

Procesos de grabado seco de silicio monocristalino con alta velocidad de grabado y anisotropía para su aplicación en la fabricación de MEMS

C. Álvarez-Macías y C. Reyes-Betanzo
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica – INAOE,
Apartado Postal 51, 72000, Puebla, México,
e-mail: creyes@inaoep.mx

Recibido el 20 de abril de 2007; aceptado el 10 de agosto de 2007

Se presentan los resultados experimentales del grabado seco de silicio monocristalino para su aplicación en la fabricación de sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS) utilizando un reactor RIE/ICP. Se analizó la contribución de las componentes física y química sobre la velocidad y perfil de grabado respecto a la variación de la presión, bombardeo iónico, flujo, tipo y mezcla de gases, y distancia a la región de plasma denso. El principal gas reactivo empleado fue SF₆ en mezcla con Ar, O₂ o CF₄. Se utilizaron enmascarantes de fotorresina, dióxido de silicio y aluminio. Se obtuvieron velocidades de grabado anisótropo de hasta 4 μm/min con enmascarante de SiO₂ y velocidad de grabado isotrópico de hasta 13 μm/min con enmascarante de Al, ambos en plasma de SF₆/O₂. Perfiles de grabado verticales se observaron cuando el voltaje de autopolarización es el más alto, y el material enmascarante presentó un fuerte efecto sobre los resultados obtenidos.

Descriptores: Silicio monocristalino; MEMS; grabado seco.

The results of dry etching of monocrystalline silicon for micro-electro-mechanical systems (MEMS) applications by using a RIE/ICP system are shown. The contribution of the physical and chemical components over the etch rate and etch profile was analyzed by the variation of the pressure, ion bombardment, flux, type and gas mixture; and over the distance of the dense plasma. The main reactive gas used was SF₆ in mixture with Ar, O₂, or CF₄. Masking materials of photoresist, silicon dioxide, and aluminum were used. Anisotropic etch rates up to 4 μm/min with SiO₂ as masking material, and isotropic etch rates up to 13 μm/min with Al as masking material were obtained, both in SF₆/O₂ plasma. Vertical etch profiles were observed when the self-bias voltage is the highest, and the masking material presented a strong effect over the obtained results.

Keywords: Monocrystalline silicon; MEMS; dry etching.

PACS: 8540Hp; 8165Cf; 5277-j

1. Introducción

El micromaquinado de silicio monocristalino ha sido un tema de gran interés en los últimos años, debido a su alto potencial en la fabricación de MEMS, como sensores de presión, flujo o gas, micro-agujas, micro-filtros, micro-motores, con múltiples aplicaciones en las áreas médica, automotriz, espacial, biológica, etc. Para la fabricación de dichos dispositivos generalmente se requiere la transferencia fiel de patrones, con alta velocidad de grabado y perfil anisótropo de las paredes de las estructuras [1-9]. Sin embargo, grabados isotrópicos también son útiles en áreas como la óptica para la fabricación de micro-lentes y en química para la fabricación de micro-celdas de combustible [10-11].

El grabado húmedo de silicio monocristalino presenta limitaciones respecto al control de las dimensiones de las estructuras por la dependencia cristalográfica del sustrato con los grabantes comúnmente empleados para estas aplicaciones. Con el grabado seco es posible obtener mejor definición de estructuras con la adecuada optimización de los parámetros de proceso que llevan a un control del mecanismo de grabado mediante sus componentes física y química.

Un gran número de trabajos han reportado la caracterización del grabado a partir de diferentes condiciones de proceso para su aplicación en microsistemas [12-27]. La mayoría de trabajos han basado su análisis en plasmas a base

de flúor empleando SF₆ como principal gas reactivo, debido a la alta velocidad de grabado que se puede obtener por la reacción espontánea con el silicio [5,7-10,12,13,15,17-24]. Los plasmas a base de cloro y bromo como HBr y Cl₂ tienen la gran ventaja de generar perfiles con paredes verticales por la baja reacción espontánea de estas especies con el silicio, sin embargo la velocidades de grabado se reducen drásticamente alcanzando una velocidad de grabado menor a 1 μm/min [16,25-27], en comparación con plasmas a base de flúor que llegan a obtener velocidades superiores a las 5 μm/min, dependiendo de las condiciones y reactor que se esté empleando. Por esta razón, los plasmas a base de flúor continúan siendo utilizados para satisfacer los requisitos de alta velocidad de grabado y anisotropía, esta última se logra mediante la inhibición del grabado lateral espontáneo por la incorporación de gases que permitan el depósito de una película que proteja la superficie de las paredes [5,7-9,12-15,18-20,23,24], o por el enfriamiento del sustrato [17,22,28]. El tipo de reactor que se emplea, como ya se mencionó, tiene un efecto importante sobre los resultados de velocidad de grabado. Reactores de alta densidad como el de acoplamiento inductivo (ICP – *Inductively Coupled Plasma*) es de los más comunes para la fabricación de MEMS con grabado profundo y anisótropo de silicio [8,10,15,17,20-22,25], sin embargo reactores con acoplamiento capacitivo como el de grabado iónico reactivo (RIE–

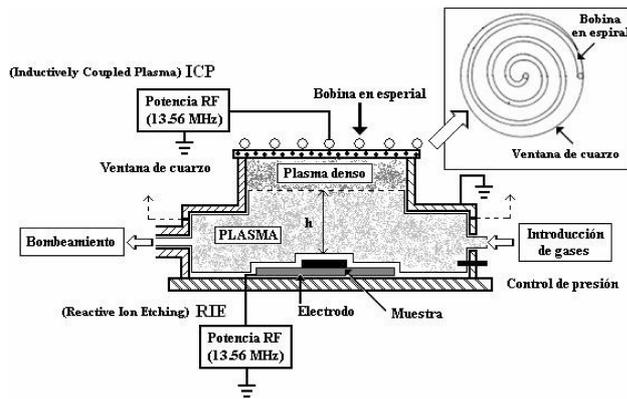


FIGURA 1. Sistema de grabado seco en configuraciones ICP y RIE.

Reactive Ion Etcher) también es ampliamente usado para estos propósitos a pesar de que la velocidad de grabado no es muy alta [5,7,9,12,18,19,23,24].

Existe una gran necesidad de desarrollar tecnología en nuestro país para la fabricación de microsistemas por la importancia que están tomando en la vida cotidiana de la sociedad. El grabado por plasma es una parte crucial en este desarrollo, es por esto que en este trabajo se presentan los resultados de grabado de silicio monocristalino con alta velocidad de grabado con perfiles isotrópico y anisotrópico en un reactor RIE/ICP, para aplicaciones en MEMS. Se hace un análisis de los mecanismos de grabado en función de parámetros de proceso como presión, potencia de radio frecuencia (RF), flujo de gases y mezclas como SF₆, SF₆/Ar, SF₆/O₂ y SF₆/CF₄. Se emplearon tres diferentes tipos de enmascarantes y se observó que éste juega un papel importante en los resultados de velocidad de grabado y anisotropía.

2. Procedimiento experimental

Se utilizaron obleas de silicio monocristalino tipo n con orientación (100). Aluminio y dióxido de silicio fueron depositados en obleas diferentes y posteriormente fue realizada fotolitografía para definir las áreas para grabado. El aluminio y el dióxido fueron grabados de manera húmeda en soluciones de H₃PO₄/CH₃-COOH/HNO₃ y HF, respectivamente. De esta manera, se emplearon tres diferentes tipos de enmascarantes, aluminio, dióxido de silicio y fotorresina. Las obleas fueron seccionadas en muestras de 1 cm² de área. Los experimentos se llevaron a cabo en un sistema por excitación RF (13.56 MHz) con acoplamiento inductivo, potencia ICP (Fig. 1). Adicionalmente, otra fuente RF con acoplamiento capacitivo es conectada al electrodo inferior, potencia RIE, en donde son colocadas las muestras. Esta última fuente se emplea para el control del bombardeo iónico hacia la superficie de la muestra y de esta manera promover la anisotropía del perfil grabado. Las muestras se colocaron a diferentes alturas de la región del plasma más denso, 6, 10 y 20 cm. Las condiciones de presión de trabajo se variaron de 25 a 75 mTorr, potencia RF de acoplamiento inductivo de 500 y 750 W, po-

tencia RF de acoplamiento capacitivo de 25 a 250 W, el voltaje de autopolarización medido entre el plasma y el electrodo inferior fue entre 0 y 342 V, flujos de gases entre 10 y 100 sccm, y los gases empleados fueron SF₆, CF₄, Ar y O₂ en mezclas de SF₆/Ar, SF₆/O₂ y SF₆/CF₄. Los tiempos de grabado variaron de 3 a 5 minutos. Las profundidades de grabado se midieron usando un perfilómetro Alpha-step y los perfiles se inspeccionaron usando un microscopio electrónico de barrido (SEM).

3. Resultados y discusión

Para obtener una alta velocidad de grabado (V_g) junto con un perfil anisotrópico es necesario, mediante el análisis del efecto de varios parámetros, optimizar la contribución de las componentes física y química en el proceso de grabado. La presión juega un papel muy importante sobre el mecanismo de grabado [29], a presiones por debajo de los 10 mTorr el camino medio libre entre colisiones es largo, lo que significa que los iones prácticamente no interactúan con otras especies en el plasma, consiguiendo incidir con alta energía en la superficie del material, por lo que el grabado es dominado por un fuerte bombardeo iónico, es decir, por un mecanismo físico. A presiones por arriba de los 100 mTorr, el camino medio libre entre colisiones es corto, esto significa que los iones interactúan constantemente entre ellos y otras especies, perdiendo continuamente energía y alcanzando la superficie con baja energía, por lo que el grabado es dominado por la reacción de especies reactivas con el material, es decir, por un mecanismo puramente químico. En el intervalo entre 10 – 100 mTorr el grabado se caracteriza por ser asistido por iones, donde tanto la reacción por especies reactivas como el bombardeo iónico contribuyen en el proceso. Del efecto de la presión sobre V_g , es posible encontrar una región donde ambas componentes realicen una aportación al proceso para obtener, por un lado, una alta V_g mediante la componente química para el grabado espontáneo por especies reactivas y, por otro, una alta anisotropía mediante la componente física del proceso por el bombardeo iónico.

En la Fig. 2 se presentan los resultados de V_g en función de la presión, en un intervalo entre 25 y 75 mTorr, para diferentes condiciones de mezcla de gases y potencia RF en modos ICP y RIE. Las muestras fueron colocadas a 20 cm de distancia del plasma denso y se utilizó aluminio como material enmascarante. En los resultados con plasma de SF₆, sólo se opera con potencia ICP en 500 W y observamos que los valores de V_g son bajos y van de 0.4 a 0.6 $\mu\text{m}/\text{min}$ para todo el intervalo de presiones. Existe poco efecto sobre V_g respecto a la variación de la presión, indicando que en este intervalo existe un predominio de la componente química, esta tendencia también se puede atribuir al hecho de que al utilizar la potencia ICP como única fuente de excitación, el bombardeo iónico es débil contribuyendo en poco al grabado. Al incorporar Ar al gas SF₆ y manteniendo el mismo valor de potencia ICP, observamos que V_g continua siendo baja aunque con un leve incremento en 25 mTorr, este aumento puede atribuirse

a una mayor contribución del bombardeo iónico al grabado, ya que Ar se caracteriza por generar una mayor densidad de iones y aunado a una baja presión de operación, el bombardeo iónico puede ser predominante en ese punto. Sin embargo, al aumentar la presión los valores de V_g disminuyen y se mantienen con poca variación, entre 0.3 y 0.6 $\mu\text{m}/\text{min}$. Con esta misma mezcla y al aplicar una potencia RIE de 25 W, podemos observar que en 40 mTorr, V_g se incrementa en casi cinco veces en comparación con el resultado cuando no se aplica potencia RIE, alcanzando 1.6 $\mu\text{m}/\text{min}$ con el valor más alto del voltaje de autopolarización (V_{sb}) de 27 V. En este punto la contribución de ambas componentes puede estar en equilibrio, mientras que en un valor menor y mayor de potencia RIE, V_g presenta valores menores con la posible participación de una sola componente en el grabado.

Al agregar O_2 al gas SF_6 y al aumentar los valores de potencia RF para ambos modos, observamos nuevamente un valor máximo de V_g en 40 mTorr, 4 $\mu\text{m}/\text{min}$ con V_{sb} de 100 V. En este caso el incremento en general de la velocidad de grabado usando este tipo de mezcla se debe a varios factores, primero al aumento de la potencia ICP de 500 a 750 W, lo que genera un plasma más denso, y como consecuencia un aumento de V_g . Por otro lado, el aumento de la potencia RIE de 25 a 100 W, genera un bombardeo iónico con mayor energía relacionado también con el aumento de V_{sb} ; y finalmente la presencia de O_2 que se caracteriza por aumentar la producción de flúor. Con este tipo de mezclas, se ha reportado un valor de V_g de 1.2 $\mu\text{m}/\text{min}$ [20].

Se encontró que en 40 mTorr se presenta un valor máximo de V_g bajo diferentes condiciones de proceso como mezcla de gases y potencias de RF. El aumento de V_g en este punto puede ser un indicativo de una posible sinergia de ambas componentes en el proceso de grabado. Con base en los resultados obtenidos en esta serie de experimentos, se con-

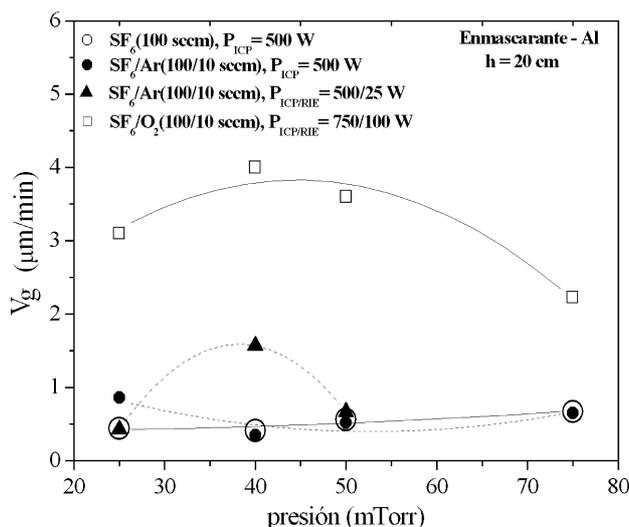


FIGURA 2. Velocidad de grabado vs. presión de trabajo, efecto en diferentes plasmas y potencias ICP y RIE, altura al plasma denso de 20 cm.

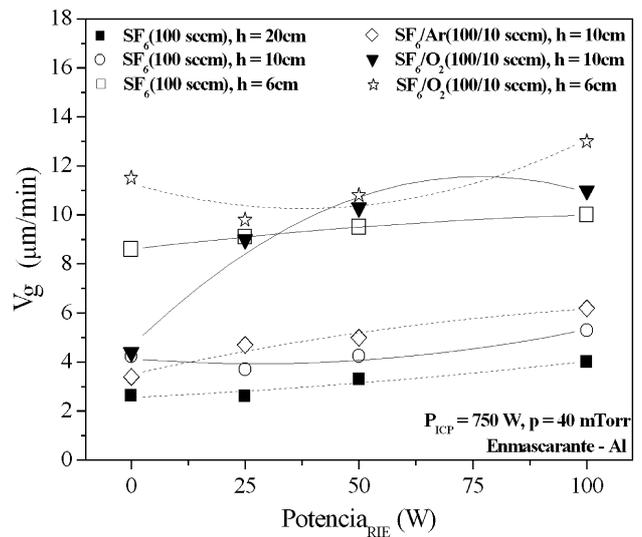


FIGURA 3. Velocidad de grabado vs. potencia RIE, efecto en diferentes plasmas y altura al plasma denso. 750 W_{ICP}, 40 mTorr.

sidera emplear en los experimentos posteriores este valor de presión.

Como se observó en los resultados de la Fig. 2, el control de la energía del bombardeo iónico debido a la polarización de la muestra por la potencia RIE es importante para el aumento de V_g . Es por esto que en la Fig. 3 se presenta el efecto de la potencia RIE sobre la velocidad de grabado para diferentes mezclas de gases y altura al plasma de mayor densidad; en todas las muestras se empleó enmascarante de aluminio y potencia ICP de 750 W. En los resultados del plasma de SF_6 cuando la muestra se coloca a 20 cm de la región de mayor densidad del plasma, se observa que conforme aumenta el valor de la potencia RIE se presenta un incremento de V_g , que va de 2.6 a 4 $\mu\text{m}/\text{min}$ para el intervalo de potencia. Este mismo comportamiento sucede cuando la muestra se coloca a 10 cm, con valores de V_g entre 4 y 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ para el intervalo de potencia. Cuando la muestra se coloca a 6 cm los valores de V_g se duplican, llegando a alcanzar hasta 10 $\mu\text{m}/\text{min}$ para el valor más alto de potencia, la generación de un mayor número de especies reactivas y la contribución del bombardeo iónico en el grabado es importante en esa condición. Cuando se incorpora Ar al gas SF_6 y colocando la muestra a 10 cm de distancia, nuevamente observamos un aumento en V_g que va de 3 a 6 $\mu\text{m}/\text{min}$, esta poca variación nos lleva a pensar que el bombardeo iónico no contribuye de manera considerable al grabado bajo esas condiciones.

En el caso de la mezcla SF_6/O_2 el incremento de la potencia (de 0 a 25 W) a una distancia de 10 cm, se refleja en un aumento considerable de V_g , de 4 a 9 $\mu\text{m}/\text{min}$, llegando a alcanzar 11 $\mu\text{m}/\text{min}$ en 100 W, bajo estas condiciones existe una mayor producción de radicales de flúor y un mayor bombardeo iónico. A una altura de 6 cm, este efecto no es notable debido a la cercanía de la muestra en la región de plasma denso, V_g se mantiene entre 10 y 13 $\mu\text{m}/\text{min}$ en el

intervalo de potencia. La contribución del bombardeo iónico por la potencia RIE y la distancia al plasma de mayor densidad son factores primordiales para la obtención de altas velocidades de grabado; requisito indispensable para la fabricación de MEMS. El efecto de la distancia a la región de plasma denso sobre la velocidad de grabado no había sido reportado en la literatura hasta ahora.

En la Fig. 4 se presentan los resultados de la velocidad de grabado para el plasma de SF₆ en función de las potencias ICP y RIE, empleando aluminio u óxido como material enmascarante. Para flujo de 50 sccm y potencia ICP de 500 W, se tiene baja V_g para muestras con ambos enmascarantes en valores altos de potencia RIE (100 y 200 W). Las muestras se colocaron a 10 cm del plasma denso y V_g se mantiene entre

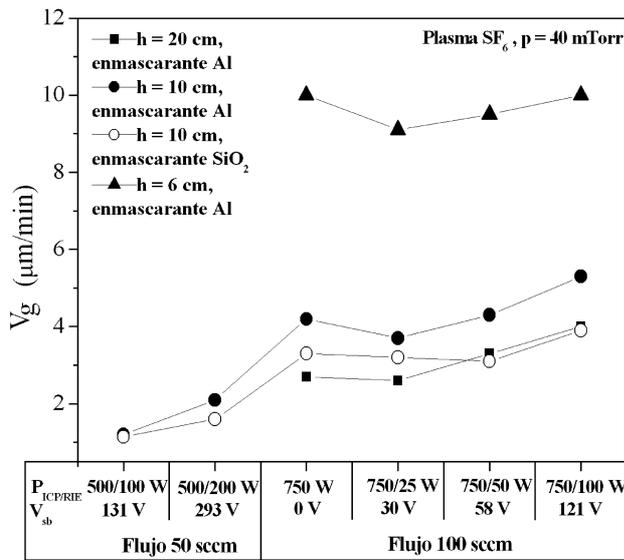


FIGURA 4. Efecto del flujo de gas, potencias ICP/RIE y altura al plasma denso sobre la velocidad de grabado en plasma de SF₆ a 40 mTorr.

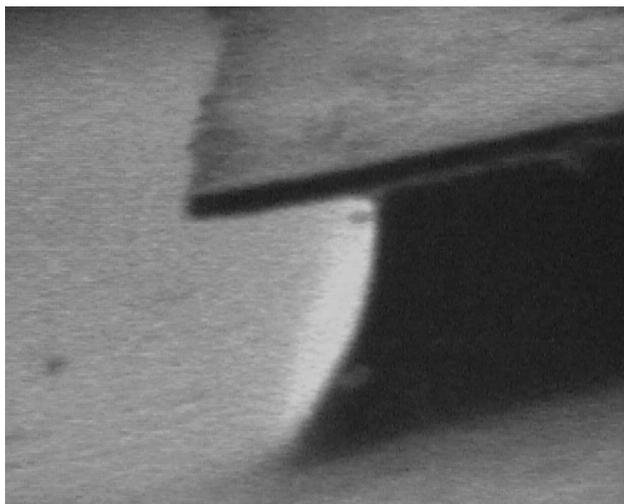


FIGURA 5. Fotografía SEM del perfil de grabado isotrópico en plasma de SF₆. 100sccm, 750 W_{ICP}, 40 mTorr, 6 cm, 10 μm/min.

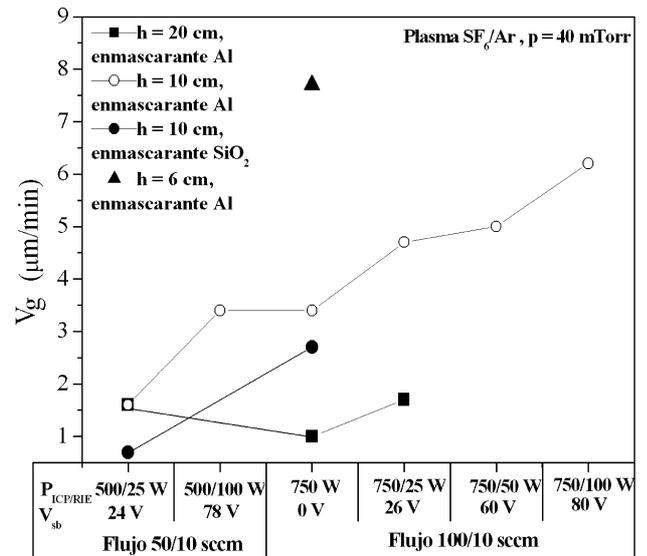


FIGURA 6. Efecto del flujo de gas, potencias ICP/RIE y altura al plasma denso sobre la velocidad de grabado en plasma de SF₆/Ar a 40 mTorr.

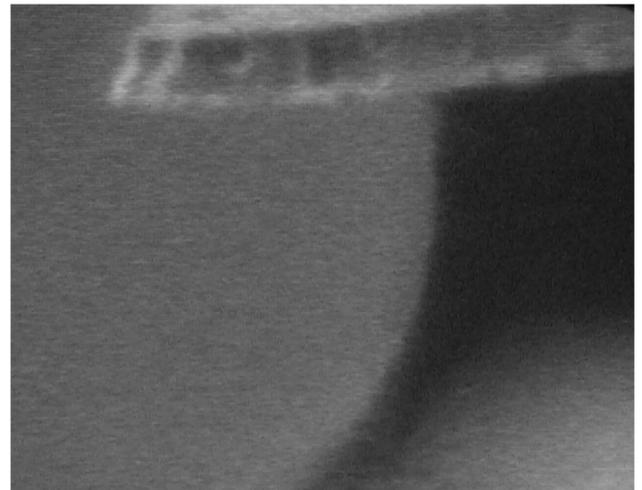


FIGURA 7. Fotografía SEM del perfil de grabado isotrópico en plasma de SF₆/Ar. 100/10 sccm, 750 W_{ICP}, 100 W_{RIE}, 10 cm, 6 μm/min.

1 y 3.5 μm/min. Cuando el flujo aumenta a 100 sccm y la potencia ICP a 750 W se observa un incremento de V_g que también es proporcional con el aumento de la potencia RIE, como ya se había observado en experimentos de la serie anterior. Nuevamente se observa que al acercar la muestra a la región de mayor densidad, los valores de velocidad de grabado son los más altos de la serie, llegando a alcanzar las 10 μm/min; este valor obtenido supera a los antes reportados con este tipo de gas en donde se obtuvieron valores de 5 μm/min [21]. En esta serie de experimentos es importante señalar el efecto importante sobre el valor de V_g del flujo de gas reactivo y una vez más la altura a la que son colocadas las muestras. En grabados a base de SF₆ predomina el mecanismo químico y como consecuencia la obtención de perfiles

completamente isotrópicos como el mostrado en la Fig. 5, donde se observa claramente el grabado lateral.

En la Fig. 6 se presentan los resultados de la velocidad de grabado para la mezcla SF₆/Ar. El incremento de V_g con el aumento del flujo y potencia ICP y RIE se observa nuevamente, para esta mezcla los valores de V_g varían entre 1.5 y 6 μm/min y son mayores en comparación con los resultados de los experimentos con SF₆. Sin embargo, a 6 cm de altura al plasma denso, el valor de V_g a pesar de ser alto, 8 μm/min, es menor en comparación con el experimento de SF₆. Se observa, al igual que en el caso con plasma con SF₆, que V_g es menor cuando se emplea SiO₂ como material enmascarante. En el caso de las muestras que emplean enmascarante de aluminio, el incremento de V_g se debe a varios factores, primero tenemos que este tipo de enmascarante tiene la propiedad de ser catalizador en plasmas a base de flúor, es decir, genera una mayor producción de esta especie lo que lleva a un aumento de la velocidad de grabado. Después tenemos el aumento de la potencia RIE, lo que en el caso particular de esta mezcla de gases se refleja en un mayor bombardeo iónico, efecto que no se presentó en plasmas de SF₆. También, tenemos el aumento del flujo de gas reactivo que, como ya mencionamos es fundamental para obtener una alta velocidad de grabado. En este tipo de mezcla esperaríamos un grabado anisótropo por bombardeo iónico, sin embargo todos los experimentos presentaron grabados isotrópicos como el que se muestra en la Fig. 7, es decir, aún existe un dominio del mecanismo químico.

Con la finalidad de obtener perfiles anisótropos mediante la protección de las paredes de la estructura, en la Fig. 8 se presentan los resultados de la velocidad de grabado para la mezcla SF₆/O₂. En general los valores de V_g son los mayores obtenidos, entre 1 y 13 μm/min bajo diferentes condiciones. Se observan las mismas tendencias que en mezclas anterior-

es, incremento de V_g en función del flujo, potencia ICP y RIE, distancia al plasma más denso, y cuando se emplea aluminio como material enmascarante. Para esta mezcla se han reportado valores de hasta 3 μm/min [18], muy por debajo de los obtenidos en este trabajo. Como ya se mencionó anteriormente, la presencia de O₂ genera una producción mayor de flúor reactivo, lo que incrementa el grabado espontáneo. Así mismo, radicales O se generan para proteger o hacer pasiva la superficie del silicio con el producto SiO_xF_y, dicha capa puede ser removida por el bombardeo iónico y de esta manera promover el grabado vertical e inhibir el grabado lateral.

En la Fig. 9 se presentan fotografías SEM de perfiles de grabado usando este tipo de mezcla de gases. La Fig. 9a muestra un perfil isotrópico, donde se observa el grabado por debajo del enmascarante con V_g de 3 μm/min. Sin embargo, valores mayores de V_g de hasta 13 μm/min también fueron obtenidos con esta mezcla donde el mecanismo de grabado espontáneo es predominante bajo estas condiciones. La Fig. 9b muestra un perfil anisótropo con V_g de 4 μm/min.

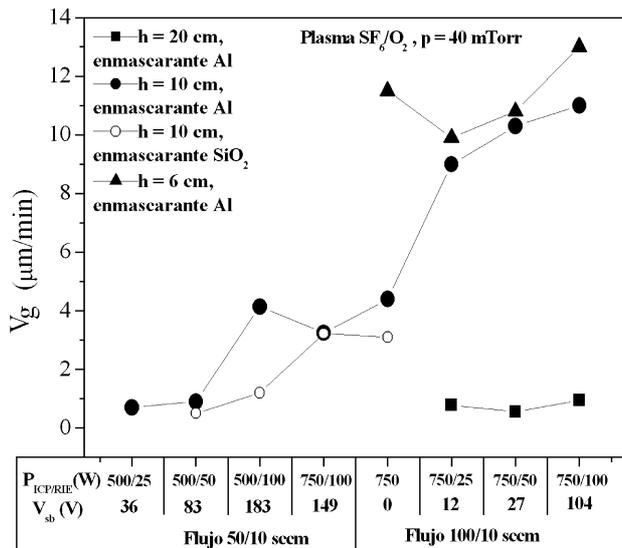
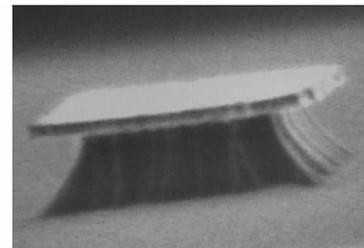
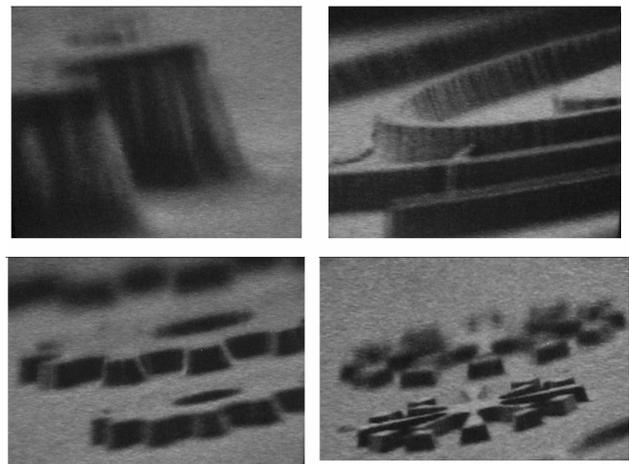


FIGURA 8. Efecto del flujo de gas, potencias ICP/RIE y altura al plasma denso sobre la velocidad de grabado en plasma de SF₆/O₂ a 40 mTorr.



(a)



(b)

FIGURA 9. Fotografías SEM del perfil de grabado en plasma de SF₆/O₂. Perfil isotrópico, 50/10 sccm, 40 mTorr 750 W_{ICP}, 100 W_{RIE}, 10 cm, 3 μm/min. Perfiles anisotrópicos, 50/10 sccm, 40 mTorr, 500 W_{ICP}, 100 W_{RIE}, 10 cm, 4 μm/min.

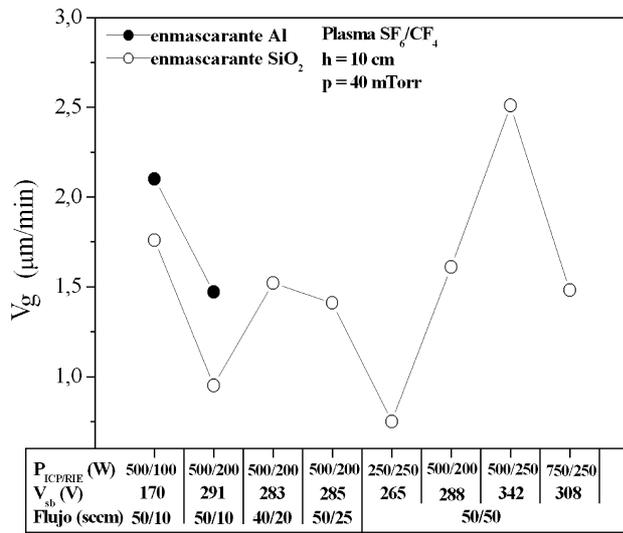


FIGURA 10. Efecto del flujo de gas y potencias ICP/RIE sobre la velocidad de grabado en plasma de SF₆/CF₄ a 40 mTorr y a 10 cm del plasma denso.

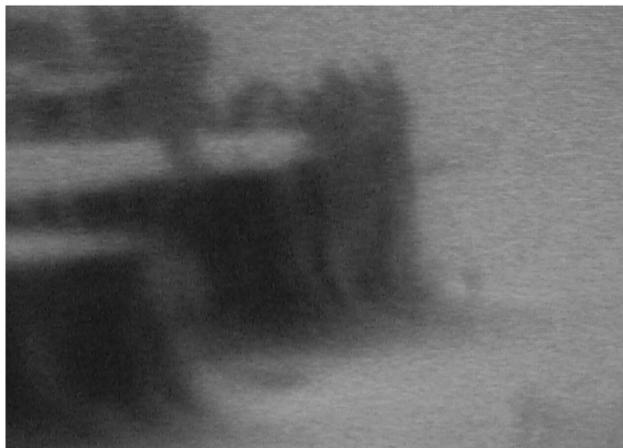


FIGURA 11. Fotografía SEM del perfil de grabado anisotrópico en plasma de SF₆/CF₄. 50/50 sccm, 500 W_{ICP}, 250 W_{RIE}, 40 mTorr, 10 cm, 2.5 μm/min.

En la Fig. 10 se presentan los resultados de la velocidad de grabado para la mezcla SF₆/CF₄. En esta serie de experimentos se obtuvieron los valores más bajos de V_g, que van de 0.75 hasta 2.5 μm/min. Las muestras fueron colocadas a 10 cm de la región de plasma denso. Es importante mencionar que a alta potencia ICP de 750 W, se observó una caída en V_g. En este valor de potencia se podría esperar una mayor velocidad de grabado, no obstante al parecer existe un proceso de polimerización superficial mayor, reflejándose en un valor reducido de V_g. Tendencias antes observadas también se presentan en esta serie de experimentos, como mayor V_g con enmascarante de aluminio en comparación con óxido y menor V_g con baja potencia ICP. La máxima velocidad de grabado se presenta cuando el voltaje de autopolarización es el más alto, 342 V. Esto indica que bajo estas condiciones existe un bombardeo de iones con alta energía que aceleran el grabado y un equilibrio de las componentes física y química;

en este punto se encontró grabado con perfiles anisótropos como se muestra en la Fig. 11. Se observa que las estructuras muestran la capa de polímero en las paredes, mientras que en la superficie horizontal fue eliminada por el bombardeo iónico. Los bajos valores de V_g en esta serie de experimentos se deben a que la presencia de CF₄ contribuye a la formación de una capa de polímero del tipo Si_xC_yF_z en toda la superficie del silicio para inhibir el grabado espontáneo [28]. Cabe destacar que el espesor de este polímero depende de otras condiciones de proceso como potencia RF y flujo de gas. Se trabajó con flujos menores de gas reactivo en comparación con experimentos anteriores con el fin de disminuir el grabado espontáneo y así asegurar un grabado anisotrópico. Para que el grabado no sea suprimido en su totalidad por la formación de la capa de polímero, es necesario un bombardeo iónico direccional que permita la eliminación de dicha capa en la superficie del silicio, permaneciendo únicamente en las paredes de la estructura. Con esto, el grabado continúa aunque con baja velocidad de grabado, ya que existe una competencia entre los procesos de formación de polímero y el bombardeo iónico para eliminarlo y así continuar el grabado por especies reactivas. Sin embargo, con este tipo de mezclas la probabilidad de obtener perfiles verticales es alta. Trabajos previos empleando mezclas semejantes han obtenido perfiles anisótropos y velocidades de grabado desde 0.6 hasta 6.5 μm/min [5,15,19]

4. Conclusiones

Presentamos los resultados de un estudio experimental de procesos de grabado seco con alta velocidad de grabado y anisotropía mediante el análisis de los efectos de parámetros de proceso como presión, potencias RF, flujo y tipo de gas, y altura de la muestra a la región de plasma denso. Las altas velocidades de grabado se deben principalmente al grabado espontáneo de silicio, es decir, el dominio de la componente química. Este tipo de grabados presentan siempre un perfil isotrópico. La anisotropía se alcanzó por el equilibrio de ambas componentes del proceso, la contribución de la componente química se debió a la formación de capas inhibitoras sobre la superficie de la pared para evitar el grabado lateral, mientras que la contribución de la componente física se debió al bombardeo iónico que elimina dicha capa de la superficie horizontal y así continuar el grabado tanto por iones como por especies reactivas. En este tipo de procesos la velocidad de grabado no fue alta. Existe siempre un compromiso entre alta velocidad de grabado y anisotropía, y en plasmas a base de flúor no es posible obtener ambas condiciones al mismo tiempo. El enmascarante de aluminio presentó un efecto catalizador en plasmas a base de flúor, aumentando con esto el grabado espontáneo con perfiles isotrópicos. El enmascarante de óxido de silicio ayudó a alcanzar la anisotropía, aunque la velocidad de grabado disminuyó considerablemente. Cada uno de los parámetros de proceso juega un papel importante y específico en el grabado, por lo que es importante entender de qué manera contribuyen en los resultados esperados para

así tener procesos óptimos para cada aplicación. Nuestros resultados fueron comparados y en muchos casos los valores de la velocidad de grabado fueron superiores a los reportados en otros trabajos. Con esto se comienza el desarrollo de nuevas tecnologías de grabado seco para la fabricación de MEMS en nuestro país.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el proyecto Conacyt 42906.

1. Walter Lang, *Mat. Sci. Eng.* **R17** (1996) 1.
2. I.W. Rangelow, *Surf. Coat. Technol.* **97** (1997) 140.
3. I.W. Rangelow, *Vacuum* **62** (2001) 279.
4. P. Werbaneth, *Solid State Technol.* **June** (2001) 135.
5. A.A. Ayón, R.L. Bayt y K.S. Breuer, *Smart Mater. Struct.* **10** (2001) 1135.
6. T. Ichiki *et al.*, *Thin Solid Films* **435** (2003) 62.
7. W.C. Wang, J.N. Ho y P.G. Reinhall, *J. Microlith., Microfab., Microsyst.* **4** (2005) 13010.
8. Hiroaki Kawata, Massaki Yasuda y Yoshihiko Hirai, *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1* **45** (2006) 5597.
9. Y.F. Chang, Q.R. Chou, J.Y. Lin y C.H. Lee, *Appl. Phys. A* **86** (2007) 193.
10. K.P. Larsen, J.T. Ravnkilde y O. Hansen, *J. Micromech. Microeng.* **15** (2005) 873.
11. L.R. Arana *et al.*, *J. Micromech. Microeng.* **17** (2007) 384.
12. C.P. D'Emic, Kevin K. Chan y Joseph Blum, *J. Vac. Sci. Technol. B* **10** (1992) 1105.
13. M. Fracou, J.S. Danel y L. Peccoud, *Sens. Actuators A* **46-47** (1995) 17.
14. Gottlieb .S. Oehrlein y Yukinori Kurogi, *Mat. Sci. Eng.* **24** (1998) 153.
15. J. Kiihamaki, H. Kattelus, J. Karttunen y S. Franssila, *Sens. Actuators* **82** (2000) 234.
16. G. Cunge *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol. B* **20** (2002) 2137.
17. R. Dussart, M. Boufnichel y G Marcos, *J. Micromech. Microeng.* **14** (2004) 190.
18. Chen-Kuei Chung, *J. Micromech. Microeng.* **14** (2004) 656.
19. C. Reyes-Betanzo, S.A. Moshkalyov y J.W. Swart, *Rev. Mex. Fís.* **50** (2004) 203.
20. Sergi Gomez *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **22** (2004) 606.
21. E. Gogolides *et al.*, *Microelec. Eng.* **73** (2004) 312.
22. M. Boufnichel *et al.*, *Microelec. Eng.* **77** (2005) 327.
23. J.R. Tao *et al.*, *Microelec. Eng.* **78** (2005) 147.
24. R.F. Figueroa, S. Spiesshoefer, S.L. Burkett y L. Schaper, *J. Vac. Sci. Technol. B* **23** (2005) 2226.
25. S. Gomez, R.J. Belen, M. Kiehlbauch y E.S. Aydil, *J. Vac. Sci. Technol. A* **23** (2005) 1592.
26. R.J. Belen, S. Gomez, M. Kiehlbauch y E.S. Aydil, *J. Vac. Sci. Technol. A* **24** (2006) 350.
27. R. Knizikevicius, *Appl. Surf. Sci.* **253** (2006) 1581.
28. M. Elwenspoek y H.V. Jansen, *Silicon micromachining*, Universidad de Cambridge, USA 2004.
29. D.M. Manos y D.L. Flamm, *Plasma Etching: An Introduction* (Academic Press, California, 1989).