

Proceso de grabado seco de silicio monocristalino para aplicaciones en guías de onda coplanares

R. Leal-Romero^a, I.E. Zaldivar-Huerta^b, J.A. Reynoso-Hernández^a, C. Reyes-Betanzo^b,
M.C. Maya-Sánchez^a, and M. Aceves-Mijares^b

^aCentro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada,
Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, 22860, Ensenada, B.C. México.

^bInstituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica,
Apartado Postal 51 y 216. 72000, Puebla, México,
e-mail: rleal@cicese.mx

Recibido el 25 de noviembre de 2009; aceptado el 11 de enero de 2010

En este trabajo se estudia la utilización de grabado anisotrópico y SRO con la finalidad de mejorar el rendimiento de las guías de onda coplanares. Se presentan resultados experimentales de grabado seco de silicio monocristalino para su aplicación en la fabricación de guías de onda coplanares (CPW's) empleando un reactor RIE/ICP. Se observa la contribución de los componentes tanto físicos como químicos de grabado seco. Los gases reactivos que se utilizan son el hexafluoruro de azufre (SF_6) mezclado con oxígeno (O_2). Para el grabado se emplean enmascarantes de fotorresina (FR) y óxido de silicio (SiO_2), este último es obtenido mediante depósito químico en fase vapor a presión atmosférica (APCVD). Se obtienen velocidades de grabado de 2.8 a 3.4 $\mu\text{m}/\text{min}$ al utilizar SiO_2 como enmascarante.

Descriptores: Silicio monocristalino; guía de onda coplanar (CPW); grabado seco; SRO.

In this work, the anisotropic etching and the use of silicon rich oxide (SRO) are studied in order to improve the waveguide coplanar (CPW). Experimental results of dry etching of mono-crystalline silicon for application in CPW's using RIE/ICP reactor are presented. The contribution of the physical as much chemical components of dry etching is observed. The reactive gases that are used are Sulfur hexafluoride (SF_6) mixed with oxygen (O_2). For etching the silicon masks of photo-resist and silicon oxide (SiO_2) are used, this last one is obtained by atmospheric pressure chemical vapor deposition (APCVD). Speed of etching from 2.8 to 3.4 $\mu\text{m}/\text{min}$ are obtained when using SiO_2 as mask.

Keywords: Mono-crystalline silicon; coplanar waveguide (CPW); dry etching; SRO.

PACS: 85.40.Sz

1. Introducción

Actualmente los circuitos integrados de microondas operan en el rango de altas frecuencias donde la señal eléctrica a ser transmitida se debe analizar como una onda electromagnética. Por lo cual nuevos conceptos deben ser considerados para transmitir la señal de la mejor manera posible [1]. En este sentido existen diversos tipos de líneas de transmisión como: coaxiales, microcinta, coplanares, etc, siendo la guía de onda coplanar una excelente opción para operar en el rango comprendido entre 0.3 y 300 GHz [2]. La CPW se caracteriza por tener sus terminales en el mismo plano, lo que representa una línea de transmisión planar con mejor desempeño que la microcinta [3]. Actualmente, y gracias al uso de técnicas de micromaquinado utilizadas para la fabricación de estructuras de sistemas micro-electro mecánicos (MEMS), se ha reportado que el uso de canales grabados en la superficie permite mejorar la eficiencia de las CPW's [4]. En particular, las mejoras obtenidas influyen directamente en las características eléctricas de las líneas de transmisión [4-6], reduciendo pérdidas por dieléctrico y por radiación. Otra opción para reducir las pérdidas es el uso de silicio de alta resistividad como sustrato [7]. Sin embargo, las mejoras del funcionamiento de CPW's usando técnicas de MEMS radican en la optimización de las características de propagación. El grabado selectivo de la CPW es el procedimiento más simple de reducir

la constante de atenuación y las características dispersivas de los parámetros de la línea [8].

Por otra parte, resultados experimentales sobre guías de onda coplanares (CPW's) fabricadas en sustrato de silicio muestran que grabar el silicio entre los electrodos disminuye las pérdidas [4,6]. También se ha reportado que la utilización de óxido de silicio rico en silicio (SRO), solo o combinado con dióxido de silicio (SiO_2), contribuye a obtener un mejor rendimiento de las CPW's [9].

De lo anteriormente expuesto, el objetivo de este trabajo es obtener las condiciones óptimas para lograr un grabado anisotrópico de silicio que disminuya las pérdidas en CPW's

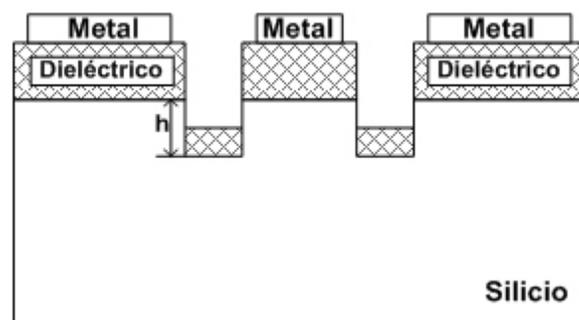


FIGURA 1. Estructura CPW con silicio grabado.

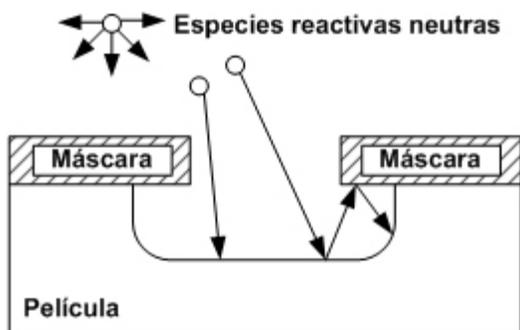


FIGURA 2. Grabado químico húmedo [12].

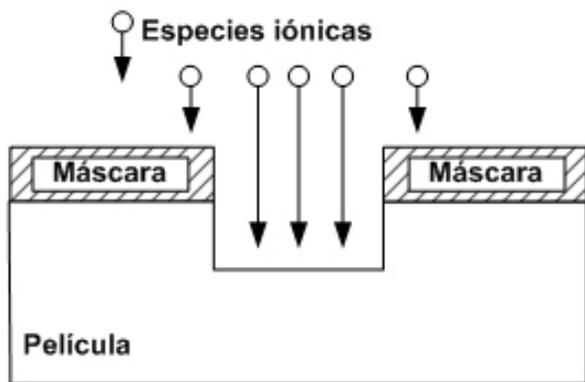


FIGURA 3. Grabado físico (poco selectivo) [12].

fabricadas en silicio de alta resistividad y usar óxido de silicio rico en silicio (SRO) obtenido mediante depósito químico en fase vapor a baja presión (LPCVD) como dieléctrico. Para esto se propone realizar un grabado de aproximadamente $12 \mu\text{m}$ de profundidad ($h=12 \mu\text{m}$) y realizar una estructura CPW como la que se ilustra en la Fig. 1, donde el dieléctrico es SRO, en este caso con una relación $R_o = 20$ (SRO_{20}) y exceso de silicio de 12 % aproximadamente.

2. Antecedentes sobre grabado de silicio

El grabado de silicio monocristalino se puede realizar tanto de manera húmeda como seca. El primero presenta limitaciones respecto al control de las dimensiones de las estructuras debido a la dependencia cristalográfica del sustrato con los grabantes, como se muestra en la Fig. 2, otra desventaja es la gran cantidad de estados superficiales que se generan como resultado de enlaces sueltos por el grabado [10,11]. Por otro lado, el grabado seco o por plasma permite control de velocidad, selectividad y minimización de daños superficiales, lo que facilita fabricar estructuras de dimensiones reducidas y la transferencia fiel de los patrones litográficos. Además, éste es un proceso limpio debido a que se trabaja en vacío, y permite obtener perfiles anisotrópicos (verticales) sin la dependencia de la orientación del sustrato, como se muestra en la Fig. 3. Lo anterior se obtiene mediante el control adecuado de los

mecanismos de grabado de sus componentes físicas y químicas.

Se han reportado diversos trabajos para grabar silicio monocristalino mediante plasmas a base de flúor generados de gases como: CF_4 , C_4F_8 , NF_3 , y SF_6 y, debido a que el flúor graba químicamente al silicio con razones muy altas, éstos son de uso general en aplicaciones de estructuras de alta razón de aspecto (*High Aspect Ratio Structures*, HARS. Razón de grabado entre el ancho y la profundidad). Sin embargo, el grabado químico rápido de silicio por flúor también da lugar a un grabado lateral significativo, que compromete la anisotropía. Para evitar el grabado lateral, las paredes deben protegerse por una capa pasivante (capa inhibidora) [13-15]. Por ejemplo, el O_2 se agrega generalmente a los plasmas SF_6 para formar una delgada capa pasivante fluorada de SiO_2 en las paredes, dando como resultado un grabado espontáneo con tendencia anisotrópica [16]. Lo anterior se debe a que se graba únicamente la parte inferior de la muestra, donde los iones bombardean la superficie continuamente, eliminando cualquier capa inhibidora y exponiendo el silicio a los átomos de flúor, mientras que las paredes continúan protegidas por la capa inhibidora que no es alcanzada por el bombardeo de iones. El mecanismo de grabado con plasma a base de flúor se muestra en la Fig. 4.

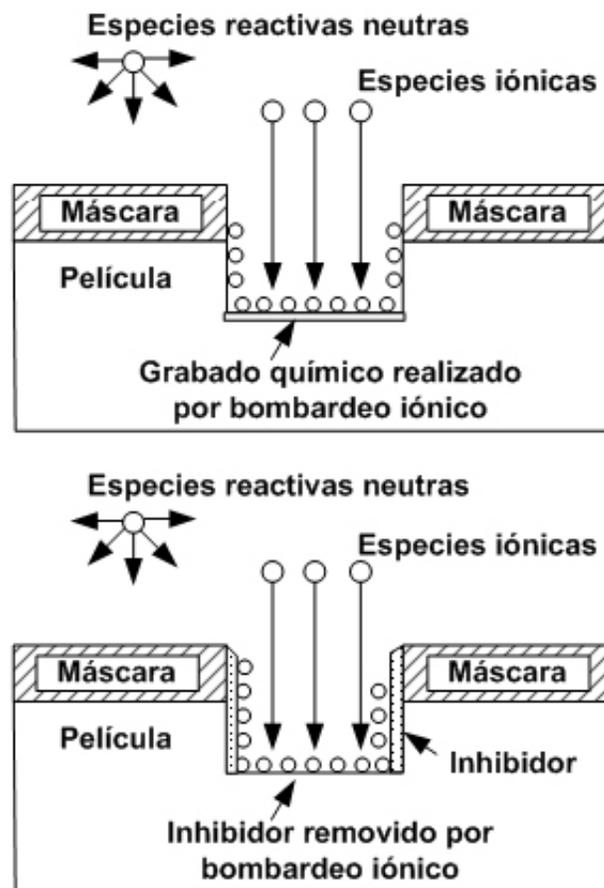


FIGURA 4. Grabado con plasma a base de flúor [10].

Dentro de las técnicas que se emplean para grabar silicio monocristalino, se encuentra el grabado iónico reactivo (*Reactive Ion Etching*, RIE) [17-19], el cual es independiente de la orientación cristalina del sustrato, lo que hace posible obtener formas arbitrarias con paredes verticales independientemente del plano cristalino. Sin embargo, una desventaja es que la velocidad de grabado no es muy alta, generalmente esto se soluciona empleando un reactor de alta densidad de acoplamiento inductivo (*Inductively Coupled Plasma*, ICP), con lo que se obtiene una mayor producción de radicales libres y de iones para incrementar la velocidad de grabado [20,21].

Cuando se emplean sistemas RIE/ICP, la tarea más complicada es determinar las condiciones óptimas de grabado como la presión de operación, la composición y flujo del gas y potencia de RF. En el trabajo reportado en la Ref. 22, se determinó que la presión óptima para el grabado de silicio monocristalino es de 40 mTorr, las potencias de 750 W para acoplamiento inductivo y 100 W para acoplamiento capacitivo, el voltaje de autopolarización (DC Bias) de 149 V, los flujos de gases de 50/10 sccm (estándar de centímetro cúbico por minuto) de SF₆/O₂. Por lo anteriormente expuesto, en este experimento se eligió la técnica RIE/ICP para realizar el grabado anisotrópico.

3. Procedimiento experimental

Se emplearon obleas de silicio monocristalino tipo n de alta resistividad (>4000 Ωcm) con orientación <100>. Se utilizó SiO₂ y fotorresina como enmascarantes para el grabado anisotrópico. La fotorresina utilizada es la MA-P 1225 (fotorresina positiva) de 2.4 μm de espesor. El SiO₂ fue obtenido mediante depósito químico en fase vapor a baja presión (APCVD) para conseguir un espesor de 1.5 μm, y se grabó mediante una solución de ácido fluorhídrico (HF) y agua desionizada (H₂O) en proporción 7:1.

La técnica RIE/ICP se realizó mediante un sistema por excitación RF (13.56 MHz) con acoplamiento inductivo (potencia ICP). El equipo adicionalmente cuenta con otra fuente de RF con acoplamiento capacitivo, la cual está 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 promoviendo la anisotropía del perfil de grabado. Las muestras se colocaron a 10 cm de la región del plasma denso, la presión de trabajo fue de 40 mTorr, y las potencias fueron de 750 W para acoplamiento inductivo y de 100 W para acoplamiento capacitivo, el voltaje de autopolarización (DC Bias) medido entre el plasma y el electrodo inferior fue entre 147 y 158 V. Los gases utilizados fueron SF₆ y O₂, y los flujos fueron de 50/10 sccm de SF₆/O₂, respectivamente. El tiempo de grabado fue de 4 minutos. La profundidad grabada de silicio se midió con ayuda de un perfilómetro Alpha-Step modelo 200. Por último, para obtener la estructura mostrada en la Fig. 1, se depositó 0.5 μm de SRO₂₀ mediante un sistema de depósito químico en fase de vapor a baja presión (LPCVD). Para los

electrodos se depositó aluminio de 1 μm de espesor mediante evaporación y se grabó mediante fotolitografía.

4. Resultados y discusión

Para el caso donde se utilizó fotorresina como enmascarante se obtuvieron profundidades aproximadamente de 2 μm, debido a la falta de selectividad del grabante en este tipo de plasma. Sin embargo, el uso de SiO₂ como enmascarante permite alcanzar profundidades de grabado de hasta 13 μm aproximadamente, como se observa en la gráfica de la Fig. 5 obtenida mediante perfilometría. En este caso la velocidad de grabado fue entre 2.8 y 3.4 μm/min.

Para observar la contribución de los mecanismos físicos y químicos que intervienen en el grabado RIE, la Fig. 6 muestra fotografías (obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido, SEM) de los experimentos bajo las condiciones de 40 mTorr de presión, a 10 cm del plasma denso y flujos de 50/10 sccm de SF₆/O₂, potencias ICP/RIE de 750/100 W, con un *dc bias* de 149 V, empleando SiO₂ como enmascarante.

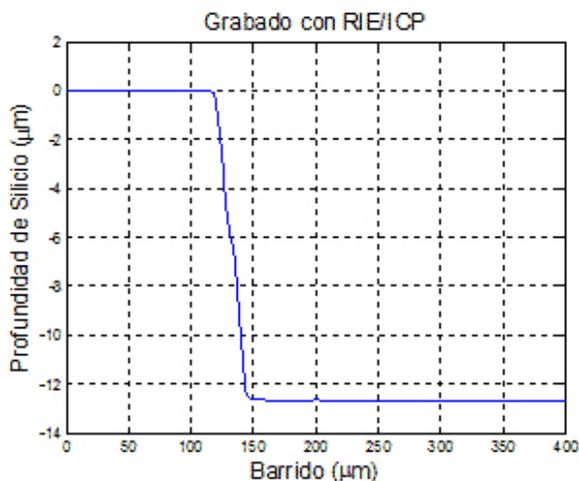


FIGURA 5. Profundidad de silicio grabado obtenida por perfilometría.

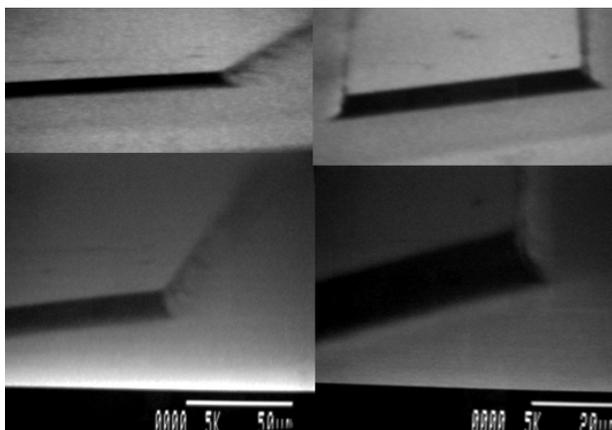


FIGURA 6. Fotografías SEM de estructura grabadas con SF₆/O₂.

Las fotografías anteriores muestran perfiles con tendencia anisotrópica. Es posible que la formación de especies reactivas de oxígeno, alcancen a formar la capa de óxido protector (inhibidor) en toda la superficie de la estructura. La eliminación de esta capa en la parte inferior de la estructura se realiza mediante el bombardeo iónico direccional producido por la polarización de la muestra, favoreciendo con esto a la obtención de un perfil con tendencia anisotrópica. De esta manera se puede observar que el grabado seco está influenciado por ambas componentes (físicas y químicas). De tal manera que es posible conseguir perfiles verticales mediante la pasivación de radicales de oxígeno y simultáneamente grabado iónico direccional, permitiendo que los radicales de flúor graben sólo verticalmente [23]. Para mostrar el efecto que el grabado de silicio monocristalino (realizado mediante RIE) tiene sobre las pérdidas de las líneas de transmisión coplanares, en la Fig. 7, se presentan resultados de la caracterización eléctrica de estas líneas. En esta gráfica se compara una CPW convencional (únicamente con dieléctrico discontinuo) y una CPW con grabado de silicio, ambas con SRO₂₀ como dieléctrico. La constante de propagación de la línea se determinó usando el método Línea-Línea (L-L) [24,25], la principal característica de este método es que no es necesario corregir los errores sistemáticos generados por el equipo de medición utilizado (anализador de redes), sólo se requieren corregir los errores de conmutación según el procedimiento reportado en la Ref. 24. El uso de un analizador sin calibrar permite eliminar los errores residuales generados por las no idealidades de los estándares de calibración. Para obtener la constante de atenuación (pérdidas) se empleó el método reportado en las Refs. 24 y 25.

Como se observa en la Fig. 7, el uso de grabado anisotrópico en una CPW para eliminar selectivamente una parte del sustrato disminuye las pérdidas de la línea, en este caso se tienen menores pérdidas a partir de 0.2 GHz de frecuencia con respecto a una CPW convencional, con lo cual se demuestra que el uso de grabado RIE/ICP ayuda a disminuir las pérdidas de una línea CPW.

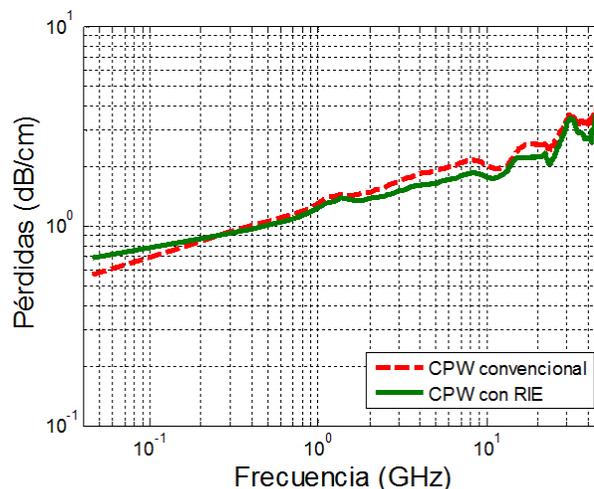


FIGURA 7. Resultados de caracterización eléctrica.

5. Conclusiones

Se obtuvieron perfiles con tendencia anisotrópica en condiciones de grabado de 40 mTorr de presión, 750/100 W de RIE/ICP, 149 V de *dc bias*, flujos de 50/10 sccm de SF₆/O₂, a 10 cm del plasma denso y empleando SiO₂ como material enmascarante, la velocidad de grabado fue entre 2.8 y 3.4 μm/min aproximadamente. Además, se demostró que las pérdidas disminuyen en la línea debido a la eliminación selectiva de una parte del sustrato mediante grabado iónico reactivo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los técnicos del laboratorio de Microelectrónica del INAOE en especial a P. Alarcón y N. Carlos por la preparación de las muestras y observación de los perfiles de grabado en el SEM. Así mismo, uno de los autores, R. Leal-Romero, agradece al CONACyT por la beca de doctorado número 48857.

1. R.E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering* (McGraw-Hill Electrical and Computer Engineering Series, Second Edition, 1992).
2. S.Y. Liao, *Microwave Devices and Circuits* (Prentice-Hall, 1980).
3. R. Osorio, *Micromachined Transmission Lines for Microwave Applications*, (Thesis of doctor degree the faculty for applied sciences of Albert Ludwig the University of Freiburg in mash gau, 2003).
4. K.J. Herrick, T.A. Schwartz, and L.P.B. Katehi, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques* **46** (1998) 762.
5. Wai Y. Liu, D.P. Steenson, and M.B. Steer, *IEEE Microwave and wireless components letters* **11** (2001) 167.
6. F. Bouchriha *et al. IEEE MTT-S Digest* (2003) 959.
7. H.S. Gamble *et al. IEEE Microwave and Guided Wave Letters* **9** (1999) 395.
8. R.N. Simons, *Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems* (John Wiley & Sons, INC., 2001)
9. R. Leal-Romero *et al. IEEE Transaction on Components and Packing Techonologies*, **31** (2008) 678.
10. S.A. Campbell, *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication* (Oxford University Press, 1996).
11. J.P. Colinge and C.A. Colinge, *Physics of Semiconductors Devices* (Springer, 2006).
12. R.A. Levy, *Microelectronic Materials and Processes* (Kluwer Academic Publishers, 1989).

13. S. Gomez, R.J. Belen, M. Kiehlbauch, and E.S. Aydila, *J. Vac. Sci. Technol. A* **22** (2004) 606.
14. R.J. Belen, S. Gomez, M. Kiehlbauch, and E.S. Aydila, *J. Vac. Sci. Technol. A* **23** (2005) 99.
15. S. Gomez, R. Jun Belen, M. Kiehlbauch, and Eray S. Aydila, *J. Vac. Sci. Technol. A* **23** (2005) 1592.
16. Fukutaro Hamaoka, Takashi Yagisawa, and Toshiaki Makabe, *Journal of Physics: Conference Series* **86** (2007) 012018.
17. T. Sreenidhi, K. Baskar, A. DasGupta, and N. DasGupta, *Semicond. Sci. Technol.* **23** (2008) 125019.
18. Chang Kun Kang *et al.*, *J. Micromech. Microeng.* **18** (2008) 075007.
19. Qiangfei Xia and Stephen Y Chou, *Nanotechnology* **19** (2008) 455301.
20. A Matsutani, H Ohtsuki, and F Koyama, *Journal of Physics* **100** (2008) 062022.
21. C.Y. Duluard *et al.* *Plasma Sources Sci. Technol.* **17** (2008) 045008.
22. C. Álvarez-Macías and C. Reyes-Betanzo, *Rev. Mex. Fís.* **53** (2007) 488.
23. M. Boufnichel, P. Lefauchaux, S. Aachboun, R. Dussart, and P. Ranson, *Microelectronic Engineering* **77** (2005) 327.
24. J.A. Reynoso-Hernández, *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett* **13** (2003) 349.
25. J.A. Reynoso-Hernández, F. Estrada, T. Parra, K. Grenier, and J. Graffeuil, *Opt. Technol. Lett.* **22** (1999) 268.