Óxido de silicio SOG como dieléctrico de compuerta recocido a 200°C

M. A. Domínguez-J., P. Rosales-Q. *, A. Torres-J., J. Molina-R.[1], M. Moreno-M., C. Zúñiga-I., and W. Calleja-A.
Departamento de Electrónica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
AP 51 & 216, C.P 72000, Puebla, Pue., México

Felipe Coyotl-M.
División de Ingenierías, Universidad Politécnica de Tulancingo
Hidalgo, México, Tel/Fax: (775) 775-8202
(Recibido: 27 de septiembre de 2010; Aceptado: 16 de enero de 2011)

Currently, the flexible electronics research field is of high interest because of the development of low cost products, such as solar cells and LCDs. Low temperature deposition processes are required in order to use flexible substrates. Nevertheless, the performance of the electronic devices built at temperatures below 350 °C is not as good as in CMOS technology. Thus, physical and electrical properties of semiconductor and insulator materials deposited at these low temperatures must be improved. In this work, characterization of SiO_2 annealed at 200°C has been done. The optical and electrical characterization showed that the refractive index (*n*) and dielectric constant (*k*) values are similar to those of thermally grown SiO_2. As can be observed, these results suggest that this SiO_2 annealing at 200°C could be an alternative to improve electrical characteristics of TFTs, among other device applications.

Keywords:

En este trabajo, se ha realizado la caracterización del oxido de silicio SOG (SOG-SiO_2) depositado por la técnica sol-gel y recocido a 200 °C. Los resultados de la caracterización óptica y eléctrica muestran que los valores del índice de refracción (*n*) y de la constante dieléctrica (*k*) son muy cercanos a aquellos valores comúnmente reportados para el SiO_2 crecido térmicamente. Nuestros resultados sugieren que el SOG-SiO_2 recocido a 200 °C puede ser una alternativa para mejorar las características eléctricas de los transistores de película delgada (TFTs), entre otros dispositivos que son fabricados a bajas temperaturas.

Palabras clave:

1. Introducción

La electrónica sobre substratos flexibles es un campo de investigación de gran interés debido al desarrollo de productos de bajo costo, tales como celdas solares y pantallas de cristal líquido (LCDs), en los cuales procesos de depósito a temperaturas menores a 250 °C son requeridas [1]. No obstante, el funcionamiento de los dispositivos electrónicos fabricados a temperaturas menores a 300 °C no es están bueno como aquel de los dispositivos fabricados en la tecnología MOS Complementaria (CMOS). Así, las propiedades físicas y eléctricas de los semiconductores y dieléctricos, depositados a estas bajas temperaturas, debe ser mejorada.

Generalmente el nitruro de silicio, crecido por el método de depósito químico en fase vapor asistido por plasma (PECVD), es el dieléctrico de compuerta usado en los TFTs [2]. Sin embargo, existen otras opciones, tal como el SOG-SiO_2. El SOG-SiO_2 es un dieléctrico en fase líquida de alcoxilenos que forman un arreglo de polímeros de silicato con una estructura Si-O, que es ampliamente usado en la tecnología CMOS como aislante entre los diferentes niveles de metal. Entre las ventajas que ofrece el SOG-SiO_2 están: uniformidad, baja densidad de defectos y una excelente planarización de la superficie. Además, al usar SOG-SiO_2 se evita el uso de gases de alto riesgo requeridos en el método de PECVD [3]. No obstante, para obtener un SOG-SiO_2 con valores de *n* y *k* iguales a los que se obtienen en SiO_2 crecidos térmicamente, la hoja de especificaciones recomienda dar un recocido térmico en el rango de 400 a 900 °C[4]. Recientemente, en [5] J. H. Cheon et al. han reportado la fabricación de TFTs usando SOG-SiO_2 (recocido a 425°C) como dieléctrico de compuerta. El material usado para la fabricación de los TFTs fue polisilicio mientras que la estructura elegida fue la apilada invertida. Los TFTs canal P tienen un voltaje de encendido (*Vth*) de -4.2 V y una pendiente subumbral (*S*) de 0.9 V/ Década. Como podemos observar la temperatura a las cual el SOG ha sido usado como dieléctrico de compuerta excede a las temperaturas típicas a las cuales se fabrican los TFTs en base a silicio amorfo hidrogenado y sus diferentes aleaciones [6]. Por lo tanto, en este trabajo se investiga las propiedades del SOG-SiO_2 recocido a temperaturas a 200 °C y su posible uso como dieléctrico de compuerta en TFTs de a-SiGe:H.

2. Experimental

En este trabajo estudiamos las propiedades dieléctricas de las películas de SOG-SiO_2 con y sin diluyentes. Los muestras fueron diluidas con una relación 3:1 en metanol y

*prosales@inaoep.mx

1

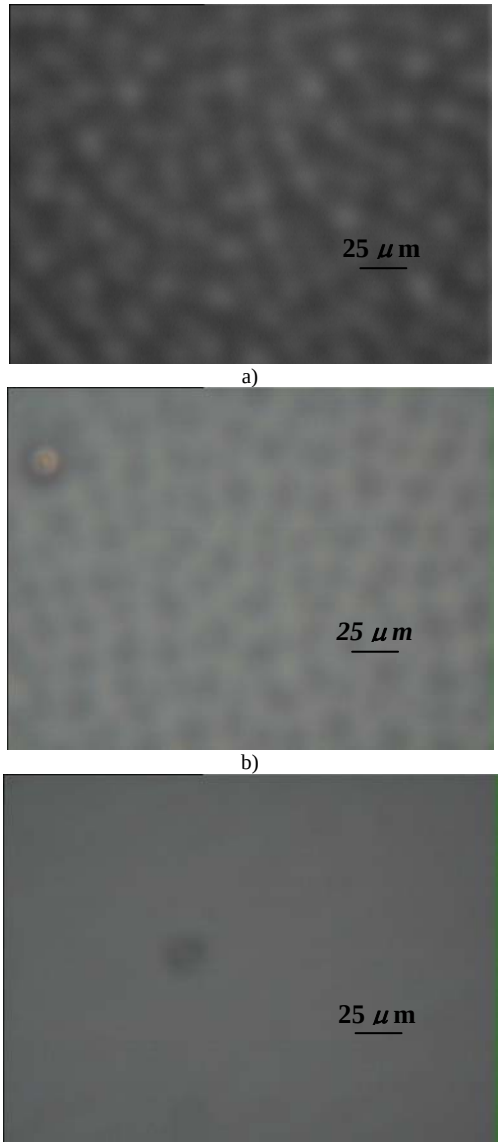

Figura 1. Vista superficial de las muestras de SOG sin diluir (a), diluido con metanol (b) y con 2-propanol.

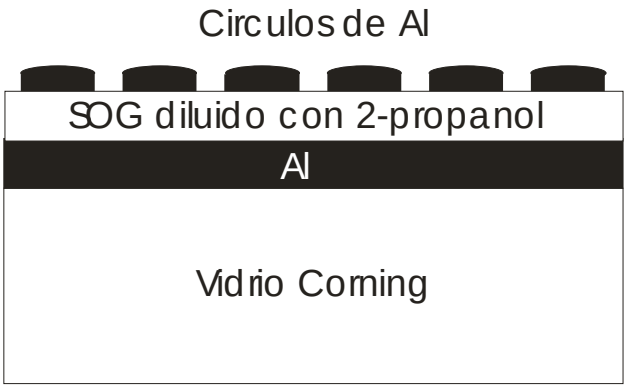

Figura 2. Estructuras MIM usadas para medir la constante dieléctrica de las muestras de SOG diluidas con 2-propanol.

2-propanol, por separado. A través del siguiente procedimiento:

1. Depósito de SOG-SiO_2 sobre el substrato a diferentes velocidades de giro (3000, 4000 y 5000 revoluciones por minuto) por 30 segundos.
2. Curado del SOG-SiO_2 a 100 °C por 15 min (con el fin de eliminar la humedad y evaporar solventes).
3. Recocido térmico por 6.5 hrs a 200 °C en nitrógeno.

Con el fin de utilizar al SOG-SiO_2 como dieléctrico de compuerta en un TFT es necesario que tenga características típicas de SiO_2 crecido térmicamente, es decir, que el valor de *n* y *k* sean de 1.46 y 3.9. Además, de tener una buena adherencia superficial y que la superficie sea lo menos rugosa posible, con el fin de formar una interfase de calidad con la película utilizada como substrato del TFT [7]. Para medir *n* y *t* se depósito SOG-SiO_2 sobre substratos de silicio y se uso el elipsómetro Gaertner L117. Mientras que con el fin de evaluar cualitativamente la rugosidad de las películas se uso un microscopio óptico. Finalmente para obtener el valor de *k* se utilizaron estructuras metal/dieléctrico/metal (MIM) y el medidor RCL automático PM 6303 de Philips.

En los TFTs fabricados usamos al a-SiGe:H (con un grosor de 100 nm) como película activa, el a-SiGe:H fue crecido por depósito químico en fase vapor asistido por plasma a baja frecuencia (LF-PECVD)a 300 °C, las regiones n^+ de fuente y drenaje fueron hechas de 40 nm de a-Ge:H dopado con fósforo a 300 °C por LF-PECVD. Mientras que aluminio, con un grosor de 300 nm, fue evaporado para formar los electrodos de de drenaje y fuente. Nitruro de silicio, depositado por LF-PECVD, fue usado como capa pasivadora y como dieléctrico de compuerta se utilizó 160 nm de SOG-SiO_2 diluido con 2-propanol. Más detalles de la estructura serán publicados posteriormente.

3. Resultados y discusión

En las Tablas 1 y 2 se muestran valores de *n* y *t* en función de la velocidad de giro en las muestras de SOG-SiO_2 con y sin diluyente. Como se puede observar los valores de *t* y *n* dependen fuertemente de la velocidad de giro en las muestras sin diluir. En estas muestras los valores de *t* varían de 300 a 215 nm, mientras que los valores de *n* van de 1.25 a 1.6. Por otro lado, en las muestras diluidas en metanol y 2-propanol se nota que existe una débil dependencia de la velocidad de giro. Esto se debe a que los dos solventes usados (metanol y el 2-propanol) se evaporan a temperatura ambiente, entonces a 200 °C muy seguramente ambos solventes se han evaporado casi por completo. Obteniéndose películas dieléctricas con muy pocos residuos. No obstante, esta temperatura de recocido no es lo suficientemente alta para evaporar la mayoría de los solventes orgánicos presentes en el SOG-SiO_2. Así podemos inferir que, en las muestras sin dilución, la concentración de residuos se incrementa con el grosor.

En la figura 1se observan las micrografías de la superficie del SOG-SiO_2 sin diluir (a) y en (b) y (c) las

Tabla 1. Grosores del SOG-SiO_2 en función de la velocidad angular (revoluciones por minuto).

RPM	SOG Sin dilución	SOG 3:1 METANOL	SOG 3:1 2-PROPANOL
3000	298	155	152
4000	279	147	144
5000	213	140	137

superficies de las muestras con diluidas con metanol y 2-propanol. Comparando estas muestras se observa que las muestras de SOG-SiO_2 diluidas con 2-propanol a 3000 rpm muestran menor rugosidad que las demás.

Esta menor rugosidad podría ser el resultado de la dismunución en viscosidad por la dilución.

De los resultados anteriores podemos inferir que la dilución del SOG-SiO_2 es necesaria para obtener dieléctricos de calidad comparable a aquella obtenida en el SiO_2 crecido térmicamente. También observamos que los resultados del grosor e índice de refracción para las muestras diluidas, presentan resultados muy similares. Sin embargo, las muestras de SOG-SiO_2 diluido con 2-propanol a 3000 rpm presentan mejor uniformidad y menor rugosidad como se puede apreciar en la Fig. 1(c). Por lo tanto, éstas podrían ser un buen dieléctrico de compuerta.

Con el fin de obtener la constante dieléctrica (*k*), de las muestras diluidas con 2-propanol, se fabricaron estructuras MIM con un área activa de 6.075×10^{-5} cm^2 (Fig. 2). Estas estructuras fueron medidas con el medidor RCL automático PM 6303 de Philips y se obtuvo una capacitancia promedio de 5.5 pF. Usando la ecuación 1 [7], se calculó un valor de *k* de 4.1, valor muy cercano al valor de *k* comúnmente reportado en SiO_2 crecido térmicamente.

$$C = \frac{k\varepsilon_0 A}{t} \qquad (1)$$

Donde *C* es la capacitancia, ε_0 es la permitividad en el vacío, *A* el área activa y *t* el grosor del dieléctrico.

Para demostrar el uso del SOG-SiO_2 como dieléctrico de compuerta fabricamos TFTs de a-SiGe:H, utilizando la estructura apilada invertida (Fig 3), que es la estructura más usada en las LCDs comerciales[6]. La caracterización eléctrica de los TFTs se realizó usando un analizador de parámetros semiconductores HP 4156B. Todas las mediciones se realizaron en obscuridad con el fin de reducir los efectos de la fotosensitividad. La figura 4 muestra la curvas típicas *Ids* vs *Vgs* (a) e *Ids* vs *Vds* (b) de los TFTs fabricados con ancho de canal (W) de 130μm y un largo de canal de 55μm.

Ya que los TFTs son comúnmente usados como elementos de conmutación, una de las principales características eléctricas de los TFTs es el valor del cociente de la corriente de encendido a la corriente de apagado (I_{ON}/I_{OFF}). Un valor mayor o igual a 1×10^5 de la relación de I_{ON}/I_{OFF} en los TFTs es deseable, con el propósito de obtener estados bien definidos de conducción y no conducción [6]. Una de las figuras de mérito es la

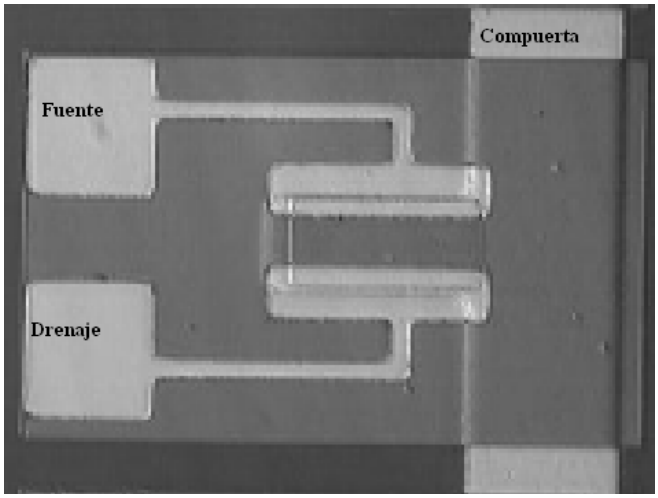

Figura 3. Vista superior de los TFTs fabricados en el laboratorio de microelectrónica del INAOE.

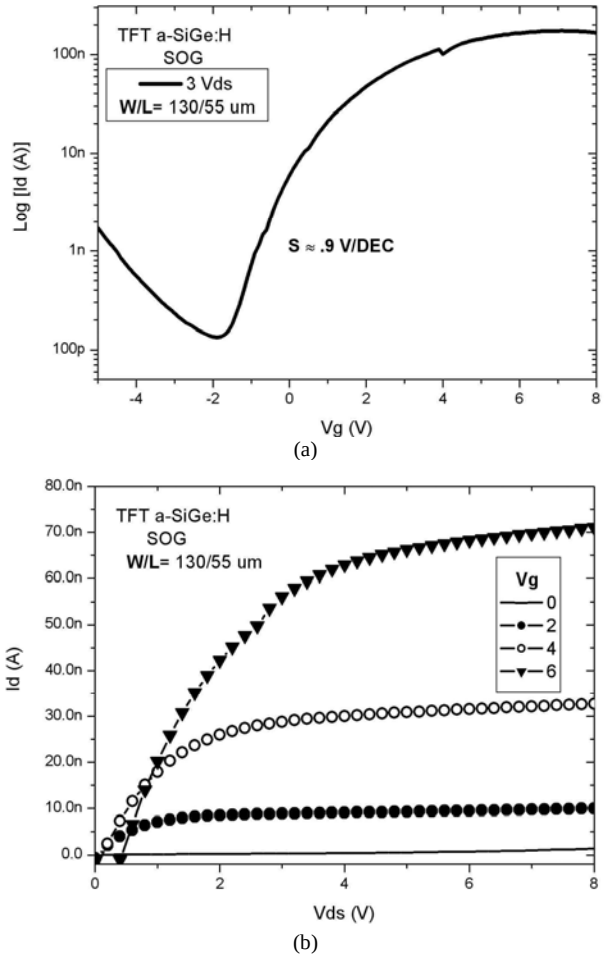

Figura 4. Curvas Características de los TFTs fabricados. a) Ids vs Vgs y b) Ids vs Vds.

pendiente de subumbral *S* [6], que nos indica que tan rápida es la transición entre los estados de apagado y encendido.

El valor de *S* nos muestra el cambio en el voltaje por cada década de corriente (ecua. 2), por lo tanto, se requiere que este cambio en el voltaje sea lo más pequeño posible, es
decir, una *S* lo más cercana a cero para que el TFT se aproxime a un interruptor ideal [6].

$$S = \left[\frac{\partial \log I_{DS}}{\partial V_{GS}} \right]^{-1} \qquad (2)$$

Otros parámetros importantes son el voltaje de umbral *Vth* y el voltaje de encendido V_{on}. El *Vth* se define como el voltaje de compuerta al cual los electrones de conducción empiezan a aparecer en el canal, mientras que el V_{on} se define como el voltaje al cual la corriente de encendido se mantiene aproximadamente constante [8,9]. En una gráfica característica de *Ids* vs. *Vgs*(tal como la que se muestra en la Fig. 4a), se puede identificar el V_{th} debajo de la "rodilla", y por encima de ésta, se identifica el voltaje de encendido V_{on} [8,9].

En general los valores típicos de I_{ON}/I_{OFF}, *S*, *Vth* y V_{on} son función de los materiales usados, de la calidad de las interfases y de la carga térmica del proceso de fabricación de los TFTs. Así en TFTs fabricados con substrato policristalino [10] tenemos que los valores de *Vth*, V_{on} y *S* son 18 V, 23 V y 1.1 V/ Década, respectivamente. Mientras que cuando se utilizan materiales microcristalinos como substrato [11-13] tenemos que los valores de *Vth*, V_{on} y *S* varían de 0.8 a 9 V, 9 a 15 V, y 0.8 a 2 V/ Década, respectivamente. Y cuando utilizamos materiales amorfos como substrato [14,15] tenemos que *Vth* varía de 1 a 2.5 V, V_{on} de 4 a 7 V y *S* de 0.85 a 1 V/ Década.

De la figura 4 (b) podemos calcular que *S* tiene un valor de 0.9 V/ Década, mientras que los valores de *Vth y Von* son 2 y 6 V, respectivamente. Observamos que los valores de *S* y de *Vth* se encuentran dentro de los más bajos reportados en [10-15]. Estos valores nos hacen suponer que tenemos una excelente interfase SOG/substrato. Por otro lado, el bajo valor de la relación $I_{ON}/I_{OFF} \approx 1\times10^3$ puede ser atribuido a la alta resistencia de contacto, como se observa en la Fig. 4(b), porque la alta resistencia de contacto está limitando la corriente de encendido y, por lo tanto, reduciendo el valor de la relación I_{ON}/I_{OFF}. Esto último nos indica, que la unión metal/semiconductor debe ser optimizada con el fin de incrementar la relación I_{ON}/I_{OFF}.

4. Conclusiones

Se han obtenido películas SOG-SiO_2, depositadas por sol-gel y recocidas a 200 °C, con propiedades similares al SiO_2 crecido térmicamente. Además estas mismas películas se han utilizado como dieléctrico de compuerta de TFTs de a-SiGe:H.

Tabla 2. Índice de refracción del SOG-SiO_2 en función de la velocidad angular (revoluciones por minuto).

RPM	SOG Sin dilución	SOG 3:1 METANOL	SOG 3:1 2-Propanol
3000	1.25	1.45	1.46
4000	1.37	1.47	1.46
5000	1.60	1.46	1.47

Los resultados obtenidos y el análisis sugieren que se tiene una buena interfase oxido/semiconductor. A pesar de que el proceso de fabricación, las interfases y las propiedades de los demás materiales, que forman los TFTs, no se han optimizado.

Agradecimientos

Los autores agradecen los técnicos del Laboratorio de Microelectrónica del INAOE: A. Itzmoyotl-Toxqui e I. Juárez-Ramírez por su ayuda a la fabricación y caracterización de los materiales y dispositivos fabricados.

Referencias

[1]. P. C. Joshi, A. T. Voutsas, and J. W. Hartzell, Electrochem. Soc. Abs. 776, 215th meeting, (2009).
[2]. Oh, J.H.; Kang, D.H.; Park, W.H.; Jang, J.; Chang, Y.J.; Choi, J.B.; Kim, C.W. IEEE-EDL. **30**, 36 (2009).
[3]. W. Luft and Y. S. Tsuo, Hydrogenated amorphous silicon alloy Deposition processes 1ed. (Marcel Dekker, Inc., 1993).
[4]. https://www51.honeywell.com/sm/em/products-applications/dielectrics/spin-on-glass.html?c=21
[5]. J. H. Cheon, J. H. Bae, W. G. Lee and J. Jang, IEEE-EDL. **29**, 235 (2008).
[6]. C. R. Kagan, P. Andry, Thin-Film-Transistors, 1ed. (Marcel Dekker, Inc., 2003).
[7]. Sze S. M. VLSI Technology, 2 ed. (Wiley, 1984).
[8]. Dosev D "Fabrication, Characterization and Modeling of Nanocrystalline Silicon Thin Film Transistor Obtained by Hot-Wire Chemical Vapour Deposition" PhD Thesis. Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya 2003.
[9]. M. S. Shur, H. C. Slade, A. A.Owusu, and T. Ytterdal, J. Electrochem. Soc., **144**, 283 (1997).
[10]. Y.D. Son, K. D. Yang, B. S. Bae, J. Jang, M. Hong and S.J. Kim, IEEE-TED,**53**, 1260 (2006).
[11]. C. Chang and Y. S. Wu, IEEE-EDL, **30**,1176 (2009).
[12]. J. H. Cheon, J. H. Bae, W. G. Lee and J. Jang, Electrochem. S-S L., 11, H77 (2008).
[13]. K. Belarbi, K. Kandoussi, I. Souleiman, C. Simon, N. Coulon and T. Mohammed-Brahim. Phys. Status Solidi C, 7, 1152 (2010).
[14]. Sung Hwan Kim et al. Phys. Status Solidi C, 7, 1136 (2010).
[15]. Hideki Matsumura, Keisuke Ohdaira and Shogo Nishizaki. Phys. Status Solidi C, 7, 1132 (2010).

4

5