

IMPLANTACIÓN IÓNICA

H.J. Dulcé Moreno¹, V.D. Dougar-Jabon^o, P. A. Tsygankov*

Universidad Francisco de Paula Santander, A.A.1055 Cúcuta, Colombia

^o Universidad Industrial de Santander, A.A.678 Bucaramanga, Colombia

* Moscow Bauman State Technical University, Moscow, Russia

RESUMEN

En este trabajo se presenta una revisión de las diferentes técnicas de implantación de iones desde los implantadores por haces iónicos, utilizados en la fabricación de semiconductores, pasando por una serie de desarrollos con base en la tecnología de la física del plasma, hasta llegar a la técnica denominada Implantación Iónica Tridimensional (3DII).

Para cada una de las técnicas de implantación iónica se presentan los dispositivos más comunes y se analizan sus características principales. Para el caso de la Implantación Iónica Tridimensional se describe el equipo JUPITER (Joint Universal Plasma and Ion Technologies Experimental Reactor), único en el mundo, para la investigación de descargas pulsadas de alto voltaje a bajas presiones y para el tratamiento superficial de materiales. Este dispositivo se implementó en el Laboratorio de Física del Plasma y Corrosión de la Universidad Industrial de Santander, con la colaboración financiera de COLCIENCIAS y con la cooperación de la Universidad Técnica Estatal Bauman de Moscú.

PALABRAS CLAVES: Implantación iónica tridimensional, descarga de alto voltaje, nitruración.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas de más actualidad en la industria metalmeccánica de alta tecnología, y en la fabricación de aparatos de precisión, es el desarrollo de técnicas

de tratamiento superficial avanzado que logren mejorar propiedades de los materiales tales como: microdureza, resistencia al desgaste por fricción, resistencia a la corrosión, etc. No hay duda que el progreso en estas ramas está ligado ante todo con los éxitos en el diseño y construcción de dispositivos que, como resultado de amplios estudios y del control de los procesos que en ellos se suceden, logren la producción de materiales con propiedades tribológicas predeterminadas de acuerdo con una necesidad específica.

Desde los años 70 se realizan investigaciones intensas en el área de tratamiento de superficies de materiales de construcción por haces de partículas cargadas y especialmente por haces iónicos. Dependiendo de la energía con la que los iones llegan a una superficie puede prevalecer uno de tres procesos diferentes (ver figura 1). Si la energía es muy baja (hasta decenas de electrón-voltios) los iones se depositan en la superficie, creándose un recubrimiento – película delgada. Si la energía es mayor (algunos centenas de electrón-voltios) predomina un proceso de chisporroteo de la superficie (conocido como sputtering), dicho proceso es útil para limpieza superficial o para evaporar materiales en procesos de recubrimiento. Finalmente, a energías mucho mayores (desde 5 kilo-electrón-voltios hasta algunos Mega-electrón-voltios), los iones penetran dentro de la superficie sólida incrustándose a una profundidad de varias capas atómicas. Este proceso se conoce como implantación iónica (Molera, 1991).

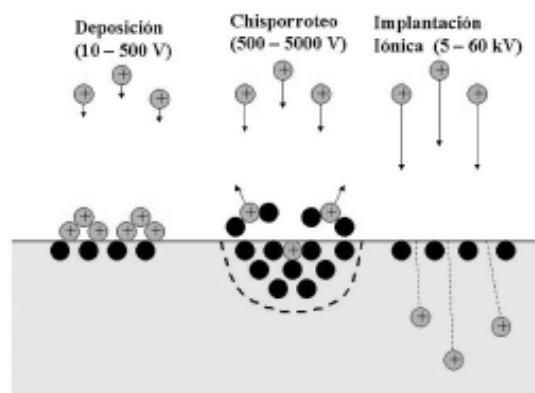


Figura 1. Tipos de procesos según el potencial acelerador

¹ [hdluce@col1.telecom.com.co](mailto:hdulce@col1.telecom.com.co)



Las tecnologías iónicas se refieren por su realización técnica a métodos vacío-plásmicos que permiten producir capas modificadas con adhesión del 100% al material tratado, diferenciándose y superando en este aspecto a los métodos tradicionales de aplicación de recubrimientos en vacío (magnetron, acelerador, chisporroteo resistivo o activo).

En el proceso de implantación de iones acelerados tiene lugar la modificación en las capas superficial y subsuperficial del material original sin cambio en las dimensiones geométricas de la pieza tratada y no se presenta, como en el caso de chisporroteo, una frontera bien definida capa – material original con diferentes características físicas (por ejemplo, diferente coeficiente de expansión térmica). En este sentido este método es próximo a los procesos tradicionales de saturación de superficies de materiales sólidos con adición de aleado tales como nitruración, carbonización, cementación con boro, etc. Es muy importante tener en cuenta que el mecanismo de adición difiere radicalmente ya que la concentración de aditivo se determina no por las constantes de difusión del proceso en equilibrio de saturación de la superficie sino por las interacciones cinéticas del ion, acelerado hasta decenas kilo-electrón-voltios, con la red cristalina del material a tratar (Ziegler, et al, 1985). Una consecuencia de esta diferencia es que la concentración del elemento implantado puede alcanzar un 20-70% en comparación con 3-7% que es común para los procesos de difusión. Con todo esto el tratamiento por implantación no se acompaña por calentamiento significativo del material tratado que es una ventaja muy grande frente a los métodos físico-químicos donde la temperatura del procesamiento es alta, en algunos casos supera la temperatura de transformación de fase. Una temperatura alta puede producir deformación de las piezas tratadas.

El ion frenado en el material participa y estimula una gran cantidad de procesos a nivel superficial y subsuperficial: crecimiento y traslación de dislocaciones, formación de nuevos compuestos

químicos, destrucción de composiciones originales, difusión estimulada por radiación, etc., y el producto final del tratamiento es una resultante de todos estos (Sharkeev, et al, 1997). Por lo anterior hasta el presente no se ha elaborado una teoría completa que abarque y determine en su totalidad el proceso de modificación de una superficie por un haz iónico.

Entre los principales mecanismos que producen endurecimiento de metal se pueden mencionar algunos: creación de composiciones químicas, defectos por radiación de la red cristalina, formación de capas subsuperficiales que provocan la tensión compresión – extensión en la superficie de material. Todavía no existe una solución al problema de determinar con exactitud cual es el efecto de modificación y el comportamiento de la capa que se desgasta ya que el grosor de capas obtenidas por implantación iónica en la mayoría de los casos no supera un micrómetro (10^{-6} m). Sin embargo los resultados impresionantes en la modificación de las propiedades tribológicas de materiales por los métodos de implantación iónica han obligado a los investigadores a buscar los métodos óptimos de la nueva tecnología, y a diseñar equipos con tecnologías especializadas.

Una razón por la que no se utiliza ampliamente en la industria este método es la no existencia de un equipo simple, seguro y económico.

2. DESARROLLO DE LAS TÉCNICAS DE IMPLANTACIÓN IÓNICA

La implantación iónica se ha usado durante más de 40 años en la industria de semiconductores debido a las posibilidades únicas en la formación de capas de grosor predeterminado con una conductividad seleccionada a una profundidad dada dentro de una base semiconductor.

Desde la mitad de la década de los 60 todos los equipos industriales se diseñaban para funcionar con elementos microelectrónicos en condiciones específicas



de fabricación. En primer lugar se debía dar una organización del proceso de fabricación en condiciones de alto vacío (HV, presiones no mayores a 10^{-3} Pa) donde se minimizaban las posibilidades de contaminación del semiconductor por impurezas especialmente en la zona de ubicación de la base (blanco); en segundo lugar se debía conseguir una dosis de iones a implantar generalmente baja (hasta 10^{20} m⁻²) con energía hasta 1×10^6 eV; en tercer lugar se debía cumplir con exigencias rígidas para separación por masas de los iones a implantar, homogeneidad energética de iones, barrido regular del haz iónico sobre la superficie plana del blanco y precisión de focalización. Los esfuerzos hechos en esta área permitieron, al inicio de los años 80, crear unos equipos efectivos y perfectos para aleación iónica de semiconductores (Ziegler, 1992). Entre las empresas que construyeron y aún producen equipos industriales para implantación iónica se pueden mencionar: Eaton Corporation (USA), Balzers (Lichtenstein), Nissan Electric (Japan), Hitachi (Japan), Varian Corporation (USA), Vesuvio (Russia).

En la década de los 70 se prestó atención a las posibilidades de la tecnología de implantación iónica en el área de modificaciones de materiales metálicos. Se obtuvieron resultados positivos que mostraron cambio significativo de las propiedades tribológicas de metales, aumento de la resistencia a la corrosión, aumento de resistencia a la fatiga de metales. Los resultados más completos de las investigaciones en esta etapa de desarrollo de los métodos de implantación iónica para los materiales de construcción se colectan en una monografía (Hirvonen, 1980). Las investigaciones se realizaron en equipos modernizados (originalmente destinados para tratamiento de semiconductores) que fueron adecuados para experimentos de laboratorio.

Al inicio de los años 80 se comprendió que el método de implantación iónica poseía un valor práctico en el mejoramiento de las propiedades superficiales de los materiales, y una serie de empresas comenzaron a diseñar equipos especializados. Muchos equipos

fabricados en los 80 tienen "lunares" de los equipos antecesores destinados para fabricación de semiconductores. Uno de los equipos industriales más perfectos construidos con un esquema tradicional para implantación iónica de materiales es el equipo de la empresa Danfysik (Denmark), serie 1090-200 (Streade, 1989). Este equipo está diseñado según un esquema clásico de la técnica de fabricación de semiconductores representado en la figura 2, y que como se puede observar incluye:

- fuente iónica y sistema de extracción de iones (1),
- separador de masas (2),
- sistema de aceleración de iones (3),
- sistema de formación y de barrido de haz iónico sobre un material a tratar (4),
- cámara de tratamiento con una mesa especial multicoordenada y móvil sobre la cual se colocan los objetos a tratar (5),
- sistema de vacío (6).

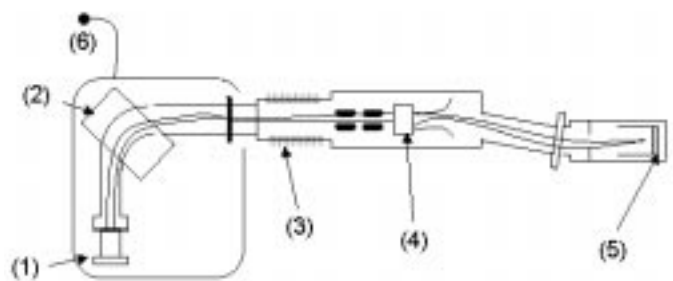


Figura 2. Esquema de un implantador para fabricación de semiconductores.

La dosis de iones implantados con la cual se manifiestan efectos en la superficie de los materiales es significativamente mayor que la requerida en la producción de semiconductores. Para garantizar productividad aceptable de los equipos industriales se utilizan fuentes iónicas que logren valores grandes de corriente de iones y que tengan la posibilidad de generar iones de metales, gases simples y complejos. En el implantador Danfysik 1090-200 se utiliza una fuente iónica plásmica Chordis 920 con la corriente de salida 4×10^{-2} A. La fuente se adiciona con un sistema de chisporroteo para metales refractarios. Tal fuente permite alcanzar una corriente en haz mayor que



5×10^{-3} A para N^+ y Ar y 2×10^{-3} A para Ti^+ , Y^+ , Ni^+ . El sistema de separación de masas garantiza resolución en masas $M/DM = 200$, que permite manejar la composición isotópica del haz. Después de la separación los iones unicargados se aceleran hasta 2×10^5 eV y se barre en dos coordenadas X-Y sobre la superficie plana de dimensión 0,40 m x 0,40 m. La potencia media consumida es de $6,0 \times 10^4$ W aproximadamente. El área ocupada por el equipo es 48 m^2 , la altura máxima del equipo es 3 m. La cámara de tratamiento donde se ubica la mesa de manipulación es de $0,6 \times 0,6 \times 0,7 \text{ m}^3$. La mayoría de las piezas industriales a tratar tienen configuraciones complejas no planas que obliga a utilizar sistemas de rotación y traslación para tratamiento uniforme de las piezas por todos lados. Sin embargo es preferible garantizar el ángulo de incidencia de iones normal ya que una desviación de 30° respecto a la normal produce disminución de la dosis implantada en 1,2 a 2 veces. En algunos casos esto no es aceptable, no solo debido a la caída en la productividad del tratamiento sino a la pérdida de calidad, especialmente para detalles que funcionan en condiciones de carga. Para resolver este problema se diseñaron sistemas de manipulación complejos y costosos, ya que debían funcionar en ultra alto vacío (UHV). Además estos sistemas debían garantizar enfriamiento de los materiales que se calientan bajo el haz iónico. El sistema de manipulación de muestras es una parte de todos los equipos de implantación fabricados a partir de los haces iónicos.

Otros dispositivos de implantación iónica industrial que se han construido según el esquema clásico son: el equipo KAX-1000 de la empresa ULVAC (Japan) que produce una corriente iónica 5×10^{-3} A con una energía de $7,0 \times 10^4$ eV y el equipo ManTech de la empresa Spire (USA) que fue desarrollado con base en el implantador comercial para semiconductores de la empresa Eaton (USA).

Los estudios de las propiedades de materiales implantados con haces iónicos demostraron que no

hay restricciones rígidas sobre composición (especialmente isotópica). Esto permitió obviar los sistemas de separación de masas en equipos especializados, produciendo un aumento en la productividad y disminución significativa en el costo de equipos. Algunos cambios en el esquema clásico fueron hechos por las empresas Leybold AG (Alemania) en los equipos LION6000 y Zymer Inc. (USA) modelo Z-100. El implantador LION6000 tiene en su composición una fuente de radiofrecuencias que funciona en condiciones de resonancia ciclotrónica electrónica a una presión de 10^{-2} Pa (Korber and Munz, 1989). Debido al alto grado de ionización del gas de trabajo se logra generar una densidad de la corriente iónica de 20 A/m^2 . El voltaje de aceleración puede alcanzar $1,5 \times 10^5$ V y la corriente iónica $4,0 \times 10^{-3}$ A. En el diseño Z-100 los especialistas no prescindieron del sistema de barrido (scanning bidimensional) pero aplicaron esfuerzos máximos para simplificar el manejo y explotación del equipo, es decir buscaron garantizar manejo del equipo por un personal no muy calificado (Denholm and Wittkower, 1985). Esta propiedad junto con las posibilidades técnicas provocó una difusión amplia del implantador.

Las ideas y éxitos tecnológicos que ocurrieron en el proceso de creación de motores de propulsión de apertura ancha para aparatos cósmicos dio origen a la generación siguiente de equipos para tratamiento iónico de materiales, estos resultaron ser más económicos y más simples en servicio, sin sistemas de separación de masas y de barrido. Como ejemplo de este tipo de equipo vale la pena mencionar un implantador diseñado en Colorado State University en la base de un motor de propulsión iónico creado en la NASA (Destefani, 1988). Este sistema garantiza una corriente hasta 5×10^{-2} A con energía de 8×10^4 eV. El implantador del Centro Tecnológico DIANA-2 de Tomsk (Rusia) pertenece al tipo mencionado arriba y tiene parámetros que prácticamente coinciden con el equipo de la Colorado State University.

Al estudiar el historial del desarrollo de equipos para



la implantación iónica de materiales es posible distinguir dos tendencias: simplificación del esquema funcional (a cuenta de renuncia del sistema de separación de iones y de barrido) y disminución de energía de iones implantados con aumento simultáneo de densidad de la corriente iónica, que produce un crecimiento en la productividad del equipo. Por ejemplo, un implantador inicial de la empresa Nissan Electric generaba iones con energía de 1×10^6 eV, pero ahora el rango más usado es $3 \times 10^4 - 8 \times 10^4$ eV. Esto teniendo también en cuenta los procesos combinados que se observan bajo haces iónicos de alta energía. Entre estos procesos los más conocidos son:

- mixing, es decir mezclado de materiales de base y de la capa chisporroteada,
- penning, que consiste en el proceso de incrustar un recubrimiento en el material de base, utilizando iones pesados de alta energía, para aumentar la adherencia.

A pesar de que la tecnología de tratamiento por haces alcanzó un grado alto de perfeccionamiento y de seguridad presentaba una desventaja esencial – el tratamiento en línea recta (line of sight). La utilización de sistemas complejos de manipulación de las piezas a tratar resolvía solamente parcialmente este problema, ya que no permitía procesar con la misma calidad todas las partes de una pieza de forma compleja. Adicionalmente los sistemas de manipulación debían funcionar en ultra alto vacío aumentando significativamente el costo de todo el equipo.

En resumen un equipo para tratamiento de materiales por haces iónicos requería:

- una cámara de vacío con la presión residual en el nivel de 10^{-2} Pa donde se pudiera colocar una mesa móvil de tres coordenadas con un sistema de enfriamiento por agua. La mesa debía permitir la ubicación de las muestras;
- una fuente de iones con un sistema de aceleración de haz iónico hasta $3 \times 10^4 - 8 \times 10^4$ eV y densidad promedio de corriente en la superficie de la muestra de 0,1- 1,0 A/m².

El tratamiento puede considerarse de alta calidad si el equipo garantiza:

- la monoenergicidad de los iones del haz,
- la incidencia normal de los iones sobre la superficie a tratar,
- la posibilidad de control y manejo de la temperatura de la muestra, incluso sostenimiento en un nivel significativamente menor al valor de las temperaturas características de estabilidad de los materiales a tratar (100-200°C),
- la formación de haces iónicos tanto de gases como metales,
- una velocidad de tratamiento aceptable (rapidez de alcance de dosis de 2×10^{21} iones/m² en un nivel no menor a $2 \times 10^5 - 3 \times 10^5$ s/m²).

Un método completamente diferente al esquema clásico lo propuso J. K. Conrad (Universidad de Wisconsin, Madison, USA) (Conrad, 1988). El método se denomina -Plasma Source Ion Implantation- (PSII). En este método una pieza a tratar se coloca en la cámara de vacío conectada a tierra. Con una fuente adicional (RF o DC) se forma el plasma de una densidad de $10^{13} - 10^{14}$ m⁻³ y después entre la pieza (cátodo) y las paredes de la cámara (ánodo) se aplica un pulso de alto voltaje (decenas de kilo-Voltios). Alrededor de la pieza se forma una capa plásmica donde los iones del gas de trabajo se aceleran hasta energías de implantación. Los iones acelerados bombardean la superficie a tratar bajo ángulos cercanos a la normal y penetran efectiva y simultáneamente en la pieza por todos los lados eliminando la necesidad de manipulación. En este equipo no se encuentra la mesa de manipulación, y pasa a un primer plano el problema de garantizar una efectividad aceptable con el cumplimiento de las exigencias de tratamiento de calidad.

Los métodos plásmicos de tratamiento superficial en los cuales la pieza a tratar sirve como cátodo no son nuevos y se utilizan ampliamente en tecnologías industriales (Conrads and Schmidt, 2000). Entre ellos se puede mencionar:

- limpieza en la capa catódica de descarga



luminiscente y chisporroteo (sputtering) catódico a bajos voltajes en el rango 0,1-3 kV,

- tratamiento físico-químico de materiales de construcción en medios activos (0,3-1,0 kV) (Von Grun, 1987),
- chisporroteo en vacío (magnetron) bajo el voltaje de 0,05-2 kV (Munz, 1991).

Como base de todos los métodos de tratamiento superficial vía plasma se encuentran las descargas de bajo voltaje, más conocidas como descargas luminescentes (Chapman, 1980). La diferencia principal del proceso de implantación vía plasma con los métodos mencionados está en la necesidad de crear un flujo iónico, hacia un objeto, con energías de algunas decenas – centenas de kilo-electrón-voltios. Esta exigencia cambia la situación cualitativamente. Es claro que se requiere generar una descarga de alto voltaje.

La tecnología PSII (Plasma Source Ion Implantation) se realiza con un tipo de descarga de alto voltaje que fue descubierto y estudiado con anterioridad (Alexeff, et al, 1969; Widner, et al, 1970; Widner, et al, 1971). En esta tecnología primero se enciende un plasma de baja densidad por una fuente independiente (fuente con un cátodo calentado, descarga de radiofrecuencias) bajo la presión del gas de trabajo (nitrógeno, helio, hidrógeno, argón o metano) de $1,3 \times 10^{-3}$ Pa hasta $1,3 \times 10^{-1}$ Pa. Sobre esta descarga se aplica un pulso de alto voltaje (hasta 1×10^5 V) con duración de 1×10^{-5} – 3×10^{-5} s, y frecuencia de repetición de 100 Hz que garantiza una corriente media de 2×10^{-3} A.

Un interés industrial en el método PSII obligó, a finales de los años 80, a iniciar tales desarrollos a grandes universidades, centros científicos y laboratorios industriales como: ASTeX, University of Tennessee, General Motors Research Laboratory, Hughes Research Laboratory, Varian Associates Inc. entre otros (Conrad, 1989). Pero hasta la fecha los implantadores tipo PSII no han encontrado todavía una aplicación amplia, en

la industria metalmecánica, ya que se han encontrado una serie de dificultades significativas.

Al aplicar un pulso de alto voltaje sobre un plasma de baja densidad, previamente generado, se presenta un desplazamiento de iones extraídos de zonas cercanas al objeto - cátodo. A medida que disminuye la población de iones de estas capas se observa un desplazamiento de la frontera de la región de escasa carga espacial positiva alejándose más y más del cátodo. Una representación de este fenómeno se puede observar en la figura 3. La envoltura plásmica que abarca el objeto a tratar se desplaza durante el pulso de descarga. Su grosor original (a) se determina por la densidad del plasma, la geometría de la pieza a tratar y el potencial aplicado (Conrad, 1987; Scheuer, et al, 1991; Tian, et al, 1999; Valentini, 2000; Berkusunova and Demokan, 2001). La expansión siguiente (b), (c) y (d) depende de la temperatura del plasma y de las masas de los iones. Por ejemplo, en el proceso de implantación de iones de nitrógeno en un cilindro del radio de 1 cm bajo el potencial de 1×10^5 V la envoltura inicial es de 4×10^{-2} m y se expande con la velocidad iónico-acústica $2,5 \times 10^4$ m/s. Luego la duración de un pulso debe ser lo bastante pequeña para que la envoltura expandida no entre en contacto ni con las paredes de la cámara ni con envolturas de los objetos próximos cuando se implantan simultáneamente varias piezas.

Figura 3. Representación de la expansión de la cobertura en PSII



En la figura 4 se presentan los pulsos de corriente y de voltaje típicos del método PSII (Shamin, et al, 1991a; Shamin, Conrad, et al, 1991b). El comportamiento de la corriente de descarga, que ha sido motivo de muchos estudios tanto experimentales como teóricos (Conrad, 1987; Lieberman, 1989; Madapura, et al, 1989; Qiu, et al, 1990; Qiu, et al, 1991; Emmert, et al, 1992; Tang, et al, 1993; Shamin, et al, 1995; Hong and Emmert, 1995; Rej, et al, 1997; Zeng, et al, 1998; Bektursunova and Demokan, 2001), se caracteriza por una caída prácticamente exponencial en la parte derecha del máximo que confirma el fenómeno de movimiento de la envoltura. La duración y la dinámica de la frontera del pulso de la corriente son consistentes con el comportamiento del pulso de voltaje.

Figura 4. Pulsos de voltaje y corriente típicos de PSII

El voltaje aplicado al cátodo permanece constante durante aproximadamente $7 \mu s$, durante el tiempo restante cae. El tiempo relativamente pequeño de mantenimiento del voltaje en un nivel constante en comparación con el tiempo de formación de la frontera delantera y el tiempo de caída de pulso hace que el flujo iónico que incide sobre el objeto (durante un tiempo significativo no menor que 50% de la duración del pulso) tenga un espectro significativamente no monoenergético. Este fenómeno se confirma por la distribución de los iones implantados dentro del material tratado (Conrad, 1989). Esto se encuentra

en contradicción con una de las exigencias principales para el tratamiento de calidad. Además de un espectro energético amplio de iones se puede producir un chisporroteo significativo de la superficie, incluso de capas ya implantadas, lo que a su turno puede tener como consecuencia la disminución de la dosis realmente alcanzable.

Entre otros elementos específicos de equipos PSII vale la pena mencionar un sistema de imanes permanentes que se utilizan para aumentar el confinamiento de los electrones en el volumen plásmico. Esto sin duda requiere de una construcción compleja que aumenta el costo del equipo.

La tecnología de implantación iónica por inmersión (Plasma Immersion Ion Implantation, PIII) (Qin, et al, 1992; Matossian, et al, 1997; Liu, et al, 1998a) se desarrolló con el propósito de solucionar dos problemas del PSII. En primer lugar, el relacionado con las dificultades de conmutación de las fuentes generadoras del plasma inicial y del pulso acelerador de los iones hacia la muestra (cátodo). El segundo, minimizar el efecto de desplazamiento de la cobertura. Para lograr estos propósitos se agrega al esquema del PSII un tercer electrodo donde se ubica la muestra a tratar y se alimenta con el pulso de alto voltaje que atrae los iones hacia él, independizándolo de los electrodos que generan el plasma inicial (Liu, et al, 1998b; Liu, et al, 1998c; Chu and Cheung, 1998; Mandl, et al, 1998; Tang, et al, 1998). Esta modificación solucionó el problema de la alimentación, pero no el del desplazamiento de la envoltura, ya que la técnica PIII sigue presentando los mismos inconvenientes que la PSII (Lieberman and Lichtenberg, 1994; Tian, et al, 1999; Berni, et al, 2000; Husein, et al, 2000).

En resumen, se pueden enumerar como principales desventajas de las técnicas PSII y PIII fundamentadas en las descargas de alto voltaje con envoltura móvil:

- los ángulos de incidencia de los iones sobre la superficie de un objeto pueden ser diferentes del



normal que conduce a la no-homogeneidad de tratamiento del objeto,

- el espectro energético de los iones no es controlable y no es monoenergético.

Una solución al problema de control del espectro energético de los iones y de garantía de la calidad del proceso se obtendría al conservar la idea del tratamiento por flujos iónicos desde la frontera plásmica de la capa catódica (la idea de PSII) pero con la capa catódica de la descarga de alto voltaje inmóvil y de grosor pequeño. La solución a este problema fue hallada por Kvesyuk y Tsygankov mediante el desarrollo de una nueva tecnología denominada Implantación Iónica Tridimensional 3DII (Khvesyuk and Tsygankov, 1997). El método 3DII se fundamenta en la descarga de alto voltaje y baja presión que se enciende en la rama izquierda de la curva de Paschen. Los pioneros en el estudio de este tipo de descarga fueron Klarfeld y Pokrovskaya-Soboleva (Pokrovskaya-Soboleva and Klarfeld, 1957). El conocimiento moderno sobre los procesos físicos que tienen lugar en descargas en la rama izquierda de la curva de Paschen es discutido por McClure (McClure, 1961). Las propiedades específicas de este tipo de descarga son las siguientes:

- la descarga se enciende y se mantiene bajo la diferencia de potencial entre los electrodos en el rango desde decenas hasta centenas kilo-electrón-voltios,
- la descarga es auto sostenida es decir no necesita de un plasma de soporte,
- el voltaje de mantenimiento de la descarga coincide con el voltaje de encendido,
- la descarga tiene estructura estacionaria durante todo el periodo después de su formación (periodo de mantenimiento de la descarga) con una capa catódica de grosor pequeño donde cae prácticamente todo el voltaje aplicado. Esta capa adquiere la forma del cátodo (un objeto metálico).

Inicialmente estas descargas se utilizaron como conmutadores en equipos que necesitan transmisión de grandes corrientes (hasta 1×10^4 A) a altos voltajes

(hasta 1×10^5 V). Sin embargo son más conocidas sus aplicaciones como base de fuentes de electrones de alta energía. La tecnología 3DII aprovecha las propiedades específicas de la descarga en la rama izquierda de la curva de Paschen con el propósito de implantar iones en metales, semiconductores y cerámicas. El primer estudio de la descarga y los primeros experimentos sobre implantación de iones realizados por el método 3DII demostraron una ventaja significativa de esta tecnología frente a la tecnología PSII (Khvesyuk and Tsygankov, 1997). El parámetro más importante a tener en cuenta en las tecnologías de implantación es el grado de monoenergicidad de iones. En la figura 5 se dan los perfiles de distribución de iones de nitrógeno por profundidad en un blanco de Silicio obtenidos por ambos métodos. Al observar dichos perfiles se puede concluir que la distribución obtenida en el equipo 3DII corresponde mejor a las exigencias de la tecnología de implantación de iones.

Figura 5. Perfiles Auger de implantación de N_2^+ en silicio para 3DII (arriba) y PSII (abajo)



En la actualidad solo existe un equipo construido en concordancia con la tecnología 3DII, este es el JÚPITER del Laboratorio de Física del Plasma y Corrosión de la Universidad Industrial de Santander. A pesar de que el JÚPITER esta basado en el equipo antecesor de laboratorio 3DII (que ya no existe) difiere significativamente de su prototipo, especialmente en la parte electrónica y parámetros del generador de alto voltaje. Además por su productividad (velocidad de aumento de dosis) y sus dimensiones es un equipo que se puede considerar como semi-industrial.

El dispositivo JUPITER que se fundamenta en las descargas pulsadas de alto voltaje a bajas presiones, posee los parámetros de pulso: duración hasta $2,5 \times 10^{-3}$ s, frecuencia de repetición hasta 60 Hz y voltaje hasta 6×10^4 V. Con los anteriores parámetros se garantiza la implantación de iones cuasi monoenergéticos con un ángulo de incidencia normal a la superficie de los materiales a tratar; además se consiguen altas dosis de átomos implantados en cortos tiempos de tratamiento, dichas dosis son suficientes para mejorar propiedades tribológicas de aceros al carbón tales como: aumento de la resistencia a la corrosión, disminución de la permeación de hidrógeno, etc.

A partir de los resultados experimentales obtenidos y la experiencia de manejo se puede afirmar que el equipo JUPITER por su productividad, monoenergicidad de iones, ángulo de incidencia, simplicidad en manejo, servicio de los sistemas del equipo, y seguridad, es más eficiente que los equipos existentes y reportados hasta la fecha (Dougar, et al, 2002). Este equipo se puede utilizar para el mejoramiento de piezas que funcionan en condiciones severas; por ejemplo sierras que cortan madera sin enfriamiento, etc.

En la figura 6 se presenta un esquema comparativo donde se puede observar el desarrollo de las técnicas de implantación: se inicia con la implantación por haces iónicos (IBI), que requieren montajes complejos y sistemas de ultra alto vacío (UHV). Se pasa por las

técnicas tradicionales de implantación con base en la tecnología de los plasmas (PSII y PIII), que trabajan en un régimen de bajo vacío (LV) y que utilizan una combinación de fuentes DC o RF, para generar un plasma previo, y fuentes pulsadas de alto voltaje (HVP) con pulsos de muy corta duración (del orden de μ s), para atraer los iones hacia las superficies a tratar. Finalmente se llega a la tecnología de Implantación Iónica Tridimensional (3DII), que trabaja en un régimen de alto vacío (HV) y que utiliza descargas pulsadas de alto voltaje (HVP) con pulsos rectangulares de duración hasta 2,5 ms, los cuales realizan simultáneamente las dos funciones requeridas para una implantación iónica eficiente, es decir generan un plasma de alta densidad y atraen los iones hacia la superficie de las muestras que funcionan como cátodo, sin que se presente movilidad de la capa catódica.

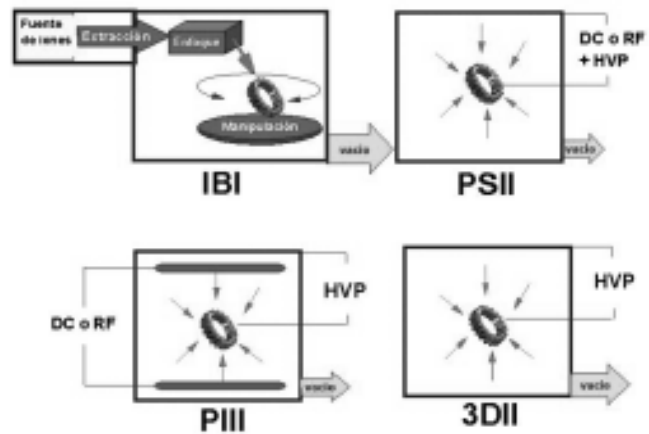


Figura 6. Evolución de las técnicas de implantación iónica.

CONCLUSIONES

El desarrollo de las técnicas de implantación iónica se ha dado fundamentalmente por dos razones; la primera, la necesidad de producir materiales semiconductores; la segunda, la búsqueda de técnicas de tratamiento superficial de materiales metálicos. En esta última han sido importantes los aportes de la tecnología del plasma.



La implantación iónica tridimensional (Three Dimensional Ion Implantation 3DII) permite adecuar, sin mayores costos, sistemas de implantación tradicionales aumentando significativamente la capacidad de funcionamiento de los equipos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alexeff I., Jones W.D., et al, *Transient plasma sheath-discovered by ion-acoustic waves*, The Physics of Fluids, 12, No.2, (1969) 345-346
- Berkusunova R.M., Demokan O., *Perturbation analysis of sheath evolution, with application to plasma source ion implantation*, J. Phys. D : Appl. Phys., 34, (2001) 326-329
- Berni L.A., Ueda M., Gomes G.F., et al, *Experimental results of a DC glow discharge source with controlled plasma floating for plasma immersion ion implantation*, J. Phys. D : Appl. Phys., 33, (2000) 1592-1595
- Conrad J.R., *Sheath thickness and potential profiles of ion-matrix sheaths for cylindrical and spherical electrodes*, J. Appl. Phys., 62, (1987) 777-779
- Conrad J.R., *Plasma Source Ion Implantation: A Approach to Ion Beam Modification of Materials*, Materials Science and Engineering, A116, (1989) 197-203
- Conrad J.R., Radtke J.L., Dodd R.A., et al, *Plasma source ion-implantation technique for surface modification of materials*, J. Appl. Phys., 62, (1987) 4591-4596
- Conrad J.R., U.S. patent No. 4764394.-Date of patent 16/08/1988
- Conrads H., Schmidt M., *Plasma generation and plasma sources*, Plasma Sources Sci. Technol., 9, (2000) 441-454
- Chapman B., *Glow Discharge Processes*, John Wiley, New York, (1980) 406p
- Chu P.K., Cheung N.W., *Microcavity engineering by plasma immersion ion implantation*, Materials Chemistry and Physics, 57, (1998) 1-16
- Denholm A.S., Wittkower A.B., *Ion beam system for implanting industrial products of various shapes*, Nuclear Instr. And Methods in Phys. Research, B6, (1985) 88-93
- Destefani J.D., *Ion implantation update*, Advan. Mater. and Processes in Metal Progress, 10, (1988) 39-43
- Dougar V.D., Dulce H.J., Tsygankov P.A., *High voltage pulse discharge for ion treatment of metals*, Rev. Sci. Instrum., 73, (2002) 828-830
- Emmert G.A., Henry M.A., *Numerical simulation of plasma sheath expansion, with applications to plasma-source ion implantation*, J. Appl. Phys., 71, (1992) 113-117
- Hong M., Emmert G.A., *Two-dimensional fluid simulation of expanding plasma sheaths*, J. Appl. Phys., 78, (1995) 6967-6973
- Husein I.F., Chan C., et al, *The effect of high-dose nitrogen plasma immersion ion implantation on silicone surfaces*, J. Phys. D: Appl. Phys., 33, (22), (2000) 2869-2874
- Khvesyuk V.I., Tsygankov P.A., *The use of high-voltage discharge at low pressure for 3D in implantation*, Surface and Coating Technol., 96, (1997) 68-74
- Korber F.J., Munz W.D., *A new developed linear ion implanter for industrial applications*, Mat. Science and Eng., A116, (1989) 205-209
- Lieberman M.A., *The model of transient plasma sheath*, J. Appl. Phys., 66, (1989) 2926-2931



Lieberman M.A., Lichtenberg A.J., *Principles of plasmas discharges and materials processing*, John Wiley & Sons Inc., New York, (1994) 572p

Liu A.G., Wang X., et al, *Inner surface ion implantation using deflecting electric field*, Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res., B 143, (1998a) 306-310

Liu A.G., Wang X.F., Tang B.Y., Chu P.K., *Dose and energy uniformity over inner surface in plasma immersion ion implantation*, J. Appl. Phys., 84, (1998b) 1859-1862

Liu A.G., Wang X., et al, *A novel distributed system for plasma immersion ion implanter control and automation*, Rev. Sci. Instrum., 69, (1998c) 1495-1498

Madapura M., Conrad J.R., et al, *Surface modification of monel K-500 by the plasma source ion implantation process*, Surface Coating Technol., 39/40, (1989) 587-594

Mandl S., Gunzel R., Moller W., *Sheat and presheat dynamics in plasma immersion ion implantation*, J. Phys. D: Appl. Phys., 31, (1998) 1109-1117

Matossian J.N., Wei R., Williams J.D., *Plasma-based ion implantation and electron-bombardment for large-scale surface modification of materials*, Surface Coating Technol., 96, (1997) 58-67

McClure G.W., *High-Voltage Glow Discharges in D₂ Gas. I. Diagnostic Measurements*, Phys. Rev., 124, (1961) 969-982

Molera Solá P., *Tratamientos térmicos de los metales*. Marcombo, Barcelona, (1991) 84

Munz W.D., *The unbalanced magnetron: current status of development*, Surface Coating Techol., 48, (1991) 81-94

Pokrovskaya-Soboleva A.S. and Klarfeld B.N., Russian J. Appl. Phys., 32, (1957) 993-1000

Qin S., Chan C., McGruer N.E., *Energy distribution of boron ions during plasma immersion ion implantation*, Plasma Source Sci. Technol., 1, (1992) 1-6

Qiu X., Conrad J.R., et al, *Plasma Source Nitrogen Ion Implantation of Ti-6Al-4V*, Metallurgical Transactions A, 21A, (1990) 1663-1667

Qiu X., Conrad J.R., et al, *Microstructural study of nitrogen-implanted Ti-6Al-4V alloy*, Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Research, B59/60, (1991) 951-956

Rej D.J., Faehl R.J., Matossian J.N., *Key issues in plasma-source ion implantation*, Surface Coatings Techn., 96, (1997) 45-51

Scheuer J.T., Shamin M.M., Conrad J.R., et al., *Model of plasma source ion implantation in planar, cylindrical, and spherical geometries*, J. Appl. Phys., 67, (1990) 1241-1245

Shamin M.M., Muller D.E., Conrad J.R., et al, *Distribution of incident ions and retained dose analysis for a wedge Shaped target in plasma source ion implantation*, J. Appl. Phys., 77, (1995) 1-5

Shamin M.M., Scheuer J.T., Conrad J.R., *Measurements of spatial and temporal sheath evolution for spherical and cylindrical geometries in plasma source ion implantation*, J. Appl. Phys., 69, (1991a) 2904-2908

Shamin M.M., Scheuer J.T., Conrad J.R., et al., *Measurement of electron emission due to energetic ion bombardment in plasma source ion implantation*, J. Appl. Phys., 70, (1991b) 4756-4759

Sharkeev Y.P., Kozlov E.V., Didenko A.N., *Defect structures in metals exposed to irradiation of different nature*, Surface Coating Tech., 96, (1997) 95-102



Streade C.A., *Practical applications of ion implantation for tribological modification of surfaces*, *Wear.*, 130, (1989) 113-122

Tang B.Y., Fetherston R.P., et al, *Measurement of ion species ratio in the plasma source ion implantation process*, *J. Appl. Phys.*, 73, (1993) 4176-4180

Tang B.Y., Chu P.K., Wang S.Y., et al., *Methane and nitrogen plasma immersion ion implantation of titanium metal*, *Surface Coating Technol.*, 103, (1998) 248-251

Tian X., Tang B., Chu P.K., *Accurate determination of pulsed current waveform in plasma immersion ion implantation processes*, *J. Appl. Phys.*, 86, (1999) 3567-3570

Tian X.B., Chu P.K., *Experimental investigation of the electrical characteristics and initiation dynamics of pulsed high-voltage glow discharge*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 34, (2001) 354-359

Valentini H.B., *Sheath formation in low-pressure discharges*, *Plasma Sources Sci. Technol*, 9, (2000) 74-582

Von Grun R., *Anlagen zum Plasmanitrieren und Plasmacarburierten*, *Elektrowarme International*, B.3-4 (45), (1987) 178-182

Widner M., Alexeff I., Andrews J.G, et al, *Sheath growth in a low pressure plasma*, *The Physics of Fluids*, 14, (1971) 339-343

Widner M., Alexeff I., Jones W.D., et al, *Ion acoustic wave excitation and ion sheath evolution*, *The Physics of Fluids*, 13, (1970) 2532-2540

Zeng X.C., Kwok T.K., et al, *Cylindrical bore using auxiliary electrode*, *J. Appl. Phys.*, 83, (1998) 44-47

Ziegler J.F., Biersack J.P., and U.Littmark, *The stopping and range of ions in solids*, Pergamon Press, New York, (1985) 367p

Ziegler J.F., *Handbook of Ion Implantation Technology*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, (1992) 699p