

**APPLICATIONS TO THE ELECTRONICS OF THE CYCLOTRONIC-ELECTRONIC
RESONANCE (CER) PLASMAS****APLICACIONES A LA ELECTRONICA DE LOS PLASMAS POR RESONANCIA
CICLOTRONICA ELECTRONICA (RCE)****PhD. Angel José Chacón Velasco****Universidad de Pamplona**

Departamento de Física y Matemáticas

Grupo de investigaciones: Procesos Electrodinámicos

E-mail: angelch@unipamplona.edu.co

Abstract: We present the physical operation principles and specificities of the reactors of plasma for applications to the electronics and we highlight the advantages of the plasma for ECR in front of the conventional sources.

Resumen: Presentamos los principios físicos de funcionamiento y especificidades de los reactores de plasma para aplicaciones a la electrónica y destacamos las ventajas de los plasmas por RCE frente a las fuentes convencionales.

Keywords: Electronic cyclotron resonance ECR, Plasma, microelectronics, etching

1. INTRODUCCION

En la última década hemos sido testigos de un acelerado crecimiento en el área del tratamiento de superficies por plasmas, siendo de primordial interés las aplicaciones a la microelectrónica. Aproximadamente un cuarenta porciento de los procesos necesarios para la fabricación de circuitos integrados están basados en la tecnología del plasma.

Los procesos por plasma poseen características que posibilitan su empleo en muchas otras áreas científicas como la propulsión espacial, destrucción de basuras toxicas, atenuación de las emisiones industriales de residuos contaminantes, procesos metalúrgicos (limpieza de superficies metálicas), obtención de polímeros biocompatibles, entre los más significativos.

Con el advenimiento de la electrónica submicrométrica, muchos de los dispositivos convencionales de acoplamiento capacitivo de radio frecuencia o diodos RF, que funcionaban con plasmas de bajas densidades, dadas sus limitaciones de operación, crearon la necesidad del diseño de nuevos reactores de plasma con alta densidad y basados en principios físicos más eficientes energéticamente, como el fenómeno RCE.

La miniaturización de las dimensiones en los dispositivos de microelectrónica pusieron en evidencia las deficiencias estructurales de los equipos convencionales de *etching* y deposición. Por ejemplo, si consideramos el ancho para la banda de un transistor, que no puede tener una variación mayor que $0.1 \mu\text{m}$, actualmente estas variaciones asumen valores entre $0.25 \mu\text{m}$ y $0.025 \mu\text{m}$ como mínimo.

Por lo tanto se hizo necesario aumentar el control sobre la anisotropía del transporte iónico sobre el sustrato donde se deposita, mas allá del que se logra con los reactores existentes basados en acoplamiento capacitivo de radiofrecuencia RF.

Las colisiones entre los iones en la región del sustrato son un factor limitante para conseguir la anisotropía requerida, razón que hizo necesario operar en bajas presiones. En los dispositivos convencionales de RF una presión menor implica campos eléctricos más altos según la curva de Paschen, lo que a su vez implica mayores energías de bombardeo sobre el sustrato por parte de los iones dado que la energía y el flujo iónico en estas fuentes están intrínsecamente acoplados.

La ausencia de control sobre la energía iónica causa daños al material tratado (etching) o imposibilita la formación del material al ser depositado. En las descargas RF con acoplamiento capacitivo (llamadas Diodos RF) –ver figura 1. Los sustratos son colocados sobre uno de los electrodos en una atmósfera de baja presión (10^{-3} - 10^{-2} Torr). Su operación se da generalmente entre las frecuencias del plasma de iones y electrones, $\omega_{pi} < \omega < \omega_{pe}$ y se producen con fuentes comerciales de 13.56 MHz.

$$w_{ra} = \sqrt{\frac{e^2 n_a}{E_0 m_a}}$$

Donde n_α y m_α son respectivamente la densidad y la masa de una especie de partícula α . En estas condiciones, los electrones, que tienen una mayor movilidad que los iones, responden oscilando instantáneamente entre los dos electrodos, los iones forman una nube que responde solamente al campo eléctrico medio.

Las oscilaciones de la nube de electrones originan las bahías de plasma, o regiones que tienen una carga total positiva. Cuando se toma la media temporal sobre un periodo de oscilación del campo eléctrico (ver figura 1). Tal carga total positiva proporciona un campo eléctrico DC (corriente continua) en medio de la bahía apuntando hacia la parte externa del plasma.

Los iones saliendo del centro de la descarga son acelerados en la bahía en dirección al sustrato provocando un bombardeo iónico que puede aumentar, inhibir o modificar reacciones superficiales en el dispositivo sobre un determinado sustrato, las amplitudes típicas de

voltaje RF entre los dos electrodos varían entre 100V y 1kV.

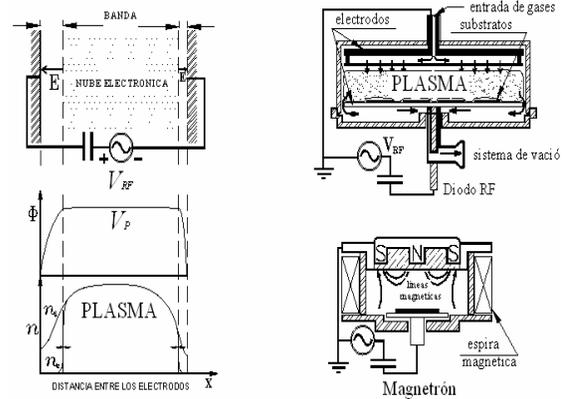


Fig. 1. Esquemas para descarga RF, Diodo y Magnetron

La región central es casi neutra y sin campos eléctricos. La diferencia de tensión es observada solo a lo largo de la bahía donde encontramos campos intensos, lo que lleva a los modelos de bahía de alto voltaje como los sujetos a la ley de Chil-Langmiur. Sobre la interfase plasma –bahía, el modelo de Bohn requiere que la velocidad media de los iones sea igual a la velocidad *ion*-acústica

$$u_B = \sqrt{\frac{e T_e}{M}}$$

Generando un flujo de bombardeo iónico $G_i = n u_B$. En estas ecuaciones T_e es la temperatura electrónica en eV, M es la masa de los iones y n la densidad del plasma. Entre los equipos convencionales de RF encontramos también los triodos, los cuales ofrecen un control independiente adicional sobre la energía iónica. Esto se logra colocando los dispositivos a ser tratados sobre un sustrato con polarización de RF aprovisionada por una fuente auxiliar por lo general de menor potencia.

Otro tipo de fuentes que hacen uso de un campo magnético uniforme entre 50 y 150 G, son los magnetrones (ver figura 1) aun con forma de diodos, operando en el régimen de presión del orden de los mTorr, en los que el campo eléctrico aplicado puede ser DC o RF. Estos reactores son utilizados en deposición rápida de películas delgadas o dispositivos de etching reactivo. El campo magnético en estos reactores es paralelo al

cátodo y facilita el acoplamiento aumentando la eficiencia con que la potencia es transferida de la fuente para el plasma al mismo tiempo que mejora su confinamiento, impidiendo que haya el flujo de iones en la dirección hacia la pared de la cavidad, inhibiendo por tanto el sputtering (chisporroteo) ocasionado por el bombardeo iónico.

Como resultado principal, los magnetrones ofrecen una mayor densidad del plasma que los llamados diodos convencionales de DC o RF, pudiendo operar en voltajes más bajos para formar la descarga. Los parámetros típicos para estos magnetrones son tensiones de 500V y corrientes de 5 A, en tanto que los diodos no magnetizados funcionan a 2500 V y a corrientes de 0.5 A.

A pesar de sus ventajas, en estos reactores surgen corrientes laterales sobre el sustrato en razón de la corriente de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$, las que causan diversos daños al proceso en aplicación, en esta configuración son utilizadas bajas frecuencias de RF, las que no posibilitan operar el plasma en la resonancia ciclotrónica electrónica, a diferencia de las descargas por microondas.

2. DISPOSITIVOS PARA APLICACION TECNOLÓGICA DEL PLASMA

2.1 Fuentes de plasma con alta densidad

Los dispositivos de plasma convencionales se caracterizan por el contacto directo entre la descarga y los electrodos polarizados que la mantienen, estas son descargas capacitivas DC o RF. En este tipo de reactores los procesos son acompañados por bahías de elevado campo eléctrico cuya presencia a su vez hace inviable el uso de estos dispositivos en determinados tratamientos. A mediados de los años 80 se diseñaron nuevas variantes de fuentes de plasma con campos eléctricos menos intensos en sus bahías (ver figura 2).

La característica en común de todos ellos es el acoplamiento de potencia no capacitiva en RF o de microondas a través de cilindros o ventanas dieléctricas, posibilitando voltajes más bajos en todas las bahías. El potencial DC en estos plasmas, es por tanto la energía de aceleración iónica del orden de 20-30 V en todas las superficies. Para controlar la energía iónica a niveles más bajos, el

electrodo donde son colocados los sustratos puede ser polarizado con una señal auxiliar en RF de menor potencia, de esta forma se condiciona independientemente el flujo iónico o la potencia transferida al plasma y la energía iónica de bombardeo (fuente auxiliar de polarización).

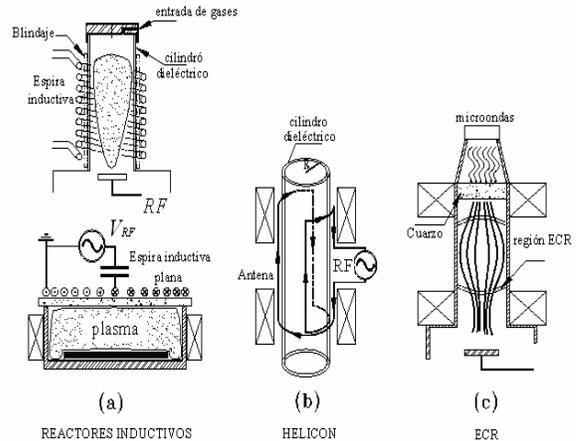


Fig. 2 Fuentes de plasma con alta densidad

Sin embargo tales reactores siguen presentando ciertas dificultades como la falta de uniformidad radial sobre grandes áreas, presente en diodos RF con acoplamiento capacitivo, para obviar esta dificultad el plasma es formado entre los electrodos con una pequeña distancia de separación (la razón entre $l/R \ll 1$), proporcionando de esta manera la uniformidad deseada.

Por hacer uso de principios de resonancia o de inducción en su operación los reactores RCE requieren cuando están diseñados para tratamiento de materiales de un alto vacío, lo que las hace un poco más costosas, además de la posible deposición de metales sobre las ventanas dieléctricas de acoplamiento de la potencia.

En las fuentes de acoplamiento inductivo ICP (*Induced Coupled Plasmas*), el plasma formado actúa como el secundario de un transformador de espira única acoplada a una bobina inductiva de RF a través de un cilindro de cuarzo. Aplicando potencia de RF a una espira inductiva no resonante, este reactor presenta ventajas en su simplicidad ya que no requiere de campos magnéticos, pudiendo operar en un largo intervalo de potencia y presión, teniendo un límite en la densidad del plasma en torno de 10^{13} cm^{-3} para un acoplamiento eficiente de la potencia en la descarga.

hasta alcanzar la región del campo magnético resonante, para el caso de una frecuencia de 2.45 GHz, el campo magnético asociado es de 875 G, en esta superficie se observa una ruptura del gas en la cavidad y el plasma formando pasa a absorber eficientemente la potencia de las microondas, fluyendo a lo largo de las líneas magnéticas hasta la cavidad de procesamiento.

La idea de usar el fenómeno RCE como fuente de plasma se dio en los años 60 en el área de calentamiento electrónico en plasmas de fusión por. Las primeras aplicaciones tecnológicas de la RCE fueron hechas a mediados de los años 70 por Musil, Suzuki e Sakudo, en las áreas de implantación iónica, oxidación de silicio y de etching por plasma. El reactor de RCE (Fig. 3) se divide básicamente en cuatro partes.

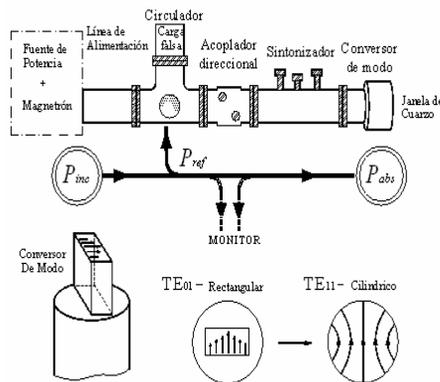


Fig.4. Sistema de inyección de microondas

Configuración apropiada según el proceso del campo magnético resonante

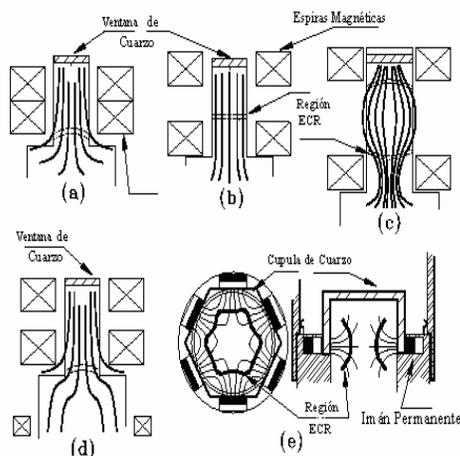


Fig. 5. Cavidad de reacción y sistema de vacío (ver figura3)

2.3 Sistema de fuentes para polarización de RF

Uno de los primeros reactores RCE que hizo uso del campo magnético divergente fue diseñado pensando en la aceleración de haces iónicos. En los años 80-90 este tipo de reactores pasó a ser de uso común en la deposición de películas dieléctricas y un poco después en aplicaciones de etching.

En este tipo de reactores la ubicación de las regiones resonantes depende de la disposición de las espiras conductoras, la descarga es operada con un gas de Argón Ar o de Nitrógeno N_2 en el intervalo de presiones entre 5.10^{-4} mbar hasta 2.10^{-6} mbar y flujos de 80 a 10 sccm respectivamente. La potencia inyectada de las microondas puede variar desde 100 W hasta 1kW, acoplada eficientemente, o sea si $P_{ref} < 100W$.

Una de las posibilidades de deposición en reactores de este tipo son las de películas de Nitruro de Aluminio AlN y las de tipo diamante como el c-BN (Nitruro de Boro cúbico) material cerámico de gran importancia tecnológica actual, por sus semejanzas con el diamante, su alta dureza, excelente conductividad térmica, alto gap, resistencia al ataque químico etc. Presentando otras propiedades que no posee el diamante como, el de ser un material que no se difunde en acero pudiendo ser depositado con éxito en sustratos ferrosos, tampoco permite la absorción de elementos de alto número atómico en sistemas de vacío, eliminando la presencia indeseada de estos elementos en aplicaciones como dispositivos de confinamiento de los plasmas.

Una de las más recientes aplicaciones de los reactores RCE descritos es su utilización para la limpieza de piezas arqueológicas, en este caso de artefactos de la recientemente descubierta en el norte del Perú cultura MOCHE Sipán.

CONCLUSIONES

Además de las aplicaciones descritas a la electrónica de los plasmas RCE podemos concluir la enorme importancia de estos plasmas también en: la generación de iones multicargados y de iones negativos es una de las más importantes aplicaciones de los plasmas RCE y ha despertado un gran interés en la comunidad científica debido a su enorme potencial científico y tecnológico.

Las aplicaciones tecnológicas de los iones multicargados están determinadas por el valor de sus energías: los de bajas energías son utilizados en especial por la espectroscopia de rayos X, la física atómica, en la tecnología de metales y de semiconductores aleados (implantación iónica), al igual son de gran utilidad para resolver el problema de las impurezas de átomos pesados en la primera pared de la cámara interna (*liner*) de las instalaciones termonucleares.

Los de energías medias y altas son de amplia utilización en la física del estado sólido, la medicina y la farmacología, en la cual se han creado nuevos fármacos y preparados radioactivos; los iones acelerados hasta energías relativistas y super-relativistas (del orden de 1 GeV por nucleón) posibilitan el estudio del plasma de quarks-gluones y la obtención de formas novedosas y exóticas de la materia (materia super-densa y super-caliente).

Las fuentes RCE han permitido recientemente en experimentos de fusión la obtención de núcleos super-pesados tendiendo a confirmar la existencia de un “islot de estabilidad”.

Un caso especial de aplicación tecnológica de los iones multicargados, es la producción de membranas nucleares o filtros nucleares que son láminas poliméricas con agujeros de paso (capilares).

La transformación de láminas a membranas se da por bombardeo de estas con iones a energías 0.1-1 MeV por nucleón acompañado de un tratamiento con rayos ultra violeta y soluciones ácidas. Dependiendo del número atómico, energía, grosor de la lámina y métodos de tratamiento después de la irradiación iónica los tamaños de los capilares varían en el rango entre 0.015 - 30 μm .

Las membranas nucleares difieren de las producidas a través de métodos convencionales por su alta homogeneidad de los capilares, capilares con forma de cilindros regulares, alta selectividad respecto a separación de componentes, bajo grado de absorción superficial e inercia biológica. Gracias al rápido aumento de las aplicaciones y a las ventajas en su fabricación, la tecnología de filtración por membranas nucleares se ha dado en llamar “*La tecnología del siglo XXI*”.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece profundamente a los profesores Ricardo M. Galvao y J. A. Sevidanes da Matta del Instituto de física de la Universidad de Sao Paulo, Brasil, por la hospitalidad en dicho instituto y la posibilidad de trabajar en el reactor RCE por ellos diseñado y construido.

REFERENCIAS

- M.A Liebermann e A.J. Lichtenberg, Principles of plasma discharges an materials processing (Wiley, 1994)
- Suzane L.Rohde, Unbalanced Magnetron Sputtering, em Physics of Thin Films, Vol.18, editado por M.H.Francombe e J.L.Vossen (Academic Press ,1994)
- M.A Liebermann. opus cit
- M.A Liebermann e R.A. Gottscho, Desing of High-Density Plasmas Sources for Materials Processing, em Physics of Thin Films, Vol.18, editado por M.H.Francombe e J.L.Vossen (Academic Press,1994)
- W. Hittorf, Wiedemanns Ann. Phys. 21,90 (1989)
- J.J Thomson, Philos. Mag, 4, 1128 (1927)
- Lam Research Corporation, Thechnical Note-003 (1992)
- F.F Chen, Plasma Phys. Controlled Fusion 33, 339 (1991)
- R.W. Boswell, Plasma Phys. Controlled Fusion 26, 1147 (1970)
- Jes Asmussen, J. Vac. Sci. Technol. A7, 883(1989)
- R.J. Kerr, R.A Dandl, H.O. Eason e M.C. Becher, Bull. Am. Phys. Soc. 7, 290 (1962)
- J. Musil e F. Zacek, Plasma Phys. 13, 471 (1971)
- R.C. DeVries, Proceedings of a NATO Advanced Study Institute on Diamond and Diamond-like Films and Coatings, July 22-August 3, 1990, in Castelvechio, Pascoli, Italy, pp 151.
- E.A.O. Saettone, J.A.S. da Matta et al, Plasma Cleaning and Analysis of Archeological Artifacts from Sipán, Journal of Applied Physics D, 2003.
- Nifenecker H., Asghar M. La Recherche N° 206 Nov 1999, pag. 24 – 25.
- Tesis Doctoral, Principios físicos de la generación de iones multicargados y de iones negativos en un plasma RCE estratificado, Ángel José Chacón Velasco, 2002.