

Comparaciones ópticas y estructurales de las películas de Óxido de Silicio rico en Silicio (SRO) depositadas por las técnicas LPCVD y HFCVD

Optical and structural comparisons of the Silicon rich Oxide (SRO) films deposited by LPCVD and HFCVD techniques

MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Haydee Patricia†, LUNA-LÓPEZ, José Alberto*, LUNA-FLORES, Adán y HERNÁNDEZ-DE LA LUZ, José Álvaro David

Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores (CIDS-ICUAP) y Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Av. San Claudio y 14 sur, Edif. 103C C.U., Col. San Manuel, Puebla 72570, México

ID 1^{er} Autor: Haydee Patricia, Martínez Hernández / ORC ID: 0000-0001-8863-4689, CVU: 353253

ID 1^{er} Coautor: José Alberto, Luna-López / ORC ID: 0000-0002-7647-3184, CVU CONACYT ID: 200808

ID 2^{do} Coautor: Adán, Luna-Flores / ORC ID: 0000-0003-2407-7072, CVU CONACYT ID: 95509

ID 3^{er} Coautor: José Álvaro David, Hernández-De la Luz / ORC ID: 0000-0002-7913-0240, CVU CONACYT ID: 240901

DOI:10.35429/JOES.2019.21.6.19.25

Recibido 20 Agosto Julio, 2019; Aceptado 30 de Diciembre, 2019

Resumen

Este trabajo describe el estudio comparativo de las propiedades ópticas y estructurales de las películas de Óxido de Silicio Rico en Silicio depositadas por dos técnicas de depósito químico en fase vapor: a Baja Presión (LPCVD) y activado por Filamento Caliente (HFCVD). Las películas de SRO-LPCVD fueron depositadas a la razón de presiones de silano y óxido nitroso ($R_0 = P_{N_2O}/P_{SiH_4}$) de $R_0=10$ y $R_0=25$. Las películas de SRO-HFCVD fueron depositadas a una presión de hidrógeno de 25 y 100 sccm, a una distancia entre fuente y sustrato de 8 mm. Para mejorar las propiedades ópticas hemos sometido las películas obtenidas por ambas técnicas a un tratamiento térmico a altas temperaturas. Las caracterizaciones ópticas y estructurales que hemos utilizado para comparar las propiedades de ambas películas fueron: Espectroscopia nula, Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier y Fotoluminiscencia, Microscopia Electrónica de Barrido que corrobora los espesores de las películas de SRO obtenidos por espectroscopia nula, y Microscopia Electrónica de Transmisión de Alta Resolución que corrobora el tamaño del diámetro de los nanocristales de silicio (ncs-Si), los cuales también fueron calculados con la energía de la banda prohibida (E_g) obtenida de los espectros de FL. Estas caracterizaciones muestran que las dos técnicas son excelentes alternativas para la obtención de películas de SRO con emisión fotoluminiscente, las cuales pueden ser usadas para dispositivos fotodetectores y electroluminiscentes.

SRO, LPCVD, HFCVD, FTIR, SEM, HRTEM, Fotoluminiscencia

Abstract

In this work, we conducted a comparative study of the optical and structural properties of Silicon Rich Oxide (SRO) films deposited by two chemical vapor deposition techniques: at Low Pressure (LPCVD) and activated by Hot Filament (HFCVD). SRO-LPCVD films were deposited at a silane and nitrous oxide pressures ($R_0 = P_{N_2O}/P_{SiH_4}$) rate of $R_0=10$ and $R_0=25$. SRO-HFCVD films were deposited at a hydrogen pressure of 25 and 100 sccm, at a distance between source and substrate of 8 mm. To improve the optical properties, we have subjected the films obtained by both techniques to thermal treatments at high temperatures. The optical and structural characterizations that we used for comparison of the films were: Null Spectroscopy, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Photoluminescence (FL), Scanning Electron Microscopy (SEM) and High-Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM). The SEM microscopy corroborates the thicknesses of the SRO films obtained by Null Spectroscopy, likewise, the HRTEM microscopy corroborates the diameter size of the silicon nanocrystals (ncs-Si), which also were calculated theoretically with the band gap energy (E_g) obtained in the FL spectra. These characterizations show that either of the two techniques are excellent alternatives for obtaining SRO films with photoluminescent emission, which can be used for photodetector and electroluminescent devices.

SRO, LPCVD, HFCVD, FTIR, SEM, HRTEM, Photoluminescence

Citación: MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Haydee Patricia, LUNA-LÓPEZ, José Alberto, LUNA-FLORES, Adán y HERNÁNDEZ-DE LA LUZ, José Álvaro David. Comparaciones ópticas y estructurales de las películas de Óxido de Silicio rico en Silicio (SRO) depositadas por las técnicas LPCVD y HFCVD. Revista de Sistemas Experimentales. 2019. 6-21: 19-24

* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: jose.luna@correo.buap.mx)

† Investigador contribuyendo como primer Autor

Introducción

El silicio es el material por excelencia en la electrónica, debido a que es un elemento electropositivo, tetravalente en sus compuestos, siendo además el segundo elemento químico más abundante de la corteza terrestre después del oxígeno, por lo que es curioso que el dióxido de silicio se emplea como materia prima para producir silicio en volumen. El silicio en volumen, es un pobre emisor de luz, debido a que su banda de energía es indirecta.

El hecho de que Leigh Canham en 1990 [1] haya descubierto emisión visible en silicio poroso aún con algunos inconvenientes como degradación y escasa estabilidad [2], motivó a muchos investigadores para obtener materiales basados en silicio como el óxido de silicio fuera de estequiometría, también conocido como óxido de silicio rico en silicio (SRO), el cual es compatible con la tecnología CMOS existente [3-5]. Este material en sus caracterizaciones ópticas y estructurales ha mostrado excelente respuesta fotoluminiscente a temperatura ambiente.

Existen varios métodos para la obtención de películas de SRO entre las que se encuentran: la implantación de silicio en óxido de silicio (SITO), Depósito mediante Láser Pulsado (PLD) y mediante técnicas basadas en Depósito Químico en Fase vapor (CVD), por sputtering, por sol-gel. No obstante, este trabajo reporta un estudio comparativo de las características estructurales y ópticas de las películas de SRO obtenidas por dos técnicas de deposición química en fase vapor (CVD): a baja presión LPCVD y activado por filamento caliente (HFCVD).

Las películas de SRO obtenidas por LPCVD y tratadas térmicamente a 1100 °C durante 3 horas en ambiente de nitrógeno, modifican su exceso de silicio, variando las presiones parciales de los gases precursores: Silano y el Óxido nitroso. Mientras que la técnica HFCVD es un método que utiliza el hidrógeno molecular que se disocia en hidrógeno atómico con la temperatura de filamentos calientes y decapa fuentes sólidas de cuarzo para obtener precursores volátiles que se depositan en forma de películas delgadas o polvos de SRO, mismas que también son tratadas térmicamente a 1100°C durante 1 hora en ambiente de nitrógeno.

Las propiedades ópticas y estructurales debido al contenido de exceso de silicio y defectos en el SRO hacen a estas películas obtenidas por las dos técnicas anteriores, muy atractivas para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos [9], dando lugar a varios tipos de aplicaciones como guías de onda, memorias no volátiles, supresores de picos, dispositivos de detección y radiación de luz, etc. [6].

Objetivo

Comparar las películas de Óxido de Silicio fuera de estequiometría (SRO), depositadas por las técnicas LPCVD y HFCVD, mediante caracterizaciones ópticas (espectroscopía nula, FTIR y Fotoluminiscencia) y estructurales (SEM y TEM).

Desarrollo y metodología

Las películas de SRO se depositaron en un sistema LPCVD [2], mostrado en la *Figura 1* sobre obleas de silicio cristalino tipo p, de 4 pulgadas de diámetro, con orientación 100 y resistividad de 1-5 Ω -cm. Las obleas fueron cortadas en cuatro partes y marcadas para someterlas a un proceso de limpieza CMOS [3-5]. Para el sistema LPCVD, dos tipos de razones de flujos fueron utilizados: $R_0=10$ y $R_0=25$ con la variación de las presiones de los flujos de gases silano (SiH_4) diluido en N_2 y óxido nitroso (N_2O) de acuerdo a la ecuación $R_0 = P_{\text{N}_2\text{O}} / P_{\text{SiH}_4}$, el flujo de los gases se controla con un sistema de control de rotámetros (Ver *Figura 1*). Para ambas películas se utilizó la misma presión y flujo del SiH_4 0.92 y torr 5.1 slpm, respectivamente, mientras que la presión y flujo del N_2O y el tiempo fueron diferentes para cada depósito, es decir, para las películas $R_0=10$ se utiliza la $P_{\text{N}_2\text{O}} = 0.31$ torr ($F_{\text{N}_2\text{O}} = 4$ slpm) por 17 minutos, y para la película $R_0=25$ se utilizó la $P_{\text{N}_2\text{O}} = 0.76$ torr ($F_{\text{N}_2\text{O}} = 3.4$ splm) por 30.5 minutos.

Este sistema LPCVD mantiene una temperatura uniforme en toda el área de la cámara de depósito, debido a que tiene tres zonas de calentamiento, con un área plana de 2 grados centígrados (°C), en donde se colocan horizontalmente las obleas de silicio cortadas y marcadas en un soporte plano de cuarzo.

Posterior al depósito, las películas fueron sometidas a un tratamiento térmico a 1100°C por 180 minutos en ambiente de N_2 con la finalidad de adquirir mejores propiedades foto y electroluminiscentes.

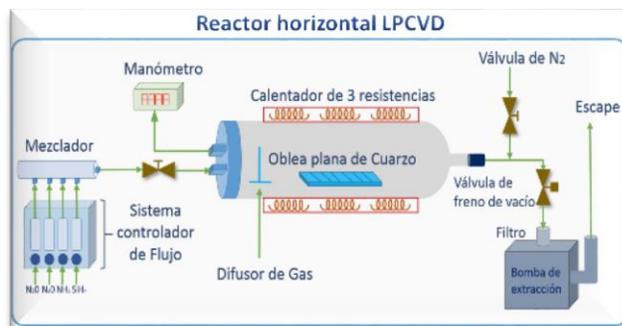


Figura 1 Reactor Horizontal LPCVD

La Figura 2 muestra el reactor HFCVD [3], utilizado para el depósito de las películas de SRO, sobre obleas de silicio de 2 pulgadas de diámetro, tipo P, orientación 100, resistividad baja $1\text{-}5\ \Omega\text{-cm}$ y espesor de 300 micras. Las obleas de silicio son cortadas en 2 partes, se marcan y se pasan por un proceso estándar de limpieza tipo MOS [3-5].

Estos depósitos se llevaron a cabo con dos flujos de hidrógeno molecular (H_2): 25 y 100 sccm, para las películas (SRO_{25} y SRO_{100}). Cada flujo fue introducido al reactor vertical HFCVD donde se disocia el hidrógeno molecular a la temperatura de 2000°C obtenido con los 11 filamentos colocados dentro del reactor, a los cuales se les suministra un voltaje de 74 V con una corriente de 38 A.

Los 2000°C provocan una disociación del hidrógeno convirtiéndolo en hidrógeno atómico el cual es altamente reactivo, por lo que decapa las 11 fuentes sólidas de cuarzo colocadas abajo de los 11 filamentos incandescentes a una distancia (d_{fr}) de 6 mm, obteniéndose así los precursores volátiles que se depositan y adsorben en la superficie del sustrato caliente el cual se ubica abajo de las 11 fuentes de cuarzo a una distancia (d_{fs}) de 8mm [3,6], el tiempo de cada depósito (t_d) fue de 3 minutos. Posteriormente estas películas pasan por un recocido térmico en ambiente de Nitrógeno a una temperatura de 1100°C por 60 minutos.

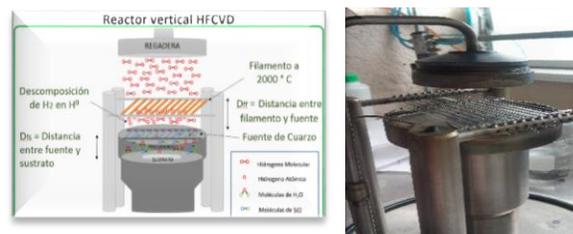


Figura 2 Reactor Vertical HFCVD

El espesor e índice de refracción de todas las películas de SRO depositadas por las dos técnicas LPCVD y HFCVD sobre sustratos de silicio, fueron obtenidos con el elipsómetro Fairfield Modelo NJ 07004-2113.

Mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se obtuvieron los espectros de absorbancia y se identificaron los modos vibracionales característicos de las películas de SRO, el equipo usado fue un espectrofotómetro Bruker Vector 22 con fuente de infrarrojo, el rango utilizado fue de $400\ \text{cm}^{-1}$ a $2400\ \text{cm}^{-1}$ Fluoromax-3 de la marca Horiba Jobin Yvon fue utilizado para medir la Fotoluminiscencia de las películas de SRO a temperatura ambiente, excitadas a una radiación de 400 a 900 nm.

Todas las caracterizaciones anteriores fueron analizadas antes del tratamiento térmico (STT) y después del tratamiento térmico (CTT). Las micrografías para observar las interfaces entre el Si y las películas fueron tomadas con un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) JEOL-JSM-7800F. El Microscopio electrónico de transmisión (TEM) JEM-ARM200F, fue utilizado para observar la formación de nanocristales de silicio (ncs-Si) en las películas de SRO

Técnica	Película	Espesores (nm)		Índice de Refracción (n)		Exceso de Silicio CTT (%)	Diámetro de Ncs-Si (nm)
		STT	CTT	STT	CTT		
ESD	R0=10	89.7±9.8	76.3±5.4	1.69±0.017	1.72±0.012	16	4.15±0.85
	R0=25	105.9±7.5	90.3±2	1.55±0.008	1.57±0.032	14.2	5.05±0.25
HFCVD	SRO25	322.9±2.6	296.3±2.1	2.46±0.03	1.3±0.04	5.5	3.9±0.10
	SRO100	319.6±4.7	283.5±3.2	2.039±0.35	1.3±0.08	5.0	4.14±0.14

Tabla 1 Películas de SRO-LPCVD y SRO-HFCVD con los espesores, índices de refracción, excesos de silicio y diámetro del ncs-Si

Resultados y discusión

En la Tabla 1 se muestra la comparación en espesores, índices de refracción, exceso de silicio y diámetro de ncs-Si de las películas obtenidas mediante las dos técnicas LPCVD y HFCVD. Podemos observar en la Tabla 1, que las películas $R_0=10$ y $R_0=25$ depositadas por la técnica LPCVD (SRO-LPCVD), son más delgadas que las películas SRO₂₅ y SRO₁₀₀ depositadas por la técnica HFCVD (SRO-HFCVD), sin embargo, ambas están consideradas como películas delgadas, debido a que ambas tienen espesores nanométricos (nm).

Una tendencia mostrada en todas las películas depositadas por ambas técnicas es que los espesores después del tratamiento térmico (CTT) se decrementan algunos nm, debido al reordenamiento atómico nanoestructural, modificándose la estequiometría estructural hacia el SiO₂. Mientras que, el índice de refracción (η), para las películas SRO-LPCVD incrementa CTT, para las películas SRO-HFCVD disminuye CTT.

De acuerdo con la literatura el índice de refracción del silicio es $\eta_{Si} \approx 3-4$ [2-5], mientras que para el SiO₂ es de $\eta_{SiO_2} \approx 1.4$ [3-5], por lo que una película con η cercano al η_{Si} nos indicara un alto exceso de silicio y lo contrario para un valor cercano al del η_{SiO_2} . Si ajustamos este análisis a las películas depositadas por las dos técnicas CVD, observamos que los η de las películas SRO-LPCVD incrementaron ligeramente, indicando que el exceso de silicio aumenta, esto nos indica que efectivamente se está incorporando cierta cantidad de átomos de Silicio en exceso a la película, formándose los ncs-Si.

En cambio, que el η de las películas SRO-HFCVD CTT se decrementa, acercándose al η_{SiO_2} , es decir, está dejando de ser no estequiométrica, considerando que se están desorbiendo las especies O-H, Si-O-Si, Si-H que no se encuentran bien enlazados en la microestructura de la película.

La Figura 3, presenta los espectros de FTIR de las películas $R_0=10$, $R_0=25$ por las técnicas LPCVD en el inciso (a) y las películas SRO₂₅ y SRO₁₀₀ depositadas por la técnica HFCVD en el inciso (b).

En ambas figuras se pueden observar los modos vibracionales de los enlaces Si-O-Si, característicos del SiO₂ [2,3]; de balanceo ($R=458$ cm⁻¹), de doblamiento ($B=812$ cm⁻¹), de estiramiento en fase ($S=1084$ cm⁻¹) y fuera de fase ($a-S=1177$ cm⁻¹). Además de otros modos de vibración con menor intensidad de absorción como el pico a 620 cm⁻¹ que es debido a vibraciones Si-H (Wagging) [3,6], además de vibraciones alrededor de 2300 y 2360 cm⁻¹, que corresponden a los enlaces de estiramiento asimétrico del Si-H ($S=2300, 2360$ cm⁻¹) [3,5]. También, se observa que la intensidad de absorbancia es mayor en los espectros de FTIR-HFCVD, debido a que los espesores de estas películas son más gruesas.

El punto de comparación de los espectros de las películas estudiadas se llevará a cabo mediante los modos vibracionales del SiO₂ listados en la Tabla 2. Por lo que destacamos que los picos (1), (3), (5) y (6) STT de ambas técnicas presentan un corrimiento hacia menores números de onda que el SiO₂, esto muestra que el óxido es no estequiométrico, es decir, incrementa el número de enlaces Si-O fuera de estequiometría.

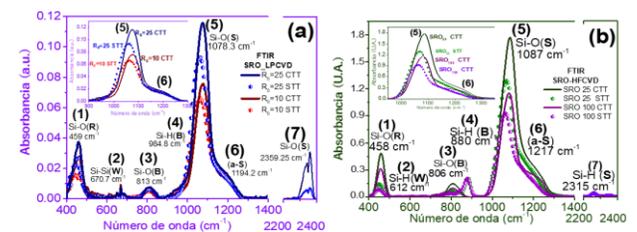


Figura 3 Espectros de FTIR (a) Técnica LPCVD, (b) Técnica HFCVD

Mientras que en las muestras CTT estos espectros se recorren a mayores números de onda que el SiO₂ y se atribuye a un reordenamiento estructural y mejora la estequiometría, debido a la separación de fase del Si y SiO₂. Puede observarse mejor en los recuadros de la Figura 3, la diferencia en las posiciones de los picos principales de la banda (S), donde un corrimiento hacia números de onda más altos se observa en las muestras CTT, siendo los espectros de las películas $R_0=25$ (SRO-LPCVD) y SRO₂₅ (SRO-HFCVD) las que tienen el mayor cambio al desplazar su punto máximo de 1058 a 1075 cm⁻¹ y de 1065 a 1089 cm⁻¹ en los espectros FTIR-LPCVD y FTIR-HFCVD, respectivamente, además de que incrementan la intensidad de absorbancia y se estrecha el espectro de las muestras CTT.

Estos cambios indican el grado de desviación de la estequiometría, es decir, algunos de los estados de oxidación de la red de SiO_x, la cual está formada por el tetraedro Si-(Si_{4-n}-O_n) con n = 0, 1, 2, 3 y 4, formándose: Si₀, Si₁₊, Si₂₊, Si₃₊ y Si₄₊, varían de acuerdo al exceso de silicio y al tiempo del depósito de la película, donde ocurren los procesos de absorción, difusión y desorción [5,6].

En lo referente a los picos (4) y (7), de acuerdo con Koshida [3], los modos de vibración Si-H flexión (875 cm⁻¹) y Si-H estiramiento (2260 cm⁻¹) están presentes en las películas debido a la incorporación de hidrógeno en el proceso de fabricación, no obstante, en las muestras CTT la desorción del hidrógeno ocasiona que estos modos vibracionales desaparezcan debido a las altas temperaturas. En la técnica HFCVD, se puede observar mejor este comportamiento.

Modos de vibración	Antes del tratamiento térmico				Después del tratamiento térmico				
	R ₀ =25	R ₀ =10	SRO ₂₅	SRO ₁₀	SiO ₂	R ₀ =25	R ₀ =10	SRO ₂₅	SRO ₁₀
(1) Si-O-Si en SiO ₂ Balanceo (R)	[3,6]	455	439	449	458	459	466	459	458
(2) Si-H Menor (W)	[4,6]	609	609	609	609	669	669	612	612
(3) Si-O-Si en SiO ₂ Doblamiento (B)	[3,5,6]	809	809	881	881	818	818	808	808
(4) Si-H Doblamiento (B)	[3,6]	938	936	-	-	942	943	-	-
(5) Si-O-Si en SiO ₂ Estiramiento en fase (S)	[3,4,6]	1061	1065	1070	1062	1082	1088	1086	1083
(6) Si-O-Si Estiramiento fuera de fase (a-S)	[3,6]	1173	1168	1174	1171	1191	1195	1227	1240
(7) Si-H Estiramiento (S)	[4,5]	2261	2261	-	-	2313	2313	-	-

Tabla 2 Modos de vibración de los espectros de FTIR del SiO₂ y de las películas SRO obtenidas por las Técnicas LPCVD y HFCVD

En la Figura 4 se muestran los espectros de emisión Fotoluminiscente (FL) de todas las películas analizadas de SRO depositadas por las técnicas LPCVD (a, b, e, f) y HFCVD (c, d, g, h), STT y CTT. Los incisos (a, b, c y d) muestran las películas de SRO de ambas técnicas STT, ampliándose estos espectros en los recuadros para su mejor visualización, mientras que en los incisos (e, f, g, h) se muestran las intensidades de FL CTT.

Las intensidades FL de las películas STT presentan un pico intenso y bien definido en el violeta (390-455 nm), el cual se atribuye a enlaces débiles de oxígeno ((WOB) [3-6], también se observan otros picos menos intensos en diferentes posiciones de la banda roja entre 622 y 780 nm, para los cuales se reporta que se debe a los Centros de huecos de oxígeno no ligados (NBOHC) y Centros E' ≡Si-O•O≡Si+ y Efectos de confinamiento cuántico (CQ) con interacción de la interface de los nc-Si y la matriz de óxido [3,6].

Observamos también en esta Figura 4 incisos (e, f, g, h) que todas las intensidades incrementaron CTT, un orden de magnitud, además el pico de mayor intensidad se observa en la banda roja e infrarroja cercana en donde los mecanismos de FL que intervienen en este proceso son los centros luminiscentes localizados en la interfaz de nc-Si/SiO₂ (CLI) y los efectos de confinamiento cuántico (QC) con interacción de la interface de los ncs-Si y la matriz de óxido.

Seguidamente, la energía de la banda prohibida óptica (E_g= hv) fue obtenida con la relación de la longitud de onda λ (nm): hv = 1239.7 / λ, y con el E_g obtenido se calculó el tamaño de diámetro del ncs-Si con la ecuación: d=[3.73/(E_g-1.12)]^{1/1.39}, obteniendo que el tamaño del ncs-Si se puede encontrar desde 1.7 a 4.7 nm para los picos de mayor intensidad ubicados en las bandas azul y roja de los espectros de FL de las películas de ambas técnicas mostrándose en la Figura 4.

Las micrografías obtenidas por SEM de las películas aquí estudiadas CTT se observan en la Figura 5, para corroborar los espesores listados en la Tabla 1. Las micrografías obtenidas por HRTEM se muestran en la Figura 6, el tamaño del ncs-Si para la película R₀=10 SRO-LPCVD oscila entre 3.3 y 4.4 nm, y el tamaño de los ncs-Si en las películas R₀=25 SRO-LPCVD se observan más grandes oscilando entre 4.8 a 5.3 nm, además de que el número de ncs-Si es mayor que en cualquiera de las otras películas.

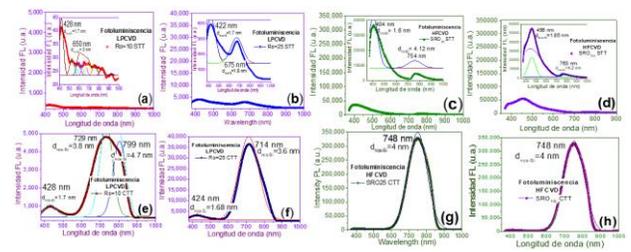


Figura 4 Espectros de FL (a,b,e,f) Técnica LPCVD, (c,d,g,h) Técnica HFCVD

Para las películas SRO₂₅ SRO-HFCVD los ncs-Si observados oscilan entre 3.8 a 4 nm y en la película SRO₁₀₀SRO-HFCVD incrementan ligeramente entre 4 y 4.28 nm. La respuesta FL, la E_g y tamaño del ncs-Si, nos permiten potenciar varias aplicaciones de estas películas en el área de los dispositivos fotodetectores y electroluminiscentes.

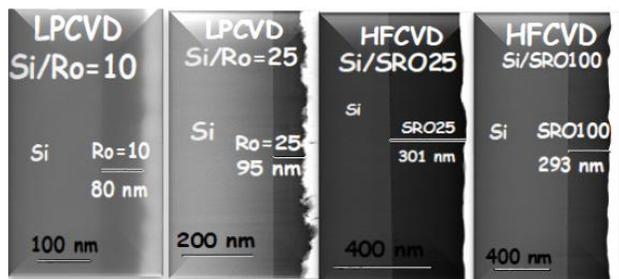


Figura 5 Micrografías SEM, de las películas $R_0=10$ -LPCVD, $R_0=25$ -LPCVD, SRO25-HFCVDy SRO100-HFCVD

Conclusiones

Se estudiaron y compararon las propiedades ópticas y estructurales de las películas delgadas de SRO depositadas por las técnicas LPCVD y HFCVD. Un análisis de espectroscopia nula y de microscopía SEM, nos muestra que las películas fabricadas por la técnica LPCVD son más delgadas que las películas depositadas por la técnica HFCVD; sin embargo con la espectroscopia FTIR, se encontró una aproximación en la composición de las películas, con la presencia de hidrógeno en las películas fabricadas por la técnica HFCVD, lo que incrementa los defectos relacionados con el oxígeno e hidrógeno, aumentando la intensidad fotoluminiscente de las películas de SRO-HFCVD. Otros defectos también se formaron en las películas depositadas por LPCVD.

Así mismo en las cuatro películas CTT todas presentaron ncs-Si de un tamaño ≈ 5 nm, por lo que se puede considerar también la existencia de CQ, sin descartar los defectos existentes en las películas, responsables de los picos más intensos de la fotoluminiscencia observada en la figura 4.

Acknowledgements

Este trabajo ha sido parcialmente respaldado por CONACyT-CB-255062 y VIEP-LULJ-EXC-2019. Los autores agradecen a CIDS, INAOE (Pablo Alarcón, V. Aca Aca, A. Hernández Flores, A. Itzmoyotl Toxqui e I. Juárez Ramírez) VIEP (Dr. Enrique González Vergara, Mtra. María Yadira Rosas Bravo).

Referencias

[1] Canham, L. T. (1990). Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers.

[2] Hsuan-Ta Wu, *et al.*, (2019) Al-Doped ZnO/Silicon-rich Oxide Superlattices with High Room-Temperature Thermoelectric Figure of Merit.

[3] Luna-López, J. A., *et al.*, (2010). FTIR, AFM and PL properties of thin SiO_x films deposited by HFCVD. Materials Science and Engineering: B, 174(1-3), 88-92.

[4] Mingming Li *et al.*, (2019). The evolution of PL properties of hydrogenated Si-rich silicon carbide/amorphous carbon nano-multilayer films grown by PECVD

[5] A.O. Zamchiy, *et al.*, (2018). Effect of annealing in oxidizing atmosphere on optical and structural properties of silicon suboxide thin films obtained.

[6] J.R. Ramos-Serrano, *et al.*, (2019). Luminescent silicon oxycarbide thin films obtained with monomethylsilane by hot-wire chemical vapor deposition.

Anexo

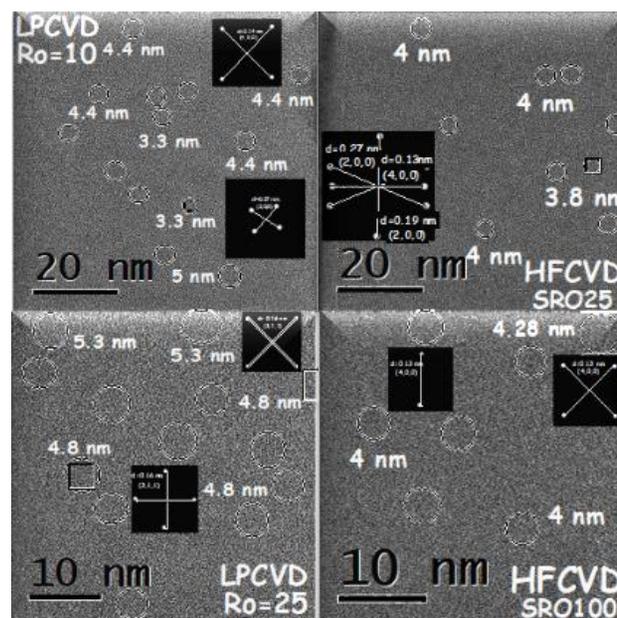


Figura 6 Micrografías HRTEM, de las películas $R_0=10$ -LPCVD, $R_0=25$ -LPCVD, SRO25-HFCVDy SRO100-HFCVD