



INAOE

Caracterización de procesos de grabado seco de materiales para la fabricación de dispositivos CMOS

por

Ing. Fernando Castillo Hernández

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

Enero 2008

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dra. Claudia Reyes Betanzo

© INAOE 2008

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



Resumen

La tendencia actual en la fabricación de circuitos integrados lleva al desarrollo de dispositivos con menores dimensiones y con número mayor de elementos integrados en un mismo chip, los cuales requieren alta definición de sus estructuras. En este sentido, una de las etapas más importantes en los procesos de fabricación es el grabado con plasma, debido a que cumple eficientemente con el requisito de una transferencia fiel de patrones. El presente trabajo tiene como objetivo principal la caracterización de los procesos de grabado de materiales en los procesos de Oxidación Local de Silicio ($Si_3N_4/polisilicio/SiO_2$, con espesores de 150, 50 y 12 nm respectivamente) y de definición de compuerta ($polisilicio/SiO_2$, con espesores de 400 y 10 nm respectivamente), desarrollados en el proyecto de fabricación de dispositivos CMOS de 0.8 μm del nuevo Laboratorio de Nanoelectrónica del Instituto. Ambos procesos juegan un papel importante en la microfabricación debido a que conjugan la reducción del ancho de canal de la compuerta con el asilamiento entre los dispositivos. La técnica empleada para realizar los procesos es la de Grabado Iónico Reactivo (RIE), debido a que involucra la combinación de mecanismos químicos del plasma y efectos físicos debidos al bombardeo iónico. Para producir el plasma para grabado se utiliza una descarga de RF con diferentes gases reactivos, como son SF_6 y CF_4 , en mezcla con O_2 . La variación de los parámetros involucrados en el grabado permite encontrar las condiciones adecuadas para obtener una velocidad de grabado, selectividad y anisotropía apropiadas a cada proceso.

Del análisis de las estructuras llevado a cabo con un microscopio electrónico de barrido (SEM), fueron observados perfiles de estructuras con tendencia vertical, con velocidades controlables de grabado de Si_3N_4 de hasta $45\text{ nm}/\text{min}$, adecuados para el proceso previo a la oxidación del Sistema de Oxidación Local de Silicio (LOCOS). En esta etapa de proceso no se requiere alta selectividad del Si_3N_4 respecto al polisilicio; sin embargo, para la etapa posterior a la oxidación es necesario tener alta selectividad tanto del Si_3N_4 como del polisilicio respecto al óxido delgado, ya que ambos materiales deben ser totalmente removidos. En ninguna de las dos etapas del proceso LOCOS la anisotropía es crítica. En el caso del sistema de definición de compuerta, el cual demanda alta selectividad del polisilicio (fuertemente dopado con fósforo) respecto al SiO_2 , fueron observados perfiles con tendencia vertical, con velocidades controlables de grabado de polisilicio de hasta $143\text{ nm}/\text{min}$ y selectividad de 22.5.

Agradecimientos

- Al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, por permitirme ser parte de él, por su hospitalidad y apoyo, GRACIAS!
- Al CONACYT por el apoyo económico brindado a través de la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría, GRACIAS!
- Mi más sincero agradecimiento a la Dra. Claudia Reyes Betanzo, profesora, asesora y directora de tesis, por todo su apoyo para llevar a cabo este proyecto de tesis.
- Un agradecimiento muy especial a los doctores: Alfonso Torres Jacome, Wilfrido Calleja Arriaga y Carlos Zúñiga Islas por su apoyo y contribución en la realización de esta tesis.
- Un agradecimiento especial al M. en C. José Guzmán, del Instituto de Materiales de la UNAM, por su gran apoyo en la observación de las muestras en el SEM.
- A todos mis compañeros y amigos del INAOE que han compartido su vida y experiencias conmigo, que me han brindado su apoyo y ayuda para la realización de esta tesis: Marisela, Ramiro, Bety, Jenny, Carlitos, Erasmo, Pepo, Edgar, Merizio, Oscar, Decle, Miguelito, Abdú, Fer, Alina, Nestor, Marisol, Andrés, Williams, Chucho, Oz, Chava, Joana, Miguel y los que me faltaron, GRACIAS!

-
- A el personal técnico del Laboratorio de Microelectrónica del INAOE: Don Pablito, don Mauro, Gina y Adrian por su ayuda durante las prácticas, sus asesorías y las facilidades para realizar los experimentos, GRACIAS!
 - A todos los profesores y personal que labora en el INAOE por la formación de excelentes personas y profesionales, GRACIAS!
 - A todos mis amigos GOSBRIAS: Pepe, Santos, Lobo, Marce, Juanito, Aaron, Raunel, Lucio, Oscar, Manolo, Afú, Al, Ricky, etc., por los momentos que hemos vivido, por su amistad, confianza, apoyo y demás virtudes que los hacen ser excelentes personas, una vez más, GRACIAS!
 - A "TODA" mi familia, padres y hermano, por su gran apoyo durante este tiempo, GRACIAS!.
 - A Bere, por estar siempre codo a codo, de la mano, fuerte, con su apoyo y entusiasmo, GRACIAS!

"Como no te voy a querer...".

Dedicatoria

A mis padres, *Maguín* y *Silvia*, y a mi hermano *Al*, porque son la luz que ilumina siempre mi camino.

A mi novia *Bere* por su amor, cariño, apoyo, alegría, sonrisa y amistad: Eres aire que da vida...

A la memoria de mis abuelitos, mis tíos y mis primitas, por su enseñanza, su cariño y alegría.

A mis abuelitas *Tata* y *Juanita*, por su amor y apoyo en todo momento.

A cada uno de mis tíos, primos, y demás miembros de mi fantástica familia, por su cariño y su apoyo constante.

A Dios y a L.S.M.G, por escucharme y darme siempre la respuesta correcta.

Índice general

1. Introducción	1
2. Fundamentos de grabado con plasma	9
2.1. Plasma para procesos de grabado de materiales	10
2.1.1. Procesos de colisión	10
2.1.2. Presión y flujo	13
2.1.3. Energía y temperatura	14
2.1.4. Densidad y grado de ionización	16
2.1.5. Procesos químicos	17
2.1.6. Reacciones superficiales	20
2.2. Grabado con plasma	23
2.2.1. Plasma de radiofrecuencia	25
2.2.2. Formación de la lámina de plasma	27
2.2.3. Grabado Iónico Reactivo	28
2.2.4. Requisitos en el proceso de grabado	30
2.3. Grabado de materiales para la fabricación del dispositivo CMOS . .	34
2.3.1. Grabado con plasma empleado en el proceso de Oxidación Local de Silicio (LOCOS)	36
2.3.2. Grabado con plasma empleado para la definición de la com- puerta del dispositivo CMOS	39

3. Parte experimental	41
3.1. Preparación de las muestras	41
3.1.1. Limpieza	42
3.1.2. Crecimiento de óxido delgado	43
3.1.3. Depósito de polisilicio	44
3.1.4. Depósito de nitruro de silicio	45
3.1.5. Litografía	46
3.2. Condiciones de grabado por medio de RIE	46
3.2.1. Variación de parámetros	49
3.2.2. Medición de la velocidad de grabado	50
3.2.3. Inspección de perfiles	51
4. Resultados y discusión	53
4.1. Análisis mediante tipo de plasma	54
4.1.1. Resultados de grabado con CF_4	54
4.1.2. Resultados de grabado con $CF_4 + O_2$	61
4.1.3. Resultados de grabado con SF_6	65
4.1.4. Resultados de grabado con $SF_6 + O_2$	68
4.1.5. Resultados de grabado con $SF_6 + CF_4$	72
4.2. Análisis de la anisotropía	75
4.2.1. Proceso de Oxidación Local de Silicio	75
4.2.2. Proceso de definición de compuerta	78
5. Conclusiones y trabajos futuros	85
5.1. Proceso de Oxidación Local de Silicio	85
5.2. Proceso de definición de compuerta	87
5.3. Conclusión general	89
5.4. Trabajos futuros	89

Referencias

98

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1

Introducción

El rápido desarrollo del grabado con plasma ha llegado a ser una parte integral en el proceso de fabricación de dispositivos microelectrónicos desde su aparición a principios de los años 70. Inicialmente, las características químicas reactivas del plasma fueron adaptadas para el proceso de grabado. Hoy en día, la fabricación de circuitos integrados depende de diferentes etapas que van desde la concepción del dispositivo, su diseño por computadora, la generación de patrones, la elección y modificación del sustrato y de los materiales depositados, la transferencia de patrones, la eliminación del exceso de material, la inspección y elección de los dispositivos, el corte y ensamble de los mismos, su encapsulado, hasta concluir con las pruebas finales. El grabado con plasma ha llegado a ser entonces de principal interés ya que es una de las técnicas que puede realizar eficientemente la transferencia total y controlada de patrones, la cual es una etapa importante en el proceso de fabricación.

Desde la invención del transistor, en 1947 por Bardeen, Brattain y Shockley, la base teórica para la tecnología de fabricación es seguida por el desarrollo de circuitos integrados (CIs), cuya principal característica es la tendencia a buscar menores

dimensiones en los dispositivos dentro del mismo chip y aumentar consecuentemente el número de transistores. Esta operación ha sido relacionada directamente con las dimensiones de los transistores, teniendo patrones con ancho de línea desde $1\ \mu\text{m}$ hasta $0.25\ \mu\text{m}$ en la década de 1980 [1]. Actualmente los dispositivos son desarrollados por debajo de $0.13\ \mu\text{m}$.

A medida que las dimensiones de los transistores se reducen, la complejidad del dispositivo ha aumentado a partir de la integración de gran escala (*Large Scale Integration*, LSI, 10^3 - 10^5 dispositivos por circuito), siguiendo a la integración de muy grande escala (*Very Large Scale Integration*, VLSI, 10^5 - 10^6 dispositivos por circuito), llegando hasta la integración de ultra gran escala (*Ultra Large Scale Integration*, ULSI, $> 10^6$ dispositivos por circuito) [1]. La tecnología de integración actual ha permitido reducir las dimensiones del dispositivo Metal Oxido Semiconductor Complementario (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*, CMOS) en particular, en la disminución de la longitud del canal de la compuerta del dispositivo hasta escalarlo en el régimen nanométrico. Como ejemplo se tiene el microprocesador de 32 bits Pentium 4, $1.9\ \text{GHz}$, cuya área aproximada es de $200\ \text{mm}^2$ con 42 millones de componentes; éste es un chip ULSI con tecnología CMOS $0.18\ \mu\text{m}$, 6 niveles de aluminio aproximadamente [2]. El límite de escalamiento es un factor fundamental en el proceso de grabado ya que el reto radica entonces en la transferencia fiel de los patrones reducidos hasta esas dimensiones.

El trabajo que se propone se desarrolla dentro del proyecto de fabricación de dispositivos CMOS de $0.8\ \mu\text{m}$ del nuevo Laboratorio Nacional de Nanoelectrónica del INAOE. El objetivo principal es la caracterización de los procesos de grabado con plasma de los diferentes materiales empleados en la fabricación del dispositivo CMOS, mediante la optimización de la velocidad de grabado, selectividad

y anisotropía en función de los parámetros de proceso como son las condiciones apropiadas de gases y sus mezclas, potencia, presión y flujo. Uno de los procesos de grabado a caracterizar esta relacionado con la estructura de nitruro de silicio, silicio policristalino y óxido ($Si_3N_4/polisilicio/SiO_2$, con espesores de 150, 50 y 12 nm respectivamente), empleado en el proceso de Oxidación Local de Silicio, (*Local Oxidation of Silicon*, LOCOS) para el aislamiento entre los transistores. Este proceso exige requisitos específicos en términos de velocidad de grabado ya que inicialmente, una vez definidas las regiones activas del transistor mediante litografía y previo a la oxidación local, se requiere remover el nitruro y después el polisilicio en un porcentaje. Una vez llevada a cabo la oxidación local de silicio se desea eliminar por completo estos materiales que protegen al óxido delgado, llegando a tener selectividad del polisilicio respecto al óxido. El otro proceso esta relacionado con la estructura de silicio policristalino dopado fuertemente con fósforo y óxido de silicio ($polisilicio/SiO_2$, con espesores de 400 y 10 nm respectivamente), empleado para la definición de compuerta del dispositivo. Este proceso en particular exige requisitos específicos de grabado en términos de velocidad de grabado ya que se tienen películas delgadas, alta selectividad del polisilicio respecto al óxido y un perfil anisotrópico para la definición de la compuerta.

Un trabajo que ha servido como antecedente para el grabado de estructuras, en particular para una compuerta de polisilicio de 0.25 μm , fue desarrollado mediante la aplicación de una descarga de radiofrecuencia (RF), con potencia de 75 W , en condiciones de baja presión (por debajo de 1 $mTorr$) en un reactor de resonancia helicoidal. Los procesos fueron desarrollados en 1989 por investigadores de los Laboratorios *Bell* bajo condiciones de grabado que implicaban utilización de plasma a base de cloro (Cl_2) en mezcla con oxígeno (O_2), con flujos de 5 a 15 scm ; las muestras consistieron de una estructura de polisilicio dopado con arsénico (300

nm) y óxido de campo crecido térmicamente (100 nm). Las velocidades de grabado obtenidas para el polisilicio fueron desde 8.8 hasta 34 nm/min y selectividad de 25 hasta 70 del polisilicio respecto al óxido de silicio [3]. Se han llevado a cabo también procesos previos de grabado de muestras de nitruro de silicio y polisilicio mediante Bombardeo Iónico Reactivo (*Reactive Ion Etching*, RIE) con potencia de 50 a 70 W de RF y presión de 22 a 52 mTorr , desarrollado en 1995 en el laboratorio de electrónica de la Universidad de Delft (Holanda) mediante la utilización de gases a base de fluor y carbono, CHF_3 o CF_4 , con nitrógeno, N_2 . Las velocidades de grabado obtenidas para el nitruro fueron de 35 a 38 nm/min , mientras que para el polisilicio fueron de 2.5 a 10 nm/min . Por otra parte, los valores de selectividad del nitruro respecto al polisilicio fueron de 1.4 hasta 4.2 [4]. En ambos casos los resultados muestran velocidades de grabado adecuadas a los procesos y perfiles altamente anisotrópicos. Otros experimentos han sido realizados para el grabado de películas de nitruro de silicio (500 nm) mediante RIE, utilizando una química de plasma a base de gases de fluor y carbono (CF_4 , C_2F_6 y CHF_3), con flujos de 100 y 200 sccm , en un equipo que opera a 13.56 MHz con presión de 100 a 300 mTorr y potencia RF de 100 W . En este caso, la velocidad de grabado se incrementó de acuerdo al orden de empleo de estos gases entre 10 y 90 nm/min . La selectividad del nitruro sobre el silicio también se incrementó en el mismo orden, obteniendo valores de hasta 25 [5]. Un trabajo previo que involucra el proceso de grabado de películas de nitruro después del proceso LOCOS se desarrolló en la Universidad de Albany, Nueva York, en 1999, el cual empleaba una descarga de O_2 , N_2 y CF_4 en una fuente de microondas (ASTEX, 2.4 GHz) para remover el nitruro. En estos casos fueron obtenidas velocidades de grabado del nitruro de 50 nm/min , mientras que la selectividad respecto al polisilicio fue de 100 y respecto al óxido de 70 . Fueron obtenidas además velocidades de grabado de nitruro tan grandes como 300 nm/min para mezclas de CF_4 con O_2 [6].

El proceso de grabado de materiales requiere mantener fielmente las dimensiones de las estructuras, cuestión que no es del todo cumplida al utilizar grabantes químicos, como es el caso del grabado húmedo. Esto es debido a que el grabado del material es realizado de manera isotrópica; en algunos casos liberando el enmascarante. Al adecuar los parámetros del plasma se puede tener un mecanismo de grabado anisotrópico. Una de las técnicas más empleadas es el Grabado Iónico Reactivo. El equipo RIE es un reactor de placas paralelas que permite la combinación de los mecanismos químicos generados por especies reactivas, así como por los efectos físicos causados por el bombardeo iónico en la superficie del material expuesto. Ambos mecanismos están influenciados por la aplicación de una potencia de RF; el electrodo donde se coloca la muestra está conectado a dicha fuente, mientras que el otro permanece aterrizado.

Los procesos a caracterizar fueron llevados a cabo en el equipo RIE/ICP del Laboratorio de Microelectrónica del INAOE, considerando sólo el empleo del modo RIE. Se optó por utilizar esta técnica debido principalmente a que se trabaja con películas delgadas y no se requiere plasma de alta densidad con velocidades altas y con ello un grabado profundo. Por otra parte, es posible ajustar los parámetros que influyen en el proceso de grabado, obteniendo buenos resultados, en función de la selectividad y la anisotropía, para la optimización del proceso y satisfaciendo los requerimientos establecidos para una buena definición de patrones en ambas etapas de fabricación del dispositivo CMOS.

Así pues, el capítulo dos presenta una revisión de los fundamentos de grabado con plasma partiendo de su estudio y el mecanismo involucrado para llevarlo a cabo. También se presenta la adaptación del proceso a las condiciones que involu-

eran las dos etapas de grabado de materiales en la fabricación del CMOS, en las cuales se enfoca este trabajo. En este sentido, para el proceso de Oxidación Local del Silicio, este se realiza con el grabado de nitruro y una parte de polisilicio previo a la oxidación. Posteriormente, concluye con el grabado de ambos materiales una vez llevada a cabo la oxidación. Para tener un control de grabado se establecieron las condiciones necesarias para obtener una velocidad de alrededor de $70 \text{ nm}/\text{min}$ y con ello garantizar que el material enmascarante resistiera un tiempo de grabado corto. En este proceso la anisotropía no es crítica ya que los materiales a grabar sirven como enmascarantes tanto en la etapa previa, como en la posterior a la oxidación local. En el caso del proceso de definición de compuerta el grabado del polisilicio requirió de una velocidad de grabado de alrededor de $80 \text{ nm}/\text{min}$ para no tener tiempos prolongados que puedan afectar al enmascarante. Además, fue necesario tener una alta selectividad del polisilicio respecto al óxido y anisotropía para obtener una buena definición de compuerta.

En el capítulo tres se muestra la metodología experimental llevada a cabo, desde la preparación de muestras hasta el establecimiento de las condiciones de grabado con la utilización del equipo RIE. En esta etapa se emplearon diferentes tipos de gases y sus mezclas; como es el caso de los gases reactivos CF_4 y SF_6 , y del gas aditivo O_2 . Los flujos de los gases reactivos se establecieron en 15 sccm, mientras que para el gas aditivo se estableció en un rango entre 2.5 y 10 sccm. La potencia empleada en el equipo fue considerada entre 25 y 75 W . La presión utilizada fue variando de acuerdo a los siguientes valores: 25, 50, 75 y 100 $mTorr$. Los tiempos de grabado oscilaron entre 1 y 5 minutos.

El capítulo cuatro comprende los resultados experimentales obtenidos en la caracterización del grabado de las estructuras del proceso de Oxidación Local de Silicio

y del proceso de definición de compuerta del dispositivo CMOS. De este modo, en el caso de la estructura para el proceso LOCOS se obtuvieron velocidades de grabado de 41, 45 y 61 nm/min con el uso de plasma de CF_4 y valores de selectividad de nitruro respecto al polisilicio de 2.5, 2 y 1.5, mientras que para el polisilicio respecto al óxido de 18, 1.5 y 1.2, respectivamente. Para la estructura del proceso de definición de compuerta se encontraron que los valores de la velocidad de grabado adecuados fueron de 78, 143 y 150 nm/min con la utilización de las mezclas de gases SF_6/CF_4 , SF_6 y SF_6/O_2 , respectivamente. Para cada caso se obtuvo una selectividad de polisilicio respecto al óxido de 22.5, 150 y 78. Se tomaron además una serie de fotografías en un microscopio electrónico de barrido (SEM) de las secciones transversales de las estructuras obtenidas en el laboratorio de las estructuras de ambos procesos; lo anterior con la finalidad de observar el perfil de las estructuras.

Finalmente, el capítulo cinco presenta las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos en los procesos de grabado en ambas etapas de fabricación del dispositivo CMOS. Del mismo modo, se mencionan los trabajos futuros consecuentes del trabajo realizado.

Capítulo 2

Fundamentos de grabado con plasma

Uno de los procesos críticos en la fabricación de circuitos integrados está relacionado directamente con el proceso de grabado basado en plasma. Años atrás, el proceso de grabado en la fabricación de los circuitos integrados involucraba en su mayoría procesos químicos llevados a cabo utilizando soluciones químicas, los cuales realizaban un grabado isotrópico. Hoy día, el proceso de grabado con plasma es utilizado para definir patrones desde dimensiones micrométricas hasta nanométricas con mayor eficiencia mediante un proceso que involucra componentes físicas y químicas para llevarlo a cabo.

Sin embargo, los procesos de grabado con plasma son a menudo un tanto complejos y requieren significativamente más atención y estudio que los procesos de grabado húmedo; estos requerimientos están dados en términos del estudio del plasma y los factores que involucran el proceso de grabado (tal como la velocidad de grabado, selectividad, control de perfil y daño superficial). Lo anterior ha originado, desde hace varios años, el desarrollo de estudios sobre el grabado de los

materiales empleados en la fabricación, lo cual significa llevar a cabo un diagnóstico de plasma y análisis superficial.

2.1. Plasma para procesos de grabado de materiales

Considerado como el cuarto estado de la materia, el plasma es un gas parcialmente ionizado que consiste de un número igual de cargas positivas y negativas. Cada partícula cargada en el plasma interactúa simultáneamente con muchas otras debido a la fuerza eléctrica. Un plasma se obtiene cuando suficiente energía, mayor que la energía de ionización, se aplica por medio de un campo eléctrico a los átomos de gas causando la producción de iones y electrones libres. Para propósitos de grabado, el plasma tiene densidades de electrón e ion en el rango de 10^{15} a $10^{19} m^{-3}$ y densidades de especies neutras en el rango de 10^{19} a $10^{22} m^{-3}$. Estos plasmas son producidos en el rango de presión de $1 mTorr$ a $1 Torr$ [7], y es la combinación de las propiedades eléctricas y químicas lo que le dan a estos plasmas sus atributos únicos para el procesamiento de materiales.

El plasma debe ser constantemente excitado y mantenido para proporcionar al gas una energía electromagnética. La fuente de energía para producir la descarga eléctrica a través del gas, y con ello formar el plasma, puede ser de diferentes formas: corriente directa, radiofrecuencia ó microondas, entre otras [7].

2.1.1. Procesos de colisión

En el caso del gas neutro al ser introducido en la cámara de proceso, las fuerzas que actúan entre sus moléculas son nulas y las partículas viajan en líneas rectas, obedeciendo con ello a la teoría cinética de los gases. Se supone entonces que las

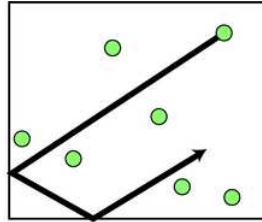


Figura 2.1: Colisiones de un átomo en un gas, donde la trayectoria de las partículas se presenta en líneas rectas [8].

partículas de dicho gas son consideradas como esferas rígidas. El camino medio libre es la distancia promedio en la cual un átomo del gas viaja para colisionar con otros átomos del gas, el cual decrece a presiones altas. La teoría cinética de los gases supone que no existen fuerzas actuando entre moléculas del gas, de esta manera se presentan interacciones entre los átomos del gas exclusivamente durante las colisiones. El movimiento esta controlado por la colisión de las moléculas, cuyas partículas viajan en lineas rectas, y entre las paredes del contenedor (Figura2.1). Una vez que es aplicado un campo eléctrico en el cuerpo del gas, el movimiento de partículas puede causar concentraciones locales de cargas positivas y negativas, mismas que generan grandes campos Coulómbicos que afectan el movimiento de las partículas fuera de las concentraciones de carga [8].

La consecuencia de la generación de estos campos afecta al conjunto de cargas que se encuentran a distancias aún muy separadas dando al plasma su comportamiento colectivo característico. De esta manera, las partículas cargadas en un plasma responden a los campos eléctricos y magnéticos que se producen en el gas debido a su excitación y se mueven a lo largo de un camino el cual sigue al campo eléctrico. Cuando el gas se encuentra a bajas presiones, el efecto de las fuerzas electromagnéticas sobre el movimiento de las partículas puede resultar más fuerte

que el efecto de las colisiones entre las partículas, de esta manera se dice que es un plasma sin colisiones [8].

Tipos de Colisiones

Las colisiones entre partículas en el plasma pueden clasificarse en elásticas e inelásticas. En este sentido, las partículas tienen usualmente dos tipos de energía: energía cinética debida a su movimiento y energía potencial, o interna, la cual puede ser en la forma de ionización, excitación, recombinación, etc. Las colisiones elásticas son las producidas entre electrones y partículas neutras o cargadas que no resultan en excitación de dichas partículas. Por el contrario, las colisiones inelásticas dejan a las partículas en un estado excitado, y la transferencia de energía debida a la colisión está determinada por la razón de masa de las partículas. Debido a la aceleración producida por el campo eléctrico los electrones ganan energía y la transfieren por medio de colisiones inelásticas a las moléculas neutras del gas. En el caso de colisiones inelásticas entre electrones energéticos y especies pesadas del plasma, la transferencia de energía no es controlada por la razón de masa de las partículas. En este tipo de colisiones el electrón puede transferir casi toda su energía a la partícula pesada, creando una especie energética del plasma. De esta manera se producen las partículas que forman a dicho plasma y que le dan su característica para realizar grabado. La colisión inelástica más importante es la ionización por impacto de electrón, en la cual el electrón primario remueve un electrón del átomo, produciendo dos electrones y un ion positivo. Los dos electrones producidos por la colisión pueden ser nuevamente acelerados por el campo eléctrico hasta producir de nueva cuenta electrones e iones. Se requiere de un mínimo de energía para que el proceso de ionización ocurra, igual a la energía para remover el enlace de electrón más débil del átomo, y es conocida como potencial de ionización.

El proceso opuesto a la ionización es la recombinación, donde un electrón se une con un ion positivo para formar un átomo neutro.

La transferencia de energía a un átomo en un enlace permite al electrón saltar a un nivel de energía alto dentro del átomo con una correspondiente absorción de energía. Este proceso es conocido como excitación, donde el electrón primario pierde energía eléctrica igual al potencial que gana una vez excitado. El proceso opuesto a la excitación es la relajación, donde los estados excitados son inestables y el electrón regresa pronto a su estado original en una o varias transiciones. La transferencia de energía involucrada en las colisiones inelásticas se presenta en cantidades que varían desde $0.1 eV$, para la excitación de moléculas, a más de $10 eV$ para la ionización. Las colisiones electrón-electrón pueden jugar también un papel significativo en el proceso de transferencia de energía en el plasma; su importancia depende del grado de ionización que existe en el plasma [9,10].

2.1.2. Presión y flujo

Debido a que las moléculas del gas neutro que están entrando continuamente en la cámara de proceso poseen energía suficiente para seguirse moviendo dentro del espacio cerrado, cada vez que una molécula golpea la pared de la cámara ejercerá una fuerza y la fuerza total por unidad de área debido a todos los átomos es conocida como presión. La presión del plasma depende directamente de la densidad de átomos de gas, su masa y de su velocidad cuadrática media. La medida de la presión es también usada para definir la energía proporcionada para formar el plasma; es decir, debido al aumento de presión se produce una disminución en la energía cinética de las moléculas. El flujo de entrada de gas hacia la cámara es necesario para mantener la presión en operación [10]. En general, los efectos de la presión pueden ser entendidos de la siguiente manera. Cuando es mantenida una

baja presión (1-10 *mTorr*) del gas en el sistema la energía cinética de las moléculas aumenta debido al aumento en el camino medio libre entre ellas y la reducción de colisiones entre iones. Al aumentar la presión (10-100 *mTorr*) existe una menor energía debido a la disminución del camino medio libre entre iones y moléculas. Cuando la presión aumenta, de 100 *mTorr* hasta 1 *Torr*, la energía cinética de las especies reactivas disminuye aún más debido a la gran cantidad de colisiones que se presentan entre ellas.

2.1.3. Energía y temperatura

Los mecanismos esenciales que ocurren en el plasma son la excitación y relajación, ionización y recombinación, además de la disociación. Para mantener en estado estacionario las densidades del electrón y del ion, el proceso de recombinación debe ser balanceado por un proceso de ionización, entonces se requiere de una fuente externa de energía. En el caso de plasma para grabado, la fuente de energía es un campo eléctrico, el cual puede actuar directamente sólo con las partículas cargadas [11]. Al considerar un campo eléctrico actuando sobre un ion inicialmente estacionario (asociando a m_e y m_i como la masa del electrón y del ion respectivamente) el trabajo realizado por el campo, y por lo tanto la energía transferida al ion, viaja una cierta distancia en un tiempo específico.

Una idea similar es asociada para la energía transferida al electrón; sin embargo, como m_i es mayor que m_e , la acción del campo eléctrico es primordialmente brindar energía a los electrones. Los átomos neutros y los iones comparten su energía eficientemente en los procesos de colisión, asimismo ceden energía a las paredes de la cámara del reactor. Los electrones pueden tener un promedio alto de energía cinética; la transferencia de energía se presenta en cantidades que varían desde 0.1 *eV* (para excitación de moléculas) a más de 10 *eV* (en el caso de

ionización). Los iones pueden absorber sólo un poco de energía directamente del campo eléctrico y tener un promedio de energía no muy alto que aquel que tienen las moléculas neutras, las cuales ganan energía en el ambiente sólo por colisiones con iones (efectivas) y electrones (no efectivas) y permanecen esencialmente a temperatura ambiente [8].

La temperatura representa la energía media de traslación de las moléculas en el sistema. En este sentido, el plasma puede ser considerado como un complemento de dos sistemas; el primero que solo contiene electrones y otro sistema que contiene especies pesadas. Los electrones e iones pueden ser caracterizados por sus temperaturas promedio, T_e y T_i respectivamente, y las especies pesadas caracterizadas por varias temperaturas: la del gas (T_g) que caracteriza la energía de traslación del gas, la de excitación (T_{ex}) que caracteriza la energía de excitación de partículas en el plasma, la de ionización (T_{ion}) que caracteriza la energía de ionización, la de disociación (T_d) que caracteriza la energía de disociación, la de radiación (T_r) que caracteriza la energía de radiación. Aunque bajo ciertas condiciones es posible alcanzar un equilibrio térmico ($T_g = T_{ex} = T_{ion} = T_d = T_r = T_e$), éste no puede ser alcanzado totalmente. Entonces, la temperatura del electrón es considerada más importante en un plasma que no se encuentra en equilibrio térmico [10].

Los plasmas a baja presión presentan las siguientes características:

- La fuerza del campo eléctrico en el plasma es lo suficientemente baja tal que las colisiones inelásticas pueden ser despreciadas, pero lo suficientemente grande para que la temperatura del electrón sea mucho mayor que la temperatura del ion, $T_e \gg T_i$.
- La frecuencia de colisión es independiente de la energía del electrón.

Las temperaturas tienden a equilibrarse, debido a la interacción entre electrones y partículas pesadas, cuando la presión o densidad de electrones en el plasma se incrementa [12].

2.1.4. Densidad y grado de ionización

La densidad del plasma esta determinada por la densidad de cargas positivas y negativas que son localmente balanceadas, es decir, la densidad de electrones y la densidad de iones son en promedio iguales y es un valor mucho menor que la densidad de partículas neutras. En el caso de grabado, la densidad determina la razón de reacción y mientras se tiene una densidad alta cerca de la superficie a grabar, el bombardeo iónico es más uniforme [12]. En la figura 2.2 se observa la distribución de densidad de las partículas del plasma de acuerdo a la temperatura; la distribución de las partículas, de acuerdo a su densidad, que corresponden a cada una de los valores de temperatura son:

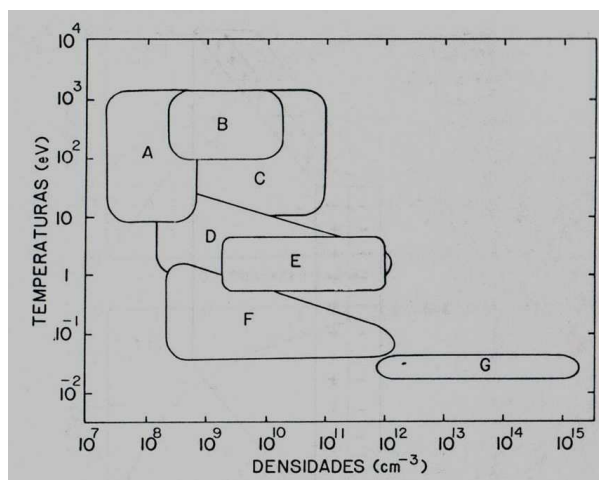


Figura 2.2: Distribución de densidad de las partículas del plasma de acuerdo a la temperatura [12].

- A - Electrones secundarios acelerados hacia la lámina del plasma.
- B - Iones retrodispersados por el cátodo.
- C - Iones acelerados hacia el cátodo
- D - Electrones en el volúmen del plasma.
- E - Iones y neutros Franck-Condon.
- F - Iones en el volúmen del plasma.
- G - Átomos y moléculas neutras.

El plasma para grabado esta caracterizado por la densidad de partículas neutras, densidad de electrones e iones y sus distribuciones de energía. La densidad del plasma es de suma importancia debido a que la eficiencia de los procesos de grabado dependen directamente de la densidad de las partículas cargadas. El grado de ionización es un parametro que define la densidad de partículas cargadas en el plasma, además especifica la fracción de partículas en la fase gaseosa, la cual es ionizada. Las densidades de plasma de 10^{17} a $10^{18} m^{-3}$ corresponden típicamente a fuentes de plasma de alta densidad, mientras que para densidades $< 10^{16} m^{-3}$ son típicamente de fuentes de plasma capacitivos. En plasmas mantenidos a baja presión, el grado de ionización típico es de 10^{-6} a 10^{-3} . Para el caso de plasmas donde la descarga es asistida y confinada por un campo magnético adicional, el grado de ionización puede alcanzar valores de 10^{-2} o mayor. En el caso de que se presenten grados de ionización por debajo de 10^{-10} la contribución de colisiones electrón-electrón a la transferencia de energía es despreciable [9].

2.1.5. Procesos químicos

Los procesos químicos que ocurren en el plasma son producidos por la energía de la descarga y no están basados ni controlados por la temperatura de la mezcla de gases o de la superficie. Los iones se difunden hacia la superficie que es expuesta

al plasma y, en el caso de los electrones, éstos se recombinan con otras especies. Los radicales y átomos neutros se recombinan a través de reacciones producidas en la superficie de las paredes del reactor o a través de reacciones homogéneas aún estando en fase gaseosa. En el caso de algunos gases se presentan fenómenos en los cuales un electrón tiene la facilidad de unirse a un átomo o molécula, esto es conocido como afinidad electrónica. Las reacciones químicas en el plasma ocurren de manera homogénea o bien heterogénea. Las reacciones químicas homogéneas son ocasionadas por colisiones inelásticas entre electrones y especies pesadas o por colisiones entre las mismas especies pesadas. Las reacciones químicas ocurren en la región del volumen del plasma cercano al cátodo, donde el campo eléctrico es más alto. Debido a que los electrones ganan energía del campo electromagnético aplicado, el gas es excitado y mantiene el plasma. Bajo estas circunstancias se producen colisiones inelásticas que dan lugar a distintas reacciones [8].

Excitación

El impacto de los electrones con suficiente energía a blancos pesados produce que átomos puedan alcanzar estados excitados electrónicamente; es decir, que un electrón salta a un nivel de energía mayor con su correspondiente absorción de energía. Este proceso, al igual que la ionización, puede resultar de la excitación producida por el impacto de un electrón [11]. El estado excitado es representado como:

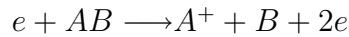
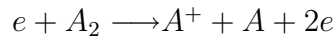
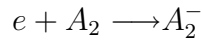
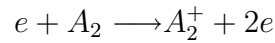
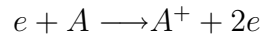


Los estados excitados regresan a su estado base emitiendo energía en forma de radiación electromagnética, la cual puede ser desde emisiones ultravioleta hasta emisiones en el rango visible. Las especies excitadas generalmente no participan en reacciones adicionales debido a que tienen tiempos de vida cortos antes de la

emisión de radiación [13].

Ionización

La reacción más importante en el plasma se debe a las colisiones inelásticas producidas cuando un electrón impacta a un átomo o molécula de gas y remueve un electrón produciendo iones positivos o negativos, atómicos o moleculares. Esto es:

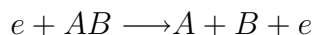


donde A y B representan un átomo o una molécula de un gas. Los dos electrones producidos por la colisión e ionización pueden ser acelerados de nueva cuenta por un campo eléctrico hasta producir una nueva ionización; con ello la descarga es mantenida en el plasma. Para que este proceso ocurra se requiere de un mínimo de energía igual a la energía para remover el enlace más debil de un electrón del átomo. Esta energía es conocida como potencial de ionización. La ionización puede ocurrir en algunas ocasiones como un proceso de dos etapas: en la primera el impacto de electrones de baja energía causan la excitación de moléculas a un estado metaestable y después éstas pueden ser impactadas por otro electrón produciendo su ionización [8].

Disociación

El proceso de disociación se lleva a cabo cuando se presenta una colisión inelástica

de un electrón con una molécula, y puede disociarla. Esto es:



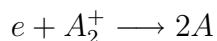
Este tipo de reacción, aunada a la ionización disociativa y la unión disociativa, es la productora de átomos, radicales e iones [8].

Recombinación

Cuando un electrón colisiona con un ion positivo para formar un átomo neutro se produce una recombinación, la cual esta acompañada por la emisión de radiación electromagnética. Esto es:



donde A representa un átomo o una molécula de un gas y $h\nu$ indica una liberación de energía por radiación. Esta energía puede producir a su vez la disociación de moléculas por medio de una reacción de recombinación disociativa [8]. Esto es:



2.1.6. Reacciones superficiales

Las interacciones entre la superficie sólida (S) del material expuesto y las especies que hay en el plasma son llamadas reacciones heterogeneas. Las especies pueden ser químicas como un átomo (A, B), una molécula (M), un radical (R) o un polímero (P) formado en el plasma, además de especies como iones positivos y negativos, metaestables y electrones (figura 2.3). Las reacciones químicas que ocurren en la superficie del material expuesto, cercana al plasma, son las siguientes [14].

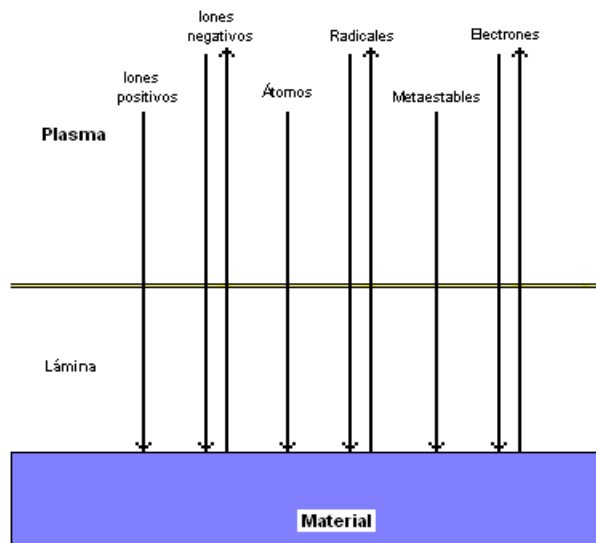
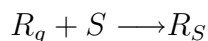
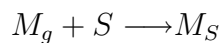


Figura 2.3: Especies que interactúan entre el plasma y la superficie expuesta [14].

Adsorción

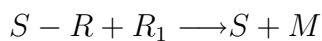
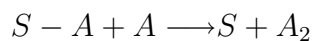
Esta reacción se produce cuando las moléculas o radicales del plasma interactúan de tal manera que se acumulan en la superficie expuesta y se forma una película delgada determinada por los flujos de gases de las especies que la forman. Es decir, estas especies son atrapadas o retenidas en la superficie del material. Esto es:



Como los enlaces químicos en la superficie expuesta presentan una discontinuidad, es decir están incompletos, pueden reaccionar con las especies disponibles del plasma [10].

Formación de Compuestos

Los átomos o radicales del plasma pueden reaccionar con especies que son previamente adsorbidas en la superficie expuesta y se combinan para formar compuestos, como lo son:



Mientras ocurre este proceso, la energía de las partículas que participan en la reacción es liberada en forma de calor sobre la superficie. La recombinación puede causar también un depósito de una película o grabado de la superficie en el caso de que sea volátil el compuesto que ha sido formado [10].

Bombardeo

Debido a que los iones positivos generados en el plasma son acelerados hacia la superficie expuesta, si llegan con suficiente energía pueden remover un átomo de la superficie. Entonces, este proceso resulta porque la energía del impacto de los iones se transfiere directamente por las colisiones en la superficie del material a especies superficiales que son desorbidas en el gas. Esto es:

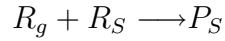


El número de átomos neutros que son removidos de la superficie por un impacto iónico simple entran al plasma con energía cinética de varios eV en el proceso de desorción, que es opuesto a la adsorción. Sin embargo, la energía del ion en la superficie es a menudo controlada por medio de la polarización de radiofrecuencia hacia la superficie [10].

Polimerización

Este proceso ocurre cuando los radicales en el plasma reaccionan, a su vez, con los

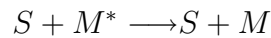
radicales adsorbidos en la superficie expuesta y se agrupan químicamente entre sí dando lugar a una molécula de gran peso llamada polímero (P). Esto es:



Entonces, en este proceso se puede formar una película debido al depósito y también puede ocurrir entre dos especies adsorbidas previamente sobre la superficie expuesta [10]. La importancia de la polimerización radica en que la capa formada protege la superficie expuesta de un grabado lateral.

Desexcitación de Metaestables

Cuando una especie metaestable del plasma colisiona con la superficie expuesta y libera su energía, regresando a su estado inicial de reposo, se produce una desexcitación y puede ser ejemplificada como sigue:



2.2. Grabado con plasma

El grabado con plasma permite la fabricación de estructuras submicrométricas, adecuadas a las nuevas tecnologías de fabricación de circuitos integrados, debido a la combinación de las reacciones y los procesos asociados con las especies reactivas producidas en la descarga. El grabado con plasma es además un proceso limpio ya que se trabaja en vacío y evita el consumo de grabantes, como es el caso del grabado húmedo, donde el ataque al material a grabar se realiza en todas direcciones, liberando en algunos casos el material enmascarante lo cual resulta en una pobre transferencia de patrones litográficos. El proceso de grabado con plasma es ilustrado en la figura 2.4, y comienza cuando el gas interactúa con un campo eléctrico

para generar el plasma que produce iones energéticos y especies reactivas que son requeridos para promover una reacción química en la superficie que será grabada [14].

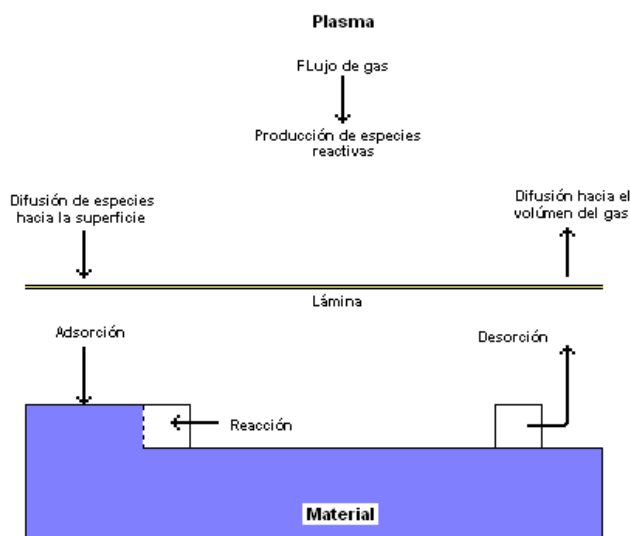


Figura 2.4: Proceso de grabado con plasma [14].

La difusión de las especies hacia la superficie del material involucra a las moléculas y radicales que son adsorbidos para producir reacciones químicas superficiales. Después de las reacciones en la superficie se forman productos finales que son desorbidos. La velocidad de grabado es incrementada substancialmente por el bombardeo iónico a dicha superficie [9]. Los productos volátiles formados a través de desorción son difundidos hacia el volumen del gas y pueden entrar en una reacción en cadena para producir de nueva cuenta especies reactivas por recombinación o por impacto con partículas energéticas. Debido a la interacción de los procesos y la multitud de parámetros que afectan al plasma para grabado, como se muestra en la figura 2.5, no siempre es posible controlar los caminos que toman las reacciones y, por lo tanto, predecir inicialmente la combinación exacta de los parámetros de

proceso requeridos para un determinado resultado en el proceso de grabado de un material. El estado del plasma está determinado entonces por parámetros externos, tales como potencia eléctrica, presión, razón de flujo de gas y otros parámetros internos como las constantes de velocidad de las reacciones que llevan a la formación o recombinación de especies en el plasma.

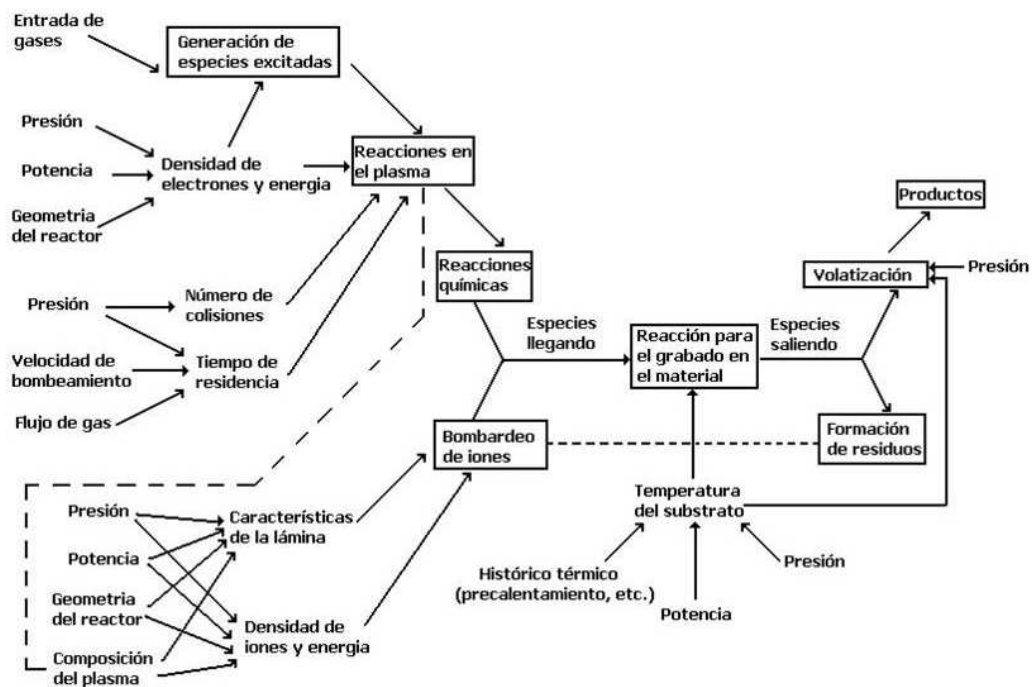


Figura 2.5: Interacción de todas las variables y procesos que influyen en el proceso de grabado de grabado con plasma [10].

2.2.1. Plasma de radiofrecuencia

La generación del plasma para grabado está influenciada por la potencia de RF (en el rango de MHz) aplicado al gas reactivo para mantenerlo ionizado. Esto se debe a que dicha potencia aplicada entre los electrodos del sistema causa que

los electrones libres oscilen y choquen con las moléculas del gas de manera constante. Los electrones entonces adquieren suficiente energía durante la oscilación en el campo de RF. El sistema de plasma de *dc* tiene la limitante de no grabar materiales dieléctricos, debido a que el plasma no puede ser mantenido en un voltaje de *dc* constante mientras el electrodo este cubierto. Es decir, cuando el electrodo esta cargado negativamente en un sistema de *dc*, y es bombardeado por iones, un electrón es atraído de un átomo que se encuentre en la superficie cada vez que un ión es neutralizado. Si se trata de materiales conductores, los electrones son reemplazados por conducción eléctrica; con ello se presenta carga negativa en el electrodo y se mantiene la descarga. En el caso de material aislante, los electrones que se pierden en la superficie no son reemplazados debido a que no es posible la conducción eléctrica. Entonces la superficie acumula carga positiva que es incrementada con el bombardeo iónico, haciendo que el plasma se extinga por el decremento en la diferencia de potencial entre los electrodos. Mediante la aplicación de potencia de RF se mantiene continuo el plasma y se reemplazan los electrones que se pierden en la superficie del aislante [7].

Cuando el material a grabar es colocado en el electrodo (el cual está acoplado a un generador de RF), mientras que el otro electrodo es aterrizado, se produce un voltaje de autopolarización (*dc bias*) negativo, convirtiendo al electrodo en cátodo respecto al otro electrodo; esto se observa en la figura 2.6 a). El *dc bias* es inducido por el plasma que se encuentra con potencial positivo (V_P), ya que el campo eléctrico acelera más rápido los electrones hacia el electrodo debido a la diferencia de masas entre ion y electrón; esto ocurre durante la parte positiva del ciclo. Los iones son atraídos durante la parte negativa, manteniendo una carga neta negativa en el electrodo.

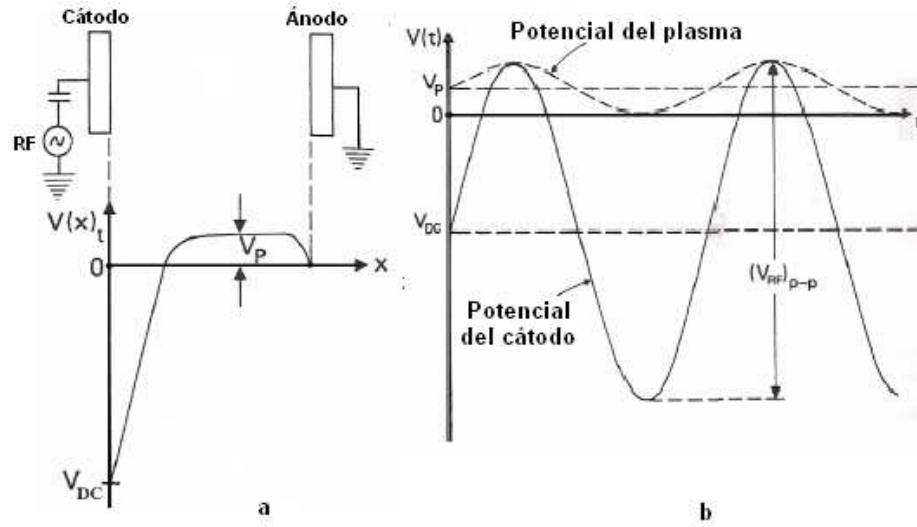


Figura 2.6: Plasma de RF. a) Aproximación de la distribución de potencial promedio de un sistema de RF planar acoplado capacitivamente. b) Distribución de potencial en el reactor: V_P = potencial del plasma, V_{DC} =voltaje de autopolarización, $(V_{RF})_{P-P}$ =voltaje pico-pico aplicado por la fuente RF [7].

De acuerdo a la figura 2.6 b), el generador RF produce una señal alterna $(V_{RF})_{P-P}$ con amplitud suficientemente grande para romper los átomos de gas debido al impacto con los electrones. En condiciones de estado estacionario, la carga positiva en la superficie del electrodo se acumula durante la parte negativa del ciclo y es remplazada por electrones durante la parte positiva de éste. De este modo, la carga neta acumulada por la superficie del aislante durante cada ciclo completo es cero [7]. La mayoría de los generadores operan a una frecuencia de 13.56 MHz debido a que es un valor asignado por autoridades internacionales de comunicaciones para no interferir con otras señales de radio transmitidas [7].

2.2.2. Formación de la lámina de plasma

La lámina de plasma es una interfaz entre el volúmen del plasma y la superficie del material, así como entre las paredes de la cámara de proceso. La lámina

de plasma es particularmente importante en el proceso de grabado porque sus propiedades determinan la manera en que las partículas cargadas del plasma interactúan recíprocamente con la superficie que es procesada. Particularmente, la energía y la dirección de los iones que inciden en el sustrato es determinada por el gradiente de potencial del plasma [8].

Debido al campo eléctrico producido por la potencia de RF aplicada en los electrodos del sistema, los electrones alcanzan primero la superficie dejando al plasma con una carga positiva en la vecindad de ésta. Los iones que permanecen acumularán una carga positiva neta en el plasma, la cual resistirá la pérdida de otros electrones. La energía de radiofrecuencia aplicada a los electrodos en contacto con el plasma incrementará la caída de voltaje a través de la lámina de plasma sin un incremento significativo de la corriente de ion hacia el electrodo. Estas caídas de voltaje proporcionan energías cinéticas a los iones, lo cual conduce a la reacción química y bombardeo de superficies en contacto con el plasma.

La región de la lámina es visiblemente más clara que la región del volumen del plasma debido a la presencia de electrones, el resultante aumento en la excitación del plasma y la emisión fotónica. La formación de la lámina de plasma se encuentra en función del potencial del plasma, como se muestra en la figura 2.7, donde se muestra además la direccionalidad del bombardeo iónico.

2.2.3. Grabado Iónico Reactivo

El Grabado Iónico Reactivo, *Reactive Ion Etching* (RIE), es una de las técnicas más usadas para grabado seco. El RIE es realizado por la combinación de mecanismos químicos generados en el plasma con los efectos físicos causados por

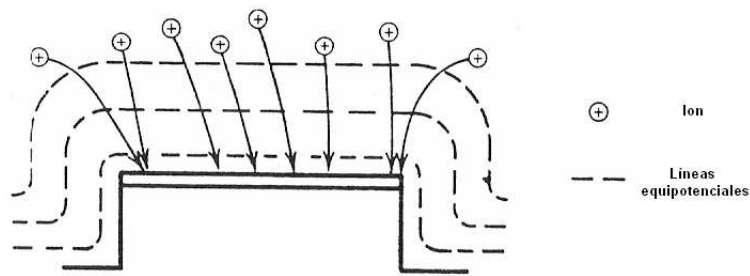


Figura 2.7: Formación de la lámina de plasma y el bombardeo iónico perpendicular resultante del gradiente de potencial [8].

el bombardeo iónico. La configuración del equipo RIE se observa en el diagrama de la figura 2.8, donde el material a ser grabado es colocado sobre el electrodo del reactor de placas paralelas que está conectado a una fuente de potencia de radiofrecuencia (RF), mientras que el otro electrodo permanece conectado a tierra; todo esto en un ambiente de vacío [9].

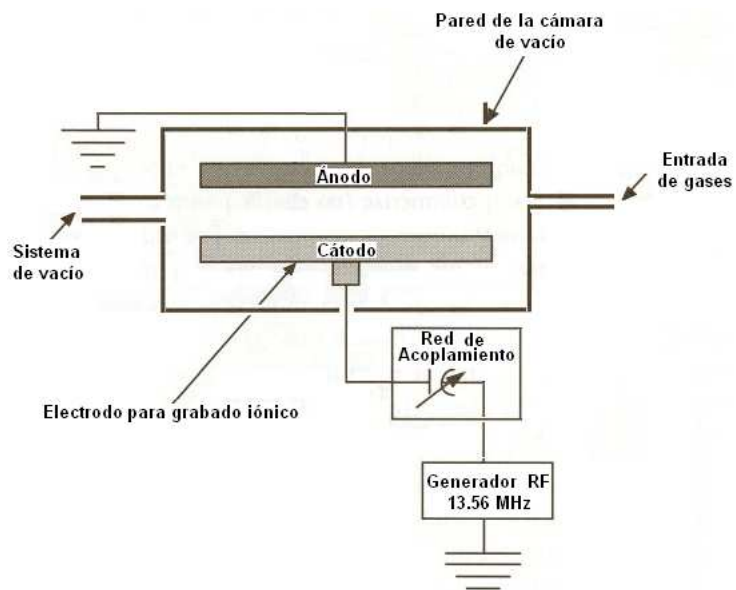


Figura 2.8: Diagrama del equipo RIE [9].

Mecanismo del RIE

Una vez que la cámara del reactor alcanza un vacío adecuado para llevar a cabo un buen proceso de grabado, con una presión base entre 1.5 y 2 *mTorr*, un flujo de gas es introducido a la cámara. El plasma es iniciado en el sistema con la energía de RF que ioniza las moléculas del gas produciendo iones positivos y negativos, electrones y especies neutras y reactivas [14].

Debido a la existencia de una diferencia de potencial en el electrodo, los iones positivos generados son acelerados verticalmente hacia la superficie del material y reaccionan para formar productos volátiles. Además del bombardeo iónico, especies reactivas son adsorbidas en la superficie del material y reaccionan químicamente de tal manera que contribuyen al ataque.

Finalmente ocurre la desorción de los productos volátiles generados en la reacción superficial, los cuales son evacuados de la cámara del reactor o se recombinan para producir especies reactivas y establecer una reacción en cadena en el proceso de grabado.

2.2.4. Requisitos en el proceso de grabado

Los procesos de grabado deben cumplir con los siguientes requisitos:

Velocidad de Grabado

La velocidad de grabado es la relación entre la profundidad (h) y el tiempo de

grabado (t). Las unidades pueden ser establecidas en $\text{\AA}/\text{min}$ o bien en nm/min ; esto es:

$$V_g = h/t$$

Anisotropía

La anisotropía es el grado de verticalidad del perfil de grabado en función de las velocidades lateral (V_l) y vertical (V_v). Esto es:

$$A = 1 - (V_l/V_v)$$

$A = 0$, perfil isotrópico

$A = 1$, perfil anisotrópico

De acuerdo a la expresiones anteriores, cuando las velocidades de grabado lateral y vertical son iguales se obtiene un perfil isotrópico. En el caso en que no exista grabado lateral o que su velocidad de grabado sea mucho menor que la velocidad de grabado vertical, entonces se obtendrá un perfil anisotrópico.

La optimización del proceso de grabado para lograr un buen control en el perfil es muy importante al considerar los requerimientos de las nuevas tecnologías de fabricación, como lo es un grabado anisotrópico en estructuras submicrométricas y con perfiles profundos. Para ello es necesario que el grabado deba ser direccional. La direccionalidad de grabado es lograda por el bombardeo de iones energéticos, grabando mucho más rápido en el fondo de la estructura que en las paredes, las cuales no son bombardeadas por iones. Al ajustar los parámetros de plasma, como presión, flujo, potencia, es posible cambiar la direccionalidad de grabado de manera isotrópica o completamente anisotrópica.

Para evitar un grabado lateral, este problema es resuelto con la pasivación o depósito de una película inhibidora en las paredes de la estructura (figura 2.9). El

inhibidor retarda o detiene completamente el grabado lateral y el grabado continúa sólo en el fondo de la estructura. Con la pasivación de las paredes el perfil de grabado puede ser controlado satisfactoriamente; sin embargo, se requiere de una limpieza adicional al final del proceso para remover la película depositada en las paredes [15].

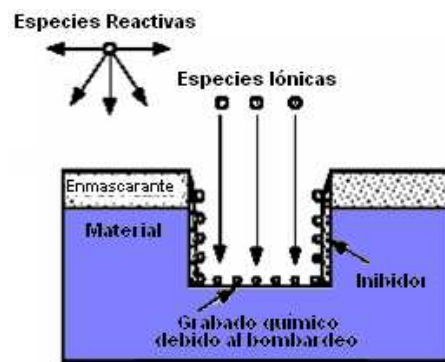


Figura 2.9: Pasivación de las paredes de la estructura en el proceso de grabado con RIE [15].

Selectividad

La selectividad esta definida como la relación de velocidad de grabado del material que se desea grabar (V_1) respecto al material subyacente o enmascarante (V_2). Esto es:

$$S = V_1/V_2$$

$S > 1$, proceso selectivo

$S < 1$, proceso no selectivo

Cuando la velocidad de grabado del material que se desea grabar es mayor que la del material subyacente, o del material enmascarante, entonces se tiene el caso de

un proceso selectivo. En caso contrario el proceso no será selectivo. Los parámetros del plasma pueden ser ajustados para obtener el grabado de un material respecto al otro. El bombardeo iónico generalmente causa diferentes grados de daño superficial en el material, al cambiar la energía del bombardeo, la selectividad de grabado puede ser alterada para lograr un proceso de grabado específico.

Uniformidad

La uniformidad se refiere a la variación del grabado por área del material.

Razón de Aspecto

Es la relación de ancho de línea (w) con la profundidad de grabado (h) y es expresada como ($w : h$).

En resumen, una comparación de los mecanismos de grabado es mostrada en la figura 2.10. En ella se aprecia que cuando se mantiene una baja presión del gas en el sistema (con valores aproximados entre 1-10 *mTorr*) existe un mayor camino medio libre y las colisiones entre iones son reducidas. Lo anterior tiene como consecuencia que la energía del bombardeo iónico se incrementa. Este tipo de grabado es altamente anisotrópico debido a que el bombardeo es normal a la superficie del material, pero con una baja selectividad, y es característico de un proceso netamente físico. Cuando la presión se encuentra entre 10-100 *mTorr*, los iones se vuelven menos energéticos debido al decremento en el camino medio libre entre ellos. Sin embargo, el proceso está influenciado por la combinación de grabado tanto físico como químico, con lo cual se tiene una selectividad media; esto significa también

una reducción de la anisotropía. Lo anterior es característico del proceso RIE. A medida que la presión aumenta, hasta llegar a un valor aproximado de 1 *Torr*, la energía cinética de las especies reactivas disminuye aún más debido a la gran cantidad de colisiones que se presentan por la gran concentración existente de ellas. Esto tiende a favorecer las condiciones para presentarse un grabado netamente químico y tener un perfil isotrópico y una alta selectividad [8].

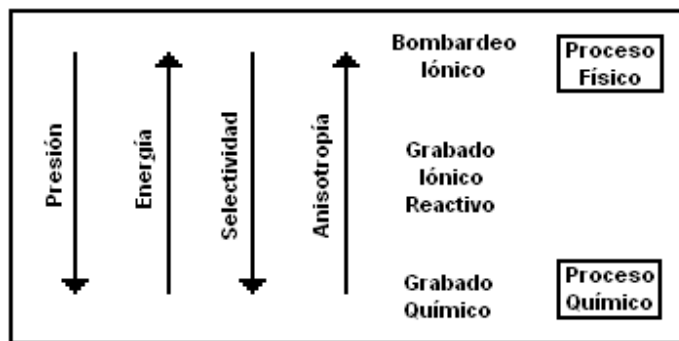


Figura 2.10: Comparación de los mecanismos de grabado y sus características [8].

2.3. Grabado de materiales para la fabricación del dispositivo CMOS

Las aplicaciones de la tecnología CMOS, desde que fue introducida al mercado en la época de los años 80, ha venido incrementándose debido a sus ventajas en tamaño, facilidad de fabricación e inmunidad al ruido, lo cual la ha llevado a convertirse hoy día en una tecnología líder y que promete seguir siéndolo de acuerdo a la optimización de sus características del proceso de fabricación. Actualmente, una de esas características es la tendencia a obtener circuitos con menores dimensiones y aumentar con ello el número de transistores dentro de un circuito integrado;

la evolución en la tecnología de fabricación de circuitos integrados permite en la actualidad la fabricación de circuitos comerciales con dimensión mínima de 65 nm , aunque han sido reportados trabajos donde son desarrollados circuitos con dimensiones mínimas de tan sólo 10 nm [2]. Consecuentemente, la densidad de dispositivos en un sólo circuito integrado se incrementa de acuerdo a la Ley de Moore, la cual predice el aumento constante del número de transistores en un circuito integrado, con chips conteniendo actualmente 10^{10} transistores y manteniendo la tendencia hasta el año 2011 [16]. El incremento del número de componentes en el circuito integrado y la reducción de las dimensiones de los mismos requieren de un cambio en la tecnología utilizada en su fabricación. Para tecnologías submicrométricas, las estructuras de óxido que se utilizan para aislar los transistores entre sí ocupan mucho espacio, mayor que la región activa, esto hace que sea difícil aumentar la densidad de los transistores en un chip. Por tal motivo es importante el desarrollo, caracterización y optimación de los procesos de fabricación. En el caso concreto de grabado, éste constituye una etapa crítica en la fabricación de dispositivos submicrométricos que exigen una alta anisotropía del perfil grabado y selectividad. El grabado con plasma tiene la ventaja de satisfacer las condiciones apropiadas en los requerimientos de grabado de los diferentes materiales empleados en la fabricación de un circuito integrado, y que será empleado para contribuir en el grabado de dos etapas importantes en la fabricación del dispositivo CMOS de $0.8\ \mu\text{m}$ del nuevo Laboratorio de Nanoelectrónica del Instituto.

2.3.1. Grabado con plasma empleado en el proceso de Oxidación Local de Silicio (LOCOS)

La etapa de Oxidación Local de Silicio (*Local Oxidation of Silicon*, LOCOS) es utilizada en circuitos integrados CMOS para el aislamiento de transistores mediante el crecimiento de óxido de campo. Para llevar a cabo este proceso se tiene inicialmente una película de óxido delgado (SiO_2) de 12 nm , una película de polisilicio de 50 nm y una de nitruro (Si_3N_4) con espesor de 150 nm (figura 2.11).

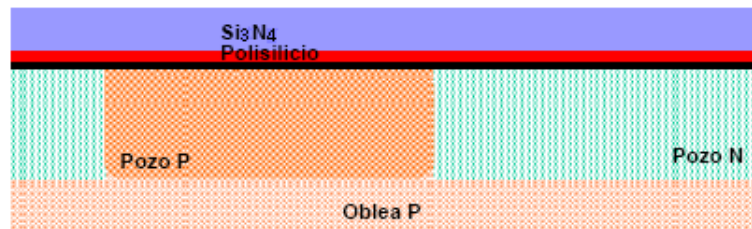


Figura 2.11: Estructura inicial para el proceso LOCOS.

Posteriormente las regiones activas del transistor son definidas mediante litografía. La estructura se observa en la figura 2.12.

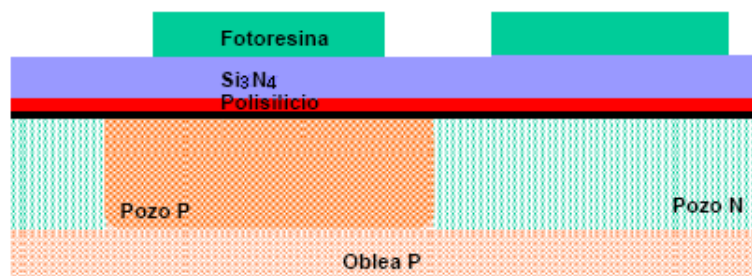


Figura 2.12: Litografía para regiones activas del transistor.

El siguiente paso consiste en eliminar el Si_3N_4 y remover una pequeña capa de polisilicio. En base al espesor de la película de Si_3N_4 (150 nm) es importante establecer las condiciones necesarias para obtener una velocidad de grabado de alrededor de 70 nm/min y garantizar además que la resina resista un tiempo de grabado corto. En esta etapa del proceso no es crítica la selectividad del Si_3N_4 respecto al polisilicio. En la figura 2.13 se observa la estructura resultante del proceso.

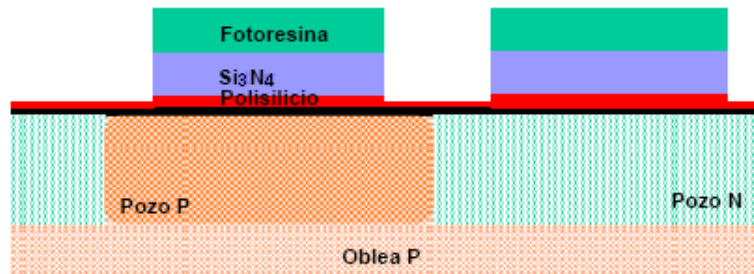


Figura 2.13: Definición de las regiones activas mediante grabado.

Después es realizado el proceso de Oxidación Local de Silicio, al crecer el óxido de campo que asilará a los transistores entre sí (figura 2.14).

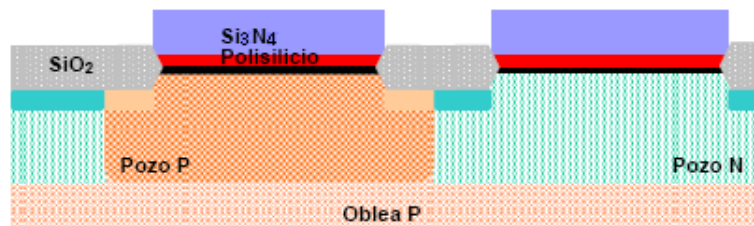


Figura 2.14: Estructura resultante del proceso de oxidación local de silicio.

Finalmente, el nitruro y el polisilicio son completamente removidos hasta la película de óxido delgado. Es necesario tener alta selectividad del polisilicio respecto al óxido para garantizar su grabado sin afectar al óxido. La estructura final se observa en la figura 2.15. La película de óxido delgado tiene un efecto remarcable en la forma de los bordes de los patrones de óxido de campo creados posteriormente, durante la Oxidación Local de Silicio, ya que el óxido de campo crece debajo de los patrones de nitruro, formándose así una estructura en forma de pico, llamada comúnmente pico de pájaro (*bird's beak*). El empleo del óxido delgado está sustentado en el control y reducción del *bird's beak* para mantener el ancho efectivo del canal del transistor MOS [17].

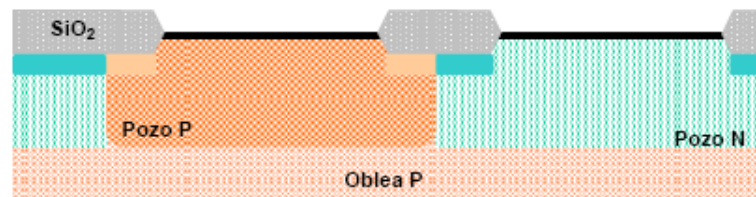


Figura 2.15: Grabado del nitruro y del polisilicio para tener un óxido delgado de alta calidad.

2.3.2. Grabado con plasma empleado para la definición de la compuerta del dispositivo CMOS

La compuerta del transistor MOS se encuentra por encima de la película de óxido delgado y consiste en un electrodo de metal como aluminio o titanio, aunque actualmente suele ser de polisilicio dopado [1]. La definición de compuerta comienza cuando se tiene una estructura con una película de óxido (SiO_2) de 10 nm y una de polisilicio dopado fuertemente con fósforo, de 400 nm de espesor. En la figura 2.16 se observa la estructura inicial.

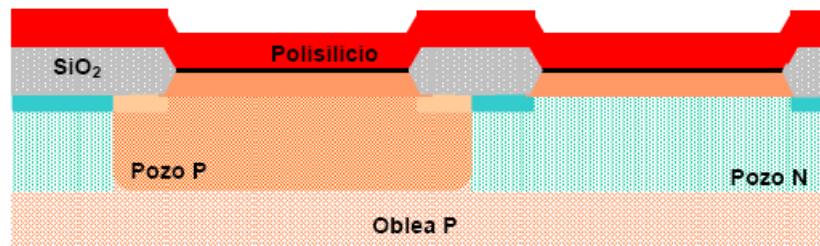


Figura 2.16: Estructura inicial para la definición de compuerta del dispositivo CMOS.

Después la estructura es llevada a litografía para abrir ventanas y pasar al grabado, como se muestra en la figura 2.17.

En base al espesor de la película de polisilicio (400 nm), el grabado de éste requiere de una velocidad de alrededor de 150 nm/min para no tener tiempos prolongados que puedan además afectar al material enmascarante. Además, es necesario tener alta selectividad del polisilicio respecto al óxido delgado y anisotropía para garantizar una buena definición de la compuerta. La estructura resultante es la que se muestra en la figura 2.18.

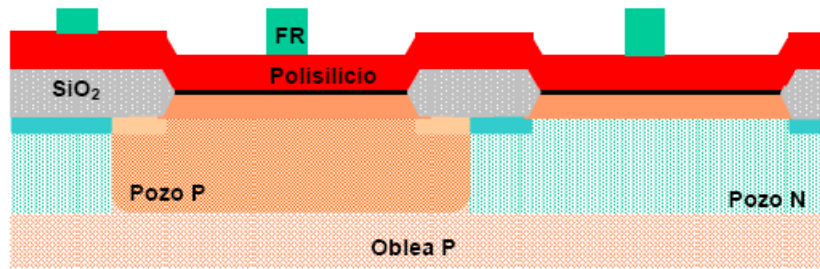


Figura 2.17: Definición de patrones geométricos para la compuerta.

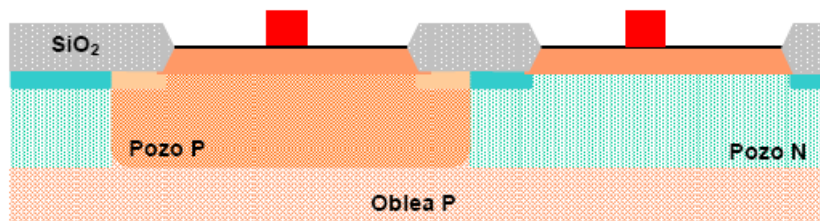


Figura 2.18: Estructura resultante para la obtención de la compuerta del CMOS.

Capítulo 3

Parte experimental

En este capítulo se mencionan los datos requeridos para llevar a cabo los procesos en las estructuras antes mencionados. Se da además una descripción de los mismos, los parámetros de proceso y la metodología empleada en la medición de la velocidad de grabado y selectividad, la cual contempla a su vez el análisis del perfil de las estructuras grabadas en las muestras.

3.1. Preparación de las muestras

Se emplean sustratos de silicio monocristalino, tipo n, con orientación (100). Todas las muestras fueron sometidas inicialmente a un proceso de limpieza. Posteriormente fue realizado el depósito de los materiales involucrados en los procesos de fabricación del dispositivo CMOS, concluyendo después con la realización de la litografía correspondiente.

3.1.1. Limpieza

El proceso de limpieza consistió de las siguientes etapas:

Piraña

Esta limpieza húmeda es realizada para remover impurezas orgánicas y metales en la superficie del material. Consiste en sumergir las muestras en una mezcla de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) con una razón 7:2, durante 10 minutos. Es una solución exotérmica cuyo rango de temperatura es de 90-120°C. Posteriormente las muestras son enjuagadas con agua desionizada (DI), con resistividad de 18 $M\Omega$, y secadas mediante centrifugación.

Desengrasado

Esta etapa de limpieza consiste en sumergir inicialmente las muestras en tricloroetileno (TCE) durante 10 minutos en el vibrador ultrasónico. Posteriormente es realizada una inmersión de las muestras en acetona (CH_3) durante 10 minutos en el vibrador y después enjuague con agua DI.

Eliminación de óxido nativo

Consiste en la inmersión de las obleas en una solución de $HF : H_2O$, en una relación 1:20, durante 10 segundos y se verifica cuando la muestra es completamente hidrofóbica. Después se realiza enjuague de las muestras con agua DI.

Limpieza RCA I

La limpieza RCA I es una solución alcalina que remueve contaminantes de partículas orgánicas y metales (i.e. Au, Ag, Cu, Ni, Cd, Cr, Co, Zn, etc.). La solución es

de $H_2O : H_2O_2 : NH_4OH$, en una relación 5:1:1, a $70^\circ C$ durante 10 minutos de inmersión de las muestras. Posteriormente se realiza enjuague de las muestras con agua DI.

Limpieza RCA II

Esta limpieza es una solución oxidante que remueve metales pesados (i.e. Fe, Cu, Ni, Zn, Au, Cr, Hg, Ag), otros metales (i.e. Al, Mg) y otras moléculas (i.e. Na, K, Li). La solución esta constituida de $H_2O : HCl : H_2O_2$, en una relación 6:1:1, a $70^\circ C$ durante 10 minutos de inmersión de las muestras. Se realiza luego enjuague de las muestras con agua DI.

Enjuague super Q

Esta etapa es un enjuague final de alta calidad que arrastra algún tipo de residuo que existiera en la muestra. Consiste de agua DI fluyendo constantemente, donde las muestras son sumergidas durante 10 minutos aproximadamente, hasta restablecer la resistividad de $18 M\Omega$.

Una vez concluido esta última etapa, las muestras son secadas mediante centrifugación.

3.1.2. Crecimiento de óxido delgado

Para la muestra que involucra el proceso de Oxidación Local de Silicio (LOCOS) las condiciones del horno para el crecimiento de óxido delgado de $12 nm$, mediante oxidación térmica, fueron:

- Temperatura: $850^\circ C$.
- Tiempo de crecimiento: 92 min.

- Diales del horno: 595/488/510.
- Densificado 30 minutos en ambiente de N_2 (rotámetro: 60 S.S.).

En el caso de la muestra que involucra el proceso de definición de compuerta del dispositivo CMOS, la única variante respecto a las condiciones anteriores fue el tiempo de crecimiento en el horno, que fue de 77 minutos, ya que se requería tener una película de 10 nm . El espesor de la película de óxido para el proceso LOCOS, medido en el elipsómetro, fue de aproximadamente 12 nm , mientras que para el proceso de definición de compuerta el espesor fue de 10 nm . Por otro lado, para la etapa de caracterización de grabado de óxido, mediante oxidación térmica, fue crecida una película de óxido grueso de 500 nm .

3.1.3. Depósito de polisilicio

En el caso de la muestra involucrada en el proceso LOCOS, el depósito de la película de polisilicio de 50 nm fue llevado a cabo en el equipo de Depósito Químico en Fase Vapor (LPCVD) del laboratorio de Microelectrónica bajo los siguientes parámetros:

- Temperatura: 650°C.
- Tiempo de depósito: 6 min.
- Diales del horno: 650/235/670.
- Flujo de gas Silano: 1.5 Torr (rotámetro: 115 S.S.).
- Presión base: 0.076 Torr.
- Presión total: 1.630 Torr.

Las muestras involucradas en el proceso de definición de compuerta del dispositivo CMOS fueron depositadas con una película de polisilicio de 400 nm con ayuda

del equipo LPCVD considerando también los parámetros antes mostrados, con la excepción del tiempo de depósito que en este caso fue de 28 minutos. Además, debido a la condición de compuerta MOS, las muestras con polisilicio fueron dopadas con fósforo al exponerlas en el horno con un flujo de fosfina de 80 S.S. durante 20 minutos (diales del horno: 525/653/525). El espesor medido de la película correspondiente al proceso LOCOS fue de 50 *nm*, mientras que el espesor de la película para el proceso de definición de compuerta fue de aproximadamente 400 *nm*. Para ambos procesos, en la etapa de caracterización de grabado de este material fueron depositadas películas de polisilicio sin dopar y fuertemente dopado con fósforo, ambas de 500 *nm*.

3.1.4. Depósito de nitruro de silicio

En el caso de las muestras del proceso LOCOS, los parámetros empleados para obtener películas de nitruro de silicio de un espesor aproximado de 150 *nm* en el equipo LPCVD son los siguientes:

- Temperatura: 755°C.
- Tiempo de depósito: 27 min.
- Diales del horno: 650/335/670.
- Flujo de gas Silano: 0.55 Torr (rotámetro: 55-56 S.S.).
- Flujo de gas Amoniac: 2.5 Torr (rotámetro: 71-72 S.S.).
- Presión base: 0.025 Torr.
- Presión total: 2.423 Torr.

El espesor de la película de nitruro medido en el elipsómetro fue de 149 *nm*, mientras que el índice de refracción fue de 2.06 lo cual indica que es el material

adecuado (Si_3N_4) para llevar a cabo el proceso de grabado para la estructura LOCOS. En la etapa de caracterización de grabado de este material fue depositada una película de nitruro de 300 nm.

3.1.5. Litografía

Una vez concluidos los procesos de crecimiento y depósito de materiales para grabar, se pasa a la etapa final de litografía donde se utilizaron dos tipos de resina positiva (ma-P 1205 y ma-P 215), cuyo espesor es de aproximadamente 0.4 μm y 1.2 μm , respectivamente. La descripción del proceso se muestra a continuación:

- Deshidratación durante 15 minutos en un horno de convección a 90°C.
- Aplicación de la resina, colocando en centrífuga a 3000 rpm durante 30 segundos.
- Precocido en el horno a 110°C durante 10 y 20 minutos, en el empleo respectivo de cada tipo de resina.
- Colocación de la mascarilla y exposición a luz UV durante 7.5 segundos.
- Revelado con hidróxido de sodio ($NaOH$) al 1.5% durante 15 segundos, seguido de 15 segundos con agua DI.
- Recocido en horno de convección a 110°C durante 15 y 25 minutos, respectivo a cada tipo de resina.
- Inspección de patrones en microscopio óptico.

3.2. Condiciones de grabado por medio de RIE

Los procesos de grabado de materiales para la fabricación del dispositivo CMOS fueron llevados a cabo en el equipo RIE/ICP del Laboratorio de Microelectrónica

del INAOE, considerando sólo el uso del equipo en modo capacitivo, RIE. El equipo se muestra en la figura 3.1.

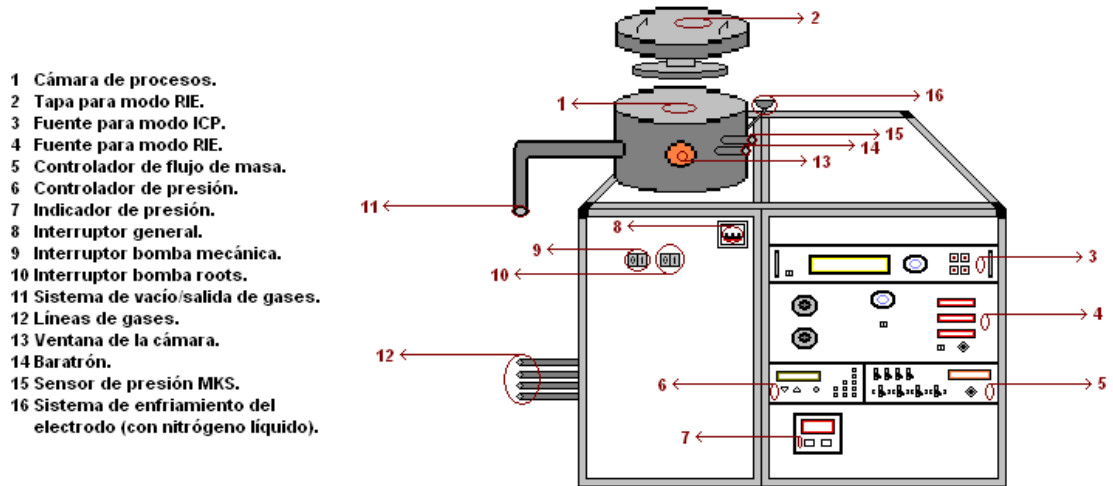


Figura 3.1: equipo RIE/ICP del Laboratorio de Microelectrónica del INAOE.

El equipo RIE consta de una cámara de procesos de acero inoxidable, la cual contiene un electrodo conectado a una fuente de potencia de RF; es en este electrodo donde las muestras a grabar son colocadas. Se utiliza una tapa de acero, con una placa del mismo material, de manera que el sistema opera en modo capacitivo por medio de las placas paralelas.

Este sistema cuenta con cuatro controladores *MKS* 2179 que regulan el flujo de gases introducidos a la cámara por cuatro líneas conectadas con la cámara de procesos. Todos los flujos pueden ser observados en la pantalla del lector *MKS* 1749 que conforma el controlador de flujo de masa. Respecto al ajuste y medición de presión, el equipo cuenta con un *Baratron* 622A01TCE conectado a un controlador de presión *MKS* 651C. Este último está integrado por cinco ajustadores

programables independientes de presión (*set points*). Existe además un sensor *PI-RANI MKS* conectado al interior de la cámara para enviar una señal al indicador de presión, cuyos valores son mostrados en unidades de *Torr*, *mBar* o *Pascal*.

Una vez que la presión y flujo de gases son determinados en el sistema para algún proceso en específico, se aplica potencia de RF para formar el plasma. La fuente que alimenta el sistema es una *MANITOU SYSTEM PB3*, la cual tiene una impedancia de salida de 50 *ohms* y una red de acoplamiento interna; cuenta además con dos reguladores los cuales permiten el ajuste de los capacitores (C_{Load} y C_{Tune}) y con ello acoplar el plasma con mínima potencia reflejada en el sistema. El máximo de potencia que puede ser aplicada es de 300 *W*.

La presión base en la cámara de proceso estuvo considerada en el rango de 1.5-1.8 *mTorr*. Esta presión es generada por una bomba mecánica inicial de vacío y una bomba *root* secundaria.

Las muestras empleadas en los procesos tienen un área aproximada de 1 *cm*², conteniendo aproximadamente entre 4 y 6 chips. Inicialmente, para determinar la selectividad en el grabado de los materiales, en cada experimento fue colocada una muestra con película de óxido, una con película de polisilicio y una con película de nitruro. En el caso de los experimentos finales, fueron colocadas muestras con las películas características de los procesos de oxidación local de silicio (*Si₃N₄/polisilicio/SiO₂*) y de la definición de compuerta (*polisilicio/SiO₂*) para inspeccionar el perfil de las estructuras mediante su observación en un microscopio electrónico de barrido (SEM).

3.2.1. Variación de parámetros

Los gases utilizados para generar el plasma en el proceso de grabado son basados en fluor; así mismo se realizaron mezclas de dichos gases. A continuación se mencionan sus parámetros.

- **CF₄**

Este gas se utilizó con potencias de 15, 25, 50 y 75 *W* y presiones de 25, 50, 75 y 100 *mTorr*. El flujo fue establecido en 15 sccm y el tiempo de grabado fue de 2 minutos.

- **CF₄ y O₂**

En esta mezcla de gases fueron variados los flujos de O₂, cuyos valores fueron: 0, 2.5, 5, 7.5 y 10 sccm, estableciendo el flujo de CF₄ en 15 sccm. Fue utilizada una potencia de 25 *W*, una presión de 50 *mTorr* y el tiempo de grabado fue de 2 minutos.

- **SF₆**

El SF₆ fue utilizado variando la presión con los siguientes valores: 25, 50, 75 y 100 *mTorr*. Fue establecido un flujo de 15 sccm y una potencia de 25 *W* y el tiempo de grabado fue de 2 minutos.

- **SF₆ y O₂**

En el caso del gas de SF₆ el flujo fue establecido en 15 sccm, mientras que para O₂ el flujo fue variando en cada experimento, estableciendo los siguientes valores: 2.5, 5, 7.5 y 10 sccm. Fue establecida una potencia 25 *W* y una presión de 50 *mTorr*. El tiempo de grabado fue de 2 minutos.

- CF_4 y SF_6

En el caso de esta mezcla de gases, la presión fue variada en cada proceso de acuerdo a los siguientes valores: 25, 50, 75 y 100 *mTorr*. El flujo fue de 15 sccm y fue utilizada una potencia de 25 *W*. El tiempo de grabado fue de 2 minutos.

3.2.2. Medición de la velocidad de grabado

Una vez que cada proceso de grabado es realizado, la fotoresina es removida con acetona y se emplea alcohol isopropílico para limpiar la superficie. Las mediciones de los escalones son realizados con el perfilómetro en varias zonas de cada muestra y se promedian para obtener un valor de la altura del escalón, teniendo un porcentaje de variación de grabado de aproximadamente 5%; dicho valor es después dividido entre el tiempo de exposición al plasma y, de esta manera, se obtiene la velocidad de grabado expresada en *nm/min*. Este procedimiento es llevado a cabo en varias ocasiones en la etapa de caracterización del grabado del Si_3N_4 , polisilicio y SiO_2 hasta obtener las condiciones adecuadas para cada material.

Para determinar la velocidad de grabado de la fotoresina se mide primero el espesor en una estructura de la muestra, una vez concluida la litografía. Realizado ya el proceso de grabado, se hace la diferencia entre el valor medido del espesor de la estructura con fotoresina respecto a aquel valor obtenido una vez que esta ha sido removida. Esa diferencia es sustraída al valor del espesor medido inicialmente y el resultado equivale a la cantidad de material enmascarante que fue grabado. Finalmente, el valor es dividido entre el tiempo de exposición al plasma para obtener de este modo la velocidad de grabado de la fotoresina expresada en *nm/min*.

3.2.3. Inspección de perfiles

La inspección de los perfiles de las muestras fue realizada con un microscopio electrónico de barrido (SEM) del Laboratorio de Caracterización de Materiales del Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México. Con la ayuda del SEM fue posible medir la altura del escalón de una estructura seleccionada de un chip de cada muestra y observar las estructuras en forma tridimensional. Fueron tomadas fotografías con el fin de realizar comparaciones del perfil.

Por otra parte, fueron inspeccionadas las estructuras de las muestras con el microscopio óptico del Laboratorio de Microelectrónica para realizar mediciones del ancho de las estructuras, antes y después del proceso de grabado, con el fin de analizar grabado lateral y la transferencia de patrones.

Capítulo 4

Resultados y discusión

La caracterización del proceso de grabado con plasma requirió establecer las condiciones experimentales para el grabado de los materiales que conforman las estructuras tanto del proceso de Oxidación Local de Silicio, así como del proceso de definición de compuerta, a partir de los resultados previamente obtenidos en el grabado de los materiales con el empleo de las películas gruesas. En primer lugar, para la estructura del proceso LOCOS (SiO_2 , polisilicio y Si_3N_4 , con espesores de 12 nm, 50 nm y 150 nm, respectivamente) se requiere obtener una velocidad de grabado de alrededor de 70 nm/min debido al espesor de la película de nitruro; la selectividad del Si_3N_4 respecto al polisilicio no es crítica antes ni después de la oxidación. Posteriormente el Si_3N_4 y el polisilicio son removidos hasta la película del óxido delgado bajo la condición de tener alta selectividad del polisilicio respecto al SiO_2 para garantizar el grabado sin afectar a éste último. Para la estructura del proceso de definición de compuerta del transistor MOS (polisilicio fuertemente dopado con fósforo y SiO_2 , con espesores de 400 nm y 10 nm, respectivamente) la caracterización del proceso fue llevada a cabo bajo la condición de obtener una velocidad de grabado de alrededor de 150 nm/min, debido al espesor de la película de polisilicio, tener alta selectividad del polisilicio respecto al óxido y anisotropía

para garantizar una buena definición de la compuerta. En este capítulo se dan a conocer los resultados experimentales de los procesos de grabado con el fin de encontrar las condiciones apropiadas a los procesos. De este modo, se muestran las tablas y gráficas correspondientes a la velocidad de grabado y selectividad de cada experimento e imágenes del perfil de las paredes de las estructuras obtenidas en un microscopio electrónico de barrido (SEM), así como las imágenes obtenidas en un microscopio óptico para el análisis del grabado lateral y transferencia de patrones. Para cada mezcla de gases empleada se realiza un análisis del mecanismo de grabado involucrado.

4.1. Análisis mediante tipo de plasma

4.1.1. Resultados de grabado con CF_4

El empleo de este plasma se realiza para encontrar la velocidad de grabado (V_g) adecuada de nitruro de silicio y polisilicio para la estructura del proceso de oxidación local de silicio (LOCOS). Para el caso de la estructura del proceso definición de compuerta del transistor MOS, el grabado producido por este gas no se adecúa a las condiciones requeridas ya que los valores obtenidos de la V_g del polisilicio son muy bajos; esto significa realizar procesos de grabado prolongados. La química del plasma de CF_4 juega un papel importante en el proceso de grabado al producirse radicales de F , los cuales son especies reactivas efectivas para el grabado de Si_3N_4 ; las concentraciones de estos radicales aumenta con el incremento de presión y flujo de gas. Por otra parte, bajo condiciones específicas de flujo, presión y potencia, este plasma contiene especies de CF_x , precursoras de polímero al formar una capa orgánica de carbono sobre la superficie de la muestra, inhibiendo el grabado espontáneo y permite de este modo un grabado más direccional debido a que protege las paredes de las estructuras [5].

En la figura 4.1 se muestran los valores de la velocidad de grabado del nitruro, polisilicio y óxido, así como el voltaje de autopolarización (*DC bias*), en función de la potencia. Al variar la potencia de 15 a 75 *W* las velocidades de grabado de los materiales tienden a incrementarse, del mismo modo que aumenta el *DC bias*. Para el Si_3N_4 la velocidad de grabado es mayor en todos los casos ya que se puede pensar que los radicales libres actúan de manera efectiva en el grabado. En el caso del polisilicio, aunque los radicales de *F* reaccionan de manera espontánea con silicio, es posible que la razón por la cual la V_g es menor se deba a que existe una mayor influencia de la capa pasivadora por la presencia de carbono en el plasma que inhibe el grabado de este material. El SiO_2 requiere de un bombardeo iónico mayor para que se produzca el grabado; éste depende sólo de la energía de los iones [18]. En la tabla 4.1 se resumen los valores de velocidad de grabado, el voltaje de autopolarización y las selectividades obtenidas. El porcentaje de variación de los resultados obtenidos para la V_g es de aproximadamente 2%, por lo que en la tabla de resultados se muestran los valores constantes.

La V_g para Si_3N_4 de 45.4 *nm/min*, correspondiente a la potencia de 25 *W*, es un valor adecuado para la primera etapa del proceso LOCOS (antes de la oxidación) debido a que garantiza poder realizar procesos con tiempos cortos de grabado sin que el material enmascarante sufra daños y, por lo tanto, controlables al tener en la estructura un espesor de Si_3N_4 de 150 *nm*; con ello el tiempo de grabado es de poco más de 3 minutos. La selectividad del Si_3N_4 respecto al polisilicio no es crítica en esta etapa del proceso. Las velocidades de grabado de Si_3N_4 resultantes en condiciones de potencia de 50 y de 75 *W* tienen valores de 41 y 61 *nm/min*, respectivamente, los cuales pueden ser también empleados en la etapa previa a la oxidación del proceso LOCOS porque están dentro de un rango de tiempo de graba-

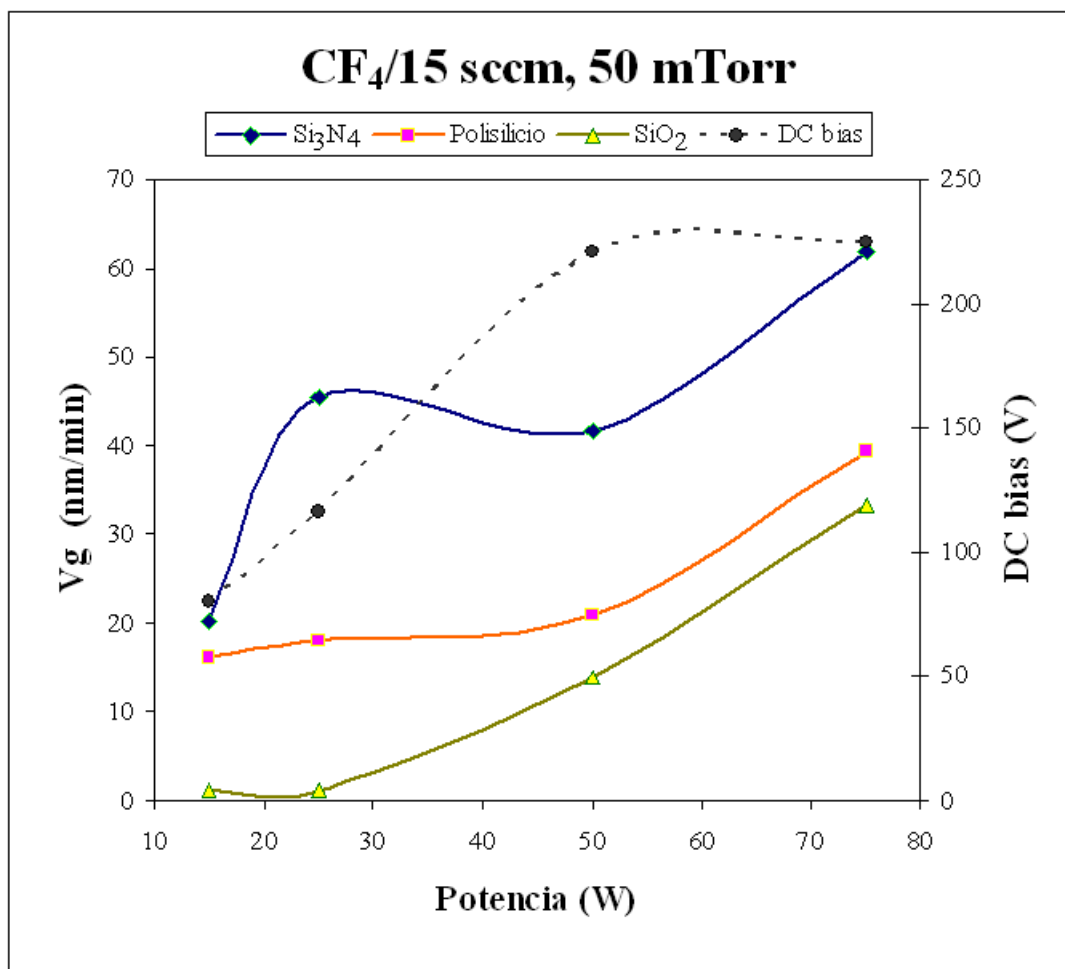


Figura 4.1: Velocidad de grabado en función de la potencia RF para plasma de CF_4 , 50 $mTorr$.

do aceptable. No obstante, bajo estas condiciones existe ya grabado de óxido. Lo anterior no es deseable para las características de la estructura ya que éste material es el utilizado como aislante entre las regiones activas y la compuerta del transistor MOS, además ayuda a controlar el grabado selectivo para que evitar daños en la superficie del sustrato de silicio [17]. La selectividad del polisilicio respecto al SiO_2 es importante para la etapa posterior a la oxidación ya que es necesario garantizar el grabado del Si_3N_4 y del polisilicio sin afectar el óxido delgado.

<i>Plasma de CF₄/15 sccm, 50 mTorr</i>							
Potencia (W)	DC bias (V)	V _{g(Si₃N₄)} (nm/min)	V _{g(polisilicio)} (nm/min)	V _{g(SiO₂)} (nm/min)	Selectividad (Si ₃ N ₄ /polisilicio)	Selectividad (Si ₃ N ₄ /SiO ₂)	Selectividad (polisilicio/SiO ₂)
15	80	20.15	16.15	1	1.25	20.15	16.15
25	116	45.4	18.1	1	2.5	45.4	18.1
50	221	41.66	21	13.83	1.98	3	1.51
75	225	61.8	39.3	33.2	1.57	1.86	1.18

Tabla 4.1: Velocidades de grabado, voltaje de autopolarización y selectividades obtenidas con plasma de CF₄, variando la potencia.

Con el fin de observar el efecto de la presión sobre la V_g del Si_3N_4 , y con ello obtener otras condiciones adecuadas al proceso LOCOS, así como algunas otras que pudieran ser consideradas para el proceso de definición de compuerta, fueron llevados a cabo nuevos experimentos con plasma de CF_4 estableciendo una potencia de 25 W y variando la presión con valores de 25, 50, 75 y 100 *mTorr*. En la figura 4.2 se muestran los resultados obtenidos. En ella se puede observar una disminución en el voltaje de autopolarización, y por lo tanto del bombardeo iónico, al aumentar la presión; lo anterior es debido a que los iones se vuelven menos energéticos a causa de la disminución del camino libre existente entre ellos. Por otra parte, el efecto de la capa pasivadora es diferente para cada material y puede ser posible que no alcance a ser eliminada por el bombardeo iónico, influyendo de esta manera con la V_g de los materiales. De este modo, existe una influencia tanto de la componente física, como de la química (debido a los radicales de F), para realizar el grabado. Esto se refleja principalmente en el caso del Si_3N_4 , donde, aunque la tendencia no es clara, puede observarse a partir de 50 *mTorr* disminución en la velocidad de grabado. En el caso del grabado del polisilicio los valores de velocidad permanecen sin variaciones importantes; mientras tanto, para el SiO_2 no hubo grabado. El resumen de nuestros resultados obtenidos se enlistan en la tabla 4.2.

En comparación con otros trabajos, como el de Li [4] donde obtienen un valor de velocidad de grabado de 35 *nm/min* bajo condiciones de plasma de CF_4 , 60 W_{RF} y 37.5 *mTorr*, el experimento correspondiente a las condiciones de presión de 50 *mTorr* y potencia de 25 W llevado a cabo es considerado entonces como uno de los adecuados para llevar a cabo la primera etapa de grabado de la estructura del proceso LOCOS debido a una mayor V_g para Si_3N_4 (45.4 *nm/min*).

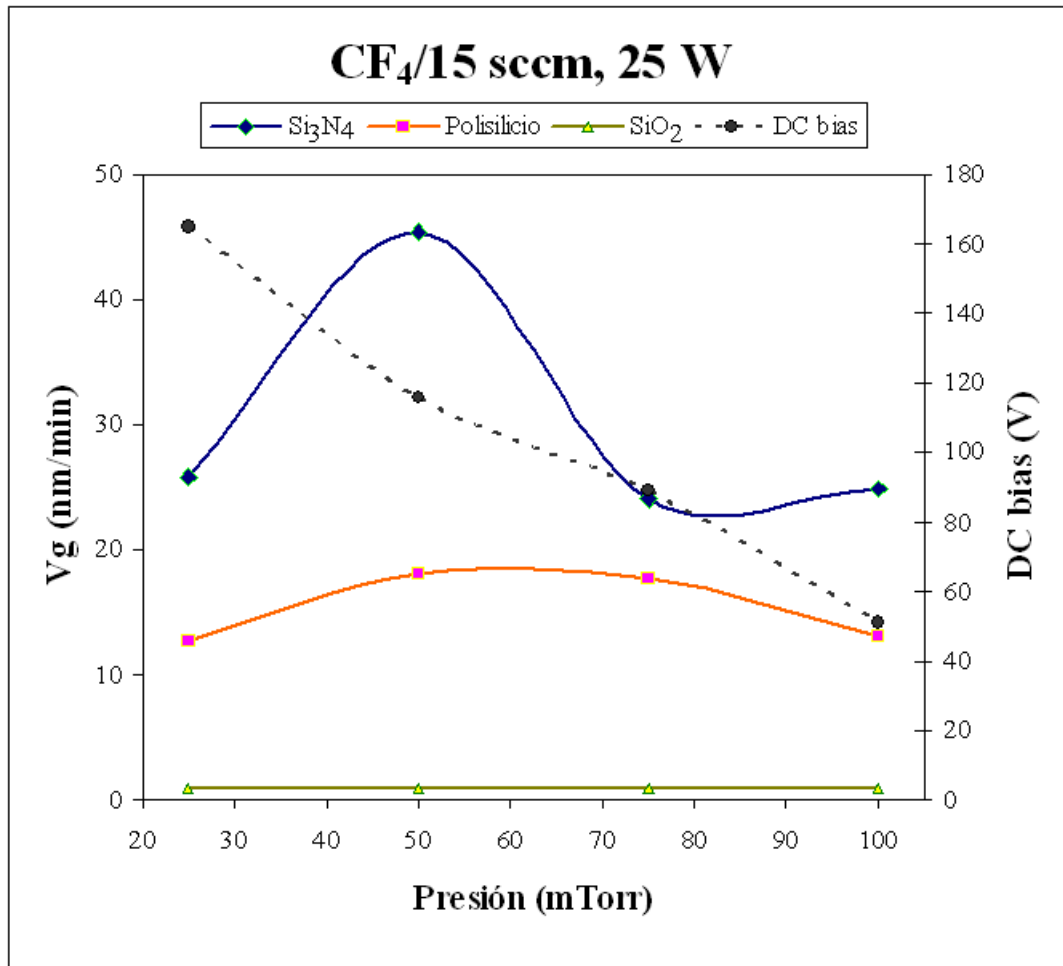


Figura 4.2: Velocidad de grabado en función de la presión para plasma de CF_4 , 25 W.

<i>Plasma de CF₄ / 15 sccm, 25 W</i>							
Presión (<i>mTorr</i>)	DC bias (<i>V</i>)	V _G (<i>Si₃N₄</i>) (<i>nm/min</i>)	V _G (<i>polisilicio</i>) (<i>nm/min</i>)	V _G (<i>SiO₂</i>) (<i>nm/min</i>)	Selectividad (<i>Si₃N₄/polisilicio</i>)	Selectividad (<i>Si₃N₄/SiO₂</i>)	Selectividad (<i>polisilicio/SiO₂</i>)
25	165	25.75	12.75	1	2	25.75	12.75
50	116	45.4	18.1	1	2.5	45.4	18.1
75	89	24	17.75	1	1.35	24	17.75
100	51	24.85	13.15	1	1.9	24.85	13.15

Tabla 4.2: Velocidades de grabado, voltaje de autopolarización y selectividades obtenidas con plasma de CF₄, variando la presión.

Concerniente a la selectividad de la fotoresina respecto al nitruro, bajo condiciones de presión de 150 mTorr , potencia de 25 W , flujo de gas CF_4 de 15 sccm , una vez llevado a cabo el proceso de grabado, se midió el espesor de una estructura de la muestra con fotoresina cuyo valor fue de 220 nm . Después fue removido el material enmascarante y fue medido de nueva cuenta el espesor de la estructura, obteniéndose un valor de 150 nm (equivalente al grabado de Si_3N_4). La diferencia entre ambos valores fue de 70 nm , dicho valor es sustraído al medido inicialmente de la fotoresina (previo al proceso de grabado), el cual fue de 360 nm , obteniéndose 290 nm , lo cual equivale a la cantidad de material enmascarante que fue grabado. Al dividir este último valor entre el tiempo de exposición al plasma, 3 min , se obtiene una velocidad de grabado de la fotoresina de 96 nm/min . Entonces, la selectividad de ésta respecto al Si_3N_4 fue de 1.93, aproximadamente.

4.1.2. Resultados de grabado con $CF_4 + O_2$

Al incorporar O_2 al gas CF_4 es posible obtener condiciones adecuadas para el grabado de Si_3N_4 en la etapa previa a la oxidación del proceso LOCOS, puesto que el gas aditivo tiene la función específica de ayudar al grabado direccional por la formación de una capa inorgánica de óxido en la superficie del material o aumentar la producción de átomos de F , producidos por el gas CF_4 , y con ello promover el grabado [18]. En la figura 4.3 se muestra la gráfica de resultados obtenidos con esta mezcla de gases.

Se puede observar que se obtuvieron bajas velocidades de grabado para Si_3N_4 en comparación con los valores de V_g obtenidos sólo con el empleo de CF_4 . Lo mismo ocurrió para el polisilicio, mientras que en el caso del SiO_2 no hubo grabado. Aunque inicialmente se tiene el mayor valor de velocidad para Si_3N_4 (45 nm/min) y para polisilicio (18 nm/min), la tendencia del voltaje de autopolarización es

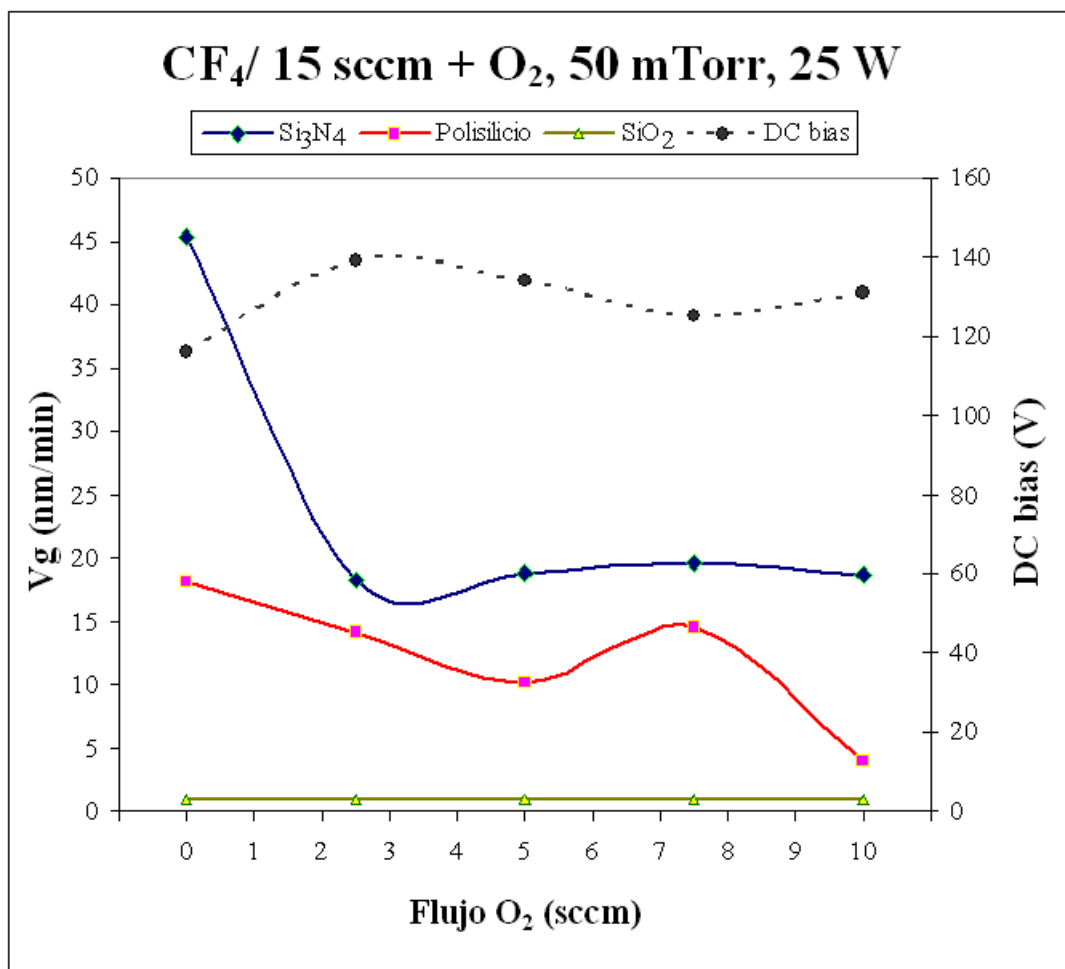


Figura 4.3: Velocidad de grabado en función del flujo de O_2 en plasma de $CF_4 + O_2$, 50 mTorr, 25 W.

permanecer relativamente constante al aplicar un incremento en el flujo de de O_2 . Por otra parte, a partir de un flujo de 2.5 sccm, hasta finalizar en 10 sccm, la V_g disminuye notablemente y oscila entre 18 y 19 nm/min para el caso del Si_3N_4 , mientras que para polisilicio disminuye de 14 a 4 nm/min. Entonces, se puede suponer que el aumento de dicho flujo no es suficiente para promover la producción de especies reactivas que contribuyan con el grabado y por el contrario es posible que una capa de óxido formada es la encargada de inhibir el grabado, in-

fluyendo de manera específica en cada material. De este modo, la capa inorgánica de óxido formada en la superficie de los materiales es inerte al ataque de los átomos de flúor y con ello el grabado es afectado, además no existe suficiente bombardeo iónico para eliminar esta capa y continuar con el grabado [6].

Los valores de la velocidad de grabado obtenidos para polisilicio permanecen entre 10 y 14 nm/min . Kastenmeier [6] obtiene una velocidad de grabado de 30 nm/min para el caso de Si_3N_4 utilizando una mezcla de estos gases, bajo condiciones de 1000 W y 600 $mTorr$. Esto representa tener muy alta energía para estimular el grabado, generada en una fuente de microondas, además del valor también elevado en la presión utilizada para el proceso.

El resumen de los resultados obtenidos en nuestros experimentos se enlistan en la tabla 4.3. Ninguno de los resultados obtenidos es considerado para llevar a cabo grabado en alguna de las dos etapas del proceso LOCOS.

<i>Plasma de CF₄ + O₂, 25 W, 50 mTorr</i>							
Gas/Flujo (<i>scm</i>)	DC bias (V)	V _{g(Si₃N₄)} (<i>nm/min</i>)	V _{g(polisilicio)} (<i>nm/min</i>)	V _{g(SiO₂)} (<i>nm/min</i>)	Selectividad (Si ₃ N ₄ /polisilicio)	Selectividad (Si ₃ N ₄ /SiO ₂)	Selectividad (polisilicio/SiO ₂)
CF ₄ /15	139	18.32	14.12	1	1.3	18.32	14.12
O ₂ /2.5							
CF ₄ /15	134	18.8	10.1	1	1.86	18.8	10.1
O ₂ /5							
CF ₄ /15	125	19.65	14.5	1	1.35	19.65	14.5
O ₂ /7.5							
CF ₄ /15	131	18.62	4	1	4.65	18.62	4
O ₂ /10							

Tabla 4.3: Velocidades de grabado, voltaje de autopolarización y selectividades obtenidas con plasma de CF₄ + O₂.

4.1.3. Resultados de grabado con SF_6

El gas SF_6 es empleado debido a que es una fuente de radicales de fluor, los cuales reaccionan de manera espontánea con el silicio para formar productos volátiles. En la figura 4.4 se muestra la gráfica con los valores de velocidad de grabado y $DC\ bias$ en función de la presión, donde se observa que la V_g de los tres materiales bajo condiciones iniciales de presión de $25\ mTorr$ y potencia de $25\ W$ adquieren un valor máximo. En esta medición el polisilicio (el cual está fuertemente dopado con fósforo) se graba con una velocidad de $143\ nm/min$, obteniéndose una selectividad de éste respecto al SiO_2 de 22.5, las cuales son adecuadas para la definición de la compuerta; en este caso, se cumple el requisito importante de una selectividad alta del polisilicio respecto al SiO_2 y anisotropía. Para el caso del Si_3N_4 y del SiO_2 la tendencia de la V_g es también a disminuir significativamente conforme la presión aumenta, ya que se obtiene el grabado a partir de condiciones de presión de aproximadamente $50\ mTorr$, descartandola para llevar a cabo el grabado de las dos etapas del proceso LOCOS. Por otra parte, el voltaje de autopolarización fue decreciendo relativamente, debido al efecto en el aumento de la presión, hasta finalizar casi $5\ V$ por debajo de su valor inicial, el cual fue de $20\ V$. Es decir, conforme aumenta la presión la energía cinética de las especies reactivas disminuye debido a la gran cantidad de colisiones que se presentan por la concentración de ellas, con lo cual el grabado es dominado en su mayoría por la componente química y es producido por dichas especies de flúor del plasma de SF_6 . La aportación de la componente física sólo fue producida en el caso inicial. Las condiciones involucradas son consideradas para llevar a cabo el grabado del proceso compuerta del transistor MOS. En la tabla 4.4 se muestra un resumen de los resultados obtenidos.

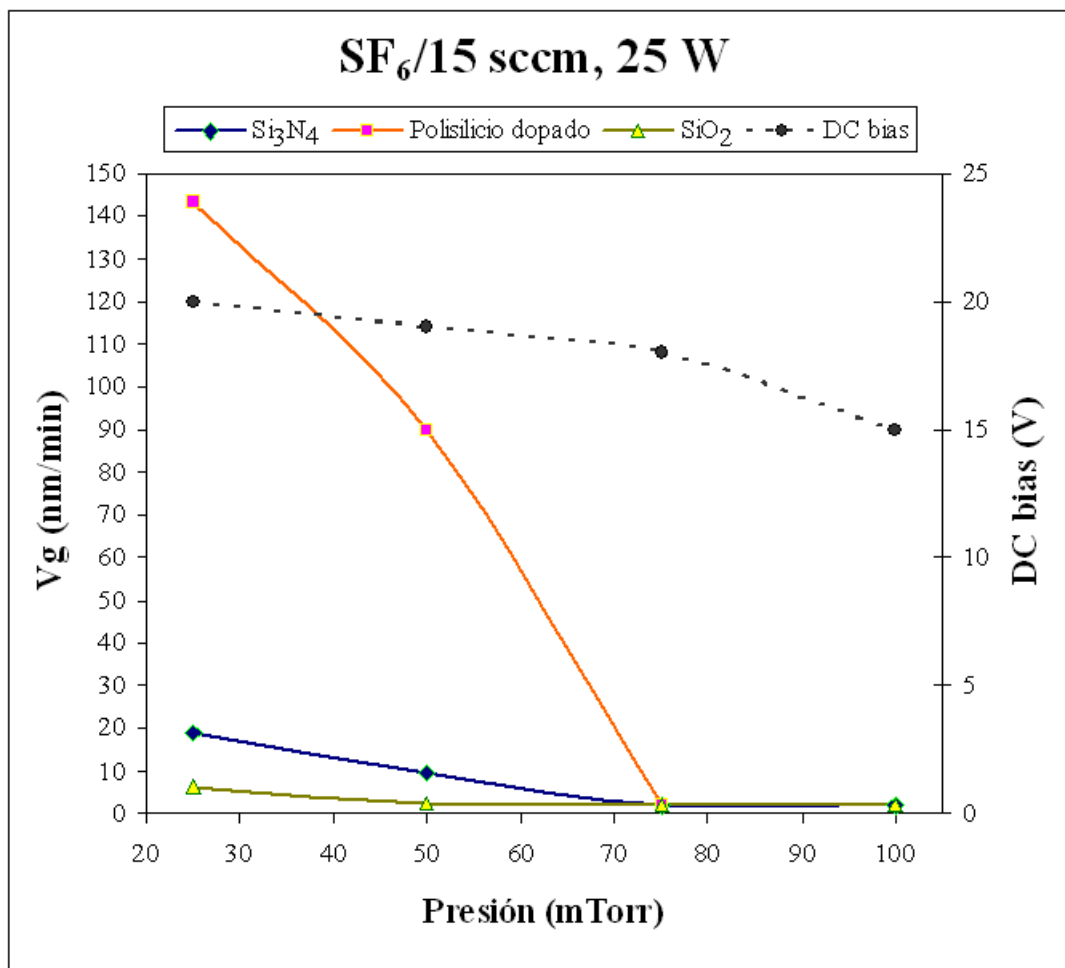


Figura 4.4: Velocidad de grabado en función de la presión para plasma de SF₆, 25 W.

<i>Plasma de SF₆ / 15 sccm, 25 W</i>							
Presión (<i>mTorr</i>)	DC bias (<i>V</i>)	V _{g(Si₃N₄)} (<i>nm/min</i>)	V _{g(polisisilicio)} (<i>nm/min</i>)	V _{g(SiO₂)} (<i>nm/min</i>)	Selectividad (<i>Si₃N₄/polisisilicio</i>)	Selectividad (<i>Si₃N₄/SiO₂</i>)	Selectividad (<i>polisisilicio/SiO₂</i>)
25	20	19.12	143.37	6.37	0.13	3	22.5
50	19	9.5	90.8	2.3	0.1	4.13	39.4
75	18	1	1	1	1	1	1
100	15	1	1	1	1	1	1

Tabla 4.4: Velocidades de grabado, voltaje de autopolarización y selectividades obtenidas con plasma de SF₆.

4.1.4. Resultados de grabado con $SF_6 + O_2$

En este caso la mezcla esta relacionada con el aumento de la velocidad de grabado mediante la incorporación de gas O_2 , el cual se encarga de promover la producción de radicales de fluor del gas SF_6 . De este modo, los radicales reaccionan con el silicio formando productos volátiles. Se consideró realizar experimentos bajo la condición inicial en el sistema de 25 W y 50 mTorr, ya que se tienen películas delgadas en la estructura del proceso de definición de compuerta y requiere velocidades de grabado bajas. En la figura 4.5 se muestran los resultados de la V_g de los materiales en función del flujo de O_2 , así como el *DC bias* generado en cada experimento.

En el caso del polisilicio (el cual esta dopado fuertemente con fósforo), la tendencia no es clara debido a la incorporación de O_2 ; las condiciones específicas de grabado resultan en comportamientos aleatorios del material para reaccionar con las componentes física y química. Se observa que con un flujo de 2.5 sccm de O_2 la velocidad de grabado del polisilicio se incrementa hasta su valor máximo (150 nm/min) cuando las condiciones de flujo de O_2 es de 5 sccm; a partir de ese valor la velocidad comienza a disminuir. Sin embargo, el valor máximo en el caso del polisilicio se ajusta perfectamente a los requerimientos de grabado para el proceso de definición de compuerta. Además, el valor de selectividad del polisilicio respecto al óxido es de 150, lo cual significa un proceso altamente selectivo. Los resultados obtenidos hacen suponer que el O_2 reacciona con las moléculas de SF_6 para liberar átomos de flúor, los cuales son insuficientes en algunos puntos para llevar a cabo una reacción en la superficie del material; en este caso del polisilicio [18]. Por otra parte puede existir un efecto de la capa de óxido formada, la cual inhibe el grabado también en algunas condiciones de flujo de O_2 . En el caso del Si_3N_4 , la velocidad de grabado disminuye a partir de su valor inicial de 20 nm/min hasta obtener su

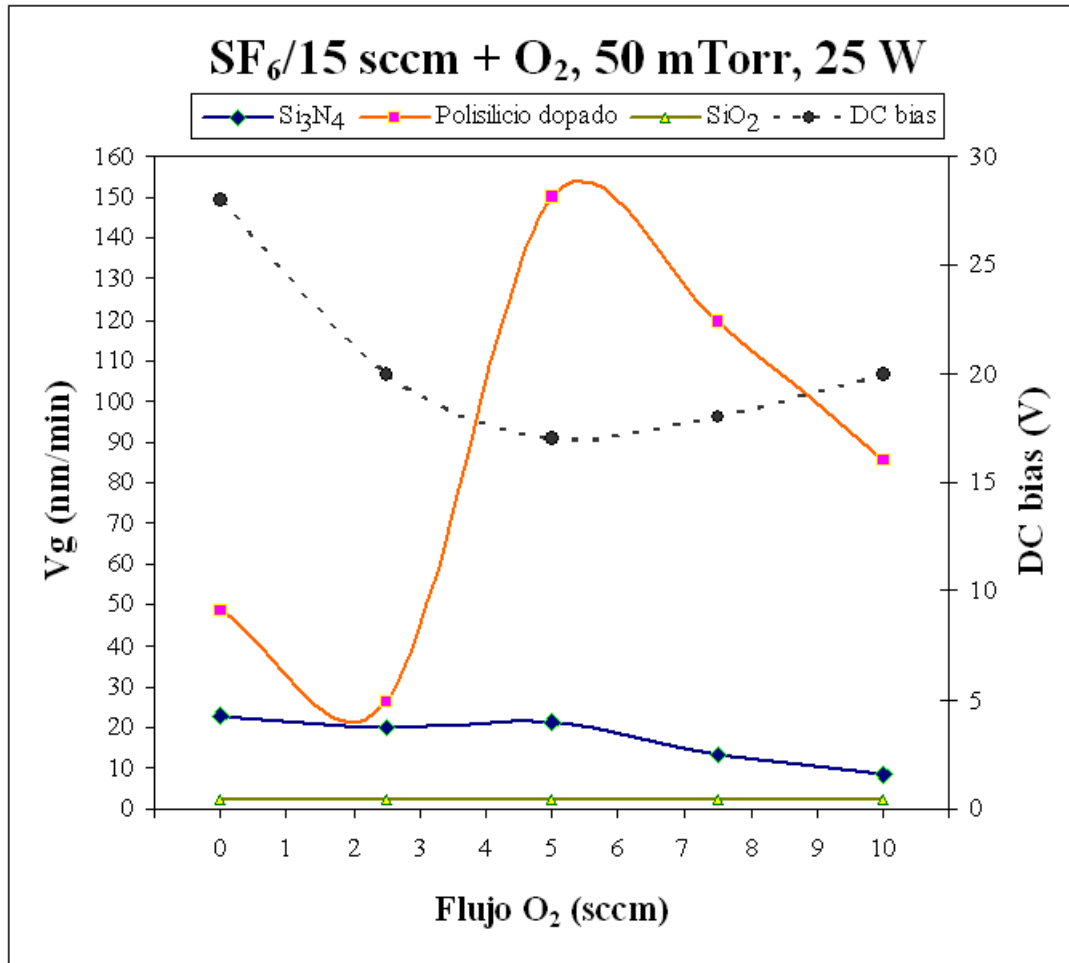


Figura 4.5: Velocidad de grabado en función del flujo de O_2 en plasma de $SF_6 + O_2$, 50 $mTorr$, 25 W .

valor más bajo, de 8 nm/min , en el último experimento; por ello, estos resultados no son considerados para llevar a cabo el grabado para el proceso LOCOS.

El valor que se observa en el $DC\ bias$ tiende también a disminuir conforme se aumenta el flujo de oxígeno, ocasionando que no haya el suficiente bombardeo iónico para producir grabado de óxido en todos los procesos. En trabajos previos que utilizan el mismo plasma para realizar grabado de Si_3N_4 , como el de Reyes-Betanzo [19], obtienen un valor de la velocidad de grabado de 50 nm/min bajo

condiciones de potencia de RF de 75 W y presión de 150 $mTorr$, empleando de igual forma un sistema RIE. Este resultado es consistente con los experimentos llevados a cabo con el empleo de esta mezcla y puede ser asociado a la condiciones establecidas en este trabajo.

Los resultados obtenidos en nuestros experimentos se resumen en la tabla 4.5.

<i>Plasma de SF₆ + O₂, 25 W, 50 mTorr</i>							
Gas/Flujo (mTorr)	DC bias (V)	Vg _(Si₃N₄) (nm/min)	Vg _(polisilicio) (nm/min)	Vg _(SiO₂) (nm/min)	Selectividad (Si ₃ N ₄ /polisilicio)	Selectividad (Si ₃ N ₄ /SiO ₂)	Selectividad (polisilicio/SiO ₂)
SF ₆ /15	20	20	26.18	1	0.76	20	26.18
O ₂ /2.5							
SF₆/15	17	21.25	150	1	2.14	21.25	150
O₂/5							
SF ₆ /15	18	13.31	119.5	1	0.11	13.31	119.5
O ₂ /7.5							
SF ₆ /15	20	8.18	85.31	1	0.1	8.18	85.31
O ₂ /10							

Tabla 4.5: Velocidades de grabado, voltaje de autopolarización y selectividades obtenidas con plasma de SF₆ + O₂.

4.1.5. Resultados de grabado con $SF_6 + CF_4$

En el caso de este plasma, como fue mencionado con anterioridad, la función del SF_6 esta relacionada con la producción de radicales de F . Por otra parte, el CF_4 también produce radicales de F y CF_x , que son grabantes efectivos, donde el carbono produce a su vez polimerización en la superficie de los materiales. Se puede pensar entonces que la mezcla de ambos gases puede llegar a promover el grabado de manera que se adecúe a las condiciones del proceso de definición de compuerta. No obstante, en la figura 4.6 se observan los resultados de la V_g obtenidos de los experimentos, donde la tendencia es a disminuir para los tres materiales conforme la presión se incrementa a partir de 50 y finalizando en 100 *mTorr*. Estos experimentos fueron realizados bajo condiciones de potencia de 25 *W* y flujos de 15 *sccm* para ambos gases; es deseable obtener velocidades de grabado bajas debido al espesor de las películas que conforma la estructura propuesta. Se puede observar que el *DC bias* disminuye también, lo cual hace pensar que el grabado esta dominado principalmente por la componente química, con la acción de los radicales de flúor, ya que no hay influencia significativa de la energía del bombardeo iónico para remover por completo la capa de polímero formada y llevar a cabo el grabado adecuadamente (esto debido a la influencia de la presión sobre la energía cinética de las especies reactivas, al reducir el camino medio libre entre ellas).

De los resultados obtenidos, el correspondiente a la velocidad de grabado de polisilicio dopado con fósforo (78 nm/min) representa un valor adecuado que permite llevar a cabo un proceso controlable para el proceso de definición de compuerta, ya que representa tener un tiempo de grabado de polisilicio de al rededor de 5 minutos. Bajo estas condiciones, presión del sistema de 50 *mTorr*, la selectividad del polisilicio respecto al SiO_2 es de al menos 78. Los resultados se muestran en la tabla 4.6.

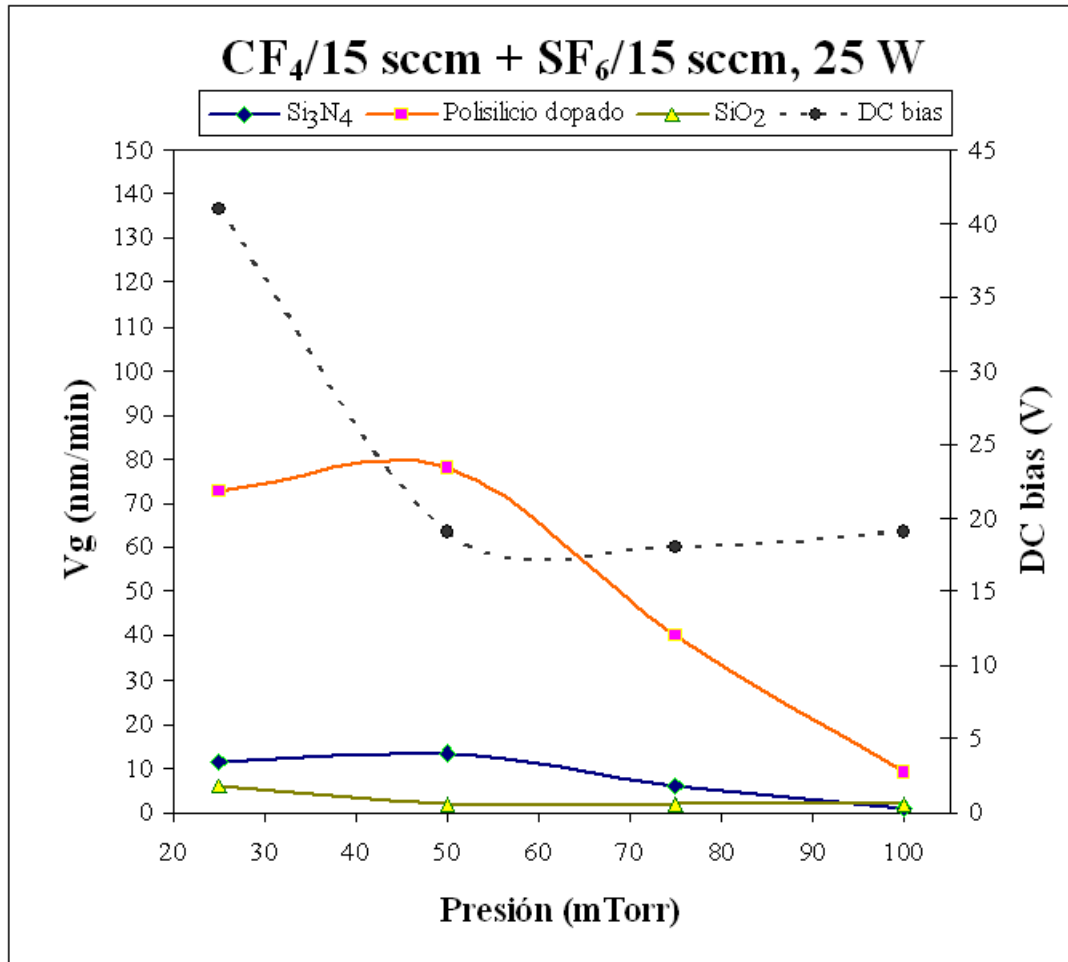


Figura 4.6: Velocidad de grabado en función de la presión para plasma de SF_6 + CF_4 , 25 W.

Plasma de SF_6 / 15 sccm + CF_4 / 15 sccm, 25 W							
Presión (mTorr)	DC bias (V)	$Vg_{(Si_3N_4)}$ (nm/min)	$Vg_{(polisilicio)}$ (nm/min)	$Vg_{(SiO_2)}$ (nm/min)	Selectividad (Si_3N_4 /polisilicio)	Selectividad (Si_3N_4/SiO_2)	Selectividad (polisilicio/ SiO_2)
25	41	11.56	72.6	6	0.16	1.93	12.6
50	19	13.33	78	1	0.17	13.33	78
75	18	6	40	1	0.15	6	40
100	19	1	9.25	1	0.1	1	9.25

 Tabla 4.6: Velocidades de grabado, voltaje de autopolarización y selectividades obtenidas con plasma de SF_6 + CF_4 .

4.2. Análisis de la anisotropía

Una vez llevada a cabo la caracterización de la velocidad de grabado de los materiales involucrados en las estructuras de los procesos propuestos, a partir de los resultados obtenidos fueron seleccionados aquellos procesos cuyos parámetros permitan obtener perfiles que tiendan a ser verticales. Lo anterior es debido a los requerimientos que las nuevas tecnologías de fabricación demandan.

4.2.1. Proceso de Oxidación Local de Silicio

Para este proceso, previo y posterior a la oxidación, la anisotropía no es crítica debido a que los materiales sirven como enmascarantes; es decir, inicialmente se requiere grabar por completo el Si_3N_4 y el polisilicio sólo en un porcentaje. Posterior a la oxidación, ambos materiales son removidos por completo hasta la película de óxido delgado. Sin embargo, el perfil de la estructura fue observado. Las mejores condiciones para realizar grabado fueron empleando plasma de CF_4 con un flujo de 15 sccm, una presión de 50 *mTorr* y con diferentes valores de potencia. La tabla 4.7 contiene los mejores resultados obtenidos de los experimentos llevados a cabo en el sistema de grabado RIE, los valores de la profundidad de grabado medida con el perfilómetro (espesor de escalon de una estructura) y los obtenidos en el microscopio de barrido electrónico (SEM).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Plasma de $CF_4/15$ sccm, 50 mTorr					
Muestra	Potencia	$Vg(Si_3N_4)$	$Vg(polisilicio)$	$Espesor(Perfilómetro)$	$Espesor(SEM)$
No.	(W)	(nm/min)	(nm/min)	(nm)	(nm)
L ₁	25	45	18	152	-
L ₂	50	41	21	154	153
L ₃	75	61	39	159	158

Tabla 4.7: Mejores resultados obtenidos para la caracterización del grabado en el proceso LOCOS.

La imagen de la figura 4.7 muestra el perfil lateral de una línea elegida de todo el patron de estructuras, donde la profundidad de grabado de la muestra L₂ es medida con el SEM; lo mismo ocurre en la figura 4.8 para la muestra L₃.

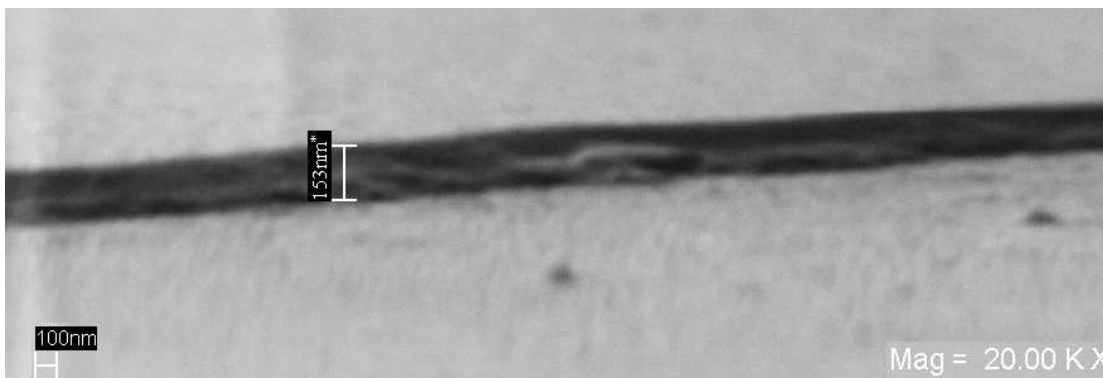


Figura 4.7: Profundidad de la estructura grabada con plasma de CF_4 , perteneciente a la muestra L₂.

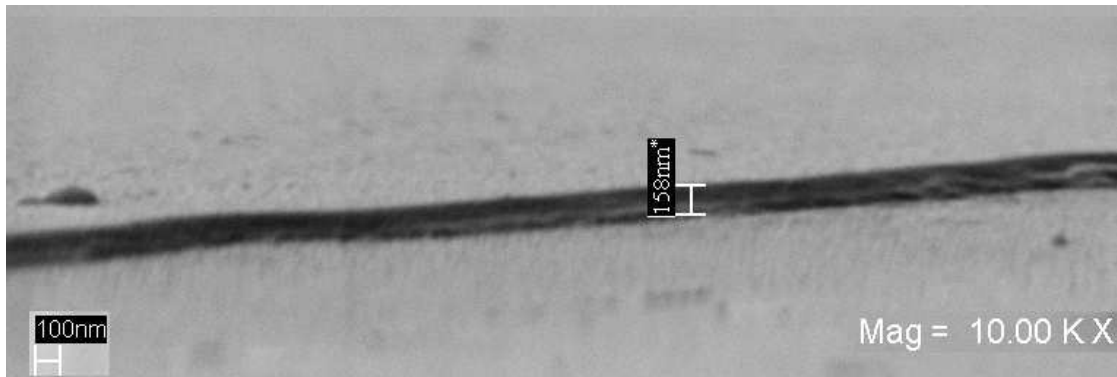


Figura 4.8: Profundidad de la estructura grabada con plasma de CF_4 , perteneciente a la muestra L_3 .

En las imágenes anteriores sólo es posible observar uno de los lados de la estructura visto de frente, donde el perfil presenta una tendencia vertical poco clara en ambos casos. Se puede pensar que el efecto del bombardeo iónico no fue suficiente para hacer un balance con la componente química y realizar un grabado totalmente anisotrópico. Es decir, la producción de especies reactivas realizaron un grabado espontáneo (isotrópico). Aunque las condiciones establecidas para llevar a cabo el proceso de grabado permiten realizar más experimentos para lograr obtener un perfil más anisotrópico, al aumentar la potencia significaría, de igual manera, que pueda presentarse grabado de SiO_2 y la selectividad de polisilicio respecto a éste disminuya considerablemente. Esto no es deseable porque se requiere tener alta selectividad de esos materiales para la etapa posterior a la oxidación. Por otro lado, en las imágenes puede observarse que en la superficie existen residuos de material que pueden atribuirse al enmascarante o al carbono producido por el plasma de CF_4 .

4.2.2. Proceso de definición de compuerta

En la tabla 4.8 se resumen los mejores resultados obtenidos en los experimentos correspondientes al proceso de definición de compuerta del dispositivo CMOS. Estos procesos fueron seleccionados debido a que cumplen con los requerimientos establecidos en función de la velocidad de grabado, selectividad y probabilidad de obtener un perfil anisotrópico. Se incluyen las profundidades de grabado (espesores de escalón de una estructura) obtenidas con el perfilómetro, así como con el SEM.

Presión de 25 y 50 <i>mTorr</i> , potencia de 25 <i>W</i>					
Muestra No.	Mezcla/Flujo (gas/sccm)	$Vg_{(polisilicio)}$ (nm/min)	Selectividad (<i>polisilicio/SiO₂</i>)	Espesor _(perfilómetro) (nm)	Espesor _(SEM) (nm)
C ₁	$SF_6/15 + CF_4/15$	78	78	321	-
C ₂	$SF_6/15$	143	22.5	337	340
C ₃	$SF_6/15 + O_2/5$	150	150	339	340

Tabla 4.8: Mejores resultados obtenidos para caracterización del grabado para el proceso de definición de compuerta.

La primera muestra examinada es la C₂, correspondiente al grabado empleando plasma de SF_6 , se puede apreciar en la figura 4.9. La otra muestra, C₃, es la correspondiente al proceso de grabado con plasma producido por la mezcla de SF_6 con O_2 y se muestra en la fotografía de la figura 4.10.

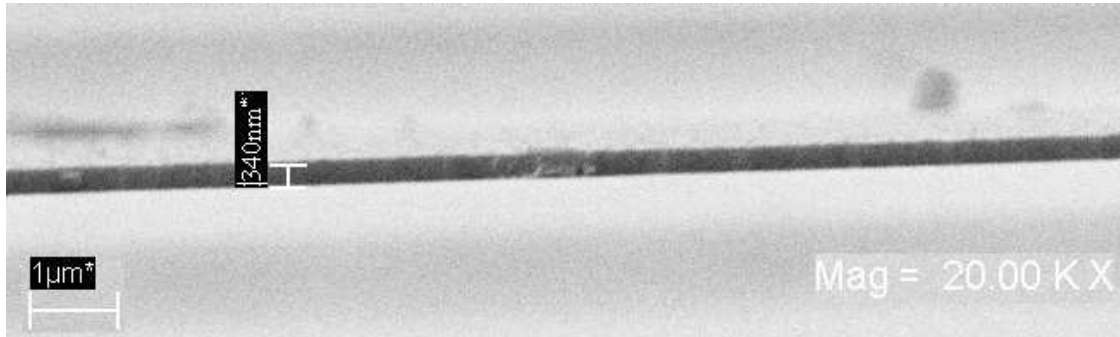


Figura 4.9: Profundidad de las estructuras grabadas con plasma de SF_6 perteneciente a la muestra C_2 .

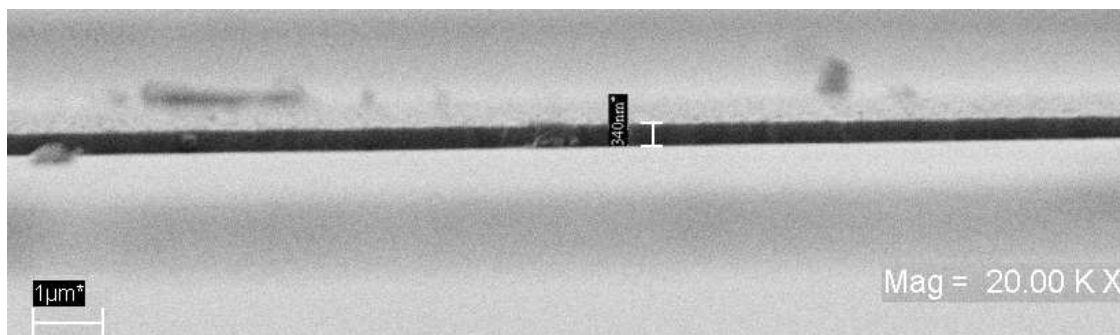


Figura 4.10: Profundidad de las estructuras grabadas con plasma de $SF_6 + O_2$ perteneciente a la muestra C_3 .

Con el fin de observar más a detalle los perfiles, en las figuras 4.11 y 4.12 se muestra el borde de una estructura correspondiente a la muestra C₃, donde se observa que el perfil de grabado tiende a ser vertical a pesar de que el proceso litográfico no permitió obtener patrones bien definidos. Se puede pensar que el bombardeo iónico contribuyó con el grabado direccional, permitiendo que los iones graben verticalmente. De este modo, el efecto presentado indica un balance de las componentes física y química para realizar el grabado. Se pueden apreciar además residuos del material enmascarante o del que fue grabado.

Las profundidades de grabado medidas con el SEM corresponden a las medidas en el perfilómetro. Por otra parte, fue cuantificado el grabado lateral al medir el ancho de una estructura de la muestra en el microscopio óptico (antes y después del grabado) y comparado con el valor medido con el SEM. Esto se observa en las figuras 4.13, 4.14 y 4.15, respectivamente, donde los valores medidos son aproximadamente iguales (de aproximadamente $18 \mu m$, estimando un porcentaje de error de 1 % en la medición con el microscopio óptico). Lo anterior indica que es factible la aplicación para el proceso de definición de compuerta del transistor MOS, existiendo transferencia fiel de patrones sin presentarse grabado lateral. No obstante, la mala definición del borde se debe a un proceso litográfico no satisfactorio.

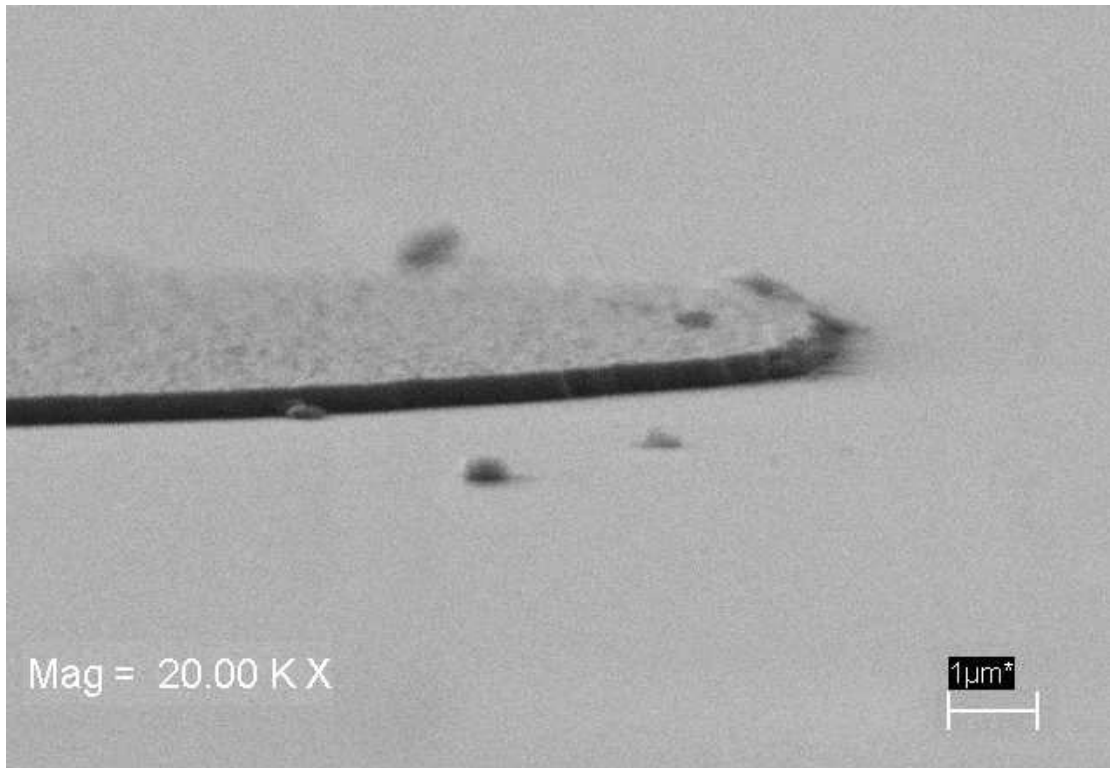


Figura 4.11: Borde del perfil de grabado de una estructura perteneciente a la muestra C_3 .

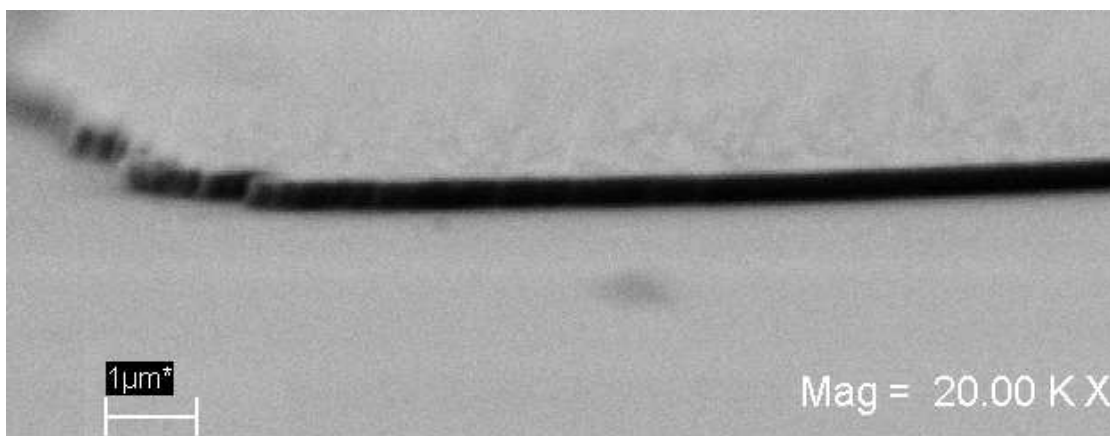


Figura 4.12: Parte frontal del perfil de grabado de una estructura perteneciente a la muestra C_3 .

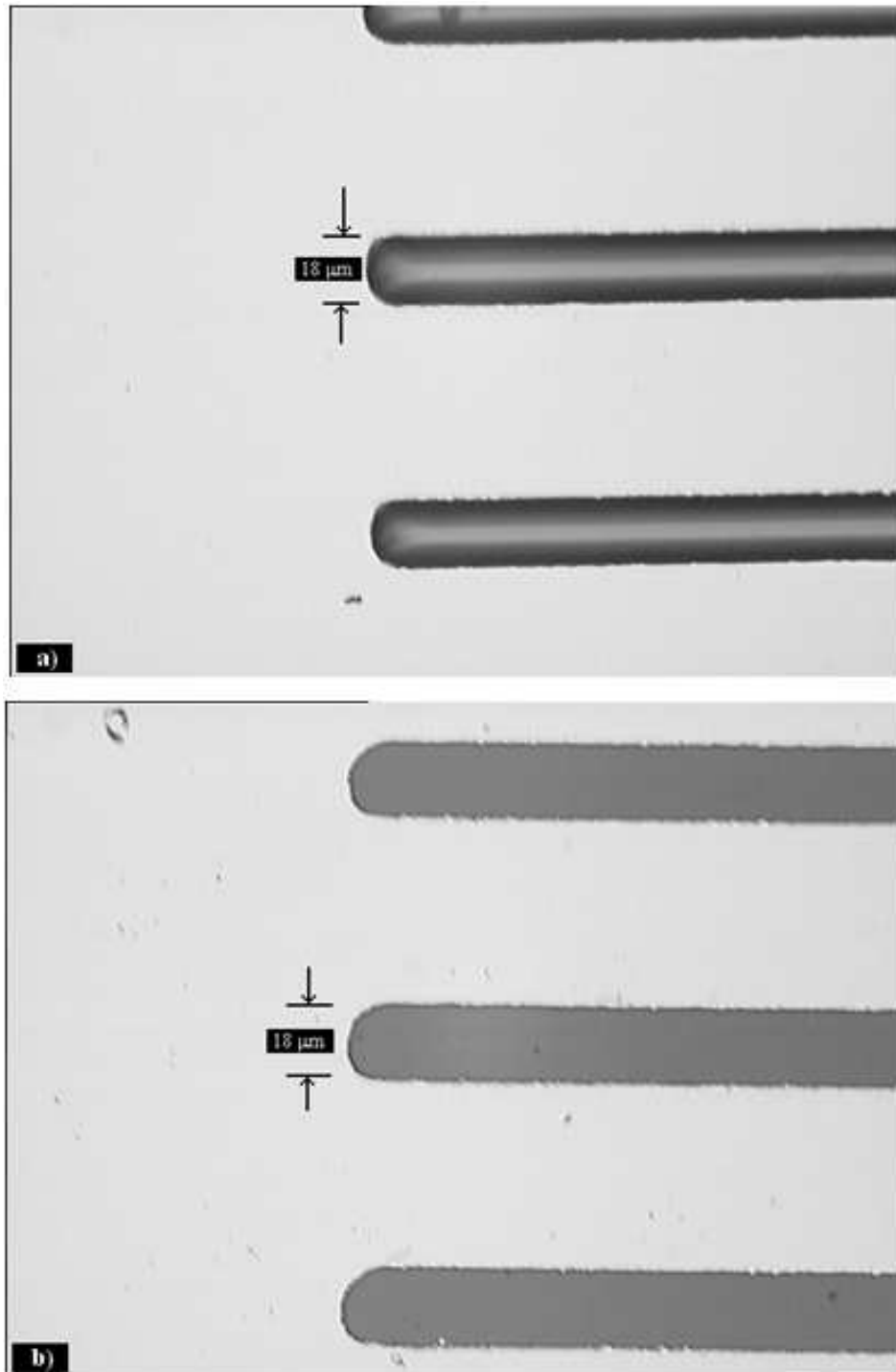


Figura 4.13: Medición del ancho de una estructura perteneciente a la muestra C_3 con el microscopio óptico (objetivo 20x0.4). **a)** Antes del grabado y **b)** Posterior al grabado.

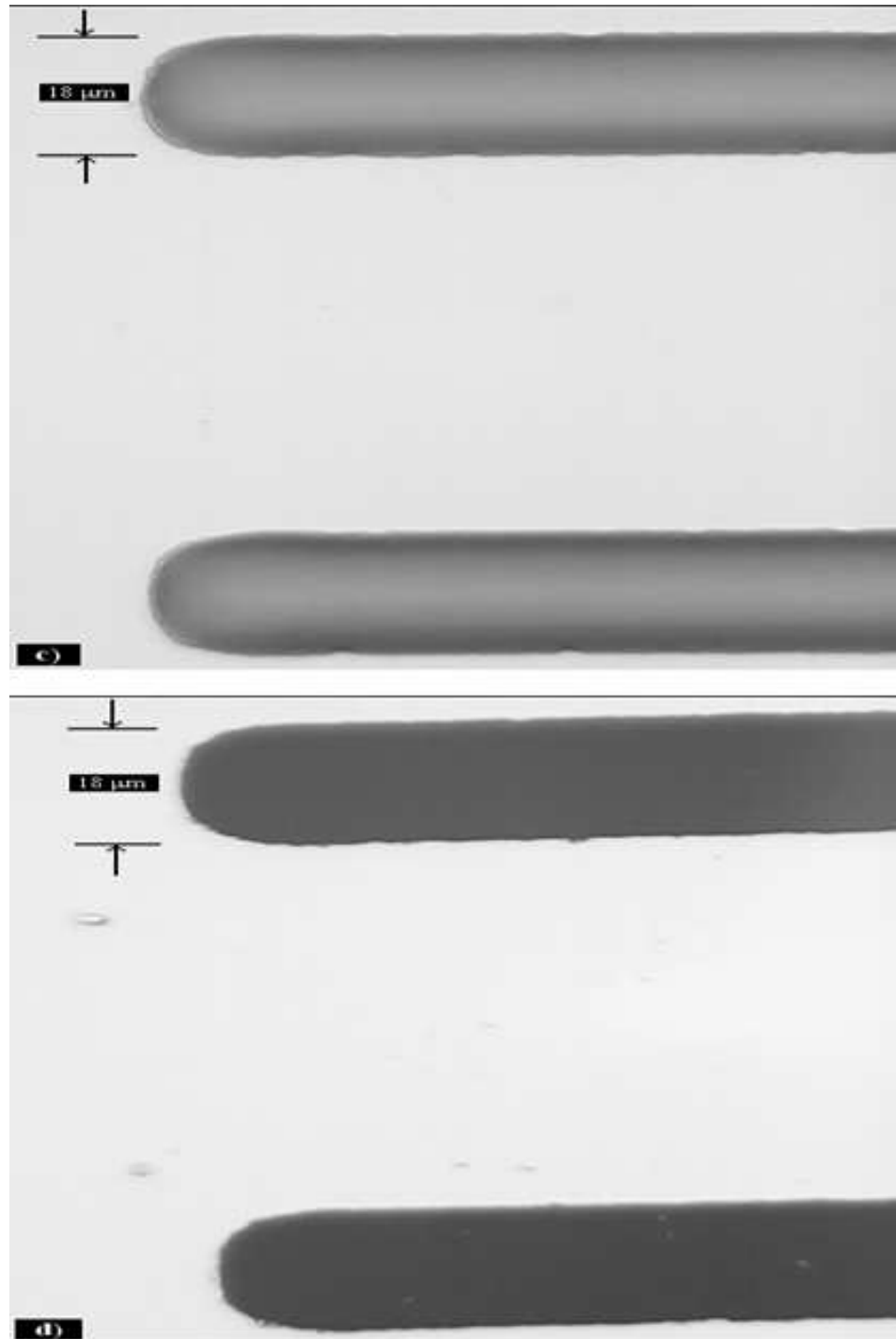


Figura 4.14: Medición del ancho de una estructura perteneciente a la muestra C_3 con el microscopio óptico (objetivo 40x0.8). **c)** Antes del grabado y **d)** Posterior al grabado.

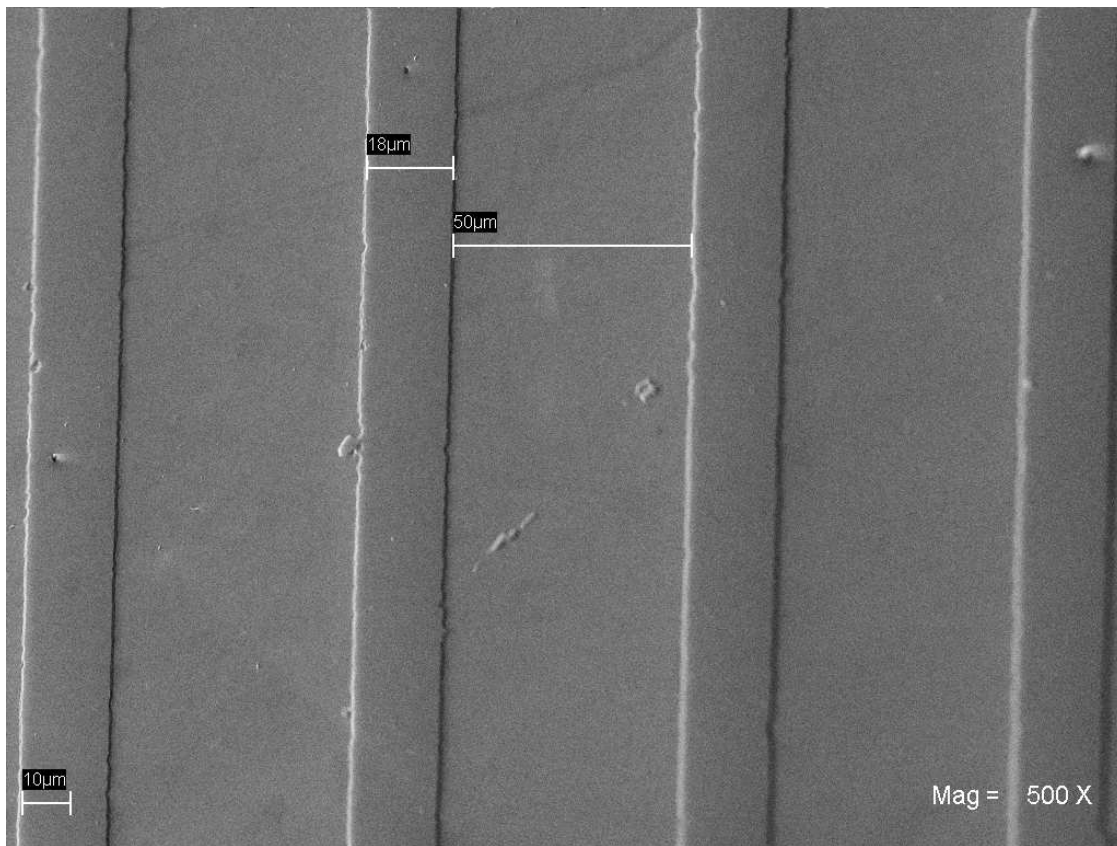


Figura 4.15: Medición del ancho de una estructura perteneciente a la muestra C₃ con el uso del SEM.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

El objetivo principal de este trabajo de investigación se cumplió satisfactoriamente, ya que la caracterización de los procesos de grabado con plasma de los diferentes materiales empleados en la fabricación del dispositivo CMOS fue realizada por medio de la optimización de la velocidad de grabado, selectividad y anisotropía en función de las condiciones experimentales apropiadas de gases y sus mezclas, así como potencia, presión y flujo para satisfacer los requisitos de grabado de los materiales que conforman las estructuras tanto el proceso de Oxidación Local de Silicio ($Si_3N_4/polisilicio/SiO_2$, con espesores de 150, 50 y 12 nm respectivamente), como para el de definición de compuerta del transistor MOS ($polisilicio/SiO_2$, con espesores de 400 y 10 nm respectivamente). Para ello se utilizaron diferentes tipos de plasmas como lo fueron CF_4 , SF_6 , CF_4+O_2 , SF_6+O_2 y SF_6+CF_4 .

5.1. Proceso de Oxidación Local de Silicio

Para el proceso de Oxidación Local de Silicio (LOCOS), las mejores condiciones para llevar a cabo grabado se encontraron mediante el empleo de plasma de CF_4 con flujo de 15 sccm, presión de 50 mTorr y diferentes valores de potencia. La

velocidad de grabado obtenida para Si_3N_4 de $45.4 \text{ nm}/\text{min}$, correspondiente a la potencia de 25 W , es un valor adecuado para este proceso ya que garantiza que puedan realizarse procesos controlables de grabado debido al espesor de la película de nitruro (150 nm) y sin que el material enmascarante sea eliminado. De este modo el tiempo de grabado fue de poco más de 3 minutos, ya que el espesor de la película de nitruro era de 150 nm . La selectividad del Si_3N_4 respecto al polisilicio obtenida bajo estas características fue de 2.5, aunque para la etapa previa a la oxidación esta condición no es crítica; por otra parte, la selectividad del polisilicio respecto al SiO_2 es importante para la etapa posterior a la oxidación ya que se debe garantizar el grabado del Si_3N_4 y del polisilicio sin afectar el óxido delgado.

Otros resultados considerados para llevar a cabo el grabado del sistema LOCOS fueron los correspondientes a las velocidades de grabado en condiciones de potencia de 50 y de 75 W , cuyos valores fueron 41 y $61 \text{ nm}/\text{min}$ respectivamente, los cuales están también dentro de un rango de tiempo de grabado aceptable. Los radicales de fluor producidos por plasma de CF_4 en el proceso son especies reactivas efectivas para el grabado del nitruro de silicio. Por otra parte, este plasma contiene especies precursoras de polímero que inhibe el grabado espontáneo y permite un grabado más direccional. Los resultados reflejan el efecto de esta capa pasivadora, existiendo, sin embargo, un bombardeo iónico continuo debido al aumento del voltaje de autopolarización. Del análisis de las estructuras llevado a cabo con el SEM se observó un perfil poco definido de las estructuras, esto hace suponer que el bombardeo iónico no fue suficiente para hacer un balance con la componente química y realizar un grabado totalmente anisotrópico. Por otro lado, se observó que en la superficie de la muestra aparecen residuos del material enmascarante o productos del carbono de plasma de CF_4 . Entonces, de acuerdo con los espesores de las estructuras medidos en el SEM, se pueden aplicar las condiciones

obtenidas para llevar a cabo un proceso con un tiempo de grabado controlado para la estructura del proceso de Oxidación Local de Silicio.

5.2. Proceso de definición de compuerta

En el caso del proceso de definición de compuerta del transistor MOS, el cual demanda una selectividad alta de polisilicio respecto al óxido y anisotropía, se encontraron las condiciones adecuadas de grabado con el empleo de mezclas de diferentes gases reactivos. En todos los casos se empleó principalmente SF_6 por ser precursor de radicales de flúor, los cuales producen un grabado dominado principalmente por la componente química. El primer proceso fue llevado a cabo sólo con el empleo de plasma de SF_6 donde se obtuvo una velocidad de grabado de polisilicio de 143.3 nm/min bajo condiciones de flujo de 15 sccm , potencia de 25 W , 25 mTorr de presión y un voltaje de autopolarización de 20 V . El efecto de la presión fue notorio ya que el voltaje de autopolarización fue decreciendo debido a la gran cantidad de colisiones entre las especies reactivas. Por lo tanto, el grabado es dominado en su mayoría por la componente química, producido por las especies reactivas del plasma al reaccionar espontáneamente con el silicio, formando consecuentemente productos volátiles. Este resultado fue considerado para llevar a cabo el proceso de grabado del sistema ya que cumple además con el requisito de tener un tiempo controlable en el proceso y una selectividad del polisilicio respecto al óxido de 22.5. Del análisis realizado en el SEM para esta muestra, se observó que las estructuras presentan un perfil que tiende ligeramente a ser vertical y la profundidad de grabado corresponde a la medida en el perfilómetro.

Para el proceso donde se empleó una mezcla de SF_6 con O_2 se encontró que la adición de O_2 aumentó la velocidad de grabado del polisilicio, debido a la mayor producción de flúor. Por otra parte puede existir efecto de la capa de óxido forma-

da en la superficie, la cual inhibe el grabado en algunas condiciones de flujo de O_2 . La velocidad de grabado del polisilicio obtenida para llevar a cabo el proceso fue de $150\text{ nm}/\text{min}$, bajo condiciones de flujo de 15 sccm y 5 sccm , respectivamente, presión de 25 mTorr , potencia de 25 W y voltaje de autopolarización de 17 V . El valor de la selectividad del polisilicio respecto al SiO_2 es de 150, lo cual significa tener un proceso altamente selectivo. En el análisis realizado a la muestra con el SEM, se observó que el perfil de grabado tiende a ser vertical y la profundidad de grabado coincidió con la medición realizada con el perfilómetro. Lo anterior señala un balance de las componentes física y química para realizar el grabado con el empleo de SF_6 en adición con O_2 . Por otra parte, fue cuantificado el grabado lateral al medir el ancho de una estructura de la muestra con el microscopio óptico, antes y después del grabado, y comparado con el valor medido con el SEM. Los valores medidos fueron aproximadamente iguales, $18\text{ }\mu\text{m}$ (estimando un porcentaje de error del 1 %, debido a la medición en el microscopio óptico), lo cual indica una transferencia fiel de patrones y, por lo tanto, su factible aplicación en el proceso de definición de la compuerta. La mala definición observada del borde de la estructura se debió a un proceso litográfico no satisfactorio.

Respecto al proceso donde fue empleada una mezcla de SF_6 con CF_4 , fue notable la disminución en la velocidad de grabado del polisilicio, la cual fue de $78\text{ nm}/\text{min}$ bajo condiciones de presión de 50 mTorr , 25 W de potencia y voltaje de autopolarización de 19 V . Este resultado implicó tiempo mayor de grabado para llevarlo a cabo respecto a los anteriores, del mismo modo puede indicar que el proceso fue dominado por la componente química mediante el grabado espontáneo. Lo anterior está sustentado en la disminución del *DC bias*, con lo cual no hay influencia significativa de la energía del bombardeo iónico para remover la capa de polímero formada en la superficie de la muestra. Es entonces factible llevar a

cabo el grabado de la estructura para el proceso de definición de compuerta bajo las características obtenidas en la experimentación ya que se obtuvieron además estructuras adecuadas al sistema, selectividad de polisilicio respecto al óxido de 78 y con tiempos de grabado controlables.

5.3. Conclusión general

En general, se puede concluir que la componente física y química están presentes en los procesos y son determinantes para llevar a cabo el grabado de los materiales de las estructuras de los procesos propuestos. Los resultados de la caracterización resultaron adecuados y confiables para llevar a cabo esta etapa crítica en la fabricación de dispositivos CMOS, mediante el empleo de esta técnica de grabado, ya que inicialmente se realizaron procesos de grabado de películas gruesas de los materiales implicados en los procesos. Posteriormente fue realizado el grabado de los materiales en las estructuras propuestas, repitiendo los procesos hasta obtener las condiciones adecuadas de presión, potencia, flujo y mezcla adecuada de gases, para llevarlo a cabo en tiempos de grabado cortos. Por otra parte, el proceso de grabado del material enmascarante fue selectivo respecto a todos los materiales para todos los procesos realizados en este trabajo.

5.4. Trabajos futuros

Como trabajos futuros se tienen, en primer lugar, la opción de realizar experimentos con plasma a base de cloro y bromo ya que tienen la característica de realizar un grabado totalmente anisotrópico [3]. Por otro lado, realizar diagnóstico de plasma *in-situ* para el análisis previo de resultados. Con la ayuda de microscopía de fuerza atómica es posible hacer una análisis del daño superficial. Finalmente, automatizar el control del sistema RIE del Laboratorio de Microelectrónica del

INAOE, con la creación de la interface física y *software* para establecer las condiciones de presión, potencia, flujo y mezcla adecuada de gases, desde una PC.

Índice de Figuras

2.1. Colisiones de un átomo en un gas, donde la trayectoria de las partículas se presenta en líneas rectas [8].	11
2.2. Distribución de densidad de las partículas del plasma de acuerdo a la temperatura [12].	16
2.3. Especies que interactúan entre el plasma y la superficie expuesta [14].	21
2.4. Proceso de grabado con plasma [14].	24
2.5. Interacción de todas las variables y procesos que influyen en el proceso de grabado de grabado con plasma [10].	25
2.6. Plasma de RF. a) Aproximación de la distribución de potencial promedio de un sistema de RF planar acoplado capacitivamente. b) Distribución de potencial en el reactor: V_P = potencial del plasma, V_{DC} =voltaje de autopolarización, $(V_{RF})_{P-P}$ =voltaje pico-pico aplicado por la fuente RF [7].	27
2.7. Formación de la lámina de plasma y el bombardeo iónico perpendicular resultante del gradiente de potencial [8].	29
2.8. Diagrama del equipo RIE [9].	29
2.9. Pasivación de las paredes de la estructura en el proceso de grabado con RIE [15].	32
2.10. Comparación de los mecanismos de grabado y sus características [8].	34
2.11. Estructura inicial para el proceso LOCOS.	36

2.12. Litografía para regiones activas del transistor.	36
2.13. Definición de las regiones activas mediante grabado.	37
2.14. Estructura resultante del proceso de oxidación local de silicio.	37
2.15. Grabado del nitruro y del polisilicio para tener un óxido delgado de alta calidad.	38
2.16. Estructura inicial para la definición de compuerta del dispositivo CMOS.	39
2.17. Definición de patrones geométricos para la compuerta.	40
2.18. Estructura resultante para la obtención de la compuerta del CMOS.	40
3.1. equipo RIE/ICP del Laboratorio de Microelectrónica del INAOE.	47
4.1. Velocidad de grabado en función de la potencia RF para plasma de CF_4 , 50 <i>mTorr</i>	56
4.2. Velocidad de grabado en función de la presión para plasma de CF_4 , 25 <i>W</i>	59
4.3. Velocidad de grabado en función del flujo de O_2 en plasma de CF_4 + O_2 , 50 <i>mTorr</i> , 25 <i>W</i>	62
4.4. Velocidad de grabado en función de la presión para plasma de SF_6 , 25 <i>W</i>	66
4.5. Velocidad de grabado en función del flujo de O_2 en plasma de SF_6 + O_2 , 50 <i>mTorr</i> , 25 <i>W</i>	69
4.6. Velocidad de grabado en función de la presión para plasma de SF_6 + CF_4 , 25 <i>W</i>	73
4.7. Profundidad de la estructura grabada con plasma de CF_4 , perten- ciente a la muestra L ₂	76
4.8. Profundidad de la estructura grabada con plasma de CF_4 , perten- ciente a la muestra L ₃	77

4.9. Profundidad de las estructuras grabadas con plasma de SF_6 perteneciente a la muestra C_2	79
4.10. Profundidad de las estructuras grabadas con plasma de $SF_6 + O_2$ perteneciente a la muestra C_3	79
4.11. Borde del perfil de grabado de una estructura perteneciente a la muestra C_3	81
4.12. Parte frontal del perfil de grabado de una estructura perteneciente a la muestra C_3	81
4.13. Medición del ancho de una estructura perteneciente a la muestra C_3 con el microscopio óptico (objetivo 20x0.4). a) Antes del grabado y b) Posterior al grabado.	82
4.14. Medición del ancho de una estructura perteneciente a la muestra C_3 con el microscopio óptico (objetivo 40x0.8). c) Antes del grabado y d) Posterior al grabado.	83
4.15. Medición del ancho de una estructura perteneciente a la muestra C_3 con el uso del SEM.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Índice de Tablas

4.1. Velocidades de grabado, voltaje de autopolarización y selectividades obtenidas con plasma de CF_4 , variando la potencia.	57
4.2. Velocidades de grabado, voltaje de autopolarización y selectividades obtenidas con plasma de CF_4 , variando la presión.	60
4.3. Velocidades de grabado, voltaje de autopolarización y selectividades obtenidas con plasma de $CF_4 + O_2$	64
4.4. Velocidades de grabado, voltaje de autopolarización y selectividades obtenidas con plasma de SF_6	67
4.5. Velocidades de grabado, voltaje de autopolarización y selectividades obtenidas con plasma de $SF_6 + O_2$	71
4.6. Velocidades de grabado, voltaje de autopolarización y selectividades obtenidas con plasma de $SF_6 + CF_4$	74
4.7. Mejores resultados obtenidos para la caracterización del grabado en el proceso LOCOS.	76
4.8. Mejores resultados obtenidos para caracterización del grabado para el proceso de definición de compuerta.	78

Referencias

- [1] Kenneth C. Smith y Adel S. Sedra, *Circuitos Microelectrónicos*. Oxford University Press. Quinta edición. USA, 2006.
- [2] <http://www.intel.com>.
- [3] J. M. Cook, D. E. Ibbotson y D. L. Flamm, *J. Vac. Sci. Technol. B.* 8(1990)1.
- [4] Y. X. Li, P. J. French y R. F. Wolffenbuttel, *J. Vac. Sci. Technol. B.* 13(1995)2008.
- [5] Yue Kuo, *J. Electrochem. Soc.*. Vol 137, No 4(1999)1235.
- [6] B. E. E. Kastenmeier, P. J. Matsuo y G. S. Oehrien, *J. Vac. Sci. Technol. A.* 17(1999)3179.
- [7] Marc J. Madou, *Foundamental of Microfabrication*. CRC Press LLC, USA 2002.
- [8] W. Scot Ruska, *Microelectronic Processing*. McGraw-Hill, USA 1987.
- [9] J. Reece, *Industrial Plasma Engineering*. Vol 1 y 2, IOP Publishing, USA 2003.
- [10] Dennis M. Manos, Daniel L. Flamm, *Plasma etching: an introduction*. Academic Press Inc., USA 1989.
- [11] Brian Chapman, *Glow Discharge Processes*. John Wiley & sons, USA 1980.

REFERENCIAS

- [12] M. Elwenspoek y H. V. Jansen, *Silicon micromachining*. Cambridge University, USA 2004.
- [13] M. A. Lieberman y A. J. Lichtenberb, *Principles of plasma discharges and materials processing*. John Wiley & Sons, USA 1994.
- [14] Stanley Wolf *Silicon Processing for VLSI ERA*. Lattice Press, USA 2000.
- [15] Alfred Grill, *Cold Plasma in Materials Fabrication*. IEEE PRESS, USA 1993.
- [16] <http://www.intel.com/cd/corporate/techtrends/emea/spa/209840.htm>
- [17] M. Moreno Moreno, *Control del efecto "bird's beak" en el proceso de Oxidación Local de Silicio (LOCOS), para una tecnología CMOS de 0.8 μ m*. Tesis de maestría, INAOE, México
- [18] C. J. Mogab, A. C. Adams y D. L. Flamm, *J. Appl. Phys.*. 49(1978)3796.
- [19] C. Reyes-Betanzo, S. A. Moshkalyov, y J. W. Swart, *J. Vac. Sci. Technol. A*. 21(2003)461.
- [20] P. J. Matsuo, B. E. E. Kastenmeier, J. J. Beulens y G. S. Oehrien, *J. Vac. Sci. Technol. A*. 15(1997)1801.
- [21] S. M. Sze, *Semiconductor Devices*. John Wiley & sons, USA 2002.
- [22] Ghandi *VLSI Fabrication Principles*. Wiley Interscience, USA 1994.
- [23] Gottlieb S. Ochrlein, *Handbook of Plasma Procesing Technology*. Noyes Publications, USA 1990.