



INAOE

Micromaquinado de silicio monocristalino mediante grabado seco

Por

Fis. Carlos Álvarez Macías

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el
grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN LA
ESPECIALIDAD DE ELECTRÓNICA**

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica.**

Febrero 2007

Tonantzintla, Puebla.

Supervisada por:

Dra. Claudia Reyes Betanzo

©INAOE 2007

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir
y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en
partes.



Agradecimientos:

Agradezco a Dios por rodearme de personas que me apoyan y han logrado cambios positivos en mi vida, por permitirme lograr una meta más y sentirme orgulloso de mí.

A mi familia por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas. Por todo su amor, mil gracias.

A mi asesora y directora de tesis, Dra. Claudia Reyes Betanzo por su paciencia, apoyo y comprensión durante la realización de la presente tesis.

A los doctores: Alfonso Torres Jácome, Wilfrido Calleja y Carlos Zúñiga por la valiosa aportación en la escritura de este trabajo.

A mis compañeros y amigos: Aldo Peña, Gabriel Mesner, Estrella Aguirre, Alfonso Torres R., etc. por su amistad y su apoyo moral.

Agradezco al INAOE por permitirme formar parte de tan reconocida institución y a todo el personal que en él labora.

Al laboratorio de microelectrónica y personal técnico por la utilización de las instalaciones, equipo y por todas las facilidades otorgadas para la realización de los experimentos.

Al CONACYT por el apoyo económico brindado a través de la beca de Maestría durante mi estancia en el INAOE.

Dedicatoria:

Dedico este trabajo a mi esposa Raquel Muñoz Ramos y a mi hijo Carlos Natanael Álvarez Muñoz, por ser mi inspiración para seguir luchando y hacer que valga la pena todo esfuerzo y empeño a seguir adelante, ya que ellos hacen posible que mi vida tenga sentido.

Índice

Índice.....	I
Resumen	1
Introducción.....	2
Objetivo general	3
Objetivos específicos.....	3
 CAPITULO 1	 4
Grabado	4
1.1. Requisitos de grabado.....	5
1.2. Grabado húmedo.	8
1.2.1. Soluciones grabantes para grabado húmedo.....	8
1.2.2. Efectos de la temperatura, agitación y concentración de la solución	10
1.2.3. Tipos de enmascarante para grabado húmedo.....	10
1.3. Grabado seco.	11
1.3.1. Plasma.....	11
1.3.2. Mecanismos de grabado.	14
1.3.2.1. Grabado físico.	15
1.3.2.2. Grabado químico.	17
1.3.3. Presión y flujo de gas.	19
1.3.4. Frecuencias RF	21
1.3.4.1. Red de acoplamiento (<i>Matching Network</i>).....	23
1.3.5. Sistemas de grabado y tipo de reactores.....	24
1.3.5.1. Acoplamiento capacitivo	26
1.3.5.2. Acoplamiento inductivo.	28
1.3.6. Gases reactivos para grabado seco.	29
1.3.6.1. Mezclas de gases reactivos.....	30
1.3.7. Películas inhibidoras de bordes.	32
1.3.8. La temperatura y el grabado seco.....	32
1.3.8.1. Grabado criogénico.....	34

CAPITULO 2	35
Metodología experimental.....	35
2.1. Diseño del <i>lay-out</i>	35
2.2. Fabricación de la mascarilla.	36
2.3. Preparación de muestras: limpieza y litografía.....	37
2.4. Sistema RIE/ICP.....	41
2.4.1. Sistema en modo capacitivo, RIE.....	43
2.4.2. Sistema en modo inductivo, ICP.	43
2.4.3. Sistema criogénico.....	44
2.4.4. Medidores de presión y controladores de flujo de masa.	44
2.5. Parámetros del plasma.	46
2.6. Medición de la velocidad de grabado e inspección de la anisotropía.....	48
CAPITULO 3	49
Resultados y discusión	49
3.1. Análisis para determinar la máxima velocidad de grabado.....	49
3.1.1. Caracterización de grabado en función de la presión.....	50
3.1.2. Polarización de la muestra y distancia al plasma denso.	51
3.2. Caracterización de la anisotropía.....	53
3.2.1. Resultados con enmascarante de fotoresina.	53
3.2.2. Análisis de resultados mediante tipo de plasma.	55
3.2.2.1. Resultados de grabados con plasma de SF ₆	55
3.2.2.2. Resultados de grabados con plasma de SF ₆ /Ar.	59
3.2.2.3. Resultados de grabados con plasma de SF ₆ /O ₂	62
3.2.2.4. Resultados de grabados con plasma de SF ₆ /CHF ₃	67
3.2.2.5. Resultados de grabados con plasma de SF ₆ /CHF ₃ /O ₂	68
3.2.2.6. Resultados de grabados con plasma de SF ₆ /Ar/CHF ₃ /O ₂	69
3.2.2.7. Resultados de grabados con plasma de SF ₆ /CF ₄	71
3.3. Proceso químico BOSCH.....	74
CAPITULO 4	82
Conclusiones y Trabajos futuros	82
4.1. Conclusiones.....	82

4.1.1. Condiciones para la máxima velocidad de grabado.	82
4.1.2. Condiciones para obtener grabado anisotrópico.....	84
4.1.3. Proceso BOSCH.	86
4.1.4. Conclusiones Generales.....	87
4.2. Trabajos futuros.....	88
Referencias.....	89

Índice de figuras.

Capítulo 1.

Figura 1.1. Secuencia de fabricación de CIs.	4
Figura 1.2. a) Grabado selectivo. b) Grabado no selectivo.	6
Figura 1.3. Esquema de direccionalidad.....	7
Figura 1.4. Proceso de grabado asistido por plasma.....	12
Figura 1.5. Mecanismos de grabado seco: a) físico, b) químico	14
Figura 1.6. Física del grabado anisotrópico: a) condición inicial, b) condición de estado estacionario, c) bombardeo perpendicular.....	16
Figura.1.7 Cinética del proceso de grabado químico selectivo	18
Figura 1.8. Mecanismos dominantes en el grabado seco en funcion la presión y energía de los iones incidentes	19
Figura1.9. Plasma en RF. A) aproximación de la distribución de potencial promedio de un sistema planar acoplado capacitivamente. B) distribución de potencial en el reactor: V_p = potencial del plasma, V_{DC} = voltaje de autopolarización, $(V_{RF})_{pp}$ = voltaje pico-pico aplicado por la fuente RF.	22
Figura 1.10. a) Circuito con red de acoplamiento, b) Típica red de acoplamiento <i>LC</i>	24
Figura 1.11. Sistema típico de grabado por plasma.....	25
Figura 1.12. Configuración de reactor de placas paralelas a) Modo <i>PE</i> , b) Modo <i>RIE</i>	27
Figura 1.13. Esquema de ICP con la bobina externa superior o rodeando a un tubo.....	28
Figura 1.14. Estados de la materia vs temperatura	33

Capítulo 2.

Figura 2.1. <i>Lay-out</i> utilizado para la elaboración de la mascarilla.....	36
Figura 2.2. Sistema RIE/ICP y sus elementos.....	42
Figura 2.3. Panel del controlador de presión MKS 651C.....	45
Figura 2.4. Lector CEP 947 y sensor de presión <i>PIRANI</i>	45
Figura 2.5. a) Controladores de flujo de masa MKS 2179 y b) lector MKS 1479.....	46

Capítulo 3.

Figura 3.1. Velocidad de grabado en función de la presión, enmascarante de Al y $h = 20$ cm.	50
Figura 3.2. Velocidad de grabado en función de la potencia RIE y distancia al plasma denso.....	52
Figura 3.3. Resultados de velocidad de grabado en diferentes plasmas empleando FR como material enmascarante.	54
Figura 3.4. Fotos de las estructuras mostrando la selectividad de la FR como enmascarante.	55
Figura 3.5. Resultados de la velocidad de grabado en plasmas de SF_6	56
Figura 3.6. Estructuras grabadas en plasmas de SF_6	57
Figura 3.7. Estructuras grabadas en plasmas de SF_6	58
Figura 3.8. Estructuras grabadas en plasmas de SF_6	58
Figura 3.9. Resultados de la velocidad de grabado en plasmas de SF_6/Ar	60
Figura 3.10. Estructuras grabadas en plasmas de SF_6/Ar	61
Figura 3.11. Estructuras grabadas en plasmas de SF_6/Ar	62
Figura 3.12. Resultados de la velocidad de grabado en plasma de SF_6/O_2	63
Figura 3.13. Estructuras grabadas en plasmas de SF_6/O_2 con mayor <i>dc bias</i>	64
Figura 3.14. Estructuras grabadas con tendencia anisotrópica en el plasma de SF_6/O_2	65
Figura 3.15. Estructuras con daño en la superficie del enmascarante de Al.	66
Figura 3.16. Estructuras grabadas en plasmas de SF_6/CHF_3	67
Figura 3.17. Experimentos de grabado en plasma de $SF_6/CHF_3/O_2$	68
Figura 3.18. Estructuras grabadas en plasmas de $SF_6/CHF_3/O_2$	69
Figura 3.19. Grabados en plasmas de $SF_6/CHF_3/O_2$	70
Figura 3.20. Experimentos de grabado en plasma de SF_6/CF_4	71
Figura 3.21. Estructuras grabadas en plasma de SF_6/CF_4	72
Figura 3.22. Estructuras grabadas a diferente razón de flujos.	73

Figura 3.23. Proceso Bosch: a) depósito de polímero, b) bombardeo de iones, c) grabado químico por radicales de flúor.	75
Figura 3.24. Velocidades de los resultados del proceso BOSCH.....	77
Figura 3.25. Proceso BOSCH a 3 min con CHF ₃ como gas polimerizante.....	78
Figura 3.26. Proceso BOSCH con CF ₄ y enmascarante de SiC.	78
Figura 3.27. BOSCH con CF ₄ como gas polimerizante y diferentes enmascarantes.	79
Figura 3.28. Proceso BOSCH a potencia mayor.	80
Figura 3.29. Proceso BOSCH a tiempos de 10 min.	81

Índice de tablas.

Capítulo 1.

Tabla 1.1. Soluciones para grabado húmedo isotrópico.....	9
Tabla 1.2. Rangos de vacío.....	20
Tabla 1.3. Configuraciones de sistemas de grabado seco.....	26
Tabla 1.4. Químicos para grabado.....	29

Capítulo 3.

Tabla 3.1. Grabados en plasma de SF ₆ /CHF ₃	67
Tabla 3.2. Experimentos de grabado en plasma de SF ₆ /Ar/CHF ₃ /O ₂	70
Tabla 3.3. Parámetros del proceso BOSCH	76

Capítulo 4.

Tabla 4.1. Resultados de las máximas velocidades obtenidas en cada plasma.	83
Tabla 4.2. Resultados de grabados anisotrópicos.	84
Tabla 4.3. Condiciones para grabado anisotrópico BOSCH.	86

Resumen

El silicio monocristalino, por sus propiedades mecánicas, es ampliamente usado en la fabricación de sistemas microelectromecánicos (MEMS – *Micro ElectroMechanical Systems*), los cuales requieren alta definición de estructura. Una vez que se conoce el método de grabado seco y cómo funciona, se observa que es la técnica idónea para la fabricación de dispositivos de tamaños micrométricos, ya que permite realizar la transferencia fiel de los patrones del enmascarante hacia el sustrato y obtener al mismo tiempo grandes profundidades de grabado en tiempos cortos.

Hasta ahora, en el laboratorio de microelectrónica del INAOE únicamente se utiliza la técnica de grabado húmedo para la fabricación de estos sistemas ^[1-3]. Con el equipo de grabado RIE/ICP (*Reactive Ion Etching/Inductively Coupled Plasma*), se tendrá la capacidad de fabricar estos microsistemas usando grabado seco o asistido por plasma en dos modos de operación: inductivo y capacitivo. El trabajo tiene como objetivo principal caracterizar la velocidad de grabado y paredes verticales variando los parámetros del proceso (potencia, presión, flujos, tipo y mezclas de gases), es decir, mediante la optimización del proceso de grabado se deben satisfacer los requerimientos para el micromaquinado de silicio monocristalino en volumen para aplicaciones en MEMS.

Para cumplir con el objetivo, durante el desarrollo experimental se emplearon cinco tipos de gases y sus mezclas, estos son: SF₆, Ar, CF₄, O₂ y CHF₃. Los rangos de presión se utilizaron entre 25 y 100 mtorr. La potencia se manejó entre 25 y 100 W para el modo RIE y entre 100 y 750 W para el modo ICP. Se utilizaron tres diferentes distancias entre la muestra y el emboinado del modo ICP. Los flujos de gases se mantuvieron en un rango de hasta 100 sccm. Los experimentos se realizaron a temperatura ambiente.

En los resultados se observó el efecto de los parámetros de proceso sobre la velocidad de grabado y el perfil de las estructuras grabadas. Se lograron velocidades de grabado isotrópico mayores a 13 µm/min, óptimas para aplicaciones en MEMS, con la mezcla SF₆/O₂. Para la obtención de un perfil anisotrópico se requiere del balance de las componentes física y química de grabado. La máxima velocidad de grabado anisotrópico fue de 3.22 µm/min, en plasmas de SF₆/O₂. Se recurrió al proceso de grabado BOSCH como otra alternativa para obtener perfiles anisotrópicos, obteniendo velocidades de hasta 2.7 µm/min.

Introducción

La reducción en tamaño de los dispositivos electrónicos ha llevado a la denominada tecnología de la microelectrónica. Esta tecnología consiste en el diseño y fabricación de circuitos formados por muchos componentes de tamaños extremadamente pequeños. A estos circuitos se les denomina circuitos integrados (CIs), donde el conjunto de componentes electrónicos se fabrican sobre un sustrato u oblea, que al seccionarla forma los llamados chips. Por otro lado, el descubrimiento y desarrollo de las propiedades electrónicas del Si, han hecho que este elemento sea ampliamente usado en dicha tecnología. Además, el silicio cristalino posee propiedades mecánicas importantes, como durabilidad y elasticidad ^[4], que hacen que este material sea atractivo para la elaboración de dispositivos micromecánicos ^[1-3].

La diversidad de procesos y productos de la microelectrónica es inmensa. Las aplicaciones de estos productos en la industria han hecho que se tenga un gran interés en el desarrollo de esta rama de la electrónica. Un circuito integrado forma parte de todo un sistema que se utiliza para un cierto funcionamiento en particular como son: computadoras, robots, aparatos electrónicos, etc. Sin embargo, la tendencia a seguir disminuyendo el tamaño de los chips ha hecho que las siguientes generaciones de dispositivos electrónicos utilicen microsistemas para mantenimiento, construcción e inspección de lugares en tamaños del orden de micras y de este modo poder tener un amplio número de aplicaciones tecnológicas. Como ejemplos de estos microsistemas se tienen: micro-cámaras, micro-reactores, micro-bombas, sensores de flujo y presión, micro-robots, etc. De este modo surge la fabricación de sistemas microelectromecánicos (MEMS), la cual consiste en fabricar dispositivos electrónicos que contienen sistemas mecánicos como: aceleradores, micro-engranes, micro-motores, etc.

La elaboración, tanto de CIs como de MEMS, requiere que en el proceso de fabricación se use una gran variedad de procesos que van desde la obtención de la oblea de silicio en forma cristalina hasta el depósito de capas metálicas para formar contactos y pistas de interconexión. Una de las etapas de fabricación más crítica, y de la cual se basa este trabajo, es el grabado. El grabado, junto con la fotolitografía, son los procesos mediante los cuales se transfieren los patrones diseñados, contenidos en la mascarilla, a la oblea. Existen dos tipos de grabado: el grabado húmedo, el cual se realiza mediante un baño de sustancias químicas, y el seco, que se realiza mediante el ataque de partículas neutras reactivas y cargadas dirigidas a la superficie de la oblea.

Objetivo general

Obtener altas velocidades de grabado junto con perfiles anisotrópicos en silicio monocristalino para su implementación en la fabricación de MEMS en volumen, mediante la caracterización de procesos de grabado seco en un sistema RIE/ICP, encontrando las condiciones apropiadas de potencia, presión, flujos, tipo y mezclas de gases.

Objetivos específicos

- A. Dar a conocer los mecanismos de grabado realizado por cada plasma utilizado, en torno a la velocidad y perfil de las estructuras.
- B. Dar una visión sencilla del proceso de grabado para así poder comprender y utilizar el sistema RIE/ICP con pleno conocimiento de su funcionamiento.
- C. Contribuir de manera particular con el avance tecnológico y científico del país, en el ámbito de la micro y nanotecnología.

Para poder cumplir con los objetivos descritos (general y específicos) se ha organizado este trabajo de la siguiente manera: En el capítulo 1 se explican los dos tipos de grabado que se utilizan en la fabricación de dispositivos. En el capítulo 2 se da la metodología que se llevó a cabo para la preparación de muestras, además se describe el sistema RIE/ICP y las partes que lo componen. Posteriormente, en el capítulo 3 se muestran los resultados y se discute la caracterización de los procesos. Finalmente, en el capítulo 4 se presentan las conclusiones a las que se llegó de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 1

Grabado

La fabricación de CIs consta de una secuencia de procesos que pueden repetirse en varias ocasiones hasta quedar terminado el circuito. Existen seis pasos principales en el proceso de fabricación y que se aplican de manera universal a todos los dispositivos semiconductores, estos son: oxidación, litografía, grabado, dopado, depósito y metalización. El orden de estos pasos es de acuerdo al dispositivo que se esté fabricando en ese momento. Estos pasos van seguidos de las operaciones de prueba, corte, alambrado y encapsulado ^[5]. Todas estas etapas están contenidas en la secuencia de la figura 1.1.

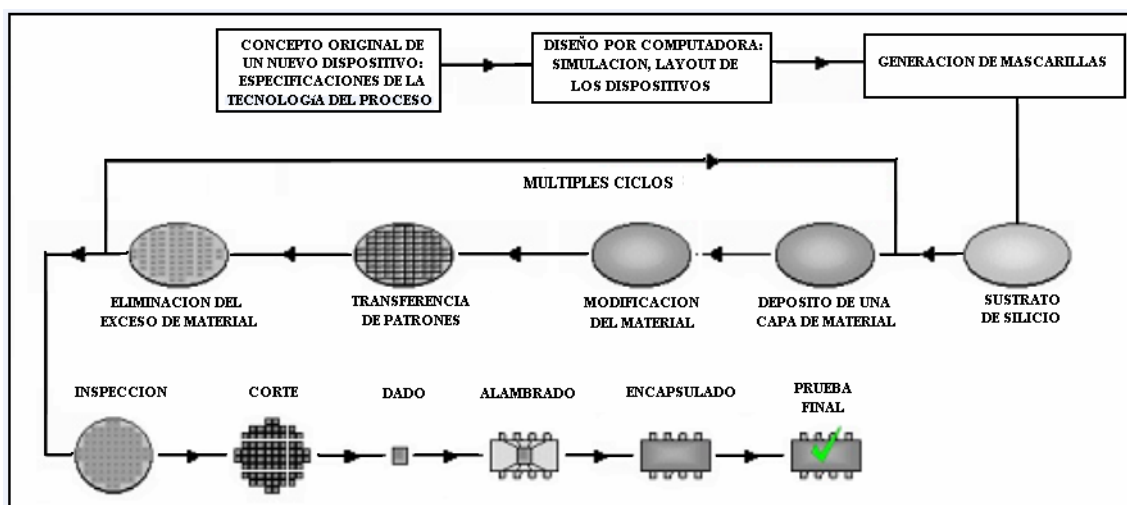


Figura 1.1. Secuencia de fabricación de CIs.

La transferencia de patrones hacia el sustrato se realiza mediante el grabado de las áreas no protegidas por el enmascarante. El proceso de grabado, en la fabricación de circuitos electrónicos, es el tema central de este trabajo y se enfoca al grabado de silicio monocristalino.

1.1. Requisitos de grabado.

En el proceso de transferencia de patrones geométricos, un patrón de fotoresina (FR) es definido por la etapa de litografía y sirve como enmascarante para el grabado del material del sustrato o de películas superiores, aunque en algunas ocasiones éstas últimas también suelen utilizarse como materiales enmascarantes. Para transferir un patrón geométrico hacia el material, es necesario eliminar o grabar parte de éste. Este proceso corresponde a grabar las áreas desprotegidas por el enmascarante y es de conformidad con los patrones contenidos en la mascarilla. Los materiales que son grabados en la fabricación de CIs pueden ser semiconductores, dieléctricos o metales. Existen diversos requisitos que son necesarios en el proceso de grabado y la optimización de ellos son tarea en técnicas modernas de grabado, algunos de estos requisitos son ^[5]:

- a) La selectividad, derivado de la química del proceso, es la razón entre la velocidad de grabado del material que se desea grabar y la velocidad de grabado del material subyacente o del enmascarante, y se define como:

$$S = \frac{R_1}{R_2} \quad (1.1)$$

donde: R_1 es la velocidad de grabado del material que se desea grabar y R_2 es la velocidad de grabado del material subyacente o del enmascarante. Si $R_1 > R_2$, entonces $S > 1$ y el proceso es selectivo (figura 1.2 a). Si $R_1 < R_2$, implica que $S < 1$ y se dice que el proceso es no selectivo (figura 1.2 b). Cuando $R_1 \approx R_2$, se da la mínima condición de selectividad $S \approx 1$. Generalmente es necesario algún sobre-grabado para garantizar un grabado completo (debido a las variaciones de espesor y velocidad de grabado), por tal motivo es importante tener alta selectividad en el proceso.

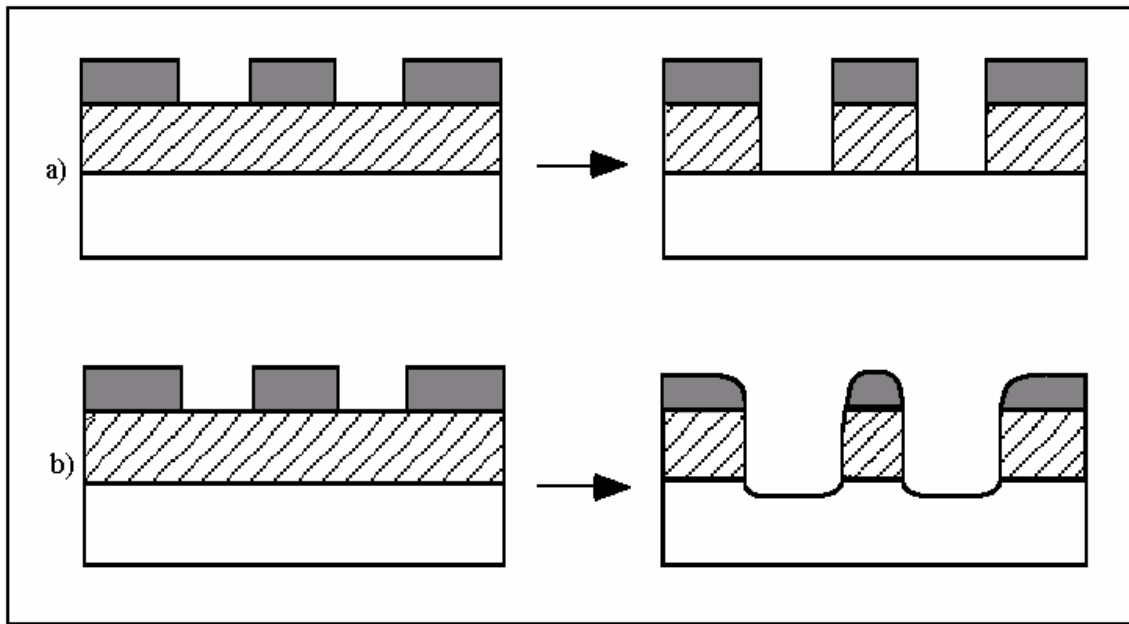


Figura 1.2. a) Grabado selectivo. b) Grabado no selectivo.

La figura 1.2.a muestra que en el grabado selectivo solamente se elimina el material que se desea grabar (zona a rayas), mientras que el enmascarante y el material subyacente permanecen sin daño. En la figura 1.2.b el grabado no selectivo elimina el material que se desea grabar y parte del enmascarante y del sustrato.

b) La direccionalidad, derivado de la física y química del proceso, se relaciona con que tan verticales son los perfiles de grabado, es decir, que el grabado lateral o *undercutting* sea mínimo comparado con el grabado vertical de la estructura. Esta definición lleva al concepto de anisotropía. La anisotropía se define como:

$$A = 1 - \frac{b}{d} \quad (1.2)$$

donde b es el grabado lateral y d es el grabado vertical. Si $b = d$, entonces $A = 0$ y resulta un grabado isotrópico. Si $d \gg b$, entonces $A = 1$ y el grabado es anisotrópico. La figura 1.3 muestra la tendencia de un grabado direccional.

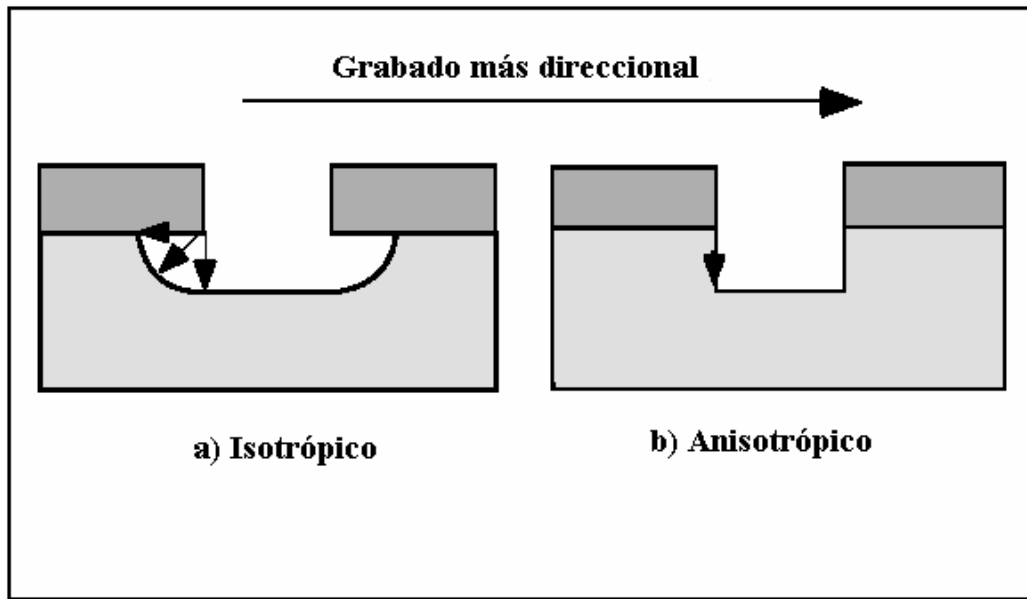


Figura 1.3. Esquema de direccionalidad.

- c) La velocidad de grabado uniforme es muy importante, ya que deberá ser en toda la superficie de la oblea. La uniformidad de velocidad de grabado esta dada por ^[5,6]:

$$\text{unif. de vel. de grabado}(\%) = \frac{\text{vel. de grabado}_{\text{máx}} - \text{vel. de grabado}_{\text{mín}}}{\text{vel. de grabado}_{\text{máx}} + \text{vel. de grabado}_{\text{mín}}} \times 100$$

En resumen, los requisitos para obtener un buen grabado son ^[6]:

1. Control del perfil deseado (pendiente o vertical).
2. Mínimo grabado lateral.
3. Máxima selectividad con enmascarante y material subyacente.
4. Uniformidad y reproducibilidad.
5. Mínimo daño superficial.
6. Limpio, económico y seguro.

El proceso de grabado puede realizarse de manera húmeda o seca. Sin embargo, la razón de usar grabado seco en lugar de húmedo para fabricación de MEMS, es debido a que el material puede ser removido solo en la dirección vertical, lo que permite reproducir fielmente los patrones definidos por el enmascarante.

1.2. Grabado húmedo.

El grabado húmedo consiste en el empleo de soluciones que contienen grabantes en forma líquida, por lo común mezcla de ácidos, en concentración y temperatura controladas. Este proceso se caracteriza por ser altamente selectivo e isotrópico y los materiales a grabar pueden ser semiconductores, conductores y aislantes.

El mecanismo de grabado húmedo consiste de tres pasos secuenciales ^[5,7]: a) los reactantes son transportados por difusión a la superficie de la oblea, b) las reacciones químicas ocurren en dicha superficie y c) los productos son removidos de la superficie por difusión. Por tal motivo este es un proceso completamente químico.

Existen dos métodos para realizar grabado húmedo ^[7,8]: a) Por inmersión, donde las obleas se introducen en las soluciones grabantes y mediante agitación mecánica se realiza la uniformidad del grabado y una velocidad de grabado constante. b) Por rocío, este método ha remplazado al de inmersión, ya que incrementa la velocidad de grabado por la incorporación constante de soluciones grabantes frescas a la superficie de la oblea.

1.2.1. Soluciones grabantes para grabado húmedo.

Para realizar el grabado húmedo es necesario conocer el tipo de soluciones grabantes, ya que cada material reacciona con soluciones específicas. Existen dos tipos de grabado húmedo de silicio que dependen del tipo de grabantes, estos son el grabado húmedo anisotrópico e isotrópico ^[8,9].

Las soluciones para el grabado anisotrópico de silicio suelen incluir soluciones alcalinas de KOH, NaOH, NH₄OH. La mezcla de hidróxido de potasio (KOH) con agua es uno de los grabantes más populares^[8,9]. Estas soluciones son anisotrópicas debido a que la velocidad de grabado depende de la dirección cristalográfica del silicio, ya que disuelven un plano cristalográfico específico mucho más rápido que otros planos. Para la red cristalina de silicio, el plano (111) tiene más enlaces disponibles por unidad de área que los planos (100) y (110), por esta razón, la velocidad de grabado suele ser más lenta para el plano (111). Por ejemplo, una solución con 19 % de KOH en agua DI a

aproximadamente 80 °C elimina más rápido el plano (100) que los planos (110) y (111). En este caso las proporciones de la mezcla son aproximadamente de 100:16:1 ^[5].

La mayoría de los grabantes isotrópicos son ácidos, de los cuales la mezcla más comúnmente utilizada es de $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$, aunque el CH_3COOH es preferible como diluyente, en vez de H_2O , porque previene mejor la disociación del ácido nítrico preservando su poder de oxidación ^[8]. A ciertas condiciones específicas, este tipo de grabado suele ser de mayor velocidad, por ejemplo, si se mantiene fija la temperatura de la solución grabante, a 25 °C por ejemplo, la velocidad de grabado isotrópico más alta es alrededor de una razón de concentración 2:1 de $\text{HF}:\text{HNO}_3$, casi tres veces mayor que la velocidad de grabado anisotrópico, y comienza a disminuir conforme se diluye ^[9]. El grabado isotrópico de silicio es mucho menos relevante para micromaquinado, esto se debe a que en general hay grabado a la misma velocidad en todas las direcciones cristalográficas del silicio ^[8].

La tabla 1.1 muestra algunos de los materiales más utilizados para grabado en la fabricación de circuitos integrados, así como las soluciones más comunes que graban de manera isotrópica a cada uno de ellos.

Material a grabar	Soluciones grabantes
Si monocristalino	$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH}$ o H_2O
Si policristalino	$\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$
SiO_2	$\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH}$ o H_2O $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}$
Si_3N_4	$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH}$ o H_2O H_3PO_4
Al	$\text{H}_3\text{PO}_4:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{H}_2\text{O}$ $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$

Tabla 1.1. Soluciones para grabado húmedo isotrópico.

1.2.2. Efecto de la temperatura, agitación y concentración de la solución.

Regularmente la velocidad de grabado se ve incrementada con la concentración de la solución grabante, según la solución que se utilice la velocidad decrece conforme la solución se diluye. Por ejemplo, para el caso de la solución de HF:HNO₃ a 25 °C, donde se encuentra una máxima velocidad de grabado en la concentración 2:1, la velocidad comienza a disminuir conforme se añade agua, mientras que aumenta de manera exponencial conforme se incrementa la concentración de HNO₃ ^[9]. Así mismo, al utilizar la solución KOH para grabar silicio en la dirección (100), existe una dependencia de la velocidad de grabado con la concentración. La velocidad de grabado es proporcional a $[H_2O]^4[KOH]^{1/2}$ y tiene un máximo en 20% de concentración de KOH ^[9].

La temperatura también influye de manera directa con la velocidad, mostrando un incremento cuando la solución se encuentra a temperaturas elevadas.

El efecto de la agitación de la solución con la velocidad de grabado es diferente para los tipos de soluciones, las isotrópicas son más sensibles con la agitación, mientras que las soluciones anisotrópicas no lo son ^[8].

1.2.3. Tipos de enmascarantes para grabado húmedo.

Una posibilidad para material enmascarante es la fotoresina. Sin embargo existen alternativas como Si₃N₄ y SiO₂ que pueden ser grabados lentamente en soluciones isotrópicas. El oro es resistente a grabantes basados en HF:HNO₃ y puede ser usado como enmascarante ^[9].

Para grabados con soluciones anisotrópicas como KOH por ejemplo, los óxidos térmicos no son buena opción, ya que inducen poca selectividad debido a que se graban rápido. Para grabados prolongados en KOH, se puede utilizar como enmascarante Si₃N₄ estequiométrico (depositado por LPCVD). Este material generalmente sirve mejor por su muy baja velocidad de grabado, encontrando de este modo, una mejor selectividad ^[8].

1.3. Grabado seco.

El control dimensional en el grabado de pequeñas geometrías es necesario para el avance de la microelectrónica e importante para el desarrollo de la microtecnología. Para grabar este tipo de estructuras se requiere de técnicas de grabado con mejor resolución. La técnica de grabado seco cumple con esta y otras características que permiten el desarrollo y avance de la tecnología, ya que, además de realizar una transferencia fiel de los patrones definidos por el enmascarante, realiza un grabado direccional independiente de la orientación cristalográfica del sustrato. Esta técnica generalmente cumple con algunas características especiales, que no son fácilmente alcanzadas por otras técnicas, como son el control en el perfil de grabado, alta velocidad de grabado, grabado anisotrópico, superficies suaves después del grabado y depósito de materiales inhibidores de grabado espontáneo. Este tipo de grabado incluye diferentes mecanismos para que una superficie sólida sea grabada; físicamente mediante el bombardeo de iones, químicamente por las reacciones de especies reactivas en la superficie, o por la combinación de ambos mecanismos. El grabado seco es sinónimo de grabado asistido por plasma, ya que para grabar un material es posible el uso de la energía contenida en algún tipo de partículas energéticas, tales como: especies neutras, radicales, iones, electrones, fonones y fotones, las cuales son producidas en un ambiente de plasma ^[9].

1.3.1. Plasma.

El plasma es energéticamente el cuarto estado de la materia y se obtiene cuando energía suficientemente alta es aplicada a átomos de cierto gas, causando producción de iones y electrones, convirtiéndose en un gas ionizado compuesto de igual número de cargas positivas y cargas negativas. Existen diversas aplicaciones tecnológicas donde se utiliza el plasma, de las cuales el grabado seco es el tema de interés en este trabajo. Este tipo de plasma se produce cuando un campo eléctrico es aplicado a un gas dentro de una cámara en vacío, causando el rompimiento de sus moléculas para volverse ionizado. Para permanecer ionizado, el gas debe recibir constantemente impulsos de energía para compensar la recombinación de las partículas cargadas en él, por lo que la aplicación

del campo eléctrico debe ser en radiofrecuencia (RF). El plasma al crearse a baja presión reduce las colisiones entre partículas y por lo tanto la recombinación de los iones.

La formación del plasma comienza con electrones libres. El campo es generado por la diferencia de potencial entre los electrodos dentro de la cámara, por ejemplo, alimentados por una fuente de potencia RF. Este campo debe ser de suficiente magnitud para poder despojar electrones de los átomos del gas. Una vez generado el plasma, los electrones libres ganan energía cinética del campo eléctrico y se aceleran. En el transcurso de su viaje a través del gas, los electrones chocan con las moléculas del gas y pierden su energía. La energía transferida por el choque causa efectos en las moléculas del gas como: excitación (electrónica, vibracional, etc), disociación o ionización ^[10]. La figura 1.4 muestra la naturaleza del proceso.

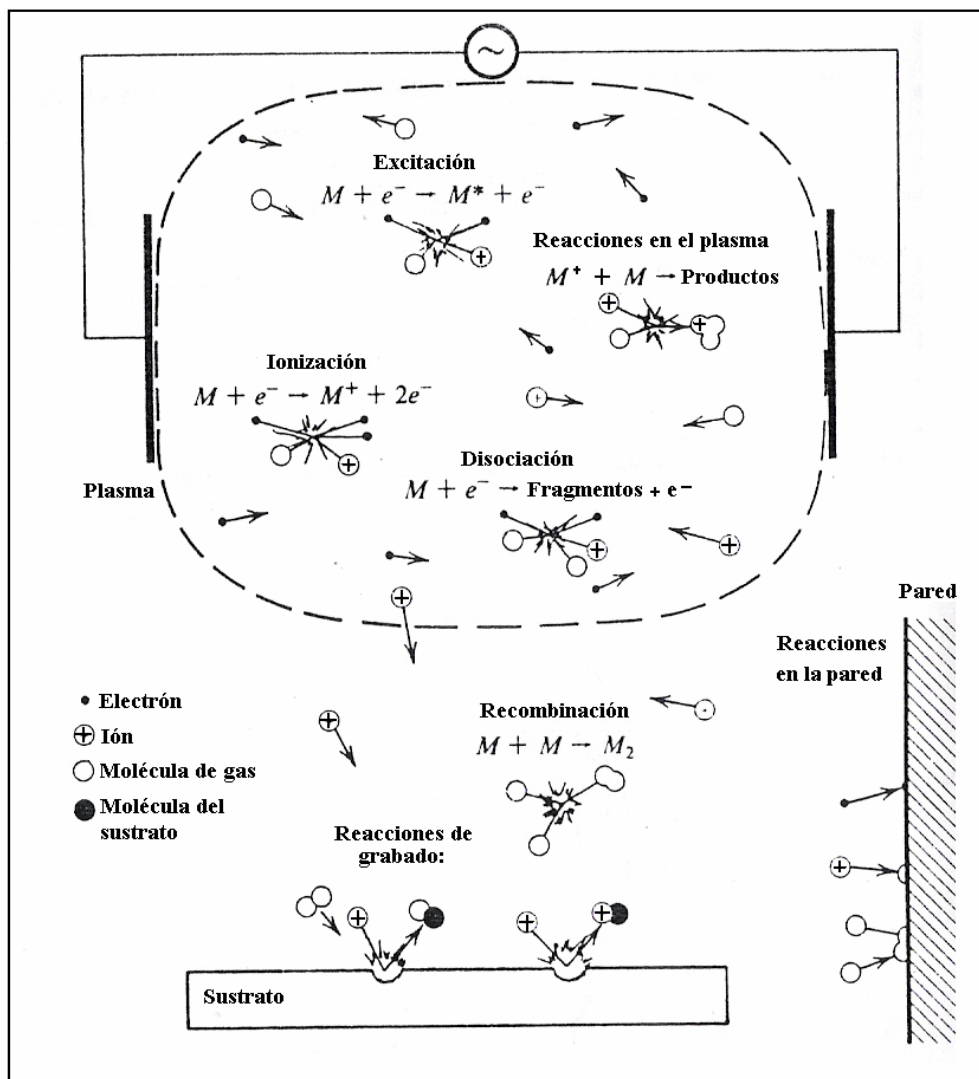


Figura 1.4. Proceso de grabado asistido por plasma ^[10].

En la excitación, un electrón de un átomo es colocado en su máximo estado de energía, es decir, a gran distancia del núcleo, generando una molécula excitada (M^*):

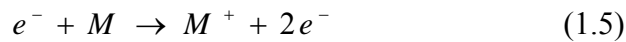


Cuando el electrón regresa a su mínimo estado de energía, emite un fotón que le da al plasma la característica de luminosidad.

En la disociación, la molécula (M_2) se rompe dividiéndose en pequeños fragmentos iguales que los átomos con o sin ionización, llamados radicales, los cuales son muy reactivos y responsables de algunas reacciones químicas:



En el proceso de ionización, un electrón es liberado generando una molécula cargada positivamente o un ión, esto incrementa el número de partículas cargadas:

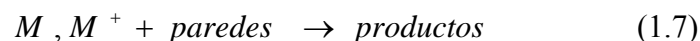


Los electrones vuelven a ganar energía cinética del campo y el proceso continúa. De este modo, cuando un voltaje mayor que el potencial de rompimiento es aplicado, un plasma se forma a través de la cámara de reacción. Por tanto, el plasma es un gas que se caracteriza por su alta densidad de población de partículas cargadas y electrones libres móviles, por lo que es altamente conductivo.

Los iones, fragmentos de moléculas y moléculas excitadas son altamente reactivas y pueden ser sometidas a una variedad de reacciones. Todas estas partículas son retiradas del plasma por su recombinación:



Y por reacción con las paredes de la cámara:



Las especies energéticas reaccionarán con los sustratos en el plasma. Si los productos de la reacción son volátiles bajo las condiciones del plasma, éstos son retirados, resultando una eliminación del material del sustrato. Esto es el grabado asistido por plasma.

En conclusión, en el plasma se llevan a cabo diferentes reacciones para formar especies químicamente reactivas (radicales e iones), a partir de un gas molecular que reacciona con el material.

Los plasmas emiten radiación en el rango del infrarrojo al ultravioleta por lo que se puede utilizar una técnica de diagnóstico para medir la intensidad de esta emisión y así determinar la presencia de especies iónicas o neutras. Estas medidas de concentraciones pueden estar en función de los parámetros del plasma y consecuentemente se podrían determinar las condiciones de grabado.

1.3.2. Mecanismos de grabado.

Específicamente, dos mecanismos básicos son usados en el proceso de grabado asistido por plasma: físico y químico (figura 1.5), y bajo ciertas condiciones hay sistemas que realizan la combinación de ambos.

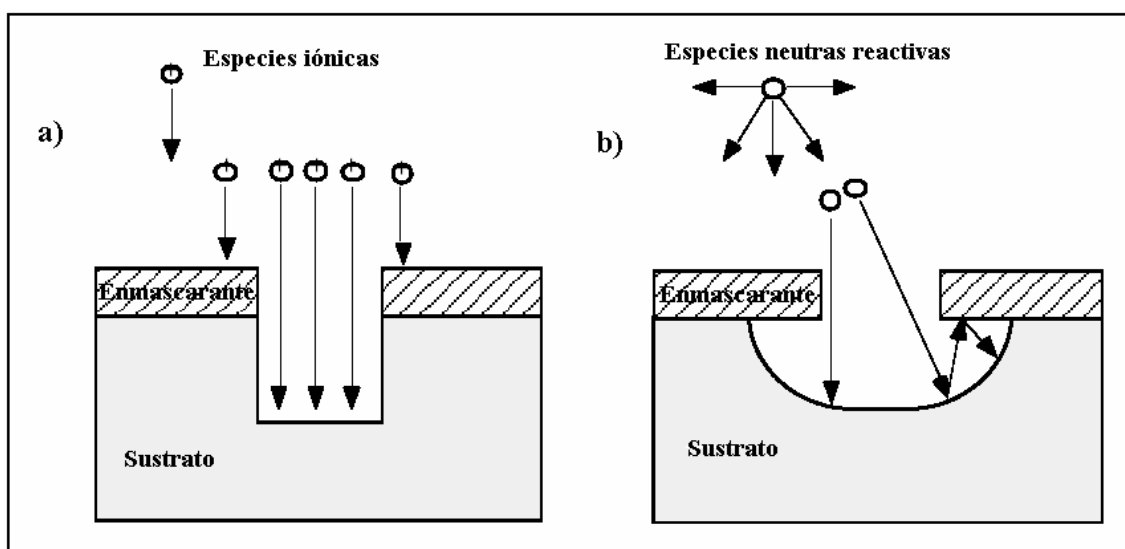


Figura 1.5. Mecanismos de grabado seco: a) físico, b) químico^[10].

En el grabado físico, los iones positivos bombardean la superficie del sustrato con alta energía, este proceso es conocido como *sputtering*. Este método puede llevar a perfiles anisotrópicos, pero está asociado con la baja selectividad de grabado, además de que el bombardeo iónico induce daño en la superficie. En el grabado químico, especies reactivas neutras generadas por el plasma reaccionan con la superficie del material de manera espontánea para formar productos volátiles. Este método proporciona una alta velocidad de grabado, buena selectividad y poco daño superficial pero lleva a perfiles isotrópicos. Al combinar ambos mecanismos, se puede obtener perfiles anisotrópicos aunado con la buena selectividad. Un ejemplo de un sistema que emplea ambos mecanismos es el de grabado iónico reactivo RIE (por sus siglas en inglés, *Reactive Ion Etcher*).

1.3.2.1. Grabado físico.

El grabado anisotrópico es favorecido por la componente física, más que por la química del proceso, esto se debe a que es posible dirigir verticalmente partículas altamente energéticas hacia la superficie del sustrato, colisionando con ella para realizar grabado direccional.

Los plasmas están llenos de portadores móviles, lo que lo hace ser un conductor. Siendo un conductor, el interior del plasma está a un potencial eléctrico uniforme. Sin embargo, el plasma no puede existir en contacto con un material, ya que cuando el material es cargado positivamente, una nube de electrones rodeará el material y cuando es cargado negativamente una nube de iones lo rodeará. Por lo que el plasma es separado de las paredes de la cámara y del sustrato por un escudo (*sheath*). De este modo dentro del plasma y fuera de la nube de electrones no existe campo eléctrico inducido^[9,10]. La figura 1.6 muestra la formación de dicho escudo.

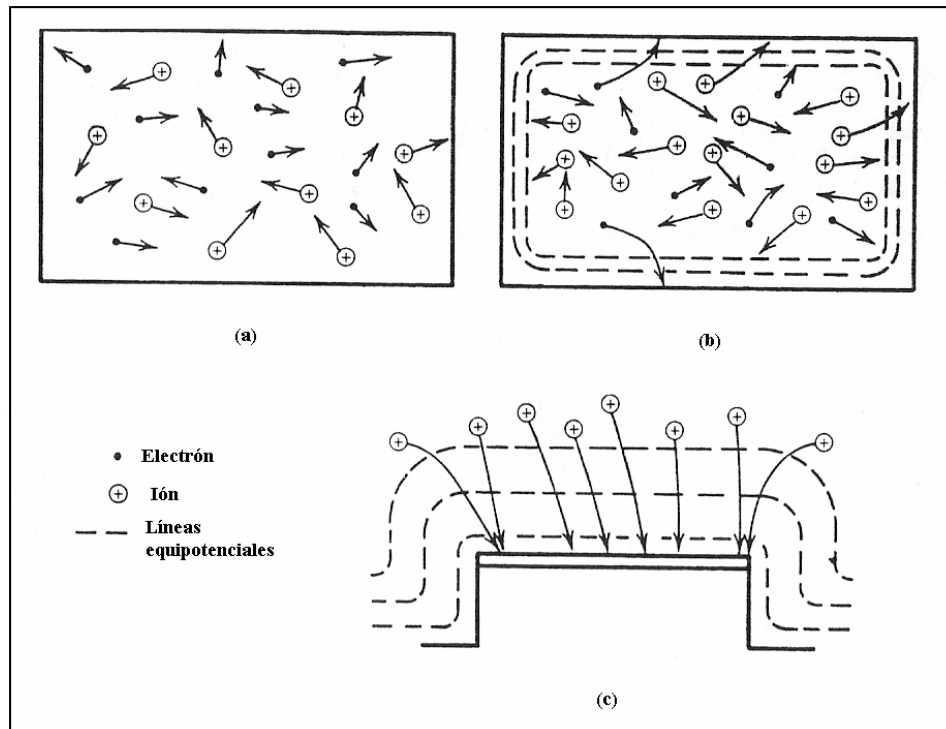


Figura 1.6. Física del grabado anisotrópico: a) condición inicial, b) condición de estado estacionario, c) bombardeo perpendicular ^[10].

El plasma, como resultado de la formación del escudo, tiene un comportamiento electrostático. Inicialmente existe un mismo número de iones y electrones en el plasma (figura. 1.6. a). Sin embargo, cerca de las paredes, tanto electrones como iones escapan del plasma para ser neutralizados en la pared (figura. 1.6. b). Los electrones, siendo mucho más pequeños y móviles, tienden a escapar más fácilmente. Esto lleva a un excedente de iones positivos en el plasma, resultando en una carga neta positiva relativa a las paredes y conforme ésta se incrementa, la pérdida de electrones decrece. Eventualmente la carga en el plasma se estabiliza a un valor positivo, mientras que la frontera de las paredes tiende a agotar las cargas formando así el escudo ^[4,10]. Debido al potencial del plasma, hay un campo eléctrico dentro del escudo, formado por las líneas equipotenciales alrededor de la cámara, y que apunta perpendicular a dichas líneas. Si se polariza negativamente un objeto dentro del plasma, tal como un sustrato sobre un electrodo, el grosor del escudo tiende a crecer conforme al aumento del voltaje de autopolarización (*dc bias*) inducido al sustrato (figura 1.6. b). De este modo, los iones del plasma son acelerados cruzando las equipotenciales y adquiriendo mayor velocidad paralela al campo debida al gradiente de potencial generado entre cada línea equipotencial. Como resultado de este comportamiento el sustrato es bombardeado por

los iones incidiendo perpendicularmente a la superficie. Esto genera un grabado direccional que hace posible un grabado anisotrópico.

A energías suficientemente altas, el bombardeo de iones remueve la superficie sobre la que chocan, generando *sputtering* que involucra el rompimiento de enlaces químicos por impacto. Este proceso no es selectivo. Si se desea un grabado selectivo, las energías deberán permanecer lo suficientemente bajas para que el *sputtering* no domine el proceso. A bajas energías, el bombardeo iónico puede promover grabado químico por el calentamiento local del sustrato y por la pérdida de enlaces químicos. En conclusión, el bombardeo físico es gobernado por las propiedades del escudo del plasma y éste a su vez depende de las variables controlables del sistema a través del *dc bias*.

1.3.2.2. Grabado químico.

En el grabado químico o grabado espontáneo, especies químicamente reactivas y neutras reaccionan con el material a ser grabado, generando productos volátiles, por ejemplo F con Si produce SiF_4 . Este grabado se realiza en todas direcciones, resultando en estructuras con perfiles isotrópicos, lo que en ocasiones es una desventaja ^[11]. Las condiciones de presión y temperatura deberán ser favorables para la formación de productos volátiles, de tal manera que no puedan disociarse y redepositarse en la superficie siendo grabada. Por lo tanto, el grabado químico depende de la naturaleza de las especies del plasma reaccionando con la superficie del sustrato. A su vez, estas dependen de los gases introducidos y sus reacciones subsecuentes en el plasma ^[6].

En general, el proceso de grabado químico selectivo se realiza en cinco pasos ^[2]: 1) las especies reactivas son generadas en el plasma, 2) estas especies son entonces transportados por difusión a la superficie del material siendo grabado, 3) la especie reactiva es adsorbida en el material, 4) se produce una reacción química para formar productos volátiles y 5) los productos son retirados de la superficie difundiéndose en el gas y expulsados al exterior por bombas de vacío (figura 1.7). Si alguno de estos pasos falla, el proceso de grabado cesa completamente. Finalmente otro efecto puede estar ocurriendo durante el proceso, se trata del depósito o redeposición de algunos de los fragmentos moleculares del gas y/o productos del grabado sobre la superficie del sustrato y paredes de la cámara ^[6].

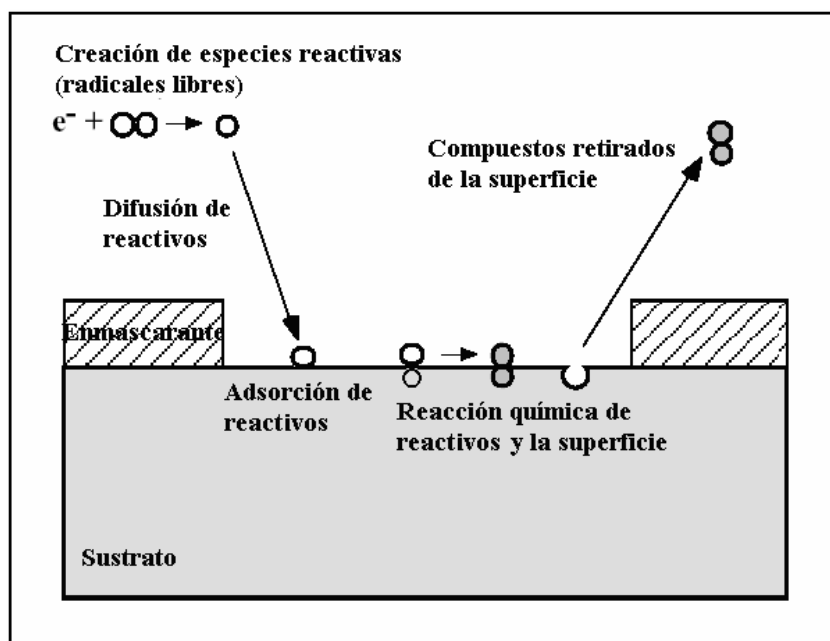


Figura.1.7 Cinética del proceso de grabado químico selectivo ^[6].

El gas grabante es seleccionado en base a la química que lleva a las especies a reaccionar con el sólido a ser grabado. Para grabar silicio por ejemplo, se eligen gases basados en halógenos. Dicho lo anterior, el papel del plasma es suministrar al gas, especies reactivas grabantes mediante disociación. Si el gas suministrado fuese lo suficientemente reactivo, no se necesitaría el plasma y el grabado solo ocurriría por las reacciones de las moléculas del gas con el sustrato mediante difusión. El principal y único requisito del grabado químico es que la reacción resulte en la formación de los productos volátiles, los cuales deberán ser retirados. Este proceso hace el grabado más selectivo debido a la sensible diferencia de los enlaces y a la composición química de cada material ^[11].

Otra de las aplicaciones de este tipo de grabado, es la posibilidad de promover el crecimiento o depósito de películas delgadas en la superficie del sustrato que actúan como barrera contra grabado espontáneo previniendo el ataque de las paredes de las estructuras. Esto se realiza con la elección adecuada de los gases que forman el plasma y sus condiciones.

Un grabado químico se puede establecer operando el plasma a bajo voltaje, de este modo se pueden eliminar por completo los efectos de bombardeo sobre la muestra provocado por los iones con altas energías, esto permite que el grabado de la superficie en su mayoría sea debido al efecto químico de las especies neutras formadas en el

plasma. El proceso de grabado anisotrópico por plasma depende del balance entre las reacciones químicas de las especies del plasma con el sustrato y el proceso físico del bombardeo iónico.

1.3.3. Presión y flujo de gas.

La contribución a la componente física o química en un proceso de grabado seco puede ser manipulada mediante la variación de la presión del gas en el plasma (figura 1.8). La presión tiene un efecto muy importante sobre el camino libre medio de las partículas, como consecuencia uno de los mecanismos de grabado es predominante.

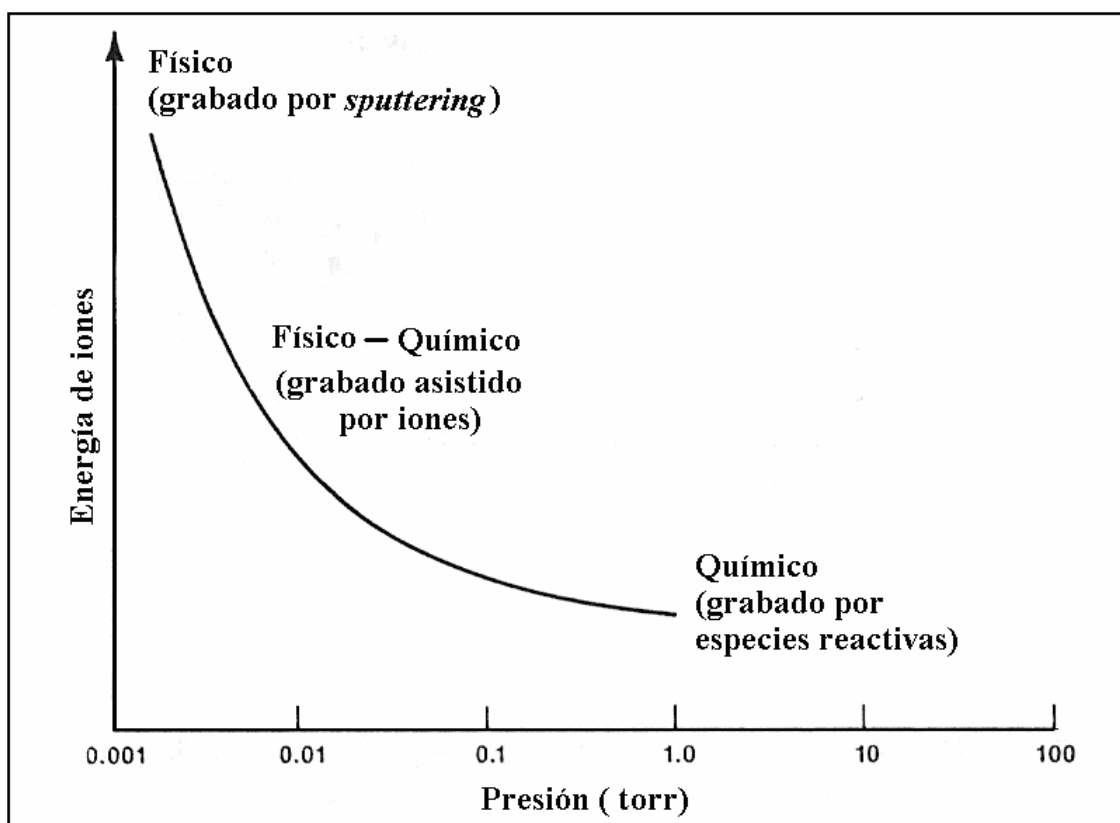


Figura 1.8. Mecanismos dominantes en el grabado seco en función de la presión y energía de los iones incidentes ^[11].

A altas presiones, mayores de 0.1 torr, el camino libre medio es corto y el comportamiento del plasma será gobernado por las colisiones entre partículas, por lo que predomina el grabado químico realizado por los radicales con el sustrato. Conforme disminuye la presión, en el rango de 0.1 a 0.01 mtorr, el grosor del escudo y el voltaje

que lo atraviesa comienzan a incrementar, así como el *dc bias*. Como consecuencia, la energía de bombardeo iónico aumenta con el decrecimiento de la presión. Estos efectos se deben al incremento del camino libre medio de las partículas y la consecuente reducción de colisiones entre electrones y moléculas. Por lo tanto, el flujo de iones hacia la superficie es mucho más directo y su energía cinética es alta, lo cual mejora la anisotropía. Sin embargo, la concentración de radicales decrece, por lo que disminuye también la velocidad de grabado. En este rango, el grabado es dominado por el balance entre ambos mecanismos. Finalmente a presiones muy bajas, menores a 0.01 mtorr, la energía de los iones es demasiado alta, dominando el grabado por el mecanismo físico, el cual induce daño a la superficie del material. Es aquí donde el *sputtering* domina el proceso ^[11].

Las unidades de presión, que comúnmente se usan en procesos de plasma, son militorr (mtorr). Para alcanzar los niveles de presión requeridos durante un proceso de fabricación se necesitan bombas de vacío. El vacío se define como una región del espacio en el cual la presión está por debajo de la presión atmosférica. Hacer vacío significa retirar algunas de las moléculas de gas contenidas dentro de una cámara que estuvo a presión atmosférica. La tabla 1.2 muestra los diferentes rangos de vacío utilizados en estos procesos.

Una atmósfera	760 torr
Bajo vacío	750 – 25 torr
Mediano vacío	25 – 7.5×10^{-4} torr
Alto vacío	7.5×10^{-4} – 7.5×10^{-7} torr
Muy alto vacío	7.5×10^{-7} – 7.5×10^{-10} torr
Ultra alto vacío	7.5×10^{-10} – 7.5×10^{-13} torr

Tabla 1.2. Rangos de vacío ^[6,10].

En procesos de grabado seco, se requiere un suministro constante de gas para mantener el plasma, ya que el gas que entra continuamente es consumido por las reacciones químicas. Por otro lado, se necesita mantener presión baja en la cámara de procesos para evacuar los productos volátiles de la reacción y contaminantes que podrían, por ejemplo, provenir de las paredes de la cámara, debido a diversos tipos de bombardeo de partículas presentes en el plasma. La cantidad de gas fluyendo a través de

la entrada de una bomba de vacío depende de la velocidad de bombeo, la cual mide el volumen de gas que pasa por segundo. La razón de flujo, es la presión multiplicada por la velocidad de bombeo. Sus unidades son sccm (*standard centimeter cubic per minute*), donde estándar se refiere a condiciones de temperatura 0°C y presión de 1 atm ^[12].

1.3.4. Frecuencias RF

Los procesos de plasmas en tecnología de fabricación son generados por potencias suministradas a altas frecuencias (voltajes de corriente alterna, *ac*), usualmente en el rango de MHz.

Una de las limitaciones de un sistema de plasma en *dc*, es que no puede grabar materiales dieléctricos, esto es debido a que el plasma no puede ser mantenido a un voltaje *dc* si el electrodo es cubierto con una capa aislante. Esto representa una gran desventaja para el grabado asistido por plasma. Cuando el cátodo, cargado negativamente en un sistema *dc* es bombardeado por iones, un electrón es extraído de un átomo de la superficie cada vez que un ión positivo es neutralizado. Si el material es conductor, los electrones son remplazados por conducción eléctrica, manteniendo al cátodo cargado negativamente y sustentando la descarga. Si el material es aislante, los electrones perdidos de la superficie del cátodo no son remplazados, ya que no es posible la conducción eléctrica. Entonces la superficie acumula carga positiva que se incrementa con el bombardeo de iones, causando un decrecimiento en la diferencia de potencial entre la superficie del cátodo y el ánodo, esto hace que el plasma se extinga ^[6].

Ante este problema, existe la manera de remplazar a los electrones perdidos en una superficie aislante y así mantener continuo el plasma. Este método involucra el uso de plasma en RF, donde un voltaje en radiofrecuencia es aplicado entre los electrodos causando que los electrones libres oscilen e interaccionen con las moléculas del gas, llevando así a un plasma continuo. Los electrones adquieren suficiente energía durante la oscilación para causar la ionización de las moléculas.

Considerando el caso donde el sustrato se coloca en el electrodo capacitivamente acoplado a un generador RF, mientras que el otro electrodo es aterrizado, el electrodo polarizado desarrolla automáticamente un *dc bias* negativo, convirtiendo al electrodo en cátodo con respecto al otro electrodo (figura 1.9 A). Este *dc*

bias, V_{DC} , es un voltaje de autopolarización inducido por el plasma que se encuentra con potencial positivo, V_p (figura 1.9 B) Esto sucede debido a la diferencia de masas entre el ión y el electrón, ya que el campo eléctrico acelera más rápido a los electrones hacia el electrodo durante la porción positiva del ciclo, y atrae a los iones durante la parte negativa manteniendo una carga neta negativa en el electrodo ^[6].

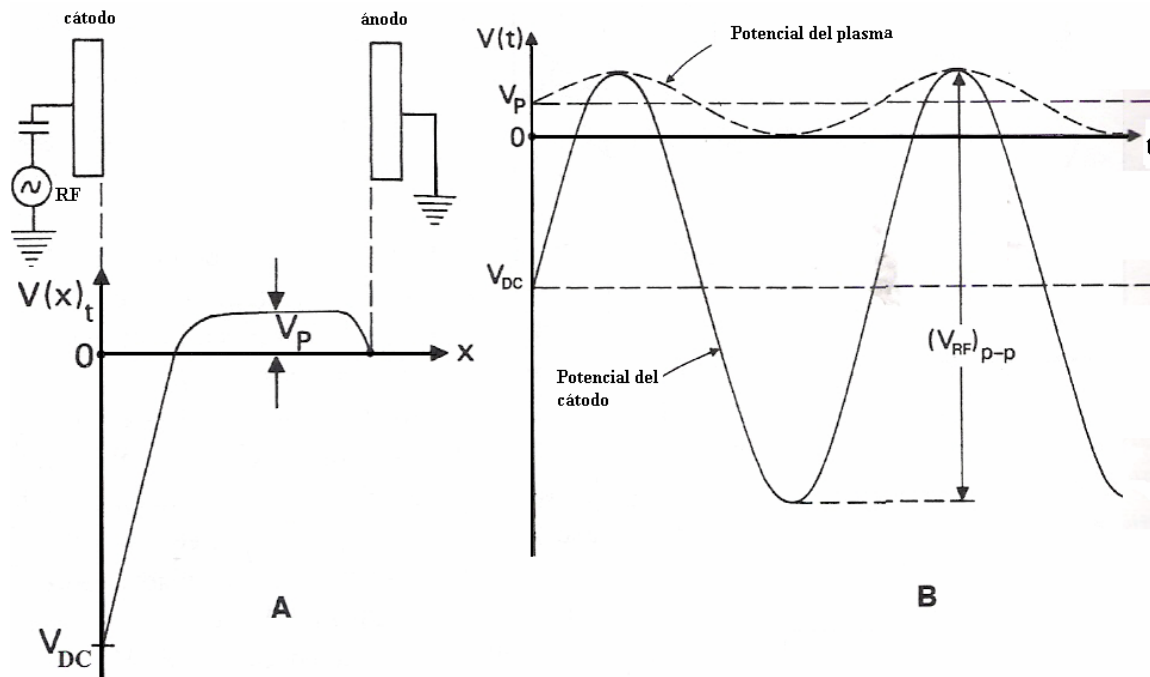


Figura 1.9. Plasma en RF. A) aproximación de la distribución de potencial promedio de un sistema planar acoplado capacitivamente. B) distribución de potencial en el reactor:
 V_p = potencial del plasma, V_{DC} = voltaje de autopolarización,
 $(V_{RF})_{pp}$ = voltaje pico-pico aplicado por la fuente RF.

Para entender cómo se reemplazan los electrones perdidos, se discute en base a la figura 1.9 B. El generador RF (figura 1.9 B) produce una señal de polaridad alterna, $(V_{RF})_{p-p}$, con amplitud lo suficientemente grande para ocasionar el rompimiento de átomos de gas por el impacto con electrones en la cámara de procesos. En condiciones de estado estacionario, la carga positiva en la superficie del sustrato se acumula durante la parte negativa del ciclo y es reemplazada por electrones durante la parte positiva de éste. Entonces la carga acumulada neta por la superficie del aislante durante cada ciclo completo es cero, reemplazando así los electrones perdidos.

Debido a que el tiempo de extinción del plasma en la parte negativa del ciclo es muy corto, las bajas frecuencias de señales *ac* (60 Hz) son inefectivas para mantener continuo al plasma. Entonces se requiere aplicar frecuencias en el orden de 50 kHz a 1 MHz a los electrodos ^[6]. La mayoría de los plasmas RF operan a una frecuencia de 13.56 MHz. Este valor es designado por las autoridades de comunicaciones internacionales, la cual limita la cantidad de energía electromagnética que puede ser radiada sin interferir con otras señales transmitidas de radio. ^[9].

1.3.4.1. Red de acoplamiento (*Matching Network*).

Para evitar grandes corrientes RF fluyendo en un circuito, los generadores comerciales de alta frecuencia están diseñados con impedancia de salida puramente resistiva, del orden de 50 Ω , por lo que es necesario acoplar la impedancia entre el generador y la carga (plasma). Para minimizar la potencia reflejada contra la potencia aplicada se utiliza una red de acoplamiento (figura 1.10 a) ^[9]. Las fuentes RF controlan la formación del plasma mediante la sintonización de la red, manteniendo la potencia reflejada en un mínimo valor ^[12].

Un plasma RF normalmente tiene una impedancia grande y parcialmente capacitiva que no se puede ajustar sin afectar el proceso. Por tal motivo, se simula una carga igual a la impedancia de salida del generador mediante la combinación de la carga del plasma con la inserción de una carga variable denominada red de acoplamiento. Esta red de acoplamiento deberá ser colocada cerca de la cámara de proceso para evitar potencias perdidas debido al gran flujo de corriente entre las dos componentes. El propósito de esto es incrementar la disipación de potencia en el plasma, y proteger así al generador ^[12]. Una configuración típica de red de acoplamiento que consiste de un circuito *LC* se da en la figura 1.10 b.

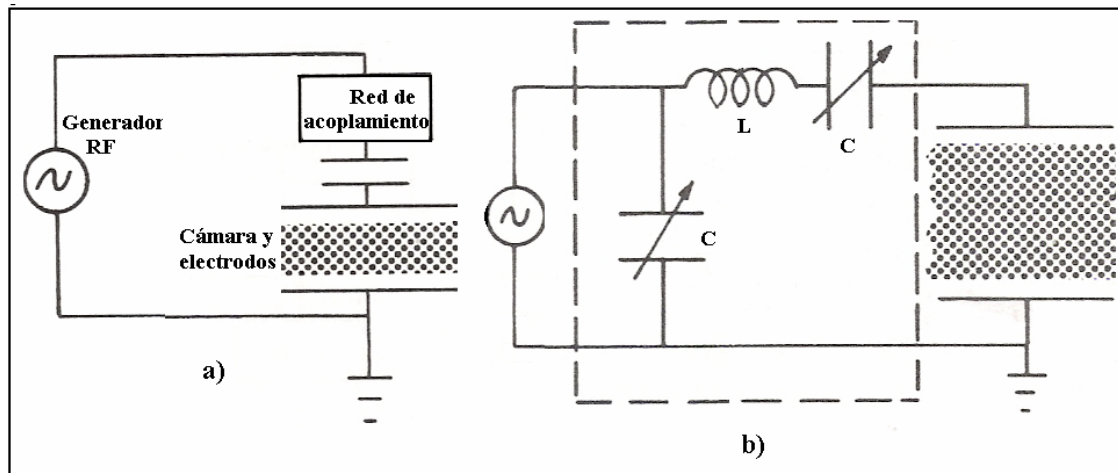


Figura 1.10. a) Circuito con red de acoplamiento, b) Típica red de acoplamiento LC.

Una red de acoplamiento autoajustable ayuda a obtener la estabilidad de los niveles de potencia a pesar de las condiciones del plasma. La impedancia del plasma varía con la frecuencia y las demás condiciones, principalmente depende del tipo de gas y presión. La eficiencia de potencia entregada al plasma esta fuertemente influenciada por el diseño de la red de acoplamiento y por la selección de componentes del circuito eléctrico ^[9].

1.3.5. Sistema de grabado y tipo de reactores.

Un sistema de plasma usado para procesos tecnológicos se muestra en la figura 1.11^[13]. Este sistema, generalmente consiste de subsistemas que proporcionan diferentes funciones, tales como:

1. Sistemas de manipulación de gases, los cuales incluyen:

- **Fuentes de gas.** Comúnmente son cilindros a alta presión o líquidos con altas presiones de vapor. A veces se utilizan sólidos con presiones razonables de vapor.
- **Controladores de flujo de masa.** Son utilizados para controlar y medir el flujo de los diferentes gases o vapores entrando al reactor.

- **Sistemas de vacío que incluyen bombas y controladores de presión.** Los tipos y tamaños de las bombas son determinados por los niveles de vacío y flujo de gases requeridos.
2. **Reactores de plasma.** Estos son descritos posteriormente.
 3. **Fuentes de potencia.** El papel de las fuentes de potencia se divide en: sustentar al plasma dentro del reactor y proporcionar un voltaje independiente al sustrato cuando sea requerido.

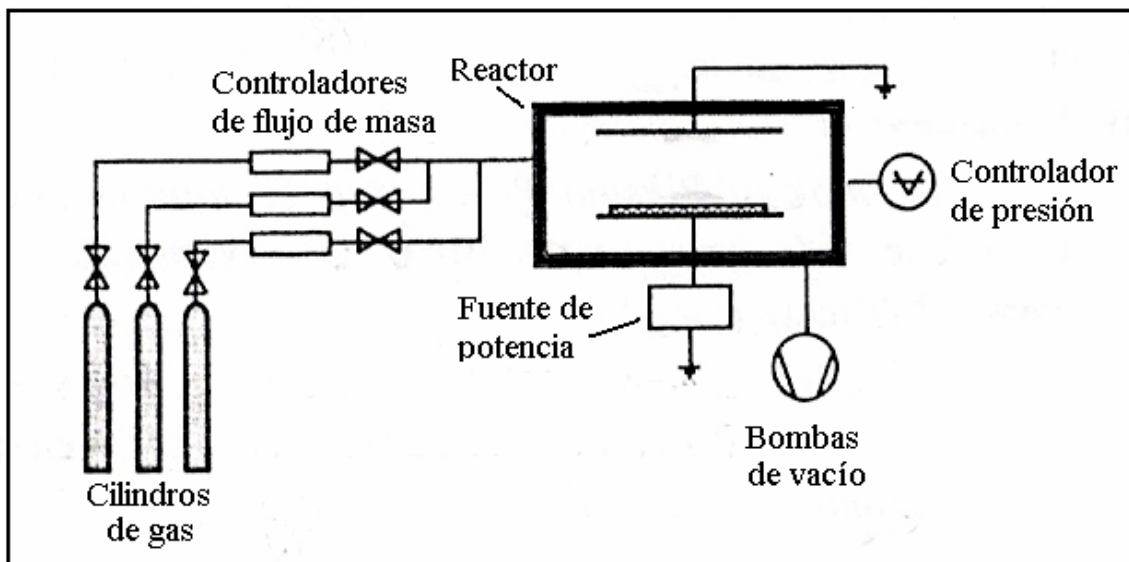


Figura 1.11. Sistema típico de grabado por plasma.

Las potencias en RF que operan a 13.56 MHz se pueden acoplar al plasma, capacitivamente o inductivamente. Sin embargo, para reactores que operan en frecuencias de microondas, el acoplamiento es distinto ^[14]. De este modo, los reactores para grabado seco se pueden clasificar respecto al tipo de acoplamiento, densidad del plasma y rango de presión en que operan. En la tabla 1.3 se muestran los principales reactores para grabado seco donde también se indica el mecanismo predominante de grabado.

Tipo de reactor con acoplamiento:	Mecanismo de grabado	Presión (torr)	Densidad de plasma (e^-/cm^3)
Capacitivo			
Reactor barril (<i>Barrel reactor</i>)	Químico	0.1 - 10	$\sim 10^9$
<i>hexagonal reactor</i>	Químico	0.1 - 10	$\sim 10^9$
Grabado asistido por plasma (<i>Plasma etching - PE</i>)	Químico	0.1 - 1	$\sim 10^9$
Grabado iónico reactivo (<i>Reactive ion etching - RIE</i>)	Químico y Físico	0.01 - 10	$\sim 10^9$
RIE asistido magnéticamente (<i>Magnetic enhanced RIE - MERIE</i>)	Químico y Físico	0.001 - 0.1	$\sim 10^9$
Triodo (<i>Symetric triode etching - STE</i>)	Químico y Físico	0.001 - 10	$\sim 10^9$
Inductivo			
Reactor de acoplamiento inductivo (<i>Inductively coupled plasma - ICP</i>)	Químico y Físico	0.01 - 0.1	$\sim 10^{12}$
Transformador acoplado al plasma (<i>Transformer coupled plasma - TCP</i>)	Químico y Físico	0.01 - 0.1	$\sim 10^{12}$
Helicoidal (<i>Helicon Plasma Etching</i>)	Químico y Físico	0.01 - 0.1	$\sim 10^{11}$
Reactores en microonda			
Reactor de resonancia ciclotrónica (<i>Electron cyclotron resonant - ECR</i>)	Químico y Físico	0.01 - 0.1	$\sim 10^{11}$

Tabla 1.3. Configuraciones de sistemas de grabado seco ^[5,14].

En este capítulo únicamente se describen los reactores por acoplamiento capacitivo RIE y por acoplamiento inductivo ICP, dado que son los que se emplean en este trabajo.

1.3.5.1. Acoplamiento capacitivo: Reactor de grabado iónico reactivo (RIE).

Este reactor también se le conoce como de placas paralelas (electrodos paralelos), donde uno de los electrodos es conectado al generador RF, mientras que el otro se aterriza, manteniendo así una configuración capacitiva. Cuando el sustrato es grabado estando sobre el electrodo a tierra, el sistema es operado en el modo de grabado asistido por plasma (PE), caracterizado por realizar grabado completamente químico (figura 1.12 a). Si se realiza el grabado del sustrato sobre el electrodo polarizado, entonces el

sistema esta en modo de grabado iónico reactivo (RIE), caracterizado por realizar grabados mediante la combinación de mecanismos físicos y químicos (figura 1.12 b). Con este último arreglo es posible dirigir iones energéticos a la superficie a grabar, causando que la muestra esté sometida a un bombardeo producido por la diferencia de potencial entre el plasma y la superficie del electrodo, además de la interacción con las especies reactivas producidas en el plasma que reaccionaran con el material. Como resultado ambas componentes, física y química, contribuyen al grabado^[6].

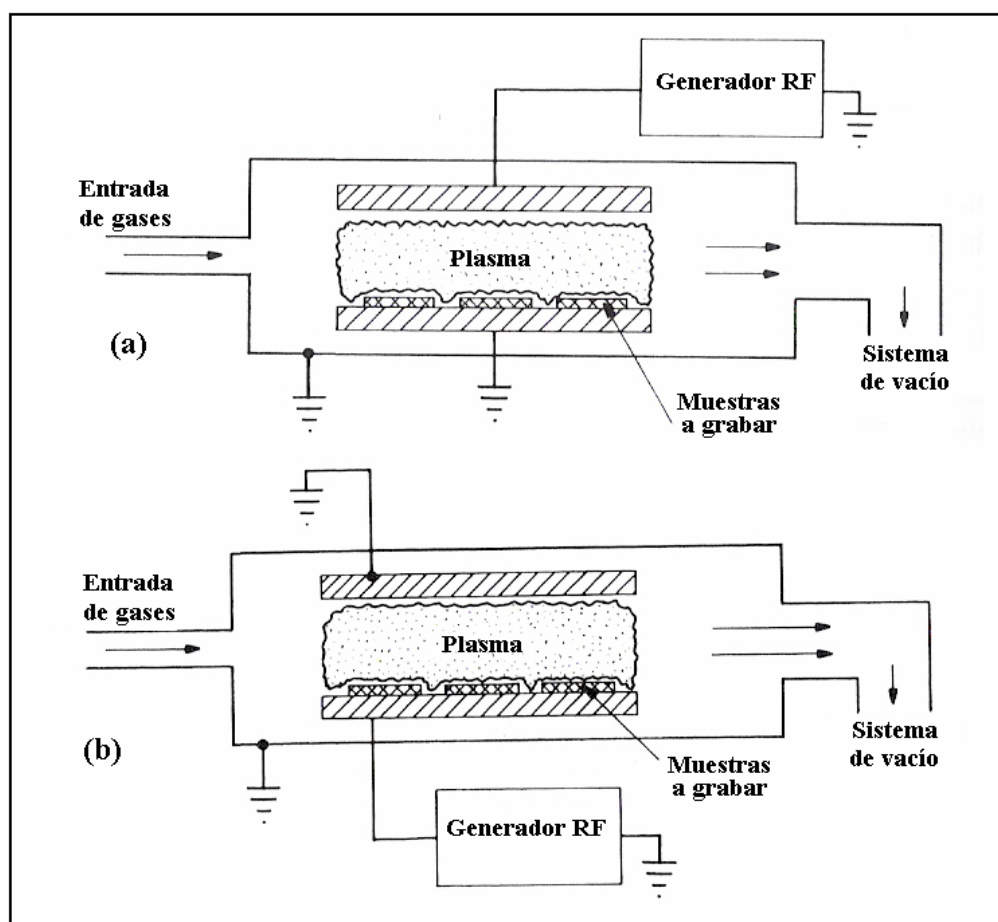


Figura 1.12. Configuración de reactor de placas paralelas
a) Modo PE, b) Modo RIE^[14].

La selectividad de este reactor en modo RIE es baja comparada con otros, esto es debido al bombardeo de iones, causando incluso daño superficial. Sin embargo, mediante la elección adecuada de los gases grabantes, es posible mejorar la selectividad así como obtener perfiles anisotrópicos. En este tipo de configuraciones no es posible controlar independientemente la densidad de plasma con la energía de los iones.

Para satisfacer las demandas de control de ancho de línea, selectividad, y bajo daño superficial, en los procesos de grabado por plasma en circuitos de ultra gran escala (ULSI), es necesario controlar la densidad del plasma independientemente de la energía del ión. Por tal motivo, se han diseñado reactores con diferentes configuraciones de electrodos que puedan operar a menor presión y generen a su vez mayor densidad de plasma, como es el caso del ICP.

1.3.5.2. Acoplamiento inductivo: Reactor ICP.

Este tipo de reactor consiste en una bobina externa a la cámara de procesos, la cual rodea un tubo o esta separada por una placa dieléctrica (figura 1.13). La bobina está conectada a una fuente de potencia RF, lo cual permite que circule en ella una gran corriente para generar un campo magnético axial que promueve el plasma. Esta configuración induce plasmas de mayor densidad que el caso del reactor RIE. Por otro lado, existe una segunda fuente RF conectada al electrodo donde se coloca la muestra y que controla la energía con la que los iones inciden en el material. De esta manera se puede tener un control independiente de la densidad del plasma y de la energía de los iones bombardeando la superficie de la muestra.

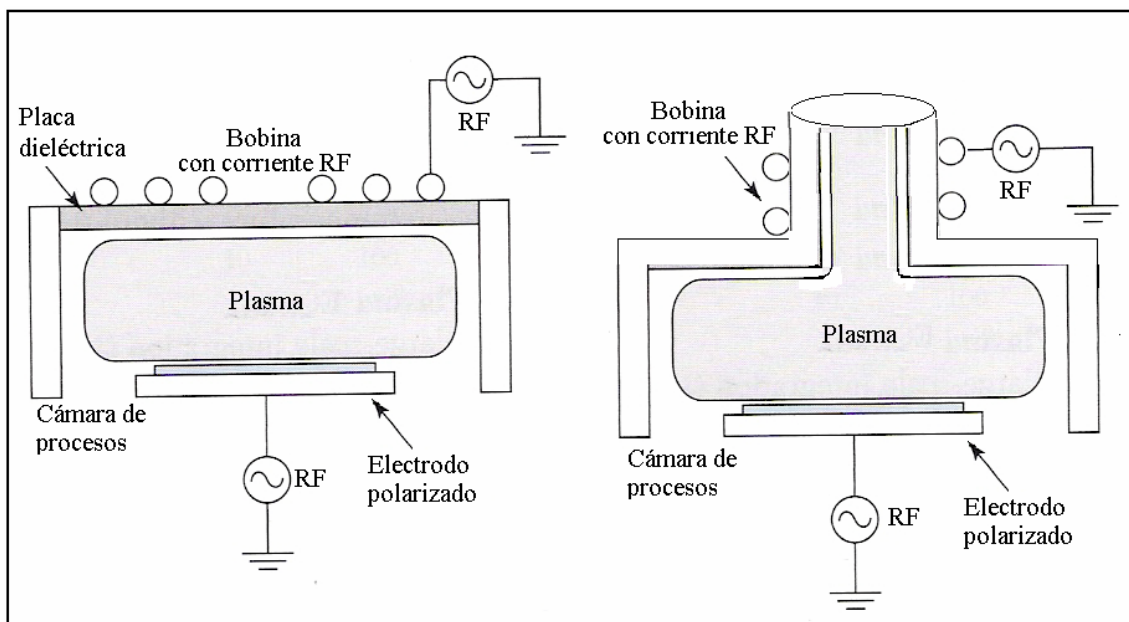


Figura 1.13. Esquema de ICP con la bobina externa superior o rodeando a un tubo ^[10].

En base a la configuración de este reactor, se puede generar una alta velocidad de grabado (por la baja presión y la alta densidad de especies activas), mejor control de dimensiones críticas y mejor selectividad. Además estos reactores proporcionan menor daño al sustrato y una alta anisotropía, por el control independiente del *dc bias* aplicado al sustrato y la densidad del plasma. Este tipo de reactores resultan sencillos de diseñar, fabricar y mantener.

1.3.6. Gases reactivos para grabado seco.

La tabla 1.4 lista algunos de los materiales empleados en la fabricación de dispositivos y los gases más comunes empleados para su grabado, también se muestra la especie reactiva que reacciona con el material y los productos volátiles que se generan en el proceso.

Material	Gases usados comúnmente para grabado seco.	Especie reactiva dominante	Producto volátil
Silicio (mono- y policristino)	Gases basados en halógenos SF ₆ , CF ₄ , CHF ₃ , CF ₃ Br, Cl ₂ , HBr	F, Cl, Cl ₂ y Br	SiF ₄ , SiCl ₄ , SiBr ₄
Óxido de silicio	CF ₄ , CHF ₃ , C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈ C ₂ H ₂ F ₄	F, CF _x	SiF ₄ , CO, CO ₂
Nitruro de silicio	SF ₆ , CF ₄ , CHF ₃	F, CF _x	Especies CN
Fotoresina	O ₂	O	CO, CO ₂ ,
Aluminio	BCl ₃ , CCl ₄ , Cl ₂ , SiCl ₄ , CHCl ₃	Cl, Cl ₂	AlCl ₃ , Al ₂ Cl ₆

Tabla 1.4. Químicos para grabado seco ^[11,14].

Ya que el silicio es el material más utilizado como sustrato, y que se empleará como tal en este trabajo, a continuación se analizan los gases reactivos y sus aditivos para su grabado.

El silicio es normalmente grabado con gases basados en flúor, cloro o bromo. Los plasmas basados en flúor, a diferencia de los demás halógenos, son generalmente usados para grabado isotrópico, ya que el flúor es la principal especie reactiva con silicio, por lo que el grabado se efectuará en todas direcciones. La reacción del plasma de flúor con el silicio se produce espontáneamente sin requerir del bombardeo iónico, por lo que produce altas velocidades de grabado ^[9,14].

A diferencia del flúor, gases basados en cloro y bromo pueden generar perfiles anisotrópicos en silicio, ya que estos halógenos no reaccionan espontáneamente a temperatura ambiente, por lo que la velocidad de grabado es baja. Por su parte, las moléculas de cloro se disocian y sus átomos son adsorbidos en el silicio para formar una monocapa ordenada de cloro, ocasionando un grabado más lento, por lo que se requiere de un fuerte bombardeo para promover el grabado ^[9,15].

El gas SF₆ es una fuente importante de flúor, ya que contiene una gran cantidad de este halógeno. Este gas es ampliamente utilizado para el grabado de silicio por su alta generación de productos volátiles. Los halocarburos como CHF₃, C₂F₆, CF₄, etc., son también fuentes de flúor, donde el más común de ellos es el CF₄. En este tipo de gases, el carbono es muy importante para el grabado ya que junto con el flúor compiten con las reacciones en el sustrato. La magnitud de este efecto depende de la razón flúor-carbono (F/C), por lo que gases con altas concentraciones de carbono, grabarán el silicio más lentamente además de que formarán una película inerte, a base de polímeros (C_xF_y) que protege las paredes contra grabado espontáneo producido por el flúor ^[10].

1.3.6.1. Mezclas de gases reactivos.

Una gran variedad de plasmas basados en flúor, cloro y bromo con una amplia abundancia de gases aditivos, tales como oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, argón, etc., son usados en la elaboración de MEMS. Para fines de este trabajo, se tratarán los efectos de plasmas basados en flúor con algunos gases aditivos.

a) Efecto de la adición de oxígeno

La adición de pequeñas cantidades de O_2 a un plasma basado en flúor incrementa la densidad de átomos de flúor y por lo tanto la velocidad de grabado de silicio. Por ejemplo, en el caso de CF_4 , el oxígeno reacciona con el carbono para formar CO_2 , esto reduce el consumo de flúor por las reacciones con el carbono, elevando así la velocidad de grabado ^[10]. Cuando se incrementa la concentración de oxígeno, se diluye el carbono y se suprime la formación de capas de polímero. En su lugar, una película inorgánica e inhibidora, $Si_xO_yF_z$, se forma en la superficie del silicio.

El efecto es el mismo con la adición de O_2 a plasmas de SF_6 . La velocidad de grabado vertical se incrementa primero por la alta densidad de átomos de F y subsecuentemente decrece por el crecimiento de la película de óxido y la dilución de átomos de F. El grabado lateral depende del grosor de la capa de óxido y de la densidad de átomos de F tratando de penetrar esta capa para grabar al Si. El grosor de la capa inhibidora es función de la densidad de átomos de O, el impacto iónico y la temperatura local ^[9].

b) Efecto de la adición de CHF_3 .

Se ha encontrado que plasmas deficientes en flúor y a base de hidrógeno, tales como CHF_3 , pueden grabar anisotrópicamente el silicio. Los átomos de hidrógeno reaccionan con los radicales de F y reducen el grabado espontáneo ^[16]. Plasmas basados en este tipo de gases, además del poco grabado espontáneamente del silicio, depositan la capa de polímero protectora contra grabado espontáneo (C_xF_y), resultando en grabados anisotrópicos pero de muy baja velocidad ^[9,17]. La adición de este gas en la mezcla SF_6/O_2 reduce la alta rugosidad generada en el fondo de las estructuras ya grabadas, debido a la oxidación del silicio por altas proporciones de O_2 (fenómeno conocido como *Black Silicon*). ^[18]

c) Efecto del suministro de otros gases.

Los gases nobles tales como Ar y He se utilizan para estabilizar el plasma. El argón causa bombardeo de iones inertes en la superficie promoviendo un grabado anisotrópico. La adición de un gas químicamente inerte puede cambiar significativamente la distribución de energía del electrón en el plasma y puede alterar la población de especies reactivas en éste ^[9].

d) Mezclas especiales.

Como caso específico, en un plasma de $\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{CHF}_3$, cada gas tiene una función específica, por lo que los perfiles grabados son fácilmente controlados mediante la variación de flujo de cada gas. Por ejemplo, SF_6 produce radicales de F para el grabado químico espontáneo, el oxígeno promueve radicales de flúor para incrementar la velocidad de grabado y el CHF_3 polimeriza la superficie de Si para inhibir el grabado lateral^[9].

1.3.7. Películas inhibidoras de paredes.

En procesos de grabado que utilizan gases basados en halocarburos, tales como CHF_3 , CF_4 , etc., una fracción del plasma generado por los radicales no es capaz de reaccionar directamente con el sustrato de silicio para generar productos volátiles, en su mayoría, ellos producen polímeros que se adhieren a la superficie. Para remover tales polímeros es necesario el bombardeo iónico, por lo que esta capa solamente se elimina en la superficie perpendicular a dicho bombardeo. En la superficie restante, tales como paredes verticales o inclinadas de las estructuras grabadas, estos polímeros no se removerán si el bombardeo iónico es vertical con la mínima dispersión por colisiones con especies neutras. Un hecho importante es que estas capas no reaccionan con los átomos de halógenos.

1.3.8. La temperatura y el grabado seco.

El plasma, junto con los otros tres estados de la materia, se puede representar en un rango de temperatura y/o energía de sus partículas como se muestra en la figura 1.14.

Existe una variedad de tipos de plasma, ellos difieren, en la concentración de electrones n_e , y la energía promedio del electrón, kT_e , donde k es la constante de Boltzmann y T_e es la temperatura del electrón. Para dar una idea, los arcos de descargas a muy alta presión tienen aproximadamente $n_e = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y $kT_e = 0.5 \text{ eV}$, mientras que los plasmas interplanetarios tienen $n_e = 10 \text{ cm}^{-3}$ y $kT_e = 25 \text{ eV}$.

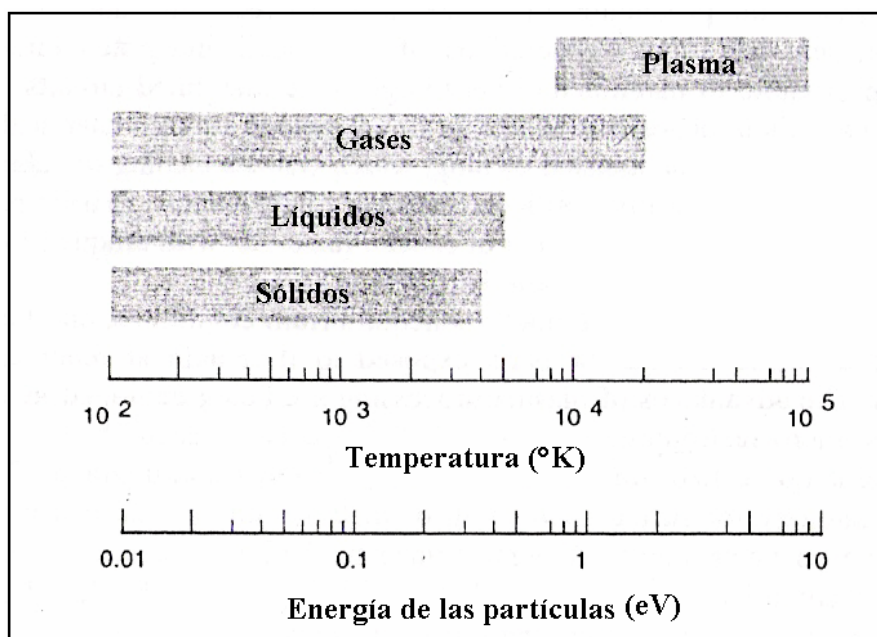


Figura 1.14. Estados de la materia vs temperatura ^[13].

Los plasmas utilizados en procesos tecnológicos, se caracterizan por operar en rangos de presiones de 0.01 a 0.1 torr, entonces n_e está alrededor de 10^{10} cm^{-3} y kT_e entre 1 y 10 eV. Estos plasmas también se conocen como plasmas fuera de equilibrio debido a que T_e es mucho mayor que la temperatura de los iones, T_i , o incluso la del propio gas, T_g , típicamente $T_e/T_i > 10$, y $T_g < 500 \text{ K}$ ^[11]. Los plasmas aplicados en procesos tecnológicos son parcialmente ionizados, la razón de n_e con la concentración de especies neutras es de 10^{-6} a 10^{-4} . Por lo tanto átomos, radicales y moléculas son los principales responsables de reacciones de grabado realizados por su alta concentración relativa a la de iones ^[11].

Este tipo de plasmas se conocen como plasma frío, debido a la baja densidad y a la muy baja capacidad calorífica de los electrones. La cantidad de calor transferida por los electrones al gas (partículas neutras y partículas ionizadas) y a las paredes que lo contiene es muy poca. Entonces el término “plasma frío” deriva de esta pequeña cantidad de calor transferida al gas o sólidos en contacto con él.

El grado de ionización del plasma es determinado por la temperatura del electrón relativa a la energía de ionización y principalmente por su densidad. Un plasma es a veces referido como caliente si esta cerca de la ionización completa (estrellas por ejemplo), o frío si solo una pequeña fracción de las moléculas del gas está ionizada. Eventualmente, en un plasma frío, la temperatura del electrón será típicamente de algunos cientos de grados ^[13].

1.3.8.1. Grabado criogénico.

Una de las condiciones para obtener grabados verticales es el enfriamiento de la muestra por debajo de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. La anisotropía del Si esencialmente resulta de la probabilidad de reacción con halógenos de flúor a los bordes. La temperatura del sustrato influye directamente con la probabilidad de reacción de silicio con los halógenos. Fundamentalmente, el proceso de grabado criogénico resulta del hecho de que a bajas temperaturas las obleas cambian su reactividad química, afectando el grado de grabado lateral. La explicación de este efecto es una reducción de la probabilidad de reacción a bajas temperaturas para el grabado lateral, mientras que la velocidad de grabado vertical es sostenida debido al bombardeo iónico.

Autores como R. Dussart ^[19] han encontrado en experimentos de grabado de silicio, con mezclas de los gases SF_6/O_2 , la formación de una capa de óxido que inhibe el grabado lateral y que depende fuertemente de la temperatura de la muestra. Aseguran que a temperaturas de aproximadamente $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ es posible obtener perfiles anisotrópicos debido a la formación de dicha capa pasivadora, mientras que a temperatura ambiente esta capa se elimina, obteniendo perfiles de grabado isotrópicos. Por otro lado, M. Francou y Col. ^[20] demuestran que hay una fuerte dependencia con la orientación cristalográfica del silicio en sistemas de grabado criogénico, que a temperatura ambiente no se observa, favoreciendo el grabado anisotrópico y la velocidad de grabado a temperaturas menores de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el trabajo de M. Bounfnichel y Col. ^[18], se habla de la eliminación total de grabado lateral mediante el enfriamiento de la muestra a temperaturas por debajo de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y usando una etapa de pasivación añadiendo oxígeno al comienzo del proceso.

Por lo tanto, el grabado a temperaturas extremadamente bajas ($-150\text{ }^{\circ}\text{C}$) es de interés. La ventaja que se observa es un mejor control del grabado lateral y un incremento a la selectividad con respecto a materiales enmascarantes de polímeros.

CAPÍTULO 2

Metodología experimental

En este capítulo se da a conocer la metodología experimental utilizada en el presente trabajo, la cual consta de una breve explicación del diseño y elaboración de la mascarilla, el procedimiento para la preparación de las muestras utilizadas para la caracterización de procesos, que abarca desde la limpieza hasta la inspección de las muestras dando a conocer los pasos de la litografía de los distintos materiales enmascarantes utilizados, la descripción y explicación del sistema RIE/ICP y las partes que lo componen, los parámetros de proceso empleados y la metodología para medir la velocidad de grabado e inspección del perfil de las estructuras grabadas en cada muestra.

2.1. Diseño del *lay-out*.

Las estructuras contenidas en la mascarilla, son elegidas pensando en que posteriormente se medirá la velocidad de grabado y se observará el perfil de las paredes de las estructuras, considerando las dimensiones mínimas de la tecnología empleada en

el laboratorio (de 10 μm para el laboratorio de microelectrónica del INAOE) y las reglas de diseño de las estructuras. La elaboración del *lay-out*, el cual es un dibujo bidimensional que contiene todas las estructuras que se incluirán en la mascarilla; se diseña y desarrolla con la herramienta de cómputo llamada L-EDIT. Este programa permite diseñar y crear las figuras geométricas del *lay-out* para formar cada una de las estructuras, las cuales finalmente se transferirán a la oblea de silicio monocristalino para formar los chips de 4 mm de lado que posteriormente serán grabados. La figura 2.1 muestra el *lay-out* diseñado para la presente tesis.

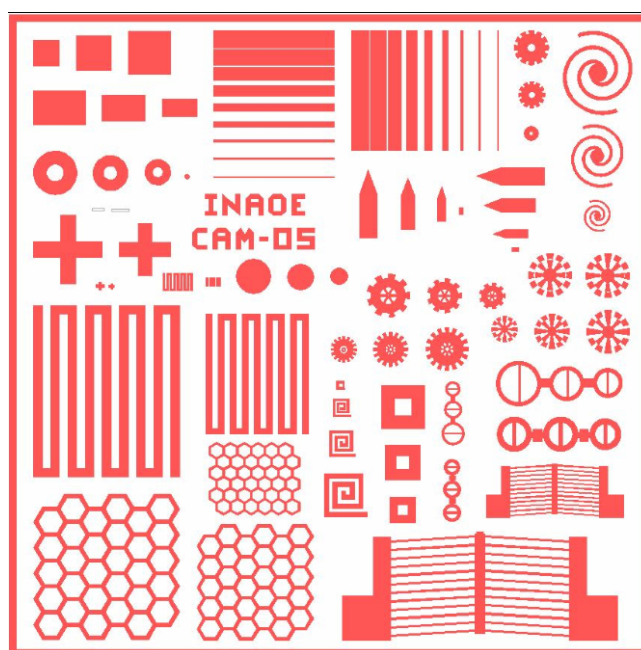


Figura 2.1. *Lay-out* utilizado para la elaboración de la mascarilla.

2.2. Fabricación de la mascarilla.

Una vez que se tiene el diseño del *lay-out*, éste se imprime con un *plotter* para realizarle una reducción de 200 veces su tamaño. De este modo se define la mascarilla de área de 2.5 por 2.5 cm que se utilizará para la fotolitografía. Esta mascarilla lleva un arreglo periódico de 13 por 13 chips, del *lay-out* reducido, separados entre ellos por líneas denominadas calles. Las calles horizontales que separan cada chip miden aproximadamente 325 μm y las verticales 275 μm . La mascarilla es una placa de vidrio de alta definición y las estructuras son formadas en la emulsión fotográfica. Una vez

obtenida la mascarilla, se realiza una inspección de sus patrones con un microscopio óptico. En esta etapa se realizan medidas de las estructuras para compararlas con las requeridas diseñadas en el *lay-out*.

2.3. Preparación de muestras: limpieza y litografía.

Para la elaboración de muestras se utilizaron obleas de 3 pulgadas de diámetro, con orientación (100) y de tipo n. A cada oblea se le realizó la litografía correspondiente. En esta etapa es importante señalar que hubo cuatro tipos de material enmascarante: resina positiva, aluminio, carburo de silicio y óxido de silicio.

Antes de realizar una litografía, las obleas pasan por una etapa de preparación, mediante una secuencia de limpiezas con el propósito de obtener superficies libre de impurezas. A continuación se muestra dicha secuencia:

- ♦ Limpieza húmeda preliminar *Piraña*: básicamente para la eliminación de material orgánico o metales en la superficie. Consta de la inmersión de las obleas en una solución 7:3 de $\text{H}_2\text{SO}_4\text{:H}_2\text{O}_2$ durante 10 min. Esta solución es exotérmica y alcanza una temperatura de 100-130 °C.
 - ♦ Enjuague en agua desionizada (DI) y secado.
 - ♦ Desengrasado: Consta de la inmersión de obleas en tricloroetileno durante 10 minutos en vibrador ultrasónico, seguido por otra inmersión similar de acetona.
 - ♦ Eliminación de óxido nativo: se realiza en una solución de $\text{HF:H}_2\text{O}$ (1:20) a temperatura ambiente durante aproximadamente 15 segundos.
 - ♦ Enjuague con agua DI.
 - ♦ El siguiente paso es limpieza RCA y consta de dos etapas: Limpieza estándar 1 y 2 (LE-1 y LE-2).
- 1.- **LE-1.** Elimina residuos orgánicos, algunos metales (i.e. Au, Ag, Cu, Ni, Cd y Cr), y partículas. La solución que se usa es 5:1:1 de $\text{H}_2\text{O:H}_2\text{O}_2\text{:NH}_4\text{OH}$ a 70°C durante 10 min.
 - ♦ Enjuague con agua DI.
 - 2.- **LE-2.** Elimina iones inorgánicos, alcalinos y metales pesados. Consta de una solución 6:1:1 de $\text{H}_2\text{O:HCl:H}_2\text{O}_2$ a 70°C durante 10 min.
 - ♦ Enjuague con agua DI en un sistema “súper Q” (agua DI fluyendo constantemente) durante 10 min o hasta que el agua alcance una resistividad de 18 MΩ.

- ♦ Secado de obleas en sistema de centrifuga durante 3 minutos.

Una vez que las obleas están limpias, lo siguiente es realizar la fotolitografía. Cada tipo de litografía se realiza diferente según el material enmascarante. En el caso de la resina, se emplearon diferentes espesores y por lo tanto diferentes procesos litográficos. A continuación se da una descripción secuencial de los pasos involucrados en cada una de los procesos.

1.- Litografía de resina positiva, espesor de aproximadamente 1.6 μm .

- 1) Deshidratación: 15 minutos en un horno de convección a 90 °C.
- 2) Aplicación de fotoresina (FR) positiva 215.
- 3) Centrifuga a 3000 rpm por 17 seg (para obtener de entre 1 y 2 μm de espesor).
- 4) El *prebake* se realiza a 90 °C durante 17 min.
- 5) Exposición a luz ultravioleta (UV) durante 7.5 seg. con alineadora.
- 6) Revelado positivo al 1.5% de hidróxido de sodio y agua durante 25 seg y enjuague con agua D.I.
- 7) *Postbake* a 110 °C durante 25 min.
- 8) Inspección de patrones en microscopio óptico
- 9) Medición de espesor de resina mediante perfilometría.

2.- Litografía de resina positiva, espesor de aproximadamente 5 μm .

- 1) Deshidratación de 30 minutos en un horno de convección a 90 °C.
- 2) Aplicación de FR positiva (Na P 1205).
- 3) Centrifuga a 1000 rpm por 15 seg.
- 4) El *prebake* a 110 °C durante 15 min (dado que es diferente tipo y grosor de FR).
- 5) Exposición a luz UV durante 50 seg.
- 6) Revelado positivo al 1.5% de hidróxido de sodio y agua, durante 90 seg y enjuague con agua D.I.
- 7) *Postbake* a 110 °C durante 30 min.

- 8) Inspección de patrones en microscopio óptico
- 9) Medición de espesor de resina mediante perfilometría.

3.- Litografía de resina positiva, espesor de aproximadamente 8 μm .

- 1) Deshidratación de 15 minutos a 110 °C.
- 2) Aplicación de FR positiva (Na P 1275).
- 3) Centrífuga a 1000 rpm por 20 seg.
- 4) El *prebake* se realiza a 110 °C durante 15 min.
- 5) Exposición a luz UV durante 70 seg.
- 6) Revelador positivo al 2.5% de hidróxido de sodio y agua, durante 60 seg y enjuague con agua D.I.
- 7) *Postbake* a 110 °C durante 150 min.
- 8) Inspección de patrones en microscopio óptico
- 9) Medición de espesor de resina mediante perfilometría.

4.- Litografía de Aluminio.

- 1) Deshidratación: 15 minutos en un horno de convección a 90 °C.
- 2) Evaporación de aluminio, aproximadamente 2 μm de espesor.
- 3) Aplicación de FR.
- 4) Centrífuga a 3000 rpm por 22 seg.
- 5) El *prebake* se realiza a 90 °C durante 17 min.
- 6) Exposición a luz UV durante 7.8 seg.
- 7) Revelador positivo al 1.5% de hidróxido de sodio y agua, durante 20 seg y enjuague con agua D.I.
- 8) *Postbake* a 110 °C durante 25 min.
- 9) Eliminación del Al desprotegido mediante grabado húmedo. Se realiza con solución "AL-ETCH" cuyas componentes son ácido fosfórico, ácido acético glacial y ácido nítrico [75:22:3]. El grabado se realiza durante 6 min.
- 10) Enjuague con agua DI.
- 11) Secado de obleas en sistema de centrífuga.

- 12) Eliminación de FR en acetona durante 3 min.
- 13) Inspección de patrones en microscopio óptico
- 14) Medición de espesor mediante perfilometría.

5.- Litografía de óxido de silicio.

- 1) Crecimiento húmedo de óxido de silicio en horno a 1100 °C por 2 horas, para obtener aproximadamente 1.5 µm de espesor.
- 2) Densificado, con las mismas condiciones y en el mismo sistema pero en ambiente de nitrógeno (60 ss) por 30 minutos.
- 3) Aplicación de FR positiva.
- 4) Centrífuga a 3000 rpm por 23 seg.
- 5) El *prebake* se realiza a 110 °C durante 10 min.
- 6) Exposición a luz UV durante 7.5 seg.
- 7) Revelador positivo al 1.5% de hidróxido de sodio y agua, durante 15 seg y enjuague con agua D.I.
- 8) Inspección de de patrones.
- 9) *Postbake* a 110 °C durante 15 min.
- 10) Eliminación del SiO₂ desprotegido mediante grabado húmedo; en solución “7:1” (NH₄F, HF y H₂O) a 32 °C.
- 11) Enjuague con agua DI.
- 12) Inspección de patrones en microscopio óptico.
- 13) Medición de espesor mediante perfilometría.

6.- Litografía de carburo de silicio.

- 1) Depósito de carburo de silicio en sistema PECVD por 80 minutos, para obtener aproximadamente 1.5 µm de espesor se utilizaron las siguientes condiciones:
 - Presión de 0.6 mtorr
 - Potencia de 250 W
 - Temperatura de 300 °C
 - Gases: Silano SiH₄ (12.5 sccm), metano CH₄ (375 sccm) y H (350 sccm).

- 2) Deshidratado: por 40 min a 110 °C en horno de convección.
- 3) Aplicación de FR positiva.
- 4) Centrífuga a 1500 rpm por 20 seg.
- 5) El *prebake* se realiza a 110 °C durante 10 min.
- 6) Exposición a luz UV durante 75 seg.
- 7) Revelador positivo al 2.5% de hidróxido de sodio y agua, durante 30 seg y enjuague con agua D.I.
- 8) Inspección de patrones.
- 9) *Postbake* a 110 °C durante 2 hrs.
- 10) Eliminación de carburo desprotegido mediante grabado seco en el sistema RIE, las condiciones son:
 - Potencia de 150 W
 - Presión de 75 mtorr.
 - Gas de CF₄.
 - Tiempo de grabado de 15 min.
- 11) Inspección de patrones en microscopio óptico.
- 12) Medición de espesor mediante perfilometría.

En las litografías de óxido y carburo de silicio no se elimina la resina, esto es debido a que en los dos casos se utilizan ambas capas como enmascarante con el propósito de mejorar la selectividad. En la inspección de patrones se determina si hubo sobre-grabado o falta de grabado de las estructuras formadas con cada tipo de enmascarante. Esto es, se miden los contornos las estructuras de interés, mediante la escala métrica de la lente del microscopio y las medidas se comparan con las diseñadas en el *lay-out* de la figura 2.1.

2.4. Sistema RIE/ICP.

Una vez realizada la litografía de cada uno de los materiales enmascarantes, lo siguiente es realizar el grabado de silicio en las zonas desprotegidas. Es en este punto donde comienza el trabajo de tesis, el grabado se llevará a cabo en el sistema RIE/ICP del laboratorio de microelectrónica del INAOE. Este sistema tiene la ventaja de poder

enciende la bomba *root* para aumentar la velocidad de bombeo hasta alcanzar aproximadamente 1 mtorr de presión. La ventana panorámica, frente a la cámara, ayuda a observar las características lumínicas del plasma que dependen del tipo y flujo de gases así como de la potencia. Una válvula de ventilación manual que esta colocada frente a la cámara ayuda a igualar a presión atmosférica dentro y fuera de ésta, con el fin de poder abrir la cámara una vez terminado el proceso de grabado. Cada modo de operación del sistema (RIE y/o ICP) requiere de una tapa de la cámara específica para cada proceso (número 16 y 17 de la figura 2.2).

2.4.1. Sistema en modo capacitivo, RIE.

Cuando la cámara de proceso utiliza la tapa número 16 de la figura 2.2, el sistema opera en modo de placas paralelas separadas entre si y formando el modo capacitivo. Mediante el controlador de flujo de masa se introducen los gases a un flujo específico. Se elije la presión de trabajo mediante el controlador de presión y finalmente se aplica la potencia RF para formar el plasma.

La fuente de RF que alimenta al sistema en este modo capacitivo, es una *MANITOU SYSTEM PB-3* (número 4 de la figura 2.2). Esta fuente tiene una impedancia de salida de 50 ohms y su red de acoplamiento está en su interior, cuenta con 2 potenciómetros para el ajuste de los capacitores (C_{Load} y C_{Tune}) de manera que se pueda acoplar el plasma con una mínima potencia reflejada. La máxima potencia que suministra es de 300 W con una resolución de hasta un 1%, ya que cuenta con un potenciómetro de 10 vueltas con el cual se ajusta la potencia de trabajo requerida.

2.4.2. Sistema en modo inductivo, ICP.

Para lograr obtener el sistema en modo inductivo, es necesario colocar la tapa de la cámara de procesos número 17 de la figura 2.2. Los flujos de gases y las presiones se manipulan de la misma manera que en el modo RIE. En este modo el plasma es generado por la bobina en espiral (número 18 de la figura 2.2), a la cual se le aplica una potencia de RF para ionizar el gas. Esta bobina, formada por tres espiras (en este caso

particular), se encuentra en la parte superior de la cámara y esta separada del plasma por medio de una placa de cuarzo. Aquí, la red de acoplamiento esta externa a la fuente y el ajuste de los capacitores (C_{Load} y C_{Tune}) se realiza desde la misma fuente. Debido al calentamiento de la bobina, producido por la corriente RF a través de ella, es necesario el enfriamiento de la misma. Esto se realiza mediante ventilación externa de aire y un flujo interno constante de agua (número 19 de la figura 2.2).

La fuente que suministra la potencia RF (13.56 Mhz) a la bobina, es una fuente *CESAR GENERATOR 1312* (número 3 de la figura 2.2). La potencia máxima que aplica la fuente es de 1200 W, con una potencia máxima reflejada de 200 W. Al igual que la fuente anterior, también cuenta con una impedancia de salida de 50 ohms. A diferencia de los reactores acoplados capacitivamente, que operan generalmente con potencias de decenas a centenas de watts, el reactor ICP puede operar en niveles de potencia de hasta 2 kW. Estas potencias elevadas y un acoplamiento eficiente permiten densidades de plasma mayores que las producidas por otros reactores y así poder obtener velocidades mucho más altas de grabado.

2.4.3. Sistema criogénico.

El sistema criogénico consiste en hacer fluir nitrógeno líquido en el interior del electrodo, este último debe garantizar un buen contacto térmico con la muestra para que ésta alcance temperaturas cercanas a -100 °C. El nitrógeno se deposita en el embudo (número 15 de la figura 2.2 donde las líneas punteadas indican su continuación al electrodo número 20 dentro de la cámara), el cual recorre el electrodo y sale en forma de gas. Consecuentemente, el equipo RIE/ICP cuenta con una entrada para un sensor de temperatura basado en un termopar. Mediante este sistema es posible medir y controlar la temperatura de la muestra.

2.4.4. Medidores de presión y controladores de flujo de masa.

Este equipo cuenta con dos sistemas que miden la presión dentro de la cámara, estos sistemas son los siguientes:

Un *Baratron* modelo 622A01TCE (número 14 de la figura 2.2) que está conectado a un controlador de presión MKS 651C (número 7 de la figura 2.2). Este último mide la presión dentro de la cámara mediante una válvula que la controla. El controlador está provisto de 5 *set points* programables y cada uno tiene la opción para programarse con respecto a la presión o posición de la válvula requerida. La lectura de presión que arroja este equipo se puede exhibir en unidades de torr, mtorr, mbar, μ bar, Pascal, kPa, etc. La figura 2.3 esquematiza el panel de control de este equipo.

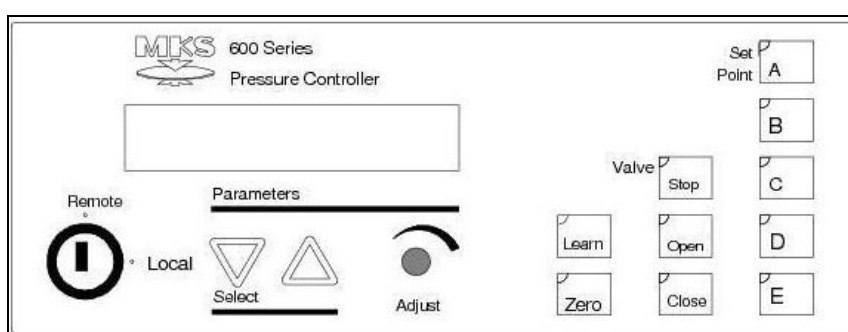


Figura 2.3. Panel del controlador de presión MKS 651C.

El otro sistema alternativo está compuesto por un sensor de presión *PIRANI* MKS (número 13 de la figura 2.2) que también se encuentra conectado al interior de la cámara y envía la señal a un lector de presión, CEP 947 (número 6 de la figura 2.2). Las unidades de presión que puede exhibir están en unidades de torr, millibar o Pascal. La figura 2.4 muestra el sensor y el lector de presión descritos.



Figura 2.4. Lector CEP 947 y sensor de presión *PIRANI*.

Por otro lado, el equipo cuenta con cuatro controladores de flujo de masa MKS 2179 que regulan el flujo de los gases que se introducen en la cámara, dos de los cuales poseen un rango de flujo máximo de 100 sccm, SF_6 y CCl_2F_2 en el canal 1 y CHF_3 y CF_4 en el 3, mientras que los otros dos controladores permiten un flujo máximo de 10 sccm para la entrada de gases aditivos, O_2 en el canal 4 y Ar en el 2. Los controladores están conectados al lector MKS 1479 (número 5 de la figura 2.2) el cual cuenta con 4 canales para los diferentes gases y permite ajustar los flujos.



a)



b)

Figura 2.5. a) Controladores de flujo de masa MKS 2179 y b) lector MKS 1479.

2.5. Parámetros del plasma.

Las muestras empleadas en los experimentos tienen un área aproximada de 1cm^2 y contienen aproximadamente entre 4 y 6 chips. Los tiempos de grabado fueron de 3 a 5 minutos.

A pesar de que se pueden utilizar otros halógenos para generar plasmas reactivos con silicio (como son los basados en cloro o bromo), se trabaja con plasmas basados en flúor. De este modo se utilizan 5 tipos de gases y sus mezclas: SF_6 , Ar, CHF_3 , CF_4 y O_2 . Los plasmas generados son:

SF_6 con flujo de 50 y 100 sccm.

SF_6/Ar con flujos de 100/10 y 50/10 sccm

SF_6/O_2 con flujos de 100/10 y 50/10 sccm

SF_6/CHF_3 con flujos de 100/10 y 100/50 sccm

SF_6/CF_4 con flujos de 50/10, 40/20, 50/25 y 50/50 sccm

$\text{SF}_6/\text{CHF}_3/\text{O}_2$ con flujos de 100/50/10, 100/10/10, 50/50/10 y 100/25/10 sccm

$\text{SF}_6/\text{CHF}_3/\text{Ar}/\text{O}_2$ con flujos de 100/10/100/10, 50/10/50/10 y 25/5/10/10 sccm

El nivel de vacío inicial debe ser de aproximadamente 1 mtorr, y las diferentes presiones de los gases dentro de la cámara que se manejaron son de 25, 35, 40, 50 y 75 mtorr.

Se utilizaron potencias de: 100, 200, 300, 500 y 750 W en la fuente de ICP, mientras que para la fuente RIE de 25, 50, 100, 200 y 250 W. En la mayoría de los experimentos se utilizó la combinación de ambas fuentes para garantizar que el grabado sea influenciado por sus componentes física y química.

Debido a que la cámara tiene dimensiones muy grandes que alejan a la bobina inductora de la muestra, se requiere que ésta se encuentre lo más cerca de dicha bobina para obtener una mejor velocidad de grabado por el efecto del plasma de mayor densidad cerca de esa zona. Por tal motivo se elaboró un cilindro de acero inoxidable de 5 cm de diámetro, que incluye un tornillo de tal modo que se puedan tener diferentes alturas. Se coloca sobre el electrodo dentro de la cámara, se utiliza como una mesa elevadora y en su superficie se coloca la muestra a grabar. De este modo se puede realizar el proceso a diferentes alturas del electrodo. Esto permite caracterizar la velocidad de grabado a diferentes distancias de la bobina inductora. En particular, para los resultados del presente trabajo, se emplearon alturas de 6, 10 y 20 cm, medidas de la base del cilindro al cristal de cuarzo que separa a la bobina de la cámara de procesos.

2.6. Medición de la velocidad de grabado e inspección de la anisotropía.

Para medir la velocidad de grabado realizada con el sistema RIE/ICP en cada experimento, se utilizó un perfilómetro *ALPHA-STEP* modelo 200. Antes de la medición, el material enmascarante debe ser retirado. Se determina la altura del escalón de la estructura y se divide entre el tiempo en el que estuvo la muestra expuesta al plasma, la unidad de velocidad de grabado se expresa en micras por minuto ($\mu\text{m}/\text{min}$). Los valores de las alturas se obtienen de promediar las mediciones hechas en diferentes *chips* y estructuras de cada muestra. Con el fin de ser consistentes, se procuró medir las mismas estructuras en cada muestra.

Para conocer el tipo de perfil de las estructuras, cada muestra grabada se observa en un microscopio de barrido electrónico (SEM) *HITACHI* modelo S-510. Este microscopio, en donde se pueden observar las estructuras en forma tridimensional, puede posicionar cada estructura lateralmente y así observar el perfil si es anisotrópico o no. Se procuró tomar fotografías de las mismas estructuras de cada muestra para poder realizar comparaciones.

2.7. Enmascarantes.

Se utiliza aluminio (Al) como enmascarante por su alta selectividad con silicio y los productos de flúor con aluminio no son volátiles^[15,19].

La fotoresina (FR) es el material más simple de usar y está constituida por materiales orgánicos que favorecen el depósito de la capa de polímero. Sin embargo, la resina es grabada tanto por reacciones químicas con átomos de halógenos como por erosiones inducidas por los iones^[9].

Se utiliza SiO_2 debido a que cuando es expuesto a alta densidad de plasmas deficientes en F, como es el caso de CF_4 , es posible crecer la película de polímero, aunque con este material es difícil notar la formación de dicha capa por su naturaleza inorgánica.

Por último se utiliza SiC el cual ayuda a promover el depósito de la capa de polímero debido a su naturaleza basada en carbono.

CAPÍTULO 3

Resultados y discusión

En este capítulo se dan a conocer los resultados experimentales del presente trabajo. Los procesos de grabado fueron caracterizados en función de la presión, potencia, distancia de la muestra al plasma de mayor densidad (h), flujo y mezcla de gases, con el fin de obtener una alta velocidad de grabado y perfil anisotrópico de las paredes de las estructuras. En cada experimento se realiza un análisis de los mecanismos de grabado. Básicamente se trabaja con plasmas a base de flúor, que es una química sencilla, económica y de fácil adquisición.

3.1. Análisis para determinar la máxima velocidad de grabado.

La presión de trabajo en la cámara es un parámetro crítico que ayuda a determinar el mecanismo predominante en un proceso de grabado. Es por esto, que la primera serie de experimentos fue pensada para encontrar el valor de presión donde se obtenga la máxima velocidad de grabado como una contribución de ambos mecanismos, físico y químico. La contribución del mecanismo químico en el proceso nos llevará a obtener una alta velocidad de grabado por las reacciones de los radicales neutros con el silicio, mientras que el mecanismo físico influenciado por la polarización de la muestra, podrá

por una parte contribuir al aumento de la velocidad de grabado por el bombardeo de iones sobre la superficie, y por otro a promover el grabado vertical de las estructuras.

3.1.1. Caracterización del grabado en función de la presión.

En la figura 3.1 se muestran los resultados de la velocidad de grabado en función de la presión, las muestras se colocaron a 20 cm de la zona del plasma denso, se utilizó aluminio como material enmascarante y el flujo del gas reactivo SF_6 fue de 100 sccm mientras que el de los gases aditivos, Ar y O_2 , fue de 10 sccm. La potencia ICP fue de 500 y 750 W, mientras que la potencia RIE varió de 0 a 100 W. La variación de presión fue de 20 a 75 mtorr, encontrándose dentro del rango de un proceso de grabado asistido por iones (ver figura 1.8, capítulo 1), es decir, con contribución de ambos mecanismos. El valor de *dc bias* se muestra en cada punto cuando es aplicada la potencia RIE.

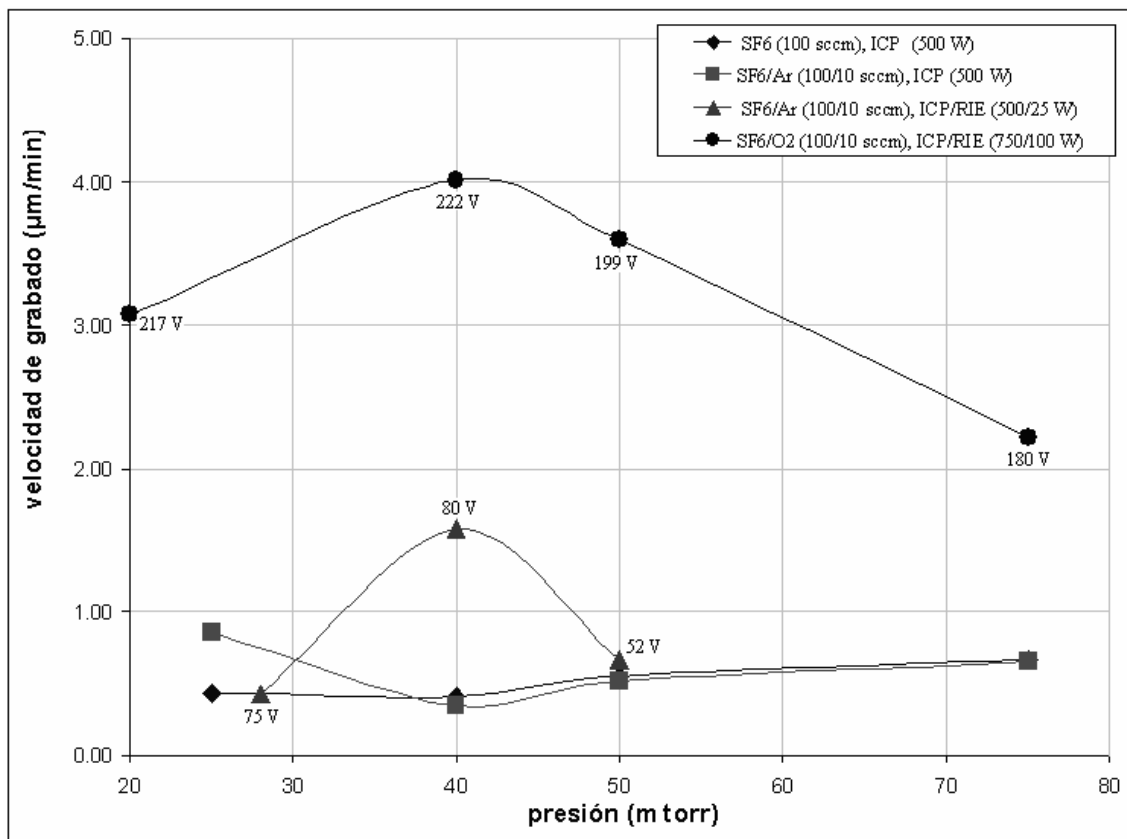


Figura 3.1. Velocidad de grabado en función de la presión, enmascarante de Al y $h = 20$ cm.

Los resultados obtenidos con plasma de SF₆ y potencia ICP de 500 W muestran poca variación conforme aumenta la presión, los valores de velocidad obtenidos están por debajo de 1 µm/min. El proceso es dominado por las reacciones de F con Si, sin embargo la lejanía de la muestra de la región del plasma denso, lleva a obtener valores muy bajos de la velocidad. Se puede suponer que acercando la muestra a esta región, se obtendrá una velocidad mayor.

Al adicionar Ar al gas SF₆ y manteniendo la misma potencia ICP, se observa un leve incremento de la velocidad a presión de 25 mtorr, esto es debido probablemente al hecho de que a ese nivel de presión el camino medio libre se ve incrementado y como consecuencia se presenta un mayor bombardeo iónico promovido por el Ar. Mientras que a presiones por arriba de los 25 mtorr, el argón comienza a diluir al SF₆ reflejándose en una baja velocidad de grabado con resultados similares que en el caso de plasma de SF₆ únicamente. Nuevamente se puede afirmar que la lejanía de la muestra del plasma denso es el factor principal que lleva a obtener bajos valores de velocidad.

Al polarizar la muestra con una potencia RIE de 25 W al plasma de SF₆/Ar, observamos que existe un máximo de velocidad a una presión de 40 mtorr y una tensión máxima de autopolarización de 80 V. En este punto podemos estimar que ambas componentes están balanceadas y contribuyen de igual forma en el proceso, reflejándose en el aumento de la velocidad de grabado.

Con el objetivo de incrementar más aún la velocidad de grabado, se aumentan las potencias de alimentación, 750 W en ICP y 100 W en RIE, y se adiciona O₂ al gas SF₆. Observamos un incremento considerable de la velocidad de grabado, alcanzando un máximo de 4 µm/min a presión de 40 mtorr y un valor máximo de tensión de autopolarización de 222 V. Con este máximo se comprueba que en este valor de presión ambas componentes contribuyen al grabado, y es el que se usará en todos los experimentos posteriores-

3.1.2. Polarización de la muestra y distancia al plasma denso.

La potencia RF aplicada al electrodo que contiene a la muestra junto con la presión, generan una tensión de autopolarización que controla la energía de los iones que bombardean la superficie del material independientemente del flujo de iones y los reactivos neutros en el plasma. Por tal motivo, la segunda serie de experimentos se

realizó pensando en los efectos de la potencia RIE y de la distancia de la muestra al plasma de mayor densidad sobre la velocidad de grabado en base a resultados obtenidos en la figura 3.1.

En la figura 3.2 se presentan los resultados de la velocidad de grabado en función de la potencia de polarización de la muestra y la distancia al plasma denso. La variación de potencia RIE fue de 0 a 100 W, mientras que la potencia ICP se mantuvo constante en 750 W y presión de 40 mtorr. La muestra se colocó a distancias de 20, 10 y 6 cm del plasma denso. Se mantuvieron el tipo de mezclas y los flujos que la serie anterior.

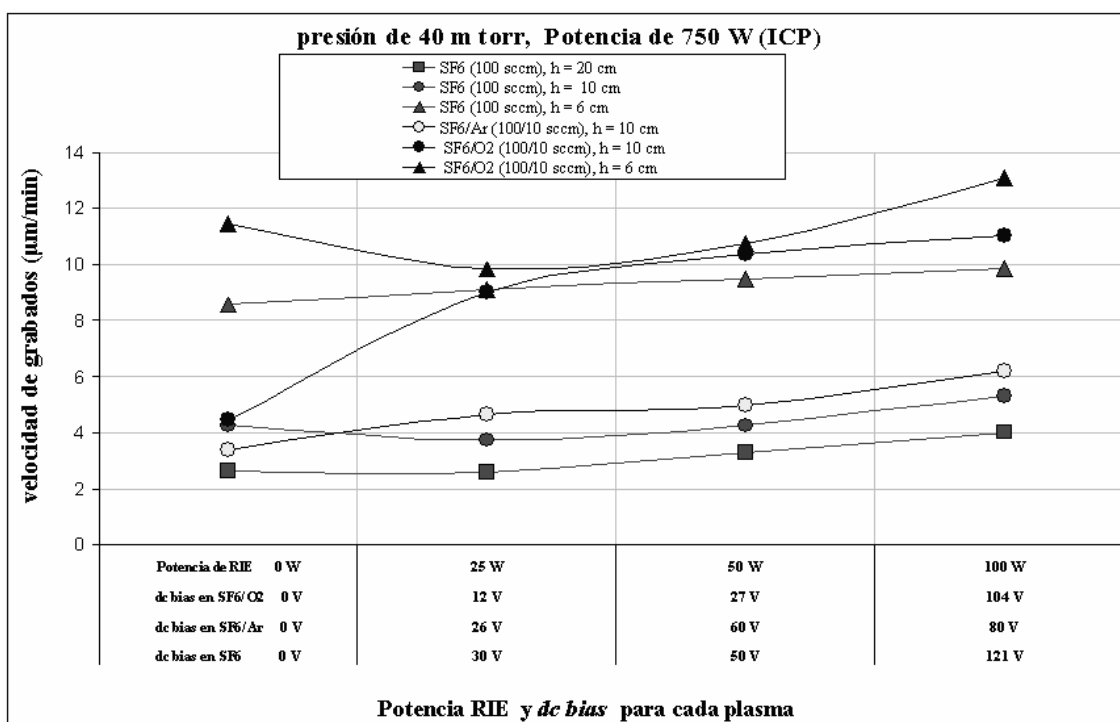


Figura 3.2. Velocidad de grabado en función de la potencia RIE y distancia al plasma denso.

Los resultados con plasma de SF₆ a diferentes alturas, muestran que conforme la muestra se acerca al plasma de mayor densidad, la velocidad de grabado se incrementa. A 20 cm de distancia la máxima velocidad fue de 4 μm/min, a 10 cm de 5 μm/min, y a 6 cm de 10 μm/min. Con la mezcla de SF₆/O₂, la variación no fue tan notable, a 10 cm se obtuvo una máxima velocidad de 11 μm/min y a 6 cm de 13 μm/min. Sin embargo, en general podemos afirmar que la distancia es factor primordial para la obtención de altas velocidades de grabado, requisito indispensable para la fabricación de MEMS.

Respecto a la variación de la potencia RIE, en la mayoría de los casos se observó poco incremento de la velocidad al aumentar la potencia. Se observa que el valor de la tensión de autopolarización es bajo, lo que podría ser un indicativo de que el bombardeo

iónico no es suficiente para contribuir significativamente en el grabado. En el caso de la mezcla SF_6/O_2 el incremento de la potencia (de 0 a 25 W) a una distancia de 10 cm, se refleja en una mayor producción de radicales de flúor, es por esto que existe un aumento considerable de la velocidad, mientras que en 6 cm, este efecto no es notable debido a la cercanía de la muestra en la región de plasma denso.

En trabajos como los de Sergi Gomez ^[21], se observó un crecimiento monótono de la velocidad de grabado conforme aumenta el voltaje aplicado al sustrato (0 – 100 V) en un sistema *Transformer Coupled Plasma* con mezcla de SF_6/O_2 , en 100 V la velocidad converge a un valor máximo y permanece constante para voltajes mayores de 100 V. Por otro lado, W. J. Park ^[22] en un sistema ICP con plasma de SF_6/O_2 (130/13 sccm), obtiene un aumento de la velocidad de grabado producido por la aplicación de potencia al electrodo en el intervalo de 0 - 40 W, obteniendo una máxima velocidad en 40 W después de este valor la velocidad permanece constante. Los resultados de esta serie de experimentos presentan la misma tendencia que las referencias mencionadas. La máxima velocidad de grabado es de 13 $\mu\text{m}/\text{min}$ con potencia RIE de 100 W y plasma de SF_6/O_2 , este valor se coloca como el máximo obtenido.

3.2. Caracterización de la anisotropía.

En esta sección se varían parámetros del proceso para realizar un análisis de los perfiles de las estructuras grabadas, para buscar que éstas tiendan a ser, o incluso sean, totalmente verticales. Los experimentos se realizan utilizando materiales enmascarantes como Fotoresina, Al y SiO_2 .

3.2.1. Resultados con enmascarante de fotoresina.

La fotoresina (FR) está constituida por materiales orgánicos que favorece al depósito de la capa de polímero para proteger las estructuras contra el grabado espontáneo y obtener así perfiles verticales. Se utilizaron tres tipos de FR, 215 con espesor de alrededor 1.6 μm , Na P 1205 con espesor de aproximadamente 5 μm y Na P 1275 con espesor entre 8 y 10 μm . Con el propósito de obtener mayor selectividad, ya

que se observó que espesores comúnmente utilizados para fabricación de dispositivos (de entre 1 y 3 μm) no fueron selectivos, se empleó el espesor mayor. Trabajos como el de C. J. D. Craigie ^[23] obtienen perfiles anisotrópicos con grandes velocidades de grabado utilizando enmascarante de FR con espesor de 10 μm . Por otro lado, M. Elwenspoek ^[9] observa que la selectividad FR/Si no es muy alta y es difícil controlarla, especialmente cuando hay átomos de O y F en el plasma.

La figura 3.3 muestra las velocidades de grabado obtenidas con enmascarante de FR Na P 1275.

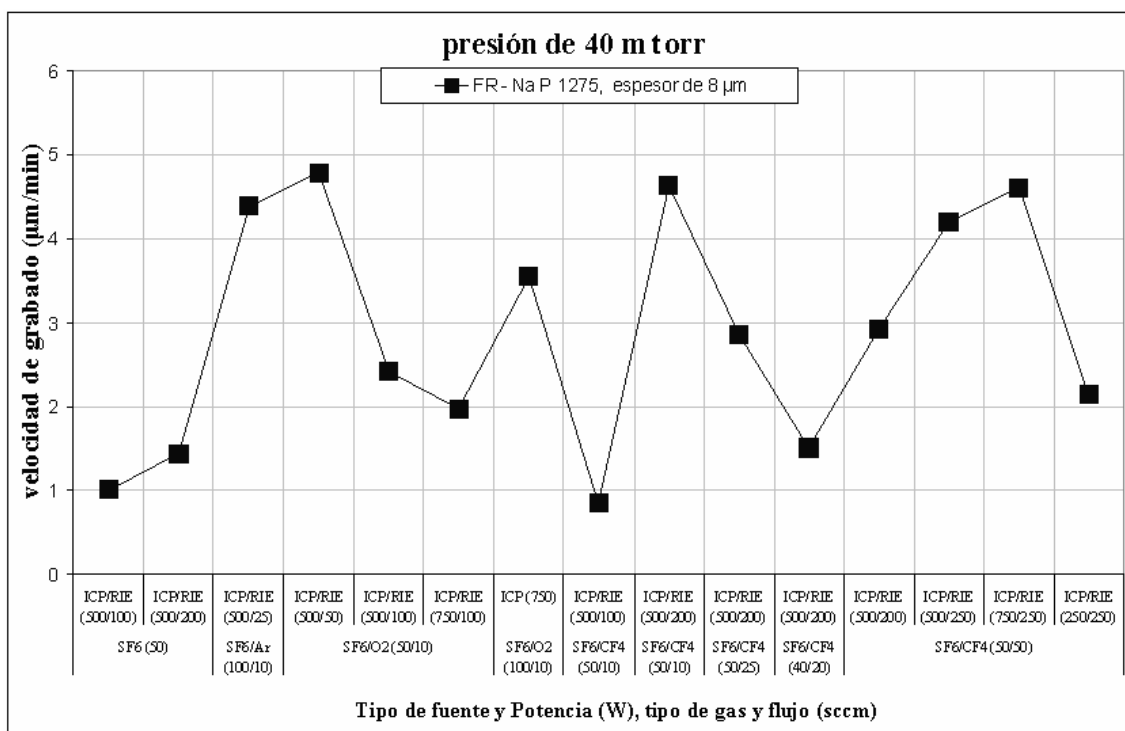


Figura 3.3. Resultados de velocidad de grabado en diferentes plasmas empleando FR como material enmascarante.

En todos los experimentos de esta figura la selectividad fue mínima y las estructuras fueron dañadas, siendo estos resultados poco confiables. A manera de demostrar la mala selectividad de la FR con el Si en los plasmas empleados en este trabajo, se muestra la figura 3.4 con algunas fotos tomadas a las estructuras.

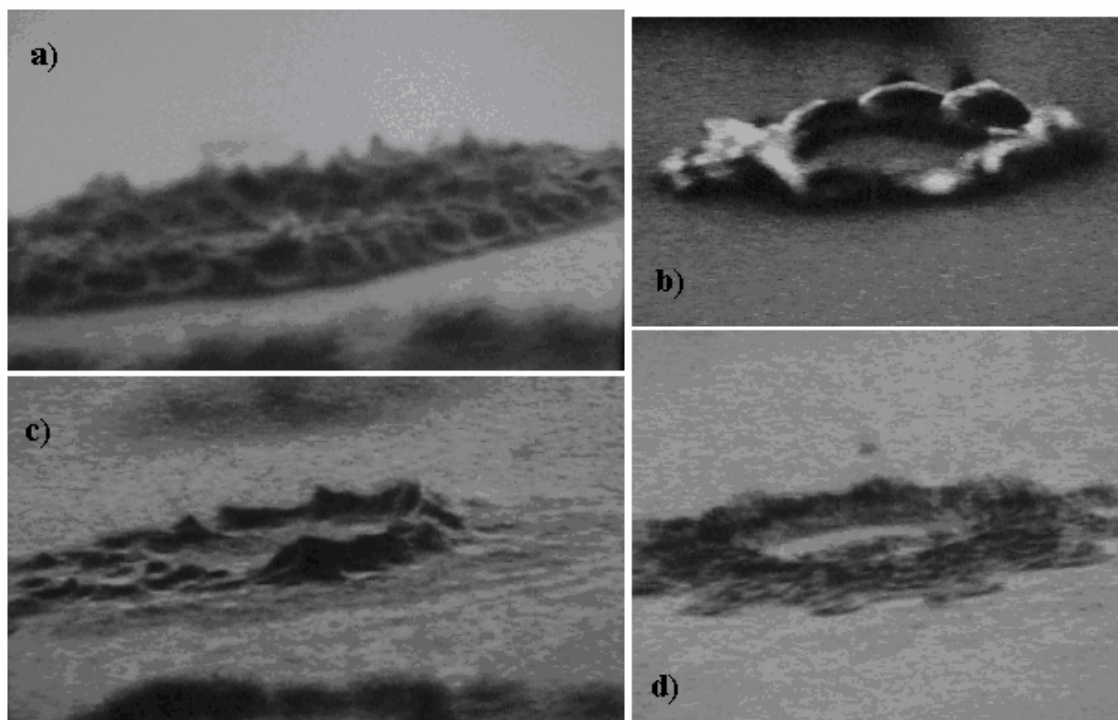


Figura 3.4. Fotos de las estructuras mostrando la selectividad de la FR como enmascarante.

Las fotos de la figura 3.4, corresponden a los experimentos en plasmas de a) SF_6 , b) SF_6/Ar , c) SF_6/O_2 y d) SF_6/CF_4 . Estos resultados demuestran que la FR no es un material resistente a grabados con plasma, por lo que en el análisis posterior no se considera este material enmascarante.

3.2.2. Análisis de resultados mediante tipo de plasma.

Se realiza el análisis de los experimentos separándolos por tipo de plasma, con el propósito de observar detalladamente el comportamiento de la velocidad de grabado y anisotropía, y así poder considerar el mejor experimento en base a estas dos características.

3.2.2.1. Resultados de grabados con plasma de SF_6 .

En la figura 3.5 se muestran los valores de la velocidad de grabado empleando Al y SiO_2 como enmascarantes. Se observa que la velocidad de grabado se incrementa con

el aumento de flujo (50 a 100 sccm), así también conforme aumenta la potencia de ICP (500 a 750 W) esto refleja la contribución química al grabado con el aumento en la densidad de especies reactivas de flúor. Por otro lado, para todos los casos se sigue observando el poco aumento de la velocidad de grabado en función de la potencia RIE. Un incremento notable se observa cuando la muestra se coloca a 6cm del plasma denso.

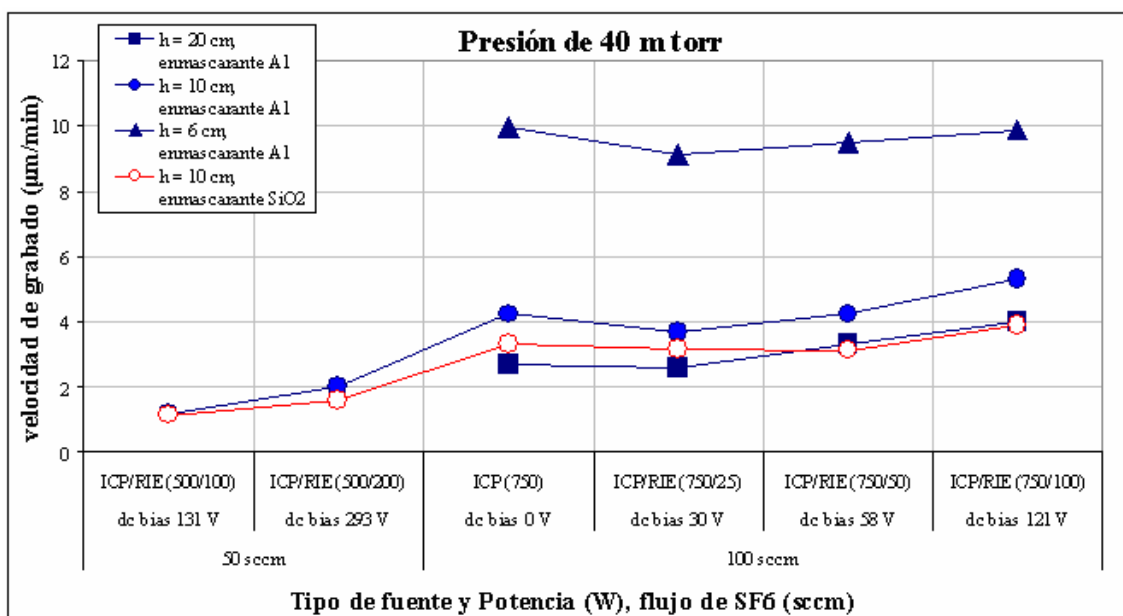


Figura 3.5. Resultados de la velocidad de grabado en plasmas de SF₆.

En lo que respecta al tipo de enmascarante, existe una mínima diferencia entre los resultados a altura 10 cm. Esta pequeña diferencia es debida a que el Al promueve más las reacciones de flúor con silicio y consecuentemente el grabado, en comparación con el SiO₂.

Respecto al análisis de la anisotropía, la figura 3.6 muestra fotos de estructuras grabadas de algunos de los experimentos en plasma de SF₆. En las estructuras de las fotos a) y b), el flujo es de 50 sccm y las potencias de 500/200 W en fuentes ICP/RIE, de *bias* de 293 V, con enmascarantes de Al y SiO₂ respectivamente, mientras que en las fotos c) y d) el flujo es de 100 sccm y las potencias de 750/0 W en fuentes ICP/RIE, con enmascarantes de Al y SiO₂ respectivamente. Los experimentos de estas fotos se realizaron a 10 cm del plasma de mayor densidad.

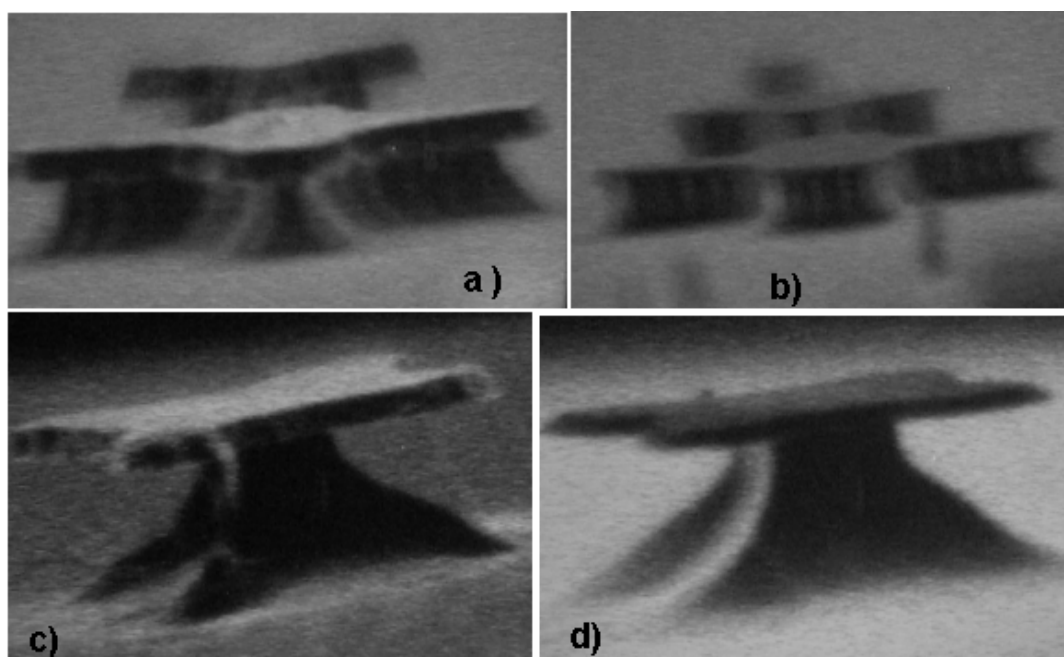


Figura 3.6. Estructuras grabadas en plasmas de SF_6 .

Las fotos a) y b) presentan un menor grado de grabado lateral debido al bajo valor de potencia ICP y alto valor de *dc bias*, el cual genera un mayor bombardeo de iones, promoviendo con esto paredes más verticales. Por otro lado, las fotos c) y d) presentan un alto grabado lateral producto del alto valor de potencia ICP y por la falta de bombardeo iónico direccional generado por la potencia RIE

Con el propósito de comparar estructuras con diferente aplicación de bombardeo iónico, las fotos de la figura 3.7 muestran los perfiles de grabado en plasma de SF_6 bajo condiciones de potencia ICP de 750 W, flujo de 100 sccm, distancia al plasma denso de 10 cm, las fotos a) y b) con potencia RIE de 25 W, *dc bias* de 30 V, enmascarantes de Al y SiO_2 respectivamente, c) y d) con potencia RIE de 100 W, *dc bias* de 100 V, enmascarantes de Al y SiO_2 respectivamente. Aunque los perfiles obtenidos debieran ser consistentes con los valores de *dc-bias* (mayor grabado lateral cuando se tiene menor voltaje de autopolarización), se observa en todos los casos un fuerte grabado lateral. El *dc bias* generado no produce suficiente bombardeo iónico para promover la anisotropía.

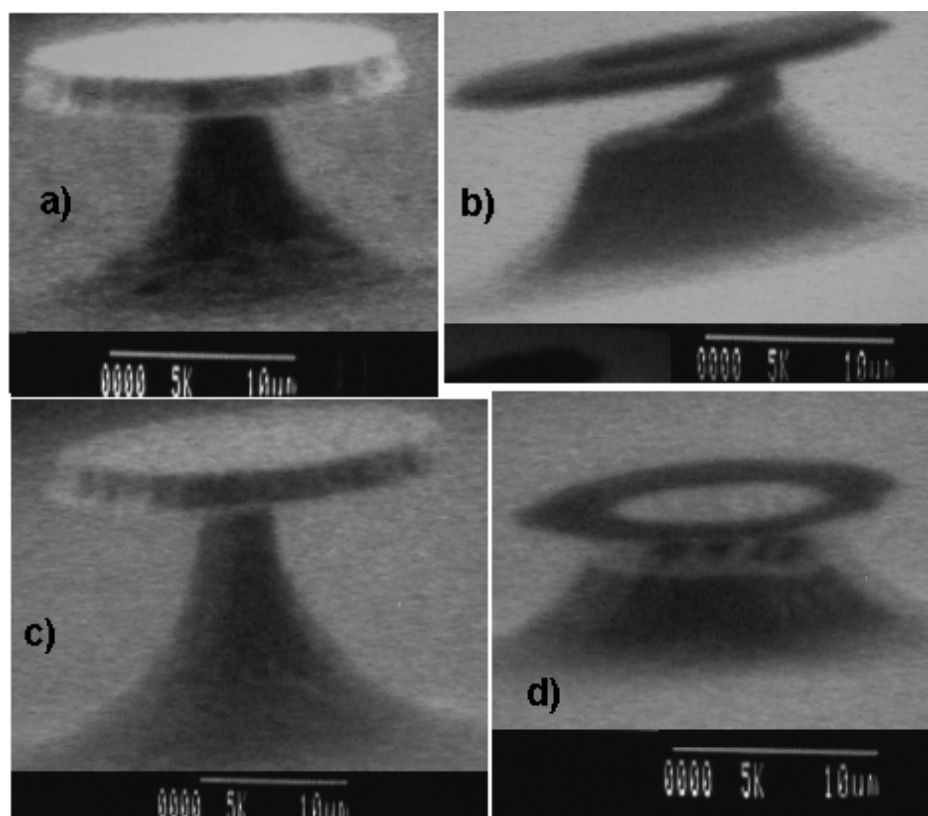


Figura 3.7. Estructuras grabadas en plasmas de SF_6 .

La figura 3.8 muestra la diferencia de las estructuras grabadas a distancia de, a) 6 cm y b) 10 cm del plasma de mayor densidad. En ambas se utiliza enmascarante de Al, las potencias de las fuentes ICP/RIE son 750/100 W y el flujo es de 100 sccm.

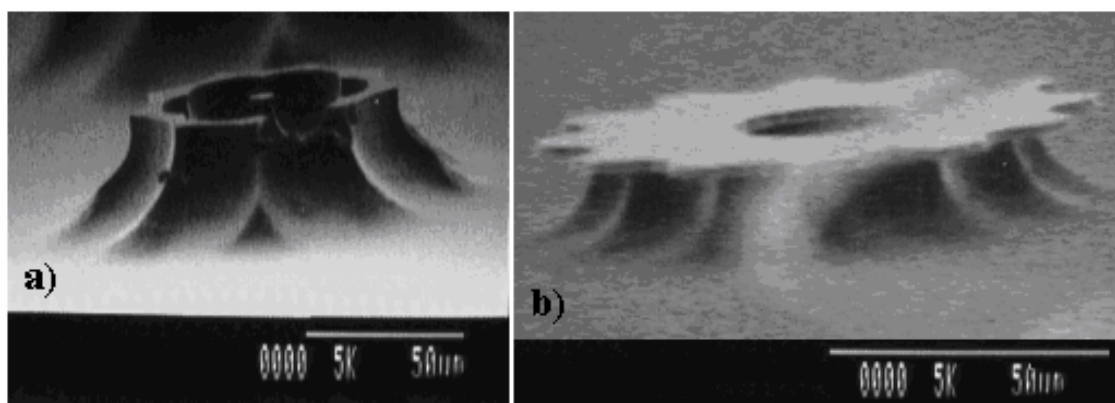


Figura 3.8. Estructuras grabadas en plasmas de SF_6 .

La diferencia de las estructuras grabadas es notoria, la selectividad del Al (y en general para cualquier enmascarante) esta restringida cuando se graba a distancias cercanas del plasma de mayor densidad. Sin embargo es más probable pensar que por la alta contribución química al grabado, el alto grabado lateral observado en la foto a) haya

llegado al grado de desprender el enmascarante, mientras que en la foto b) el enmascarante permanece.

El grabado realizado con plasma de SF_6 , es dominado en su mayoría por la componente química y la velocidad máxima alcanzada fue de $10 \mu\text{m}/\text{min}$ en condiciones de presión de 40 mtorr, potencia ICP de 750 W, flujo de 100 sccm, distancia al plasma de mayor densidad de 6 cm, utilizando enmascarante de Al y obteniendo en general perfiles isotrópicos.

Al utilizar SiO_2 como enmascarante en plasmas basados en flúor, es posible obtener una buena selectividad (aunque no mejor que el Al) ya que la razón de velocidades de grabado en Si/ SiO_2 por átomos de flúor es mayor de 30 al usar plasmas basados en flúor. Sin embargo, en la zona de grabado asistido por iones y usando SF_6 los perfiles resultan en altos niveles de grabado lateral con enmascarante de SiO_2 , resultando grabados isotrópicos ^[15].

Estructuras con tendencia anisotrópica se dan con la aplicación de potencia RIE, menor valor de potencia ICP y alto *dc bias*. Sin embargo, el valor de la velocidad de grabado se ve reducido considerablemente. Finalmente podemos decir que existe un compromiso entre alta velocidad de grabado y perfil anisotrópico.

3.2.2.2. Resultados de grabados con plasma de SF_6/Ar .

En la figura 3.9 se muestran los valores de la velocidad de grabado empleando Al y SiO_2 como enmascarantes en el plasma de SF_6 con Ar como gas aditivo. Se observa que en todos los resultados la velocidad de grabado se incrementa con el aumento de la potencia de RIE (0 a 100 W), incrementado de esta forma el voltaje de autopolarización y por lo tanto el bombardeo iónico, contribuyendo con la componente física del grabado. También se nota un incremento de la velocidad de grabado con la potencia de ICP cuando va de 500 a 750 W, indicando que existe una aportación química al grabado.

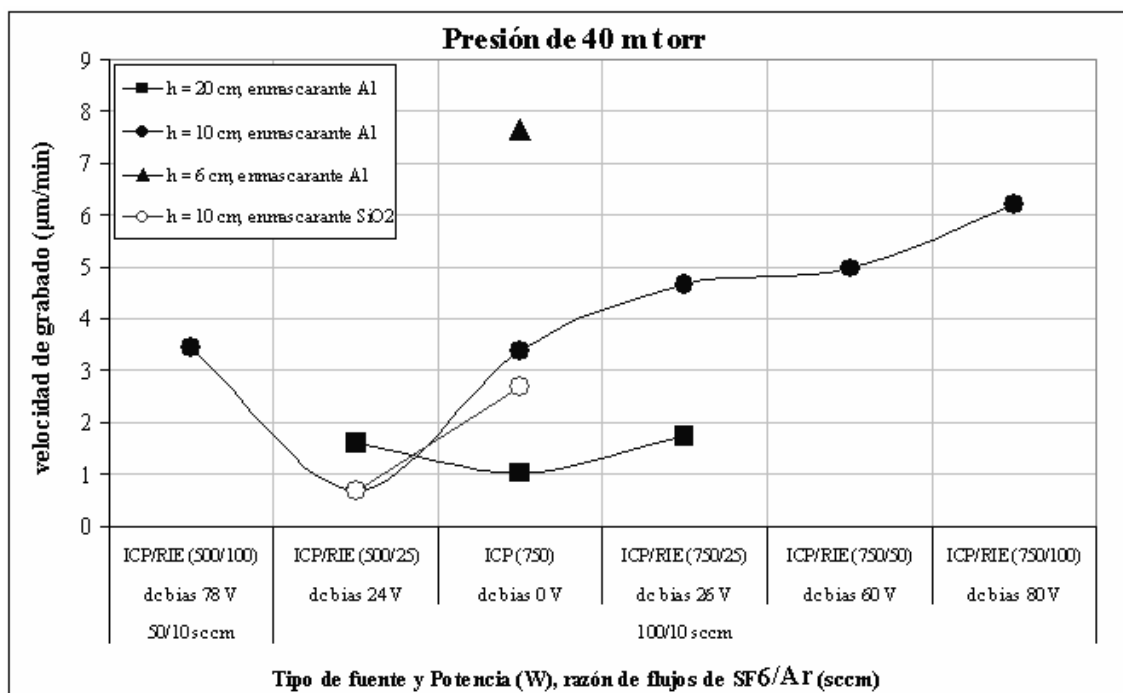


Figura 3.9. Resultados de la velocidad de grabado en plasmas de SF₆/Ar.

En estos resultados se sigue observando que la velocidad aumenta cuando la muestra se acerca al plasma de mayor densidad, mostrando una velocidad máxima cuando se coloca a 6 cm del plasma denso.

Respecto a los enmascarantes, se observa un comportamiento similar en ambos. Por otro lado, se observa que la velocidad de grabado responde más al cambio de potencia RIE, de 25 a 100 W, que al cambio de flujo, de 50 a 100 sccm.

La figura 3.10 muestra fotos de algunas estructuras grabadas en plasma de SF₆/Ar, las condiciones son de 40 mtorr de presión, flujos de 100/10 sccm y todas las muestras se grabaron a 10 cm del plasma denso. En las estructuras de las fotos a) y b) las potencias son de 750/0 W, mientras que en la c) son de 750/100 W de las fuentes ICP/RIE, respectivamente, con un *dc bias* de 80 V. Solo la muestra de la foto a) utiliza enmascarante de Al, las demás usan SiO₂.

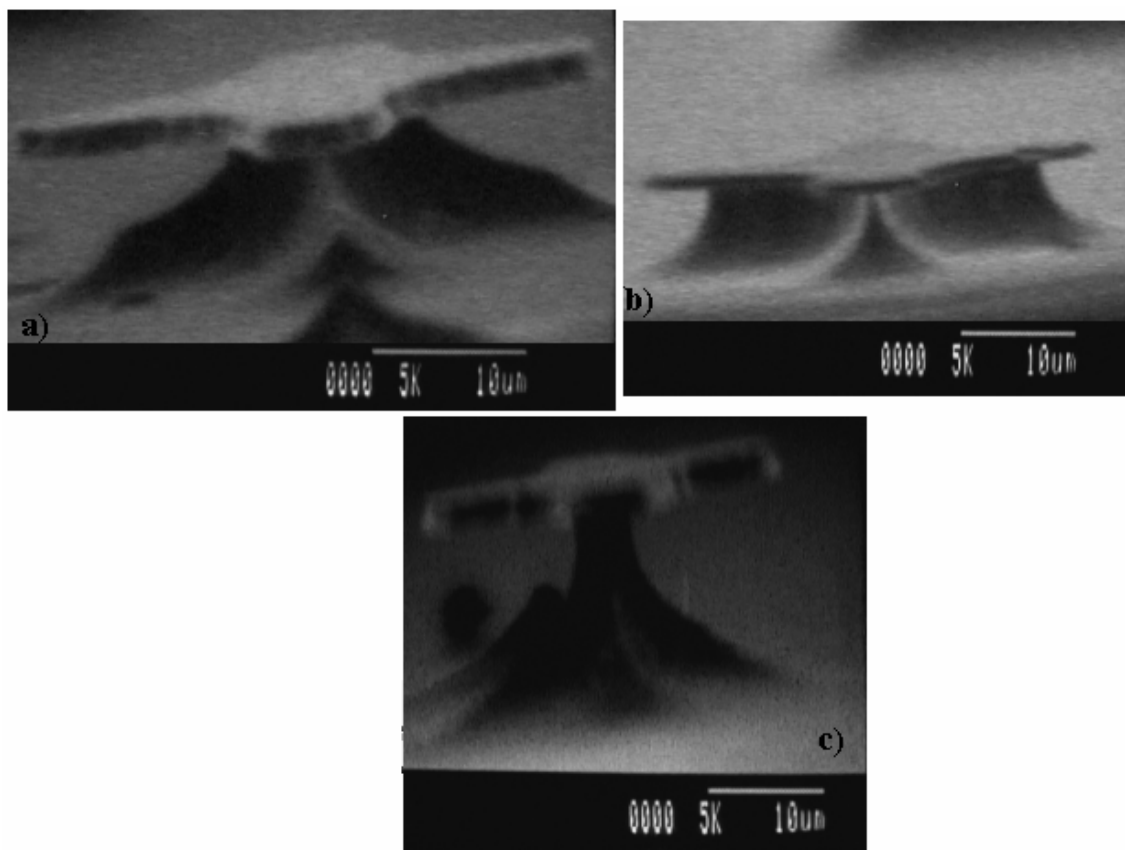


Figura 3.10. Estructuras grabadas en plasmas de SF_6/Ar .

A comparar las fotos a) y b), considerando que fueron grabadas con las mismas condiciones, el nivel de grabado lateral es mayor en a), ya que enmascarante de aluminio realiza su propia contribución a la componente química del proceso, lo cual también contribuye al grabado isotrópico. En la imagen de la foto c) se observa que la aportación física del bombardeo iónico no es suficiente ante la fuerte contribución química debida a la gran producción de reactivos y reacciones de las condiciones del plasma, lo cual se refleja en el grabado espontáneo y consecuentemente isotrópico de las estructuras.

Respecto al daño en la superficie del enmascarante, se muestran las fotos de la figura 3.11, en donde se puede apreciar el daño en el Al inducido por los iones estando cerca del plasma denso, ya que este experimento es el único realizado a 6 cm. La muestra fue grabada incluso sin la aportación de la energía al bombardeo, solamente se densifica el plasma con 750 W en la fuente ICP y flujos de 100/10 sccm.

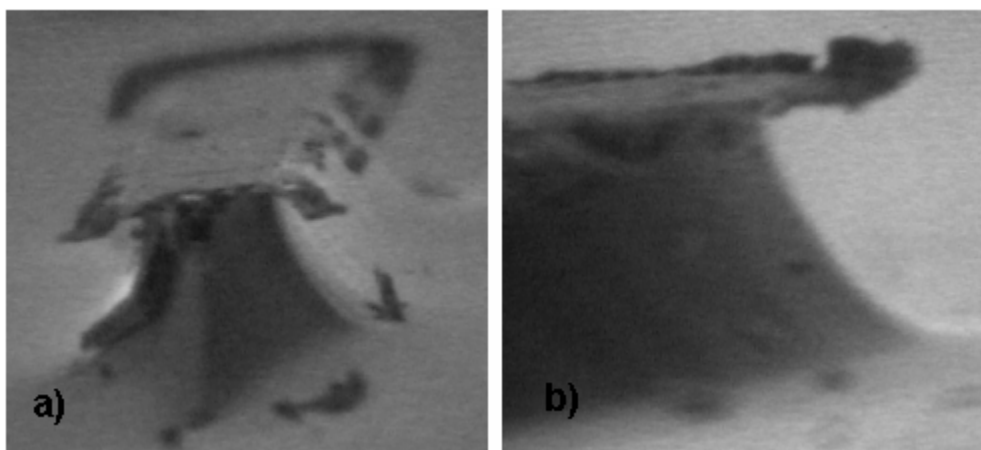


Figura 3.11. Estructuras grabadas en plasmas de SF_6/Ar .

Las fotos muestran que el daño se ocasionó únicamente en el enmascarante, mientras que en la superficie del sustrato de silicio no lo hay.

El plasma de SF_6/Ar es dominado en su mayoría por la componente química del proceso, aunque hubo poca aportación física al obtener en algunos casos perfiles con menos grabado lateral y daño en el enmascarante en comparación con el plasma de SF_6 . La velocidad máxima alcanzada es de $7.67 \mu\text{m}/\text{min}$ en condiciones de 40 mtorr de presión, 750 W de potencia ICP, flujos 100/10 sccm de SF_6/Ar y $h = 6 \text{ cm}$, utilizando enmascarante de Al y obteniendo un perfil isotrópico.

3.2.2.3. Resultados de grabados con plasma de SF_6/O_2 .

Para este tipo de plasmas, en la figura 3.12 se muestran los valores de la velocidad de grabado empleando Al y SiO_2 como enmascarantes. Se observa que en general la velocidad de grabado se incrementa con el aumento de flujo de 50 a 100 sccm, así como con el aumento de la potencia de ICP de 500 a 750 W, esto es consistente debido a que el O_2 como gas aditivo promueve la producción de flúor. Por otro lado, se muestra una tendencia creciente de la velocidad con la potencia del RIE. Se observa una vez más el incremento de la velocidad cuando la muestra se acerca al plasma denso.

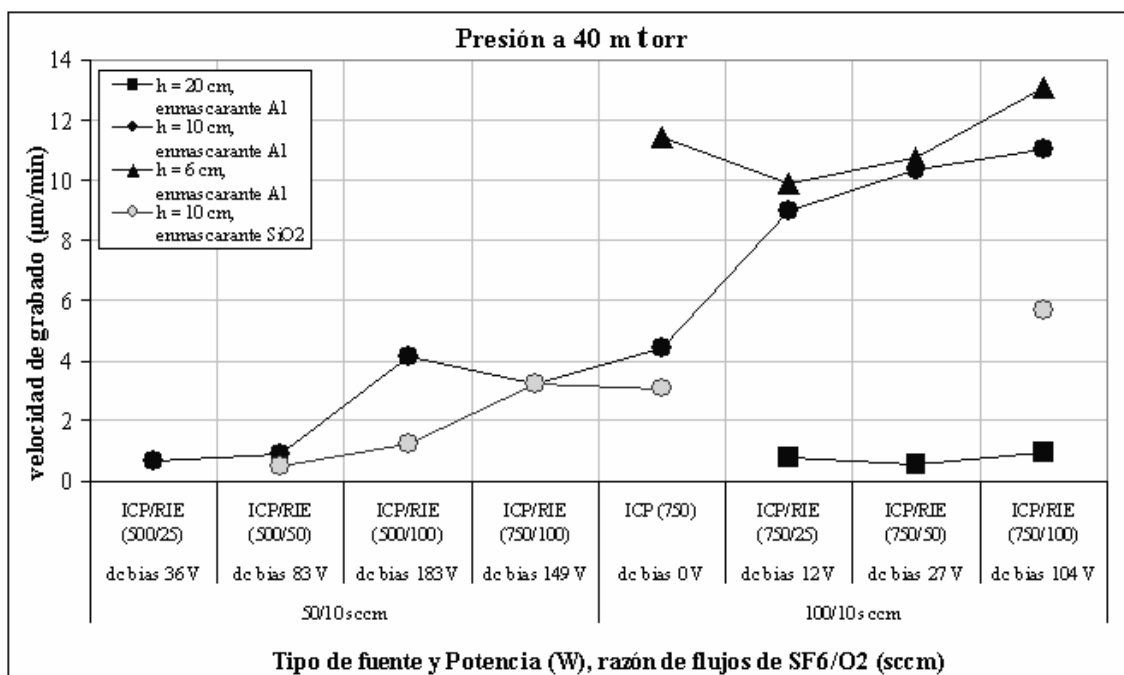


Figura 3.12. Resultados de la velocidad de grabado en plasma de SF₆/O₂.

Respecto al tipo de enmascarante, se observa una misma tendencia al utilizar ambos, y del mismo modo que el análisis de plasmas anteriores, con el Al se muestra en general una velocidad poco mayor en comparación con el SiO₂.

Para los experimentos con $h = 20$ cm, la velocidad tiende a ser constante con el aumento del bombardeo iónico, esto es debido a la lejanía de la muestra del plasma de mayor densidad, como se ha venido observando.

En lo que respecta al análisis de las paredes de las estructuras, anteriormente se observó que es posible obtener estructuras con tendencia anisotrópica cuando el *dc bias* es alto. Ante esta situación se especula que se puede encontrar este tipo de perfiles en tres puntos de la figura 3.12, estos son los de mayor *dc bias* (104, 149 y 183 V).

Con el propósito de confirmar la hipótesis descrita, se muestra la figura 3.13 con fotos de los experimentos de mayor *dc bias*, las condiciones son de 40 mtorr de presión y todas las muestras se grabaron a 10 cm del plasma denso. En las estructuras de las fotos a) y b) los flujos son de 100/10 sccm, las potencias en las fuentes ICP/RIE son de 750/100 W, con un *dc bias* de 104 V, y se utilizan enmascarante de Al y SiO₂ respectivamente. En las estructuras c) y d) los flujos son de 50/10 sccm, las potencias en las fuentes ICP/RIE son de 500/100 W, con un *dc bias* de 183 V, y se utilizan enmascarante de Al y SiO₂ respectivamente. En las estructuras e) y f) los flujos son de 50/10 sccm, las potencias en las fuentes ICP/RIE son de 750/100 W, con un *dc bias* de 149 V, y se utilizan enmascarantes de Al y SiO₂ respectivamente.

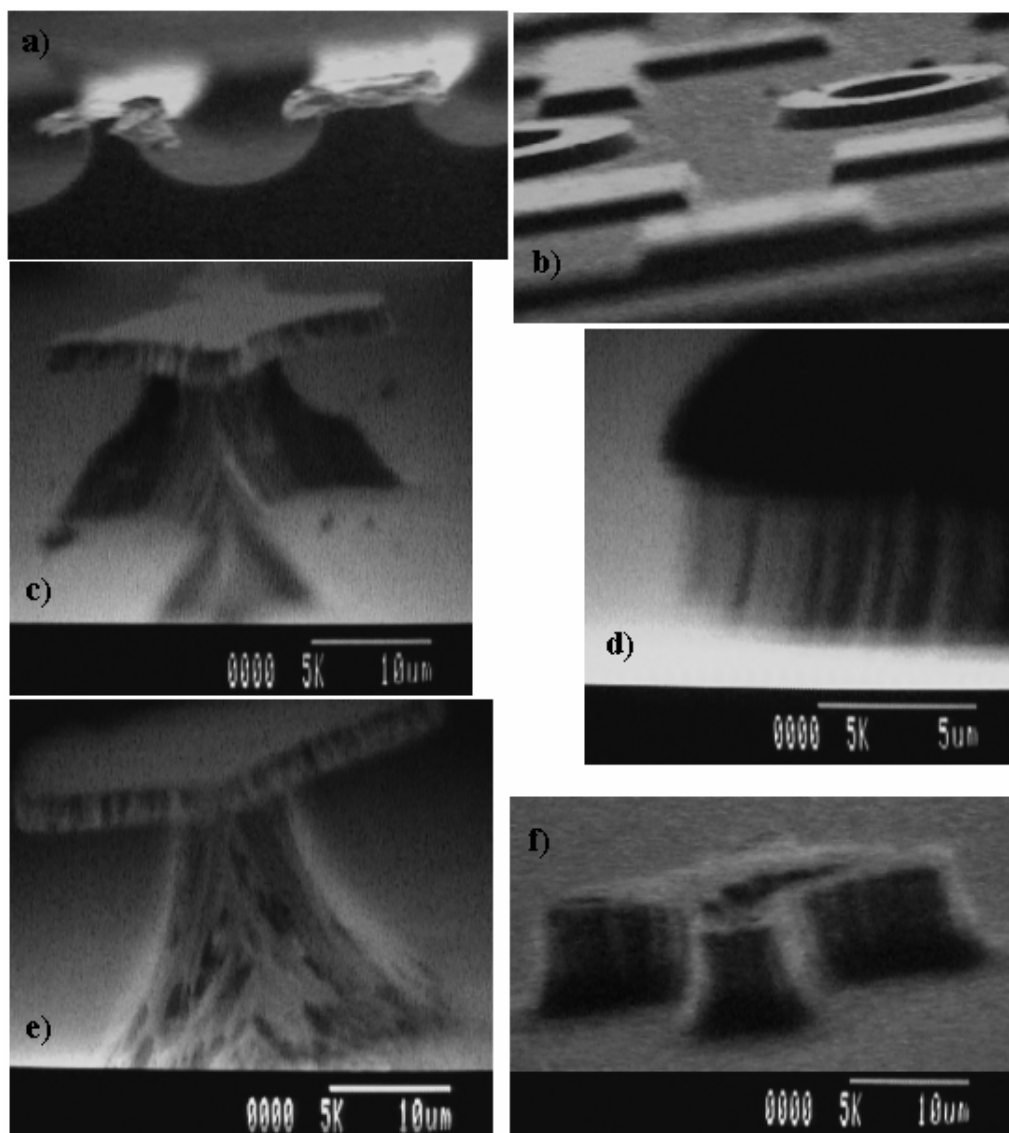


Figura 3.13. Estructuras grabadas en plasmas de SF_6/O_2 con mayor *dc bias*.

Es notorio el grabado lateral existente en las estructuras de las fotos a), c) y e), donde se utilizó Al como enmascarante, mientras que el SiO_2 utilizado en las estructuras de las fotos b), d) y f) muestra perfiles con tendencia a ser verticales. Es posible que la formación de especies reactivas de oxígeno, las cuales se adsorben en la superficie con la ayuda del enmascarante de SiO_2 , alcancen a formar la capa de óxido protector en toda la superficie de la estructura. La eliminación de esta capa en la parte inferior de la estructura, se realiza mediante el bombardeo iónico direccional producido por la polarización de la muestra, favoreciendo con esto a la obtención de un perfil anisotrópico. De esta manera se puede observar en estos tres puntos que el grabado en este tipo de plasma está influenciado por ambas componentes. M. Boufnichel y Col. logran una alta anisotropía en Si con enmascarante de SiO_2 en plasmas SF_6/O_2 a un 8 %

de O_2 . Perfiles anisotrópicos se obtienen por la pasivación de los radicales de oxígeno y simultáneamente grabado iónico direccional, permitiendo que los radicales de flúor graben solo verticalmente ^[17].

Siguiendo con el análisis de selectividades, se observa la baja selectividad del SiO_2 comparada con Al ante el sustrato de silicio. En las estructuras b) y f) el enmascarante de óxido fue eliminado, solamente en la foto d) se mantuvo.

Con el propósito de hacer hincapié en los perfiles con mayor tendencia anisotrópica (foto f de la figura 3.13), la figura 3.14 muestra algunas otras estructuras bajo las mismas condiciones de potencias a 750/100 W de RIE/ICP, *dc bias* de 149 V, con flujos de 50/10 sccm, altura de 10 cm y usando SiO_2 como material enmascarante.

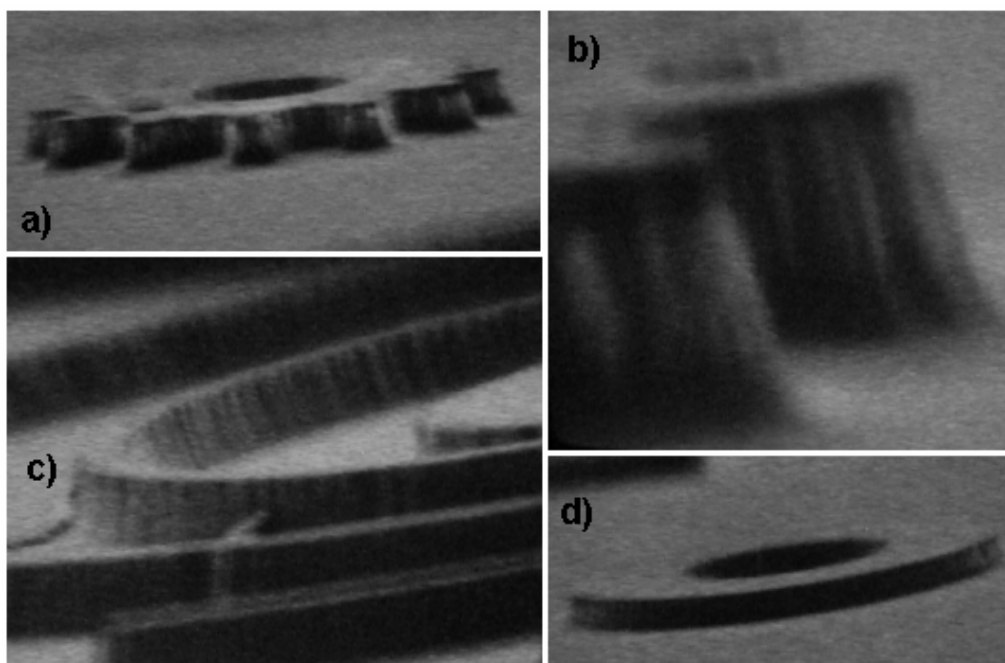


Figura 3.14. Estructuras grabadas con tendencia anisotrópica en el plasma de SF_6/O_2 .

Las estructuras de las fotos a) y b) de la figura 3.14 muestran la capa enmascarante de SiO_2 que no fue eliminada con el grabado, a diferencia de las estructuras c) y d), en donde si se eliminó. En todas las estructuras obtenidas de esta muestra, los perfiles muestran tendencias a la anisotropía o incluso en algunos casos son completamente anisotrópicas, como en la foto de la estructura c).

Otro aspecto importante es que en todos los experimentos obtenidos hasta ahora, no apareció rugosidad en el fondo las estructuras. Esta rugosidad, llamada “*Black Silicon*”, aparece comúnmente en grabados con plasmas de SF_6/O_2 , en un rango especial de contenido de oxígeno y temperatura del sustrato ^[19].

Referente al daño inducido al enmascarante de Al, en la figura 3.15 se observa dicho daño al estar la muestra a 6 cm del plasma de mayor densidad. La muestra se grabó a potencias de 750/0 W de ICP/RIE y flujos de 100/10 sccm.

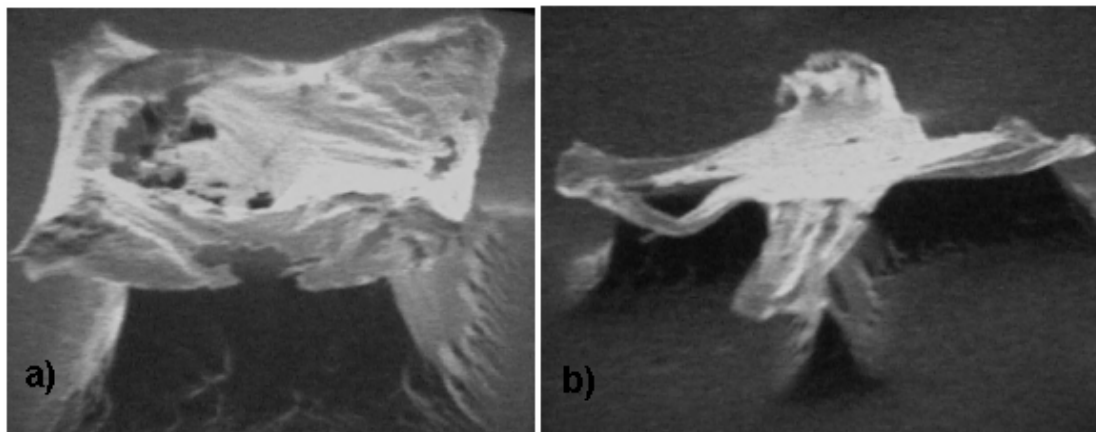


Figura 3.15. Estructuras con daño en la superficie del enmascarante de Al.

La muestra fue grabada, incluso sin la aportación de la energía al bombardeo, solamente se densifica el plasma. Estas fotos muestran lo que ocurre a distancias cercanas al plasma de alta densidad cuando éste está a una fuerte potencia ICP.

En conclusión, al utilizar SiO_2 como enmascarante la razón de grabado espontáneo y el grabado lateral dependen de la razón F/O en el plasma, si ésta se incrementa, se obtiene mayor grabado espontáneo resultando en grandes niveles de grabado lateral, mientras que la reducción de la razón F/O en el plasma lleva a menor grabado lateral hasta lograr eliminarlo ^[24]. Por lo tanto, la adición de O_2 al plasma de SF_6 en conjunto con la utilización del enmascarante de SiO_2 , y con la colaboración del fuerte grabado iónico direccional, obtenido con grandes niveles de *dc bias*, permiten obtener un grabado con tendencia anisotrópica. El grabado resulta de la combinación de ambas componentes.

La velocidad máxima alcanzada es de $13.08 \mu\text{m}/\text{min}$ en condiciones de presión a 40 mtorr, 750 W de potencia ICP y 100 W de potencia RIE, flujos 100/10 sccm y a una distancia de 6 cm del plasma denso, utilizando enmascarante de Al y obteniendo un perfil isotrópico.

Perfiles anisotrópicos fueron obtenidos en condiciones de 40 mtorr de presión, 750/100 W de RIE/ICP, *dc bias* de 149 V, flujos de 50/10 sccm, altura de 10 cm y empleando SiO_2 como material enmascarante, la velocidad de grabado fue de aproximadamente $3.5 \mu\text{m}/\text{min}$. Se hace hincapié en el compromiso que existe entre alta velocidad de grabado y anisotropía del perfil.

3.2.2.4. Resultados de grabados con plasma de SF₆/CHF₃.

La tabla 3.1 muestra los únicos dos experimentos que se realizaron con este plasma (desgraciadamente el gas CHF₃ se terminó).

Vel. de grabado (μm/min), utilizando la mezcla: SF ₆ /CHF ₃		
presión de 40 mtorr, Enmascarante: Al (2.5 μm)		
flujos (sccm)	fuentes y potencias (W) <i>dc bias</i> (V)	h = 6 cm
100/10	ICP (750)	8.87
100/50		5.21

Tabla 3.1. Grabados en plasma de SF₆/CHF₃.

Se puede observar que entre más gas CHF₃ se incorpore en el plasma, la velocidad de grabado decrece. Esto es debido a que, además de la dilución del SF₆ por el hidrógeno, es posible la formación de la capa protectora de polímero, lo cual inhibe el grabado en general obteniendo velocidades cada vez menores.

Las fotos de la figura 3.16 muestran los perfiles obtenidos con este plasma. La estructura de la foto a) se grabó con flujos 100/50 sccm y la estructura de la foto b) a 100/10 sccm.

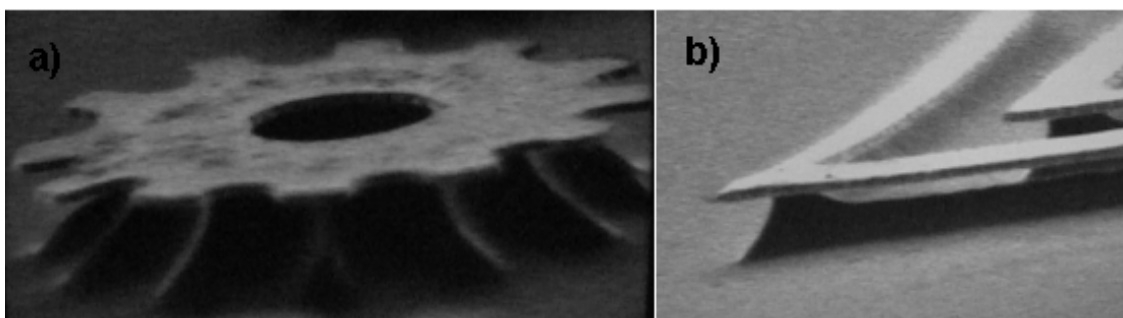


Figura 3.16. Estructuras grabadas en plasmas de SF₆/CHF₃.

Se muestra un alto grabado lateral en ambas estructuras, que resulta consistente con la altura de 6 cm, podemos suponer que a esta altura el grabado espontáneo domina sobre la formación de la capa pasivadora de polímero.

La velocidad máxima de 8.87 μm/min se obtuvo a 6 cm del plasma denso, con enmascarante de Al, con flujos de 100/10 sccm y potencia de 750 W de ICP.

3.2.2.5. Resultados de grabados con plasma de $\text{SF}_6/\text{CHF}_3/\text{O}_2$.

En este plasma cada gas tiene una función en específico, el SF_6 produce radicales de flúor formando productos volátiles SiF_4 , el O_2 crea los radicales que inhiben el grabado en la superficie con una capa de SiO_xF_y y/o promueve la producción de F. El CHF_3 (o SF_6) es la fuente de iones responsable de eliminar la capa de SiO_xF_y formando productos volátiles CO_xF_y (SO_xF_y) ^[9] y también el CHF_3 inhibe el grabado espontáneo con la formación de una capa de C_xF_y . De este modo es más probable el crecimiento de alguna de las capas protectoras contra grabado espontáneo, ya sea orgánico o inorgánica. La Figura 3.17 muestra los valores de la velocidad de grabado empleando Al como enmascarante.

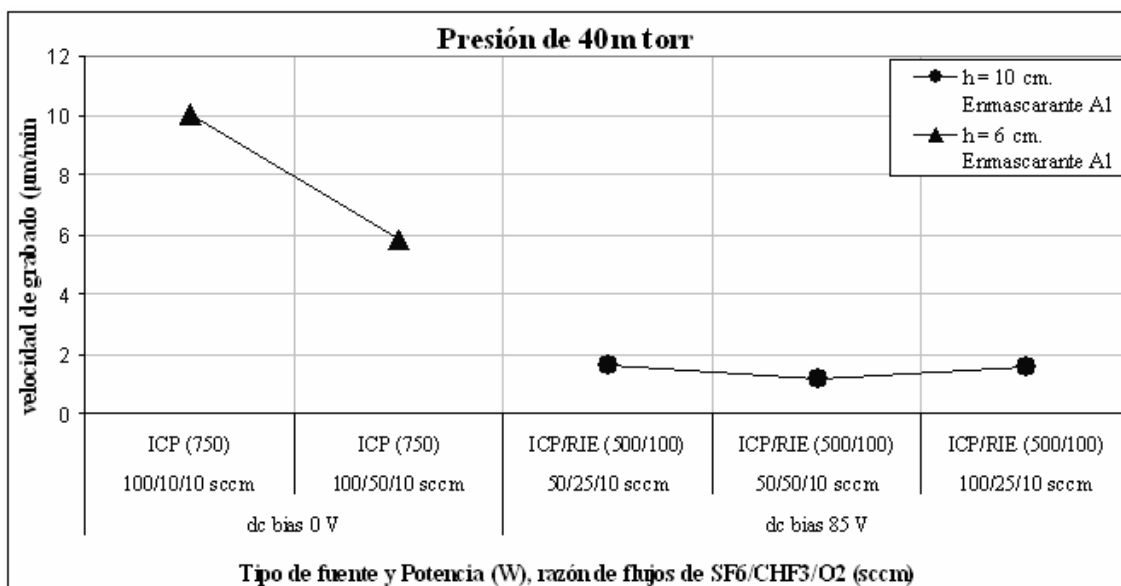


Figura 3.17. Experimentos de grabado en plasma de $\text{SF}_6/\text{CHF}_3/\text{O}_2$.

Se observa que la velocidad de grabado disminuye (en $4 \mu\text{m}/\text{min}$) con el aumento de flujo de CHF_3 (de 10 a 50 sccm) cuando no hay voltaje de autopolarización en la muestra y es colocada a la altura de 6 cm. Sin embargo, la velocidad permanece constante ante el cambio de los flujos cuando la muestra es polarizada y con altura de 10 cm. Por lo tanto se piensa que el gas CHF_3 es el que modera el grabado cuando no hay *dc bias* presente en la muestra. Una vez más se observa que la mayor velocidad es a la distancia mínima al plasma denso.

La figura 3.18 muestra fotos de las estructuras grabadas en condiciones de, a) altura de 6 cm, potencia de 750 W de ICP, flujos de 100/50/10 sccm y b) altura de 10 cm, potencias de 500/100 W de ICP/RIE con *dc bias* de 85 V y flujos de 50/50/10 sccm.

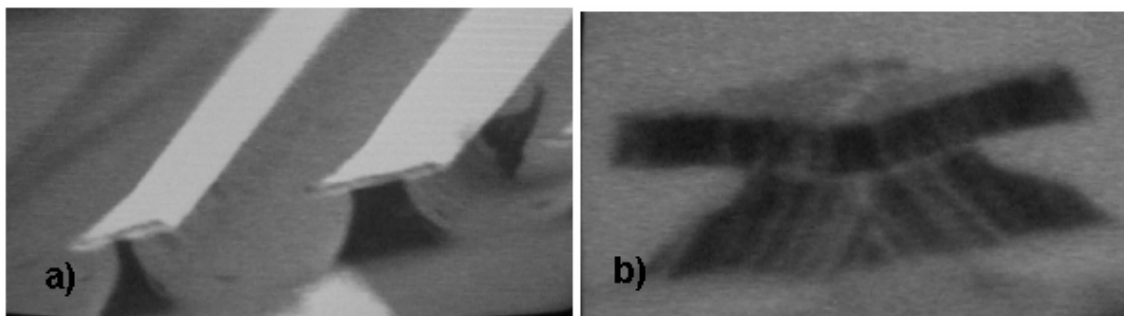


Figura 3.18. Estructuras grabadas en plasmas de $\text{SF}_6/\text{CHF}_3/\text{O}_2$.

En ambas estructuras, los perfiles tienen grabado lateral a pesar de las diferencias de grabado en las muestras. Este comportamiento indica que el dominio de la componente química del proceso sigue presente, ante la aportación física al grabado hecha con el bombardeo iónico en la estructura b).

Por último, se concluye que en el plasma de $\text{SF}_6/\text{CHF}_3/\text{O}_2$, el proceso de grabado es dominado por la componente química, ya que los grabados fueron en general en todas direcciones. La velocidad máxima de $10 \mu\text{m}/\text{min}$ se obtuvo a altura de 6 cm con enmascarante de Al, flujos de 100/10/10 sccm y la potencia de la fuente en modo ICP es de 750 W (sin utilizar la fuente RIE). En comparación con el plasma anterior, la adición del O_2 colaboró con el aumento de la velocidad de grabado cuando la muestra está a 6 cm del plasma de alta densidad.

3.2.2.6. Resultados de grabados con plasma de $\text{SF}_6/\text{Ar}/\text{CHF}_3/\text{O}_2$.

En este caso también cada gas tiene una función específica, de modo que fácilmente sea posible el control de los perfiles del grabado mediante el manipuleo del flujo de uno de estos gases. Los gases O_2 , CHF_3 y Ar ayudan en conjunto con la dilución del SF_6 y disminuir el grabado espontáneo. El CHF_3 y el SF_6 son la fuente de radicales de flúor formando productos volátiles. El O_2 y CHF_3 ayudan al grabado direccional por la formación de sus capas inorgánica y orgánica respectivamente, y el Ar induce grabado por bombardeo de iones.

La tabla 3.2 muestra los resultados de los tres únicos experimentos hechos con este plasma, en los cuales se utilizó aluminio como enmascarante, y todos se realizaron a altura de 6 cm. En esta ronda de experimentos las muestras no se polarizaron.

Vel. de grabado ($\mu\text{m}/\text{min}$), utilizando la mezcla: $\text{SF}_6/\text{Ar}/\text{CHF}_3/\text{O}_2$			
presión de 40 mtorr, Enmascarante: Al ($2.5 \mu\text{m}$)			
flujos (sccm)		fuentes y potencias (W)	h = 60 mm
25/5/10/10	Foto a	ICP (750)	0.67
50/10/50/10	Foto b		1.91
100/10/100/10	Foto c		4.24

Tabla 3.2. Experimentos de grabado en plasma de $\text{SF}_6/\text{Ar}/\text{CHF}_3/\text{O}_2$.

Las fotos de la figura 3.19 corresponden a cada uno de los resultados de la tabla. Todos los experimentos muestran grabado lateral.

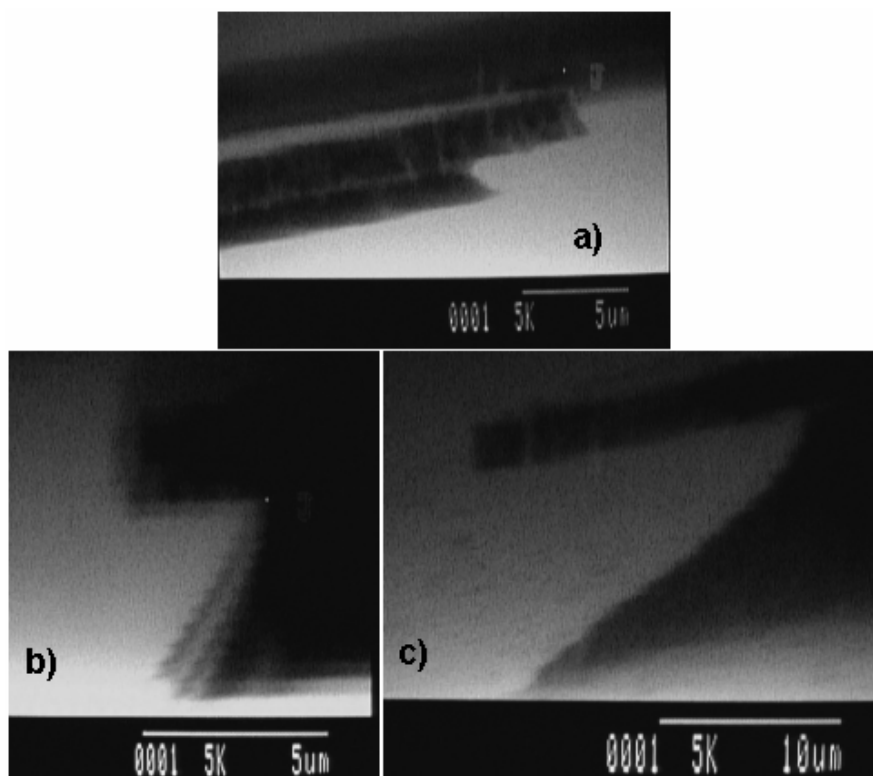


Figura 3.19. Grabados en plasmas de $\text{SF}_6/\text{CHF}_3/\text{O}_2$.

El proceso de grabado sigue dominado por su componente química, ya que en ningún caso se obtuvieron perfiles con tendencia vertical. La máxima velocidad de grabado ($4.24 \mu\text{m}/\text{min}$) se realizó a flujos de 100/10/100/10 sccm y potencia de ICP de 750 W. Los gases aditivos colaboran a diluir a los gases reactantes, notándose en el decremento considerable de la máxima velocidad de grabado en comparación con las otras velocidades máximas obtenidas en los otros plasmas.

3.2.2.7. Resultados de grabados con plasma de SF₆/CF₄.

El CF₄ produce radicales de F y CF₃ que permite que la velocidad no se atenúe, además proporciona productos no volátiles que forman una capa orgánica (Si_xC_yF_z) para inhibir el grabado espontáneo, y de este modo el grabado sea direccional.

La Figura 3.20 muestra los resultados con este plasma, realizados a la altura de 10 cm, utilizando en la mayoría de los experimentos SiO₂ como material enmascarante y potencia de ICP a 500 W.

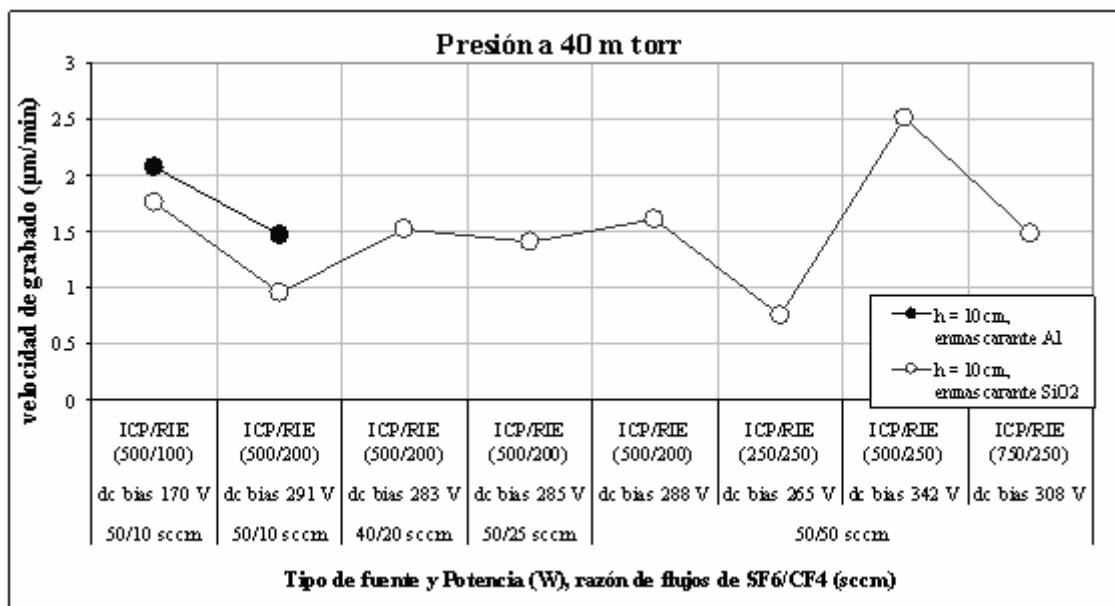


Figura 3.20. Experimentos de grabado en plasma de SF₆/CF₄.

En lo que respecta a los dos únicos experimentos realizados con diferente enmascarante, se sigue observando que existe una mínima diferencia de velocidades entre ellos, debida a que el Al promueve más velocidad de grabado que el SiO₂.

Un caso interesante, en estos mismos dos primeros puntos, es que al aumentar la potencia RIE de 100 a 200 W y manteniendo las demás condiciones iguales, el *dc bias* incrementa de 170 a 291 V y la velocidad de grabado decrece poco menos de una micra. Aquí se piensa que el bombardeo iónico se encarga de estar eliminando constantemente la capa pasivadora que se alcanza a formar, contribuyendo poco con la velocidad de grabado. Cuando se realizan cambios en los flujos y se mantienen las demás condiciones iguales (potencias de 500/200 W y *dc bias* entre 283 y 291 V), se observa que la velocidad permanece constante (alrededor de 1.5 µm/min). Aquí es posible que la capa de polímero pasive las reacciones F-Si, dominando más la adsorción del carbono en la superficie de las estructuras por el incremento de CF₄, sin tener respuesta de la

velocidad con el cambio de la razón de flujos. Ahora bien, si se disminuye considerablemente la potencia de la fuente ICP (de 500 a 250 W), los flujos permanecen en 50/50 sccm y se aumenta la potencia RIE a 250 W, el *dc bias* aumenta a 350 V y la velocidad disminuye a 0.7 $\mu\text{m}/\text{min}$. El comportamiento es similar cuando la velocidad incrementa a 2.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ al subir la potencia ICP a 500 W, manteniendo la potencia RIE a 250 W y con un *dc bias* de 342 V. Sin embargo, cuando la fuente ICP incrementa a 750 W y la energía del bombardeo iónico permanece igual (250 W de RIE, con un *dc bias* de 308 V), la velocidad decrece a 1.5 $\mu\text{m}/\text{min}$. En este último punto de la gráfica es posible que se contribuya poco con la velocidad de grabado por la formación de la capa pasivadora.

Con el propósito de comparar los perfiles de las estructuras donde se tiene un mayor *dc bias*, la figura 3.21 muestra fotos de los experimentos que se grabaron a potencias en las fuente ICP/RIE de 750/250 W con *dc bias* de 308 V en las fotos a) y b) y a 500/250 W con *dc bias* de 342 V en las fotos c) y d), en todas las muestras se utiliza SiO_2 como enmascarante y se grabaron con flujos de 50/50 sccm.

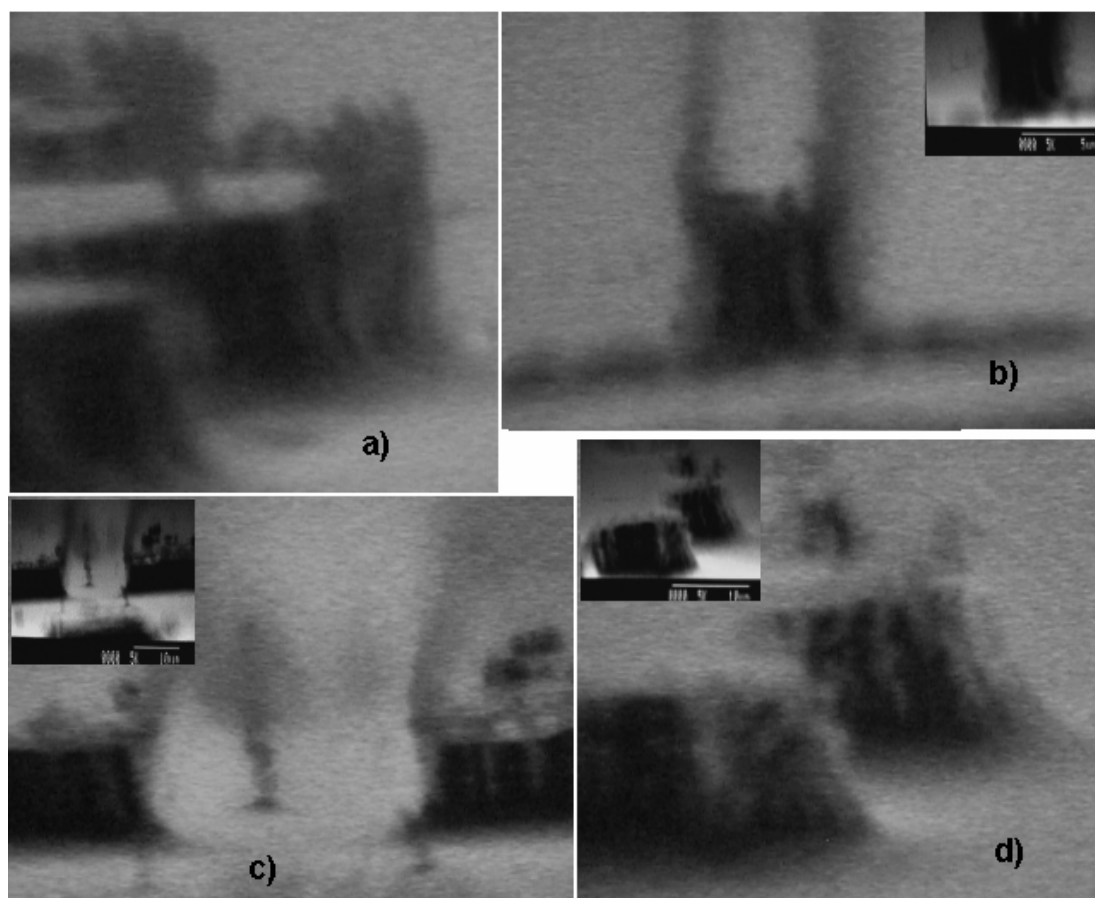


Figura 3.21. Estructuras grabadas en plasma de SF_6/CF_4 .

La figura 3.21 ilustra la formación de la capa de polímero en las cuatro imágenes, el efecto indica que se contribuye al balance entre ambas componentes para realizar un grabado anisotrópico. En las fotos a) y b) la capa protectora que se alcanza a formar muestra la afinación de la estructura de manera vertical por el efecto direccional del bombardeo iónico, mientras que en las fotos c) y d) aunque hay capa inhibidora, se observa menos la tendencia a ser vertical.

Por otro lado, la selectividad del SiO_2 fue mínima en todas las estructuras, ya que este material no permaneció en la superficie de las muestras, consecuencia de la alta densidad del plasma. Dicho lo anterior, se determina que el grado de polimerización es diferente para cada material.

Con el propósito de analizar los perfiles ante los cambios en los flujos, se muestra la figura 3.22; las estructuras de las fotos a) y b) se grabaron con flujos de 50/10 sccm y *dc bias* de 291 V, y las estructuras de las fotos c) y d) a 50/50 sccm con *dc bias* de 288 V. Solo la estructura b) utiliza Al como enmascarante, las demás usan SiO_2 . Todas las muestras se grabaron a potencia de 500/200 W en las fuente ICP/RIE respectivamente.

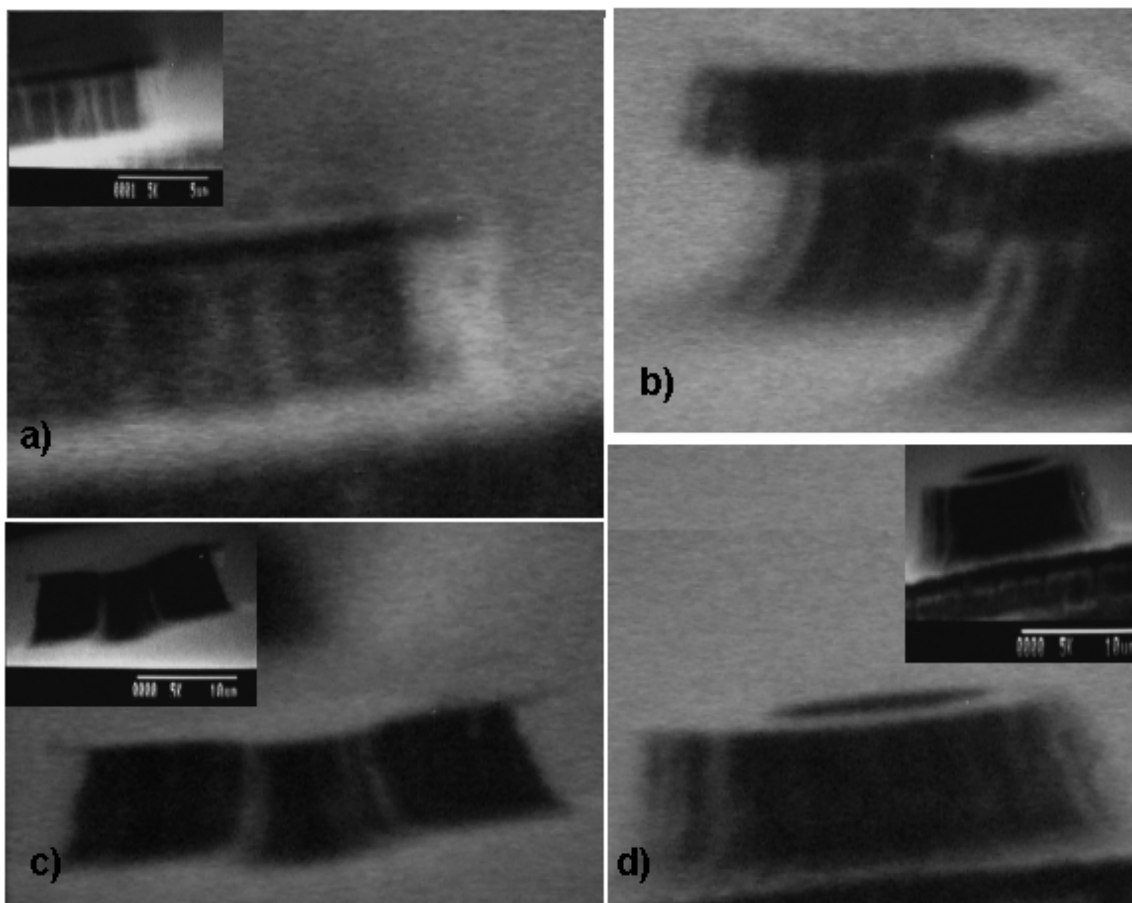


Figura 3.22. Estructuras grabadas a diferente razón de flujos.

Considerando que la única diferencia de las fotos a) y b) es el enmascarante, se obtiene grabado con tendencia anisotrópica en la foto a), distinto de la foto b), donde se muestra grabado lateral producto de la catalización del Al. Las fotos c) y d) presentan menor tendencia a paredes verticales debido al aumento del CF_4 , en la foto d) se eliminó el enmascarante durante el proceso, sin lograr identificar el grabado lateral en la pared de la estructura.

De este modo se termina el análisis de resultados con plasma de SF_6/CF_4 , concluyendo una vez más que los experimentos que presentan un mayor *dc bias*, obtienen perfiles con tendencia a la anisotropía, la componente química realiza el grabado. En particular los voltajes mayores de autopolarización en este plasma son de 291, 308 y 342 V, la formación de la capa de polímero fue posible con CF_4 como gas aditivo. La baja selectividad del óxido se mostró en todos los experimentos en general. La máxima velocidad de grabado es de $2.51 \mu\text{m}/\text{min}$ con potencias de 500/750 W en ICP/RIE, flujos de 50/50 sccm con enmascarante de SiO_2 a altura de 10 cm

Pese a que uno de los objetivos principales de esta tesis es la obtención de estructuras con paredes verticales y dado que la mayoría de los perfiles obtenidos con las mezclas estudiadas presentaron una notable isotropía, existen importantes aplicaciones en la fabricación de MEMS donde se requieren este tipo de perfiles, por ejemplo; en la fabricación de micro agujas con radio de curvatura en su cúspide del orden de algunos nanómetros para aplicación en el escaneo microscópico y dispositivos de emisión de campo, o para fabricar estructuras libres como superficies micromaquinadas tipo puentes soportados por *pads*, etc ^[25].

3.3. Proceso químico BOSCH.

Durante el análisis de los resultados del presente trabajo se observaron pocos casos que cumplen con la obtención de perfiles verticales, que es uno de los objetivos principales de esta tesis. Ante esta situación, se recurre a otro mecanismo que pueda lograr dichos perfiles como alternativa para poderlo aplicar en la fabricación de MEMS de silicio en volumen. Para controlar la direccionalidad del grabado, se ha decidido cambiar al control total de la química del proceso mediante el balance de parámetros con la alternación de depósito y grabado espontáneo, sin la fuerte aportación del bombardeo iónico. Este método de grabado es denominado proceso BOSCH.

Como se ha observado, un problema común para grabar grandes profundidades de Si utilizando plasmas basados en flúor es que el proceso es altamente químico y como consecuencia el grabado es espontáneo. Ante este problema, en 1993 Robert Bosch GMBH, científico Alemán, desarrolló una nueva técnica para realizar profundidades de grabado anisotrópico en Si. El proceso BOSCH, comúnmente llamado, consiste en usar plasma basado en C_4F_8 para depositar una capa de polímero protector de grabado químico antes y/o después de la etapa de grabado (figura 3.20 a). Antes de realizar el grabado, el área que necesita ser grabada en el fondo de las estructuras deberá ser liberada del polímero protector (figura 3.23 b). Esto es realizado mediante *switcheo* de plasma de SF_6 (potencias RF en la fuente de RIE) para que los iones acelerados bombardeen con gran energía a la estructura y rompan el polímero de su base dejando cubiertas solo las paredes. Esto ocurre debido a que los iones colisionan con la superficie para eliminar solo el polímero de la base de las estructuras, mientras que los radicales de flúor, liberados del plasma de SF_6 , graben químicamente el silicio desprotegido por el enmascarante (figura 3.23 c). De este modo, al realizar ciclos alternados de depósito de polímero y grabado espontáneo, se pueda seguir profundizando verticalmente dentro del sustrato de silicio.

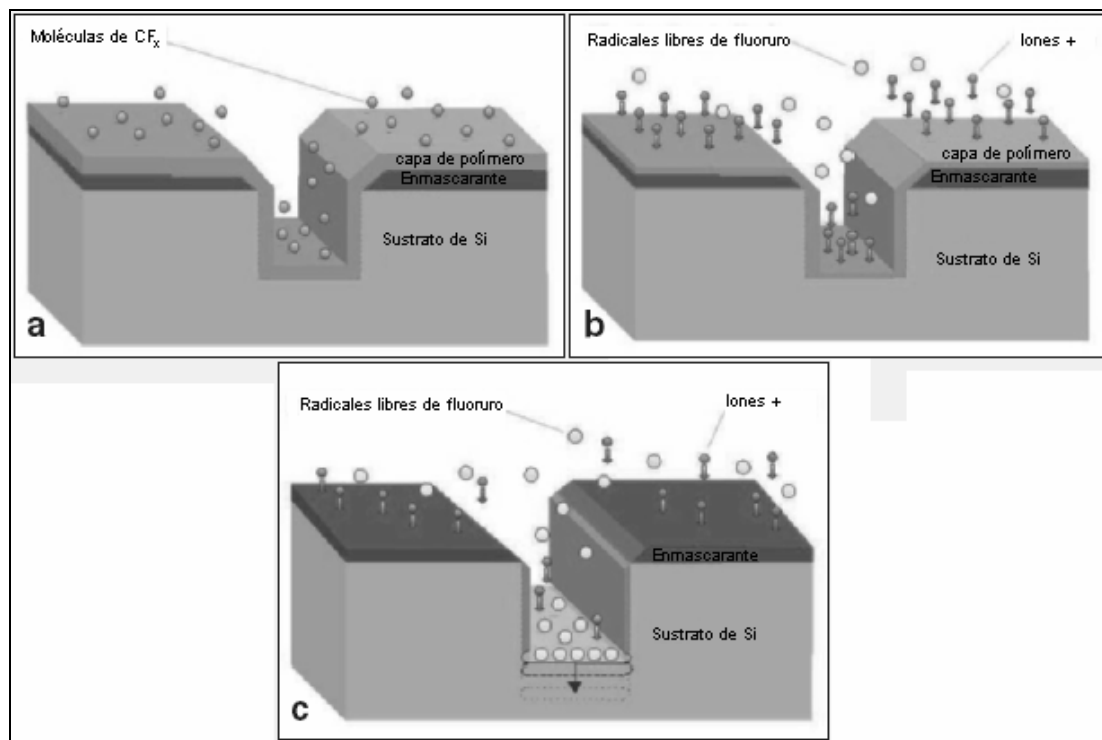


Figura 3.23. Proceso Bosch: a) depósito de polímero, b) bombardeo de iones, c) grabado químico por radicales de flúor.

Para el caso particular de este trabajo, ante la experiencia obtenida en los plasmas con CHF_3 y CF_4 por sus características inhibitoras, se determina usarlos para la etapa de depósito de la película protectora, y el SF_6 como gas grabante debido a su alto contenido de F. Los grabados se realizan a alturas de 10 y 20 cm con el propósito de comparar y obtener el mejor resultado. Los enmascarantes que se utilizan se consideran debido a sus diferentes propiedades: se utiliza FR debido a su naturaleza orgánica ya que contribuye en la formación de la capa de polímero, además que debe ser de grosor grande (no menor de $10\text{ }\mu\text{m}$ ^[18,23]). También se utiliza SiO_2 debido a la experiencia obtenida con éste enmascarante, aunque con este material es difícil notar la formación de dicha capa por su naturaleza inorgánica. Y por último se utiliza SiC el cual ayuda a promover el depósito de la capa de polímero debido a su naturaleza basada en carbono. Los parámetros para realizar este proceso tales como presión, potencias, flujos y tiempos de duración de cada ciclo, son partiendo del trabajo de C. J. D. Craigie y Col. ^[23], y conforme se observaron resultados estos parámetros se fueron modificando. La tabla 3.3. Muestra los parámetros utilizados en el proceso.

Parámetros de proceso BOSCH, presión de 35 mtorr, tiempo por etapa de 15 seg y utilizando enmascarantes de FR, SiO_2 y SiC					
etapa	gases flujos (sccm)	Alturas (mm)	Potencias ICP/RIE (W)	<i>dc bias</i> (V)	tiempo total (min)
grabado	SF_6 (100)	100 y 200	450/30	42	3, 5 y 10
		200	750/30	84	
depósito	CHF_3 (100)	100	450/30	100	3 y 5
	CF_4 (100)	100 y 200	450/15	90	
	CF_4 (25, 50 y 100)	200	450/30	103	3, 5 y 10
			750/30	150, 158 y 140	

Tabla 3.3. Parámetros del proceso BOSCH

Los resultados obtenidos se colocan en la figura 3.24 para observar el cambio de las velocidades de grabado a diferentes condiciones de proceso BOSCH. Sin embargo en este proceso las velocidades son relativas, ya que los tiempos de grabado son detenidos cada 15 segundos para pasar a la etapa de depósito. A pesar de esto se fija el tiempo total en el que se quiere grabar la muestra y se mide la profundidad grabada mediante perfilometría, obteniendo así las velocidades.

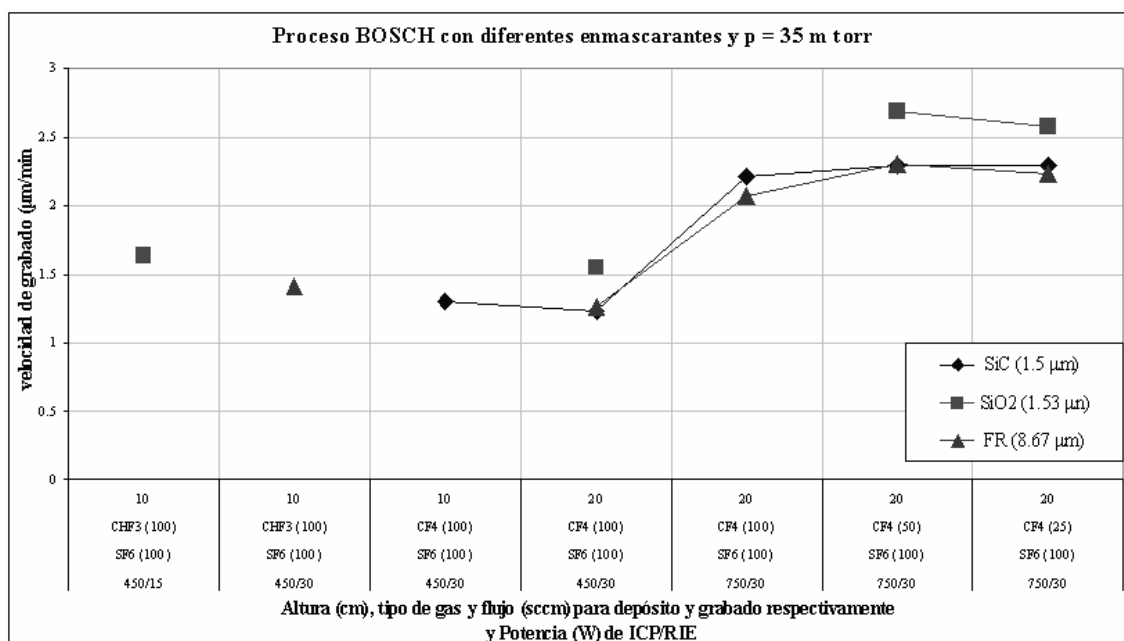


Figura 3.24. Velocidades de los resultados del proceso BOSCH.

Se observa que la velocidad permanece alrededor de 1.5 µm/min ante el cambio de alturas. Lo mismo sucede al cambiar de tipo de gas polimerizante de CHF₃ a CF₄ y sus flujos, la velocidad permanece en el mismo intervalo. Aunque ambos gases añaden diferentes cantidades de F al plasma, ambos son polimerizantes, lo cual estando a determinadas condiciones del plasma, la capa se forma inhibiendo el grabado a las dos diferentes alturas.

Se observa que el único parámetro relevante para el aumento de la velocidad es el incremento de la potencia de ICP (de 450 a 750 W), teniendo polarizada la muestra. Esto se debe a que cuando se densifica el plasma, entre todo lo que produce también están los iones dirigidos al sustrato polarizado y esto ocurre durante las dos etapas (depósito y grabado). De este modo, al densificar el plasma se aumenta la producción de iones que permiten eliminar la capa en las bases de las estructuras y las reacciones en el plasma en la etapa de grabado, se encargan de grabar verticalmente el sustrato.

Otra situación que se observa es el comportamiento similar de los enmascarantes, lo cual remarca que los tres enmascarantes colaboran con la formación de la capa inhibidora con sus formas particulares de hacerlo. Aquí es importante señalar que se probaron diferentes espesores de FR obteniendo su eliminación durante el proceso, por lo que se decide ocupar la de mayor espesor (8.6 µm).

Con el propósito de constatar la formación de dicha capa y observar los perfiles de las estructuras, se muestra la figura 3.25. Este proceso se realizó con potencias de 450/30 W en fuentes ICP/RIE, flujos de 100 sccm de SF₆ y CHF₃, a 10 cm del plasma

de mayor densidad, el tiempo total de proceso es de 3 minutos (3 minutos de grabado y 3 de depósito) con ciclos de 15 segundos y se utiliza FR como enmascarante.

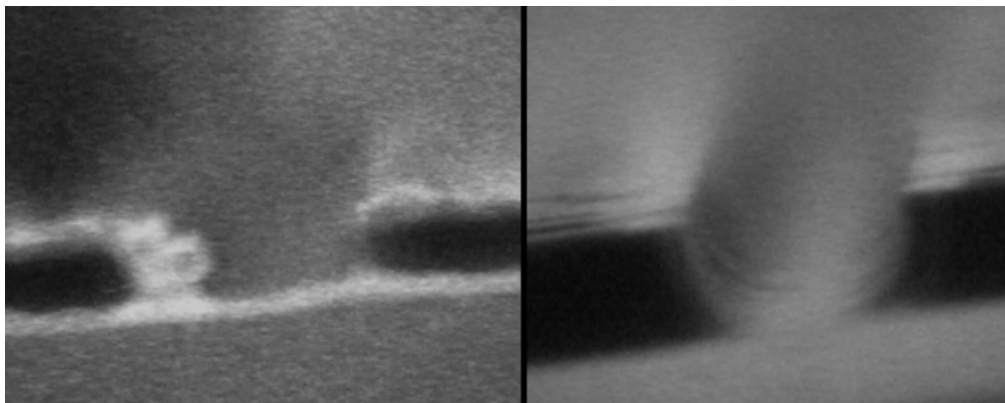


Fig 3.25. Proceso BOSCH a 3 min con CHF_3 como gas polimerizante.

La foto izquierda muestra la formación de la capa protectora protegiendo las paredes de las estructuras. Se observa que la capa es más delgada en las zonas horizontales debido al bombardeo iónico. La foto de la derecha muestra la misma estructura cuando se le realiza una limpieza para eliminar la capa pasivadora y el material enmascarante (FR). Las paredes de las estructuras grabadas tienen clara tendencia a la anisotropía. Por otro lado la figura también demuestra que la FR promueve la formación de dicha capa.

Para el análisis con CF_4 como gas polimerizante, se muestra la figura 3.26 donde se observa la misma estructura grabada con potencias de 450/30 W en fuentes ICP/RIE, flujos de 100 sccm para grabado y depósito, SiC como enmascarante, tiempos totales de grabado y alturas de: a) 3 minutos a 10 cm y b) 5 minutos a 20 cm.

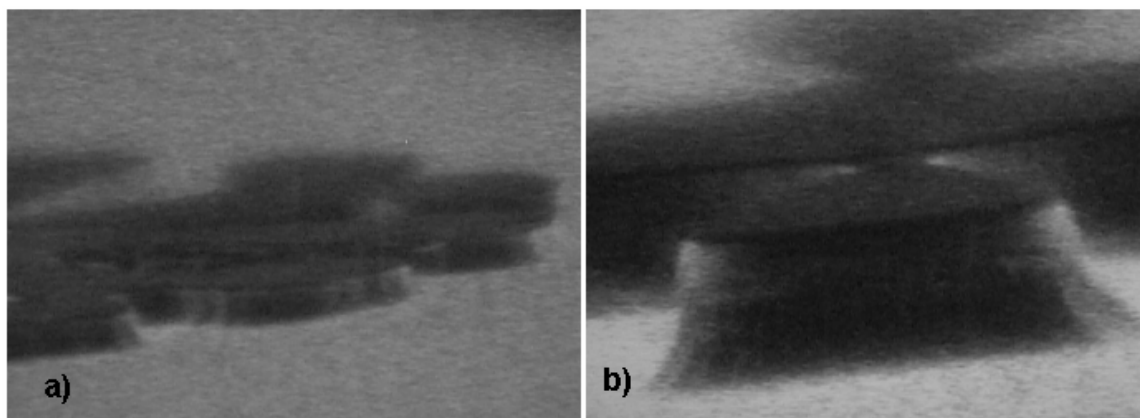


Figura 3.26. Proceso BOSCH con CF_4 y enmascarante de SiC.

En ambas fotos se observan perfiles con tendencia anisotrópica, considerando la diferencia de alturas en ambas muestras, lo cual confirma que también con el CF_4 es posible formar la capa protectora de polímero y se refleja al obtener la misma velocidad.

Respecto al SiC como enmascarante, se observa que el material es un buen promotor para la formación de la capa protectora. Por lo que hasta ahora se puede decir ambos materiales enmascarantes (FR y SiC) ayudan en la formación de la capa de polímero.

Para realizar una comparación del perfil de las estructuras utilizando los tres diferentes tipos de material enmascarante se muestra la figura 3.27. Las potencias son de 450/30 W en fuentes ICP/RIE, los flujos de 100 sccm de grabado con SF_6 y depósito con CF_4 , los ciclos son de 15 segundos y la altura es de 10 cm. Los enmascarantes son de: a) FR, b) SiO_2 y c) SiC.

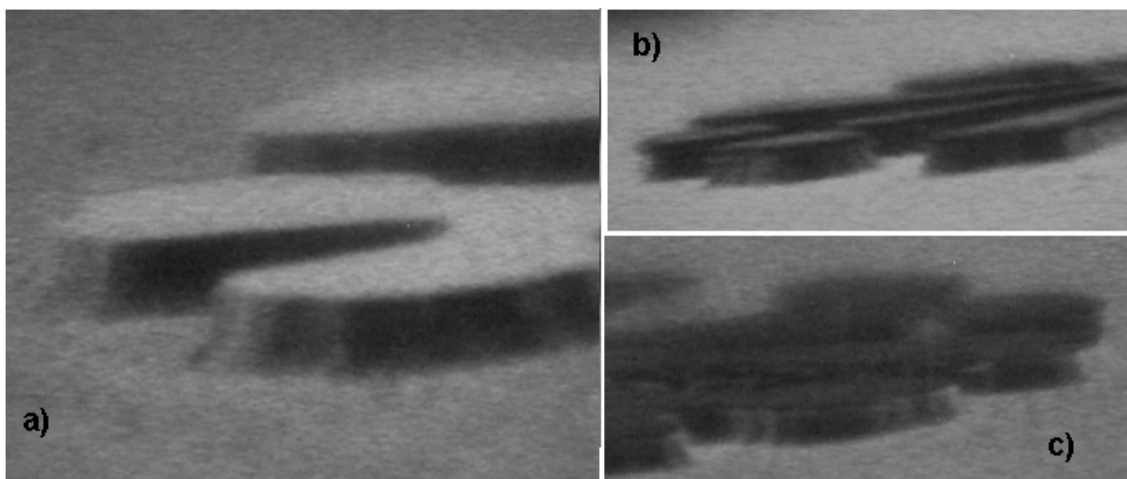


Figura 3.27. BOSCH con CF_4 como gas polimerizante y diferentes enmascarantes.

En todos los casos, los perfiles de las estructuras tienden a la anisotropía, aunque el enmascarante de FR de la foto a) fue eliminado totalmente.

Ahora bien, respecto al análisis cuando la potencia es mayor, la figura 3.28 muestra fotos de los experimentos realizados a potencia de 750/30 W en fuentes ICP/RIE, flujos de 100 sccm de SF_6 en grabado y de 25 sccm de CF_4 en depósito, ciclos de 15 segundos y el tiempo de proceso es de 3 minutos, la altura es de 20 cm y los enmascarantes son de a) SiC, b) SiC con capa de polímero, c) FR y d) SiO_2 .

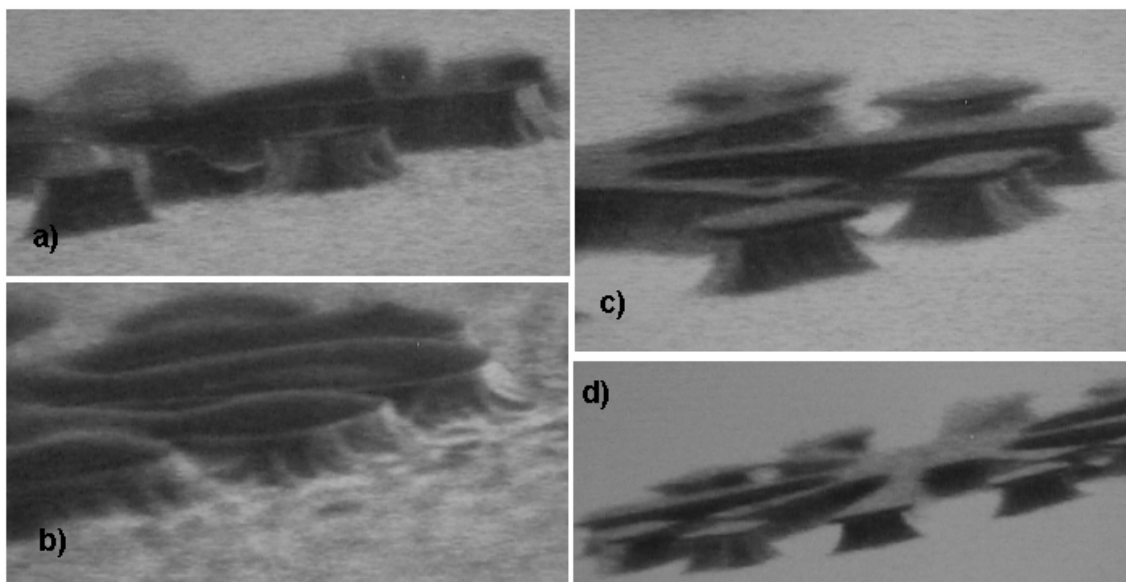


Figura 3.28. Proceso BOSCH a potencia mayor.

A diferencia de las demás figuras de esta sección, se observa que los perfiles no muestran tendencia anisotrópica para ningún enmascarante utilizado, ya que el aumento de densidad de plasma contribuye mayormente a la componente química del proceso, y el grabado direccional realizado por el bombardeo iónico no es notorio en este caso.

Por otro lado, la formación de la capa de polímero formada durante el proceso con SiC como enmascarante, las fotos a) y b) muestran la diferencia de las estructuras protegidas con la capa (foto b) en comparación cuando se elimina intencionalmente dicha capa (foto a). En ningún experimento del proceso BOSCH se formó la capa inhibidora al utilizar SiO₂ como enmascarante por su naturaleza inorgánica.

Hasta aquí se ha hecho el análisis de los perfiles de estructuras grabadas a tiempos cortos (menores que 5 minutos), con los diferentes gases polimerizantes, e incluso a diferentes potencias, aunque hubo diferencia con los perfiles ante el incremento de la potencia, los materiales enmascarantes resistieron el grabado. Sin embargo en tiempos prolongados de proceso, los materiales enmascarantes fueron afectados mostrando baja selectividad ante el Si. Este problema de los materiales enmascarantes resulta de gravedad, ya que en procesos de fabricación se requiere grabados muy profundos, de alrededor de 200 μm y las profundidades máximas alcanzadas con este proceso son de alrededor de 30 μm .

Como muestra del problema se presenta la figura 3.29, en la cual se observa la baja selectividad de los tres diferentes enmascarantes. Estas estructuras se grabaron incluso a baja potencia del ICP (450/30 W en fuentes ICP/RIE) y flujos de 100 sccm. Los ciclos son de 15 segundos y el tiempo total de proceso fue de 10 minutos. Los

enmascarantes, gases y alturas son respectivamente, para la foto a) FR, SF_6/CHF_3 y 10 cm, para la foto b) FR-SiC, SF_6/CF_4 y 20 cm, para la foto c) SiO_2 , SF_6/CHF_3 y 10 cm y para la d) SiC, SF_6/CF_4 y 20 cm.

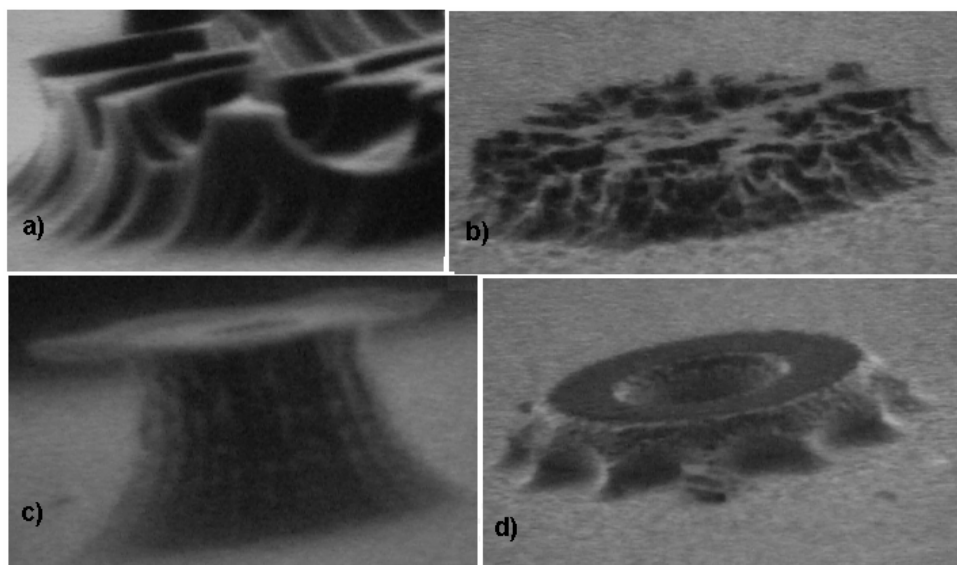


Figura 3.29. Proceso BOSCH a tiempos de 10 min.

Es claro que se tiene un problema con el material enmascarante, ya que ninguno de los enmascarantes mostró buena selectividad en tiempos mayores a 5 minutos. Como se puede ver en la foto a) y b), donde la FR utilizada sufre daño por el efecto del bombardeo iónico, atacando y dañando así el Si. En la foto c) es claro el grabado lateral y la mala selectividad del SiO_2 producto de la poca ayuda a la formación de la capa de polímero. En la foto d) el SiC también es eliminado durante el proceso y el silicio grabado.

Con el proceso BOSCH fue posible obtener perfiles con tendencia vertical en potencias de hasta 450 W en la fuente ICP, usando ambos gases polimerizantes (CF_4 y CHF_3) en la etapa de depósito y SF_6 en la de grabado. Aquí la velocidad de grabado es un factor relativo ya que el grabado es interrumpido periódicamente para realizar depósito, sin embargo, este valor se mantuvo constante ante la mayoría del cambio de parámetros, a excepción de la potencias ICP, donde se puede obtener mejor velocidad en 750 W. La selectividad de los enmascarantes usados es mínima en tiempos de proceso mayores a 5 minutos.

Este proceso, que resulta ser en mayoría un mecanismo químico, es una alternativa para la obtención de perfiles anisotrópicos ocupando tiempos no tan prolongados de proceso.

CAPÍTULO 4

Conclusiones y trabajos futuros

Este capítulo esta compuesto de dos partes, en la primera se presentan las conclusiones a las que se llegaron con los resultados del presente trabajo y en la siguiente se dan propuestas para iniciar algún otro trabajo de investigación referente a temas que se abrieron durante la tesis.

4.1. Conclusiones.

4.1.1. Condiciones para la máxima velocidad de grabado.

Presión

Con el análisis de los resultados obtenidos se dedujo que la presión adecuada de trabajo es de 40 mtorr, donde existe un balance entre los mecanismos físicos y químicos para el grabado.

Distancia al plasma denso

Se encontró que existe un aumento de la velocidad de grabado conforme la muestra está cerca del plasma de mayor densidad, por lo que las velocidades de grabado más altas se obtuvieron a una distancia de 6 cm.

Tipo de plasma

La tabla 4.1 muestra las máximas velocidades obtenidas en cada uno de los plasmas que se estudiaron en este trabajo, así como las condiciones de cada uno de ellos.

Velocidades isotrópicas máximas en cada tipo de plasma				
altura (mm)	Tipo de gas y flujos (sccm)	Potencias RF (W)	enmascarante	velocidad (μm/min)
60	SF ₆ (100)	ICP (750)	Al	9.98
60	SF ₆ /Ar (100/10)	ICP (750)	Al	7.67
60	SF ₆ /O ₂ (100/10)	ICP (750)	Al	13.08
60	SF ₆ /CHF ₃ (100/10)	ICP (750)	Al	8.87
60	SF ₆ /CHF ₃ /O ₂ (100/10/10)	ICP (750)	Al	10.01
60	SF ₆ /Ar/CHF ₃ /O ₂ 100/10/100/10)	ICP (750)	Al	4.24
100	SF ₆ /CF ₄ (50/50)	ICP/RIE (500/250)	SiO ₂	2.51

Tabla 4.1. Resultados de las máximas velocidades obtenidas en cada plasma.

El principal gas reactivo utilizado en este trabajo fue SF₆, en general al aumentar el flujo se obtuvo aumento en la velocidad de grabado. La adición de Ar permitió una mejor respuesta de la velocidad por el incremento en la producción de iones. La adición de O₂ colaboró con el aumento de la velocidad de grabado, debido a la mayor producción de flúor. Con la adición de CHF₃ el grabado resultó con menor velocidad debido a la polimerización de la superficie. Al incorporar O₂ a la mezcla SF₆/CHF₃ se observó un aumento en la velocidad de grabado. Con la mezcla SF₆/Ar/CHF₃/O₂, los gases aditivos colaboraron a diluir a los gases reactivos, notándose en el decremento considerable en la velocidad de grabado. La adición de CF₄ al plasma de SF₆ se observó que en la mayoría de los resultados el grabado fue dominado por la química mediante la formación de la capa de polímero, obteniendo una baja velocidad de grabado.

Potencias ICP/RIE

En general la velocidad de grabado se incrementa con el aumento de la potencia de las fuentes ICP y RIE.

Enmascarantes

Con el enmascarante de Al se obtienen las máximas velocidades de grabado indistintamente del plasma y sus condiciones, SiO₂ es poco selectivo y la FR fue eliminada en la mayoría de los procesos.

4.1.2. Condiciones para obtener grabado anisotrópico.

En la tabla 4.2 se muestran los resultados en los cuales se obtuvo la mejor anisotropía y sus condiciones de grabado.

Presión de 40 mtorr , h = 10 cm y enmascarante de SiO ₂			
Gases y flujos (sccm)	Potencias RF (W)	<i>dc bias</i> (V)	velocidad (μm/min)
SF ₆ /O ₂ (50/10)	ICP/RIE (500/100)	183	1.5
	ICP/RIE (750/100)	149	3.22
SF ₆ /CF ₄ (50/50)	ICP/RIE (500/250)	342	2.51
	ICP/RIE (750/250)	308	1.48
SF ₆ /CF ₄ (50/10)	ICP/RIE (500/200)	291	1

Tabla 4.2 Resultados de grabados anisotrópicos.

Se obtuvieron perfiles con tendencia vertical solo en los plasmas de SF₆/O₂ y SF₆/CF₄, en cada uno hubo tres casos. Todos estos casos se dieron cuando el voltaje de autopolarización es el máximo.

Enmascarantes

El enmascarante con el cual se obtuvieron los grabados anisotópicos fue con SiO_2 a altura no cercana al plasma de mayor densidad, pero resulta poco selectivo. El Al colabora con el grabado espontáneo y tiene buena selectividad. La FR no mostró buena selectividad en ningún plasma utilizado, a pesar de que se utilizaron diversos tipos y grosores, en todos los casos se eliminó durante el proceso.

Películas protectoras contra grabado espontáneo.

En el caso del plasma SF_6/O_2 se debió formar una película inorgánica de óxido, esta clase de películas son muy delgadas y es difícil poder observarlas en microscopios. Sin embargo, los comportamientos que tuvo la velocidad de grabado y la anisotropía obtenida, se supuso que dicha película fue formada. En el plasma SF_6/CF_4 fue posible observar la capa inhibidora, la cual es de material orgánico basado en polímero.

Velocidad y anisotropía.

Para obtener velocidad y anisotropía a la vez, en un grabado que esta influenciado por sus dos componentes, se observa que la velocidad disminuyó considerablemente al obtener la anisotropía. Esto llevó a determinar que en plasmas basados en flúor existe un compromiso entre velocidad y anisotropía.

Las condiciones de grabado con los mejores resultados en términos de velocidad de grabado y anisotropía se listan a continuación:

Para el enmascarante Al:

- ✓ La máxima velocidad de grabado es de $13.08 \mu\text{m}/\text{min}$.
- ✓ $p = 40 \text{ mtorr}$, $P = 750 \text{ W}$ (ICP), $h = 6 \text{ cm}$ con flujos de $100/10 \text{ sccm}$ de SF_6/O_2 .
- ✓ Perfiles isotrópicos.
- ✓ Promueve grabado lateral.
- ✓ Buena selectividad.

Para el enmascarante SiO_2 :

- ✓ La máxima velocidad de grabado es de $3.22 \mu\text{m}/\text{min}$.
- ✓ $p = 40 \text{ mtorr}$, $P = 750/100 \text{ W}$ (ICP/RIE), $dc \text{ bias} = 149 \text{ V}$, $h = 10 \text{ cm}$ con flujos de $50/10 \text{ sccm}$ de SF_6/O_2 .
- ✓ Perfiles anisotrópicos.
- ✓ Minimiza el grabado lateral.
- ✓ Poca selectividad.

4.1.3. Proceso BOSCH.

Con el proceso BOSCH fue posible obtener buena anisotropía en potencia de 450 W en fuente ICP y, 15 y 30 W en fuente RIE, a flujos de 100 sccm de SF_6 como gas reactivo, y CHF_3 o CF_4 como gas polimerizante. La velocidad de grabado se mantuvo constante con la variación de la mayoría de los parámetros, a excepción del aumento de la potencia de la fuente ICP (de 450 a 750 W). Este proceso, que resulta ser en mayoría un mecanismo químico, es una alternativa para la obtención de perfiles anisotrópicos. Con este proceso fue posible observar la capa de polímero protectora contra grabado espontáneo en los enmascarantes de FR y SiC. Sin embargo con enmascarante de SiO_2 no fue posible observar dicha capa.

En la tabla 4.3 se muestran las condiciones a las cuales se obtuvo un grabado anisotrópico.

Anisotropía en el Proceso BOSCH a 35 mtorr y 15 seg por ciclo						
altura (cm)	Etapas	gases y flujos (sccm)	Potencias ICP/RIE (W)	$dc \text{ bias}$ (V)	Enmascarante	velocidad ($\mu\text{m}/\text{min}$)
10	grabado depósito	SF_6 (100) CHF_3 (100)	450/15 y 450/30	84 90 y 100	FR y SiO_2	1.63 y 1.85
10 y 20	grabado depósito	SF_6 (100) CF_4 (100)	450/30	84 103	FR, SiO_2 y SiC	1.53, 1.26 y 1.3

Tabla 4.3. Condiciones para grabado anisotrópico BOSCH.

El problema con este proceso es la baja selectividad de los materiales enmascarantes de FR, SiO₂ o SiC ante el Si, ya que en alturas de 6 cm y/o tiempos de proceso mayores a 5 minutos estos enmascarantes se eliminaron durante el proceso.

4.1.4. Conclusiones Generales

- ✓ Las componentes física y química de grabado juegan un papel importante con la velocidad de grabado y anisotropía.
- ✓ En la mayoría de los resultados presentados el grabado es dominado por la componente química del proceso mediante grabado espontáneo y depósito de capa protectora.
- ✓ Para poder realizar grabados anisotrópicos es necesario que se genere un alto voltaje de autopolarización.
- ✓ La máxima velocidad de grabado con tendencia anisotrópica fue de 5.8 $\mu\text{m}/\text{min}$ con enmascarante de SiO₂ en $p = 40$ mtorr, $P = 750/100$ W (ICP/RIE), *dc-bias* de 104 V, en $h = 10$ cm con flujos de 100/10 sccm de SF₆/O₂.
- ✓ La máxima velocidad de grabado isotrópico fue de 13.08 $\mu\text{m}/\text{min}$ con enmascarante de Al en $p = 40$ mtorr, $P = 750$ W (ICP), $h = 60$ mm con flujos de 100/10 sccm de SF₆/O₂.
- ✓ La anisotropía también se alcanzó con el proceso químico BOSCH, resultando el SiC como mejor enmascarante.
- ✓ La máxima velocidad de grabado anisotrópico de proceso BOSCH fue 1.63 $\mu\text{m}/\text{min}$ en condiciones de: enmascarante de SiC, $p = 35$ mtorr, $P = 450/15$ W (ICP/RIE), $h = 10$ cm con gases y flujos de SF₆ (100 sccm) en grabado y CHF₃ (100 sccm) en depósito.
- ✓ En químicas basadas en flúor se observó que es difícil alcanzar una alta velocidad y anisotropía al mismo tiempo.
- ✓ Se encontró que existe un problema con los materiales enmascarantes utilizados, ya que ninguno mostró alta selectividad y eliminación del grabado lateral a la vez.
- ✓ Técnicas y equipos como este reducen el tiempo de fabricación de CIs ya que esta etapa abarca hasta un 60% del tiempo total.
- ✓ La buena caracterización de procesos de grabado en el equipo RIE/ICP ayuda a la elaboración de MEMS en volumen.

Estos resultados son característicos de las condiciones particulares obtenidas en este trabajo y con el equipo RIE/ICP del Laboratorio de Microelectrónica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en Puebla, México.

4.2. Trabajos futuros.

1. Optimización del proceso BOSCH mediante la realización de nuevos experimentos.
2. Hacer pruebas con el sistema criogénico para realizar grabados anisotrópicos basados en química de flúor mediante el enfriamiento de la muestra a temperaturas de aproximadamente -100 °C.
3. Probar otro tipo de materiales y espesores de enmascarantes, debido a la mala selectividad de los materiales enmascarantes utilizados en este trabajo.
4. Trabajar otras químicas a base de cloro y bromo.
5. Empleo de técnicas *in-situ* para el diagnóstico del plasma, lo que llevará a una mejor comprensión de los resultados.
6. Todas las partes que componen al sistema RIE/ICP cuentan con pines de salida que posteriormente pueden ser utilizados para que sean controlados desde una pc y de este modo el equipo sea automático.

Referencias

- [1] A. G. Rojas Hernández, Diseño de sistemas ópticos con microdepresiones producidas en Si cristalino, Tesis de doctorado, INAOE, México 2006.
- [2] J. E. Aragon Puerto, Fabricación de microelectrodos de Si utilizando micromaquinado con KOH, Tesis de doctorado, INAOE, México 2003.
- [3] J. E. Aragon Puerto, Micromaquinado de sondas de silicio y su aplicación en sensores de impulsos nerviosos, Tesis de maestría, INAOE, México 1997.
- [4] Walter Lang, Silicon Microstructuring technology, *Materials Science and Engineering*, R17, pp. 1-55, 1996.
- [5] S. M. Sze, Semiconductor Devices, John Wiley & sons, USA 2002.
- [6] Stanley Wolf, Silicon Processing for VLSI ERA, Lattice Press, USA 2000.
- [7] Ghandhi, VLSI Fabrication Principles, Wiley interscience, USA 1994.
- [8] Marc J. Madou, Fundamental of Microfabrication, CRC Press LLC, USA 2002.
- [9] M. Elwenspoek y H. V. Jansen, Silicon micromachining, Cambridge University press, USA 2004.
- [10] W. Scot Ruska, Microelectronic Processing, McGraw-Hill, USA 1987.
- [11] Dennis M. Manos, Daniel L. Flamm, Plasma etching: an introduction, Academic Press Inc., USA 1989.
- [12] Brian Chapman, Glow Discharge Processes, John Willey & sons, USA 1980.
- [13] Alfred Grill, Cold Plasma in Materials Fabrication, IEEE PRESS, USA 1993.
- [14] J. Reece Roth, Industrial Plasma Engineering, Vol. 1 y 2, IOP Publishing, USA 2003.
- [15] Gottlieb S. Ochrlein, Handbook of Plasma Procesing Technology, Noyes Publications, 1990.
- [16] Gottlieb S. Ochrlein y Yukinori Kurogi, Sidewall surface chemistry in directional etching processes, *Materials Science and Engineering*, R 24, pp. 153-183, 1998.
- [17] M. Boufnichel y col., Origin, control y elimination of undercut in silicon deep plasma etching in the cryogenic process, *Microelectronic Engineering*, Vol. 77, pp. 327-336, 2004.
- [18] M. Boufnichel y Col., Profile control of high aspect ratio trench of silicon. I. Effect of process parameters on local bowing, *American Vacuum Society*, Vol. 20 (4), pp. 1508-1512, 2002.

- [19] R. Dussart y col., Passivation mechanisms in cryogenic SF₆/O₂ etching process, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, pp. 190-196, 2004.
- [20] M. Francou y Col., Deep and Fast Plasma Etching for silicon micromachining, *Sensors and Actuators*, Vol. 46-47, pp. 17-21, 1995.
- [21] Sergi Gomez y Rodolfo J. Belen y Col., Etching of high aspect ratio structures in Si using SF₆/O₂ plasma, *American Vacuum Society*, Vol. 22, pp. 606-615, 2004.
- [22] W. J. Park y Col, Etching Characterization of Shaped hole high density plasma for using MEMS devices, *Surface & coatings technology*, Vol. 193, pp. 314-318, 2004.
- [23] C. J. D. Craigie, T. Sheehan y Col., Polymer Thickness effects on BOSCH etch profiles, *America Vacuum Society*, Vol. 20 (6), pp. 2229, 2002.
- [24] Gottlieb S. Ochrlein, Surface Processes in low Pressure Plasma, *Surface Science*, Vol. 386, pp. 222-230, 1997.
- [25] I. W. Rangelow, Reactive ion etching for high aspect ratio silicon micromachining, *Surface & coatings technology*, Vol. 97, pp. 140-150, 1997.