J. Gordillo-Vázquez, A. Perea, J. A. Chaos, J. Gonzalo y C. N. Afonso en *Applied Physics Letters*, vol. 78, págs. 7-9; 2001.

DISTINCT NONEQUILIBRIUM PLASMA CHEMISTRY OF C₂ AFFECTING THE SYNTHESIS OF NANODIAMOND THIN FILMS FROM

C₂H₂(1%)/H₂/AR-RICH PLASMAS.

F. J. Gordillo-Vázquez y J. M. Albella en *Journal of Applied Physics*, vol. 94, págs. 6085-6090; 2003.

LAMINAS DELGADAS Y RECUBRIMIENTOS: PREPARACION, PROPIEDADES Y APLICACIONES.

Dirigido por J. M. Albella. CSIC; Madrid, 2003.

INTERPLAY OF PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS IN THE PECVD AND ETCHING OF THIN FILMS.

C. Cavallotti, M. Di Stanislao y S. Carrà en *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, vol. 48/49, págs. 123-165; 2005.