



INAOE

Efecto de la rugosidad en el sustrato en las características electro-ópticas en capacitores emisores de luz.

Por

Ing. Joaquín Hernández Betanzos

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**
Febrero de 2017
Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Mariano Aceves Mijares
Investigador Titular del INAOE

©INAOE 2017

Derechos reservados

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



Dedicatoria.

*A mis padres, Joaquín Hernández Díaz y Ma. Del Carmen
Betanzos Flores.*

A mis hermanos, Erika Berenice y Fidel.

A mi sobrina, Natalia.

Gracias por existir. Los Amo.

Agradecimientos.

Al Dr. Mariano Aceves Mijares por permitirme realizar este trabajo bajo su asesoría. A su invaluable apoyo, motivación, y supervisión en el desarrollo de esta tesis.

Al M.C Jesús Alarcón Salazar por todo el apoyo otorgado y asistencia en el trabajo experimental.

A los miembros del jurado: Dr. Alfredo Abelardo González Fernández, Dra. Claudia Reyes Betanzo y Dr. Enrique Quiroga, por sus comentarios y sugerencias para el mejoramiento del presente trabajo.

Al personal del laboratorio de microelectrónica en especial a Pablo Alarcón Peña, Armando Hernández Flores, Víctor Aca Aca, Adrián Itzmoyotl Toxqui e Ignacio Juárez Ramírez. A Leticia Tecuapetla por las mediciones en AFM y SEM.

Al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica por las facilidades otorgadas para realizar mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado para la realización de los estudios de maestría.

Resumen

Los esfuerzos para desarrollar circuitos optoelectrónicos totalmente integrados en silicio han sido bastante amplios. Se ha experimentado con diversos materiales entre ellos el óxido de silicio rico en silicio para obtener fuentes de luz dado sus potenciales características luminiscentes y que se puede obtener mediante técnicas estándar en procesos CMOS.

El óxido de silicio rico en silicio o SRO es un material formado por una matriz de óxido de silicio, óxido de silicio no estequiométrico y silicio en forma de nanopartículas embebidos en esta matriz. Se puede obtener mediante técnicas de depósito químico en fase vapor (CVD) y al someterse a tratamientos térmicos a altas temperaturas adquiere diversas propiedades, como el atrapamiento de carga, fotoluminiscencia, catodoluminiscencia y electroluminiscencia.

Se han fabricado emisores de luz con estructuras tipo MOS en las cuales se ha obtenido electroluminiscencia de área completa usando como compuerta polisilicio dopado y SRO como capa activa. Esta tecnología es completamente compatible con CMOS. Sin embargo aún se tienen eficiencias bajas y voltajes de operación altos.

En la presente tesis se hace un estudio de los efectos de la rugosidad en las propiedades ópticas y eléctricas de los capacitores emisores de luz con SRO obtenidos mediante LPCVD usando capas simples y múltiples de SRO sobre sustratos rugosos con 3 niveles de rugosidad obtenidos mediante grabado por iones reactivos (RIE). Se caracterizan las superficies rugosas mediante microscopía de fuerza atómica (AFM), las propiedades ópticas del SRO mediante elipsometría, caracterización fotoluminiscente, espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) y electroluminiscencia. Además caracterización eléctrica de los capacitores mediante técnicas de medición de corriente en función del voltaje ($I - V$) y capacitancia en función del voltaje ($C - V$).

Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivos específicos.....	2
1.2 Organización del Trabajo.....	3
2. Antecedentes.....	4
2.1 Oxido de Silicio rico en Silicio (SRO).....	4
2.2. Fotoluminiscencia en SRO.....	5
2.3 Dispositivos Electroluminiscentes basados en SRO.....	6
2.4 Optimización de emisores de luz con rugosidad.....	8
3. Procedimientos Experimentales.....	9
3.1 Fabricación.....	9
3.1.1 Texturizado de Sustratos.....	13
3.1.2 Depósito de SRO.....	14
3.1.3 Tratamiento Térmico.....	16
3.1.4 Depósito y dopado de polisilicio.....	16
3.1.5 Litografía de polisilicio.....	17
3.1.6 Contactos de Aluminio.....	17
3.2 Caracterización.....	18
3.2.1 Microscopía de fuerza atómica.....	18
3.2.2 Elipsometría.....	18
3.2.3 FTIR.....	18
3.2.4 Caracterización Fotoluminiscente.....	19
3.2.5 Corriente en función del voltaje.....	20
3.2.6 Capacitancia en función del voltaje.....	21
3.2.7 Electroluminiscencia.....	21
4. Resultados Experimentales y discusión.....	22
4.1 Texturizado de Sustratos.....	22
4.1.1 Rugosidad de Área.....	22
4.2 Caracterización Óptica de SRO.....	28
4.2.1 Elipsometría.....	28
4.2.2 Fotoluminiscencia.....	30
4.2.3 FTIR.....	32
4.3 Caracterización Eléctrica de Dispositivos.....	33
4.3.1 Corriente en función del voltaje.....	33
4.3.1.1 Dispositivos Poly/SRO / Si -p / Al.....	33
4.3.1.2 Dispositivos Al/SRO/Si-p/Al.....	42
4.3.2 Capacitancia en función del Voltaje.....	43
4.3.2.1 C – V Poly /SRO/Tex.....	44
4.3.2.2 C-V Al/SRO/Si-p/Al.....	46
4.3.3 Electroluminiscencia.....	48
5. Conclusiones y trabajo futuro.....	55
5.1 Propuestas de trabajo futuro.....	57
6 Referencias.....	58

1. Introducción

La búsqueda de integrar una mayor cantidad de transistores por unidad de área y de aumentar la velocidad de comunicación de los circuitos integrados ha generado diferentes problemas. La reducción de las dimensiones tanto en transistores como en las líneas de interconexión traen consigo el aumento en el consumo de potencia, calentamiento, degradación de las interconexiones e incremento de las componentes parásitas que impactan negativamente en la velocidad de transmisión e integridad de las señales¹⁻³. Se ha propuesto entonces interconectar los componentes usando fotones.⁴ La transmisión de información mediante luz permite la transmisión a largas distancias con bajas pérdidas e inmunidad al ruido con tasas de transferencias muy altas^{5,6}. Un circuito optoelectrónico necesita 3 elementos básicos: una fuente de luz que transforme señales eléctricas en luminiscentes, una guía de onda que transmita las señales luminosas y un sensor que transforme la señal luminosa a eléctrica.⁷

El silicio es un semiconductor de banda indirecta por lo que es un emisor de luz ineficiente. En cambio los semiconductores de banda directa son excelentes emisores de luz. Sin embargo hacerlos compatibles con procesos CMOS tiene aún muchas limitantes y altos costos^{8,9}. A raíz del descubrimiento de la emisión visible en silicio poroso¹⁰ se han hecho desde entonces muchos trabajos para obtener emisores de luz basados en silicio y totalmente compatibles con la tecnología CMOS existente.¹¹⁻¹³ El óxido de silicio rico en silicio o SRO ha resultado en una alternativa ventajosa para desarrollar fuentes de luz compatibles con CMOS y se puede obtener mediante técnicas CVD empleadas en procesos de fabricación y con buen control de proceso.

Con la finalidad de obtener un circuito optoelectrónico completamente integrado en silicio se han fabricado y estudiado dispositivos tipo MOS usando como dieléctrico SRO y de material de compuerta polisilicio cristalino dopado u óxidos conductores transparentes (TCO por sus siglas en inglés). Sin embargo la eficiencia obtenida hasta ahora es baja y los voltajes de operación altos.¹⁴⁻¹⁶

Se han hecho experimentos empleando múltiples capas de SRO con diferentes excesos de silicio para aumentar la intensidad luminiscente y reducir los voltajes de operación.^{12,14}

Se ha reportado también que la formación de nanopirámides en la superficie del sustrato en dispositivos emisores de luz incrementa la inyección de portadores, permitiendo el encendido a menores valores de voltaje.¹⁷

En este trabajo se busca contribuir a la optimización de emisores de luz basados en SRO creando rugosidad en la superficie de los sustratos usando técnicas de grabado mediante iones reactivos (RIE por sus siglas en inglés) con diferentes variables de proceso. Se fabricaron capacitores emisores de luz (LECs) con capa simple y multicapas de SRO con diferentes excesos de silicio sobre sustratos de silicio con diferentes niveles de rugosidad.

1.1 Objetivos

Estudiar el efecto del texturizado del sustrato en las características de la corriente y la emisión de luz en capacitores emisores de luz tipo MOS con SRO como capa activa y sustratos de silicio con diferente texturizado.

1.1.1 Objetivos específicos.

1. Obtener sustratos de silicio con rugosidad mediante RIE y caracterizar superficialmente mediante microscopía de fuerza atómica (AFM).
- 2.- Hacer depósitos de SRO mediante LPCVD sobre sustratos rugosos y pulidos.
- 3.- Caracterización óptica para las películas de SRO mediante elipsometría y emisión fotoluminiscente.
- 4.- Fabricar y caracterizar dispositivos LECs, con multicapas de SRO sobre sustratos de silicio texturizados y pulidos.

- 5.- Caracterización eléctrica de los LEC mediante corriente en función del voltaje ($I - V$), capacitancia en función del voltaje ($C - V$) y Electroluminiscencia (EL)
- 6.- Comparar resultados experimentales
- 7.- Determinar las condiciones experimentales del espesor de SRO y el texturizado del sustrato adecuadas.

1.2 Organización del Trabajo.

El presente trabajo resume el proceso experimental realizado en el laboratorio de microelectrónica que constó de la fabricación y caracterización de dispositivos emisores de luz basados en SRO sobre sustratos rugosos. También el análisis y las conclusiones de los datos de caracterización obtenidos mediante diferentes técnicas.

El primer capítulo es una introducción donde se presenta el problema a estudiar. También se describen los objetivos y la organización del trabajo.

En el capítulo 2 se hace un breve resumen de las propiedades ópticas y eléctricas del SRO, métodos de obtención y de dispositivos electroluminiscentes basados en SRO y diferentes formas de mejorarlos.

En el capítulo 3 se exponen las técnicas de fabricación y caracterización utilizadas en el presente trabajo y se describen los métodos empleados.

En el capítulo 4 se presentan y analizan los resultados experimentales, que comprenden el análisis de los sustratos texturizados, estadísticas de rugosidad, elipsometría de películas de SRO monocapas y multicapas, análisis molecular mediante FTIR, caracterización eléctrica de corriente en función del voltaje ($I - V$), capacitancia en función del voltaje ($C - V$), fotoluminiscencia y electroluminiscencia para dispositivos LECs fabricados.

En el capítulo 5 finalmente se exponen las conclusiones y alcances del trabajo experimental. También se proponen mejoras a los dispositivos para trabajos posteriores.

2. Antecedentes.

2.1 Óxido de Silicio rico en Silicio (SRO)

El óxido de silicio rico en silicio o SRO es un material compuesto por diferentes fases de óxido: óxido de silicio estequiométrico (SiO_2), óxido no estequiométrico (SiO_x , $0 < x < 2$) y Silicio en su forma elemental (Si)¹⁸.

Existen varias técnicas para obtener 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)¹⁹. Dentro de este grupo las más dominantes son: depósito químico en fase vapor asistido por plasma (PECVD) y depósito químico en fase vapor a baja presión (LPCVD)^{20,21}. En la figura 2.1 se muestran de forma general las técnicas de obtención de SRO mediante Implantación de silicio y mediante CVD.

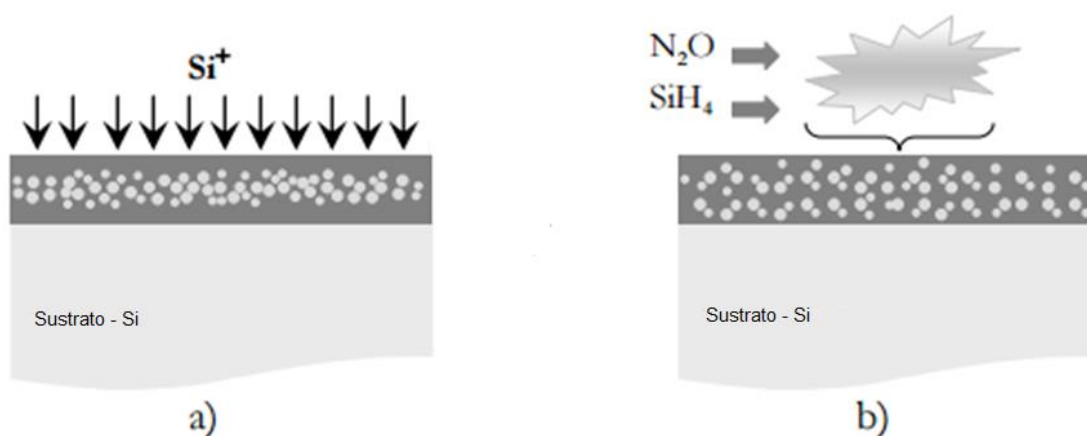


Figura 2.1. Técnicas de obtención de SRO: a) Implantación de silicio. b) Depósito en fase vapor (CVD)²².

Al tratar térmicamente a altas temperaturas ocurre una separación de fases entre el Silicio y el óxido de Silicio creándose nanopartículas de silicio amorfo y cristalino

en el óxido ^{22,23}. El tamaño de nanopartícula depende del exceso de silicio dentro las películas depositadas además del tiempo de tratamiento y la temperatura del tratamiento térmico.²³

Para obtener SRO mediante LPCVD se utilizan como gases de reacción silano (SiH_4) y óxido nitroso (N_2O). La concentración de exceso de silicio es definida mediante la relación de las presiones parciales de óxido nitroso y silano.

$$R_0 = \frac{P_0(\text{N}_2\text{O})}{P_0(\text{SiH}_4)} \quad (2.1)$$

El exceso de silicio es inversamente proporcional a la relación de gases. Un exceso de silicio del 17% es encontrado con un valor de $R_0 = 3$, y para $R_0=100$, se obtiene un óxido estequiométrico.^{18,24}

2.2. Fotoluminiscencia en SRO.

Al estimular las películas de SRO con luz ultravioleta se obtiene emisión luminiscente en la región visible como respuesta. Esto es conocido como fotoluminiscencia (PL).

Se ha reportado que mediante la técnica LPCVD se ha obtenido la más alta intensidad fotoluminiscente.²¹

Con tratamiento térmico a 1100°C , por 180 minutos, en atmósfera de nitrógeno, las películas depositadas adquieren sus propiedades luminiscentes. Las mejores características luminiscentes se han encontrado en películas depositadas con exceso de silicio del orden del 5% (alrededor de $R_0=30$), con un pico de emisión cercano a los 720 nm, La luminiscencia es disminuida conforme aumenta el exceso de silicio y un corrimiento hacia valores más altos en el pico de emisión ^{19,25}.

La figura 2.2 muestra los espectros de fotoluminiscencia para 3 películas de SRO con diferente exceso de silicio ($R_0= 10, 20$ y 30) antes y después de tratamiento térmico.

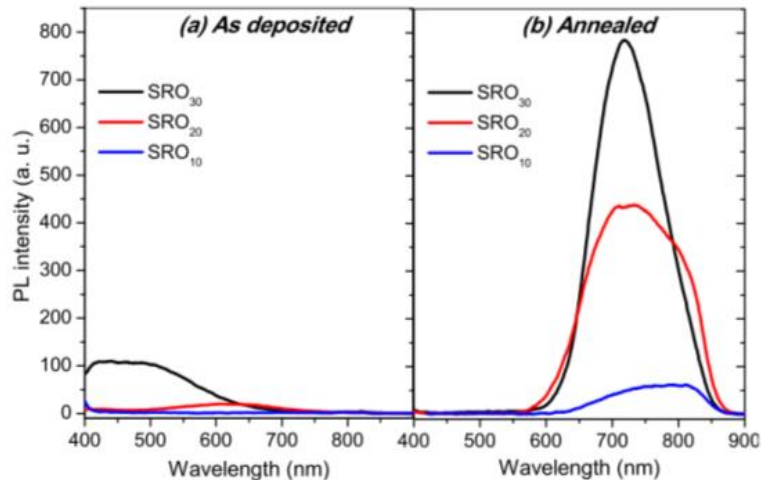


Figura 2.2. Fotoluminiscencia en SRO para diferentes excesos de silicio antes y después de tratamiento térmico ¹⁹.

2.3 Dispositivos Electroluminiscentes basados en SRO.

La propiedad de obtener luminiscencia en espectro visible al aplicar un campo eléctrico o voltaje se conoce como electroluminiscencia. Usando estructuras tipo MOS, con capa activa de SRO, sustrato de silicio y un electrodo de compuerta transparente se ha obtenido electroluminiscencia observable a simple vista ^{12,13,16,26,27}.

En la figura 2.3 se muestra un esquema de un dispositivo emisor de luz conocido como capacitor emisor de luz (LEC) que consta de una compuerta de polisilicio y una capa activa de SRO sobre sustrato de silicio ²⁷.

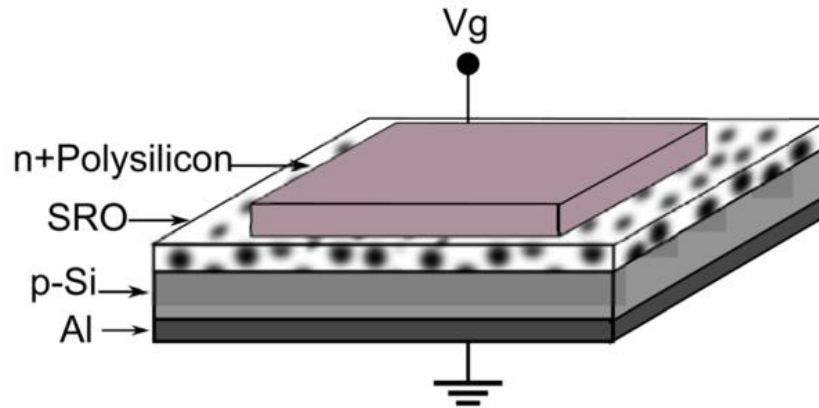


Figura 2.3. Esquema de un dispositivo electroluminiscente tipo MOS (LEC).²⁷

El SRO con $R_0=30$, tiene las mejores propiedades luminiscentes¹⁹, pero muy baja inyección de portadores, por lo cual a valores de voltajes muy elevados se obtiene luminiscencia. Para R_0 más bajas, la inyección mejora, pero disminuye las propiedades luminiscentes. Para mejorar la emisión, se han estudiado los dispositivos utilizando múltiples capas de SRO, intercalando capas de R_0 baja, y R_0 alta, para obtener mayor emisión a voltajes menores^{12,28-31}. En la figura 2.4 se muestra un dispositivo de este tipo o LEC multicapa.

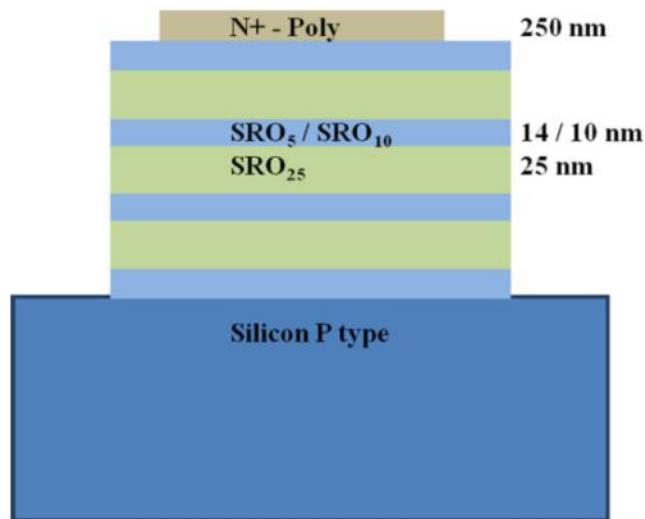


Figura 2.4: Esquema de un LEC , con multicapas de SRO³¹.

2.4 Optimización de emisores de luz con rugosidad.

Existe un compromiso entre luminiscencia e inyección de portadores. El SRO con mayor exceso de silicio tiene mejores propiedades conductivas pero baja emisión luminiscente y el caso con menor exceso de silicio tal como sucede con SRO30 se han encontrado las mejores características luminiscentes pero baja inyección de portadores.^{18,19,21} Con la finalidad de mejorar la inyección de portadores para mejorar la emisión, y reducir los voltajes de operación, se ha propuesto utilizar rugosidad en la superficie de los sustratos. Se ha reportado que la existencia de rugosidad en la interfaz del sustrato y óxido en emisores de luz de películas ultradelgadas causa un incremento en la electroluminiscencia³². Se ha estudiado en la influencia de nanopirámides de silicio formadas sobre el sustrato en la corriente de diodos emisores de luz y su efecto sobre la emisión luminiscente, encontrándose que se tiene mayor inyección de portadores a menores voltajes y un incremento en la intensidad luminiscente y que esta es dependiente de la densidad de pirámides en la superficie.¹⁷

Un experimento reciente consistió en la fabricación de emisores de luz tipo MOS con SRO sobre sustratos tratados con RIE usando Hexafluoruro de Azufre (SF_6) y Argón. Se obtuvieron sobre las superficies formas cónicas que contribuyeron a mejorar la inyección de portadores, reduciendo el voltaje de encendido. Se comparó con un mismo dispositivo con sustrato pulido y hubo una mejora de 4 veces en la eficiencia.³³. Un espectro de electroluminiscencia del experimento se muestra en la figura 2.5.

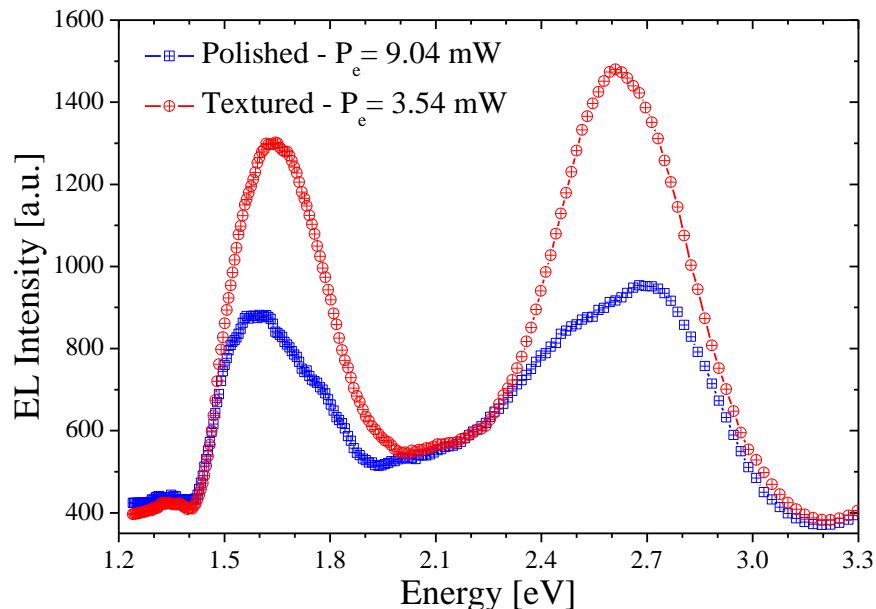


Figura 2.5. Espectro de Electroluminiscencia en LECs con sustrato rugoso y pulido. Se observa que la potencia eléctrica es menor en el caso rugoso y la emisión luminosa más intensa.³³

3. Procedimientos Experimentales

3.1 Fabricación

En esta sección se describen los procesos de fabricación para los dispositivos cuyos esquemas se presentan en las figuras 3.1 y 3.2 y 3.3

Las figuras 3.1 y 3.2 corresponden a dispositivos LEC, tipo MOS, multicapa y monocapa de SRO, respectivamente. Estos dispositivos tienen compuertas semitransparentes de Polisilicio N+ y contacto posterior de aluminio, sobre sustratos rugosos tipo p y tipo n. La figura 3.3 ilustra las otras estructuras propuestas, que son capacitores tipo MOS con monocapas de SRO, y compuerta de aluminio, sobre sustratos pulidos. La rugosidad en los sustratos se midió por AFM en tres sustratos marcados como Tex1, Tex2 y Tex 3.

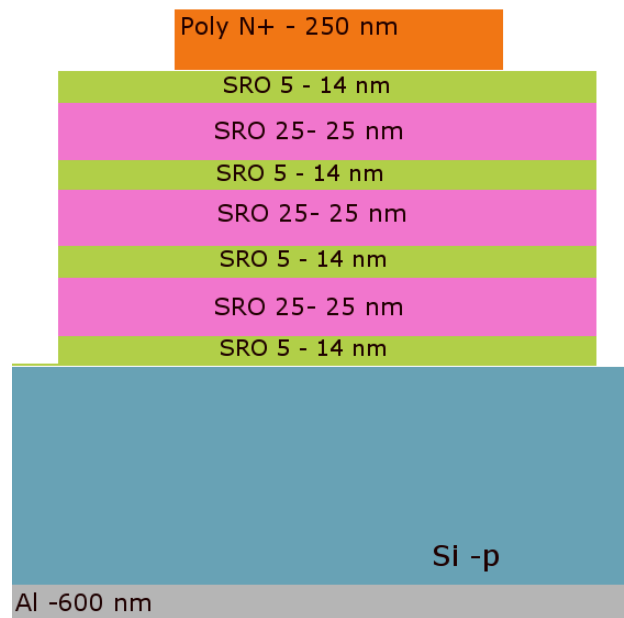


Figura 3.1. Estructura para LECs multicapa 5/25, sustratos rugosos, con compuerta de polisilicio N+ como conductor transparente (no a escala).

Compuerta

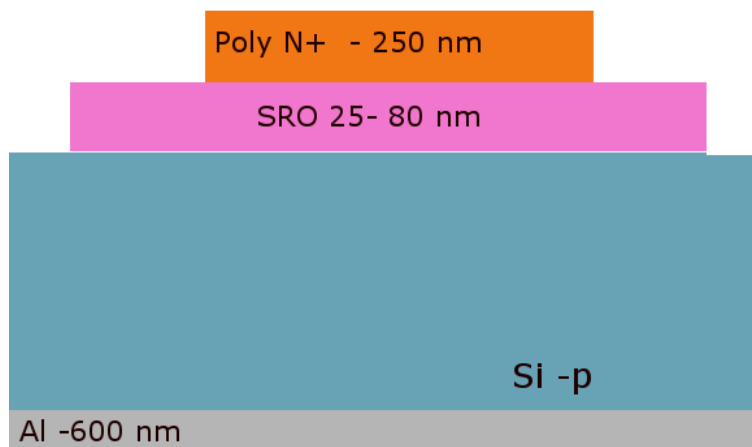


Figura 3.2 Estructura para LECs monocapa SRO 25, sustratos rugosos, con compuerta de polisilicio N+ como conductor transparente (no a escala).

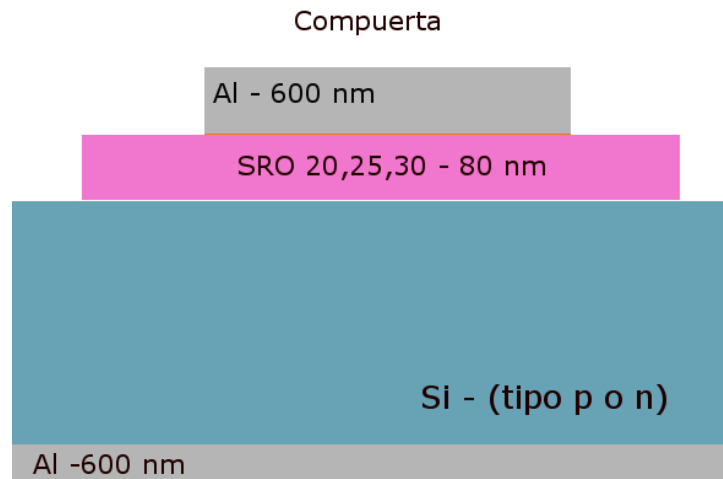


Figura 3.3. Estructura para capacitores Al/SRO/Si-p/Al (no a escala).

Aunque se realizó la fabricación de los dispositivos con compuerta de óxido de Zinc dopadas con aluminio (AZO) se decidió no reportarlos en esta tesis porque las corrientes obtenidas en todos los casos fueron anómalas. Por tanto más experimentos deberán hacerse hasta de obtener resultados confiables y repetitivos.

En las tablas 3.1 y 3.2 se resumen las características de los pilotos de proceso y los dispositivos fabricados, señalando parámetros relevantes de la fabricación, como la limpieza (RCA), tipo de película (ML para multicapas), tratamiento térmico a 1100°C (T.T.), enfriamiento y caracterización realizada: corriente en función del voltaje (I-V), capacitancia en función del voltaje (C-V), elipsometría(Elip), microscopía de fuerza atómica (AFM), fotoluminiscencia (PL), electroluminiscencia (EL) y transformada de Fourier de espectroscopia de infrarrojo (FTIR).

Tabla 3.1 Nomenclatura y procesos de fabricación de pilotos para monitorear las características de las capas depositadas y los diferentes substratos, se usan los siguientes abreviaturas Tex (texturizado) RCA (limpieza RCA), T.T (tratamiento térmico a 1100 °C durante 180 minutos). ML se refiere a multicapas de $R_0= 5/25$.

Muestra	Tex1	Tex2	Tex3	RCA	R_0	T.T	Enfriamiento	Elip	AFM	PL	FTIR
Tex1	x								x		
Tex2		X							x		
Tex3			x						x		
P5					ML	x	x	x		x	x
P7					25	x	x	x		x	x
P20				x	20	x		x		x	x
P1				x	30	x		x		x	x
P2				x	30			x		x	x
P5A				x	20	x		x		x	x
P6				x	20			x		x	x

Tabla 3.2. Nomenclatura y características de los dispositivos fabricados. ML se refiere a multicapas de SRO con $R_0 = 5/25$.

Muestra	Tex 1	Tex 2	Tex 3	RCA	ML	R_0	T.T	Enfriamiento	I-V	C-V	EL
P1-1	x				x		x	x	x	x	x
P1-3	x					25	x	x	x	x	x
P2-1		x			x		x	x	x	x	x
P2-3		x				25	x	x	x	x	x
P3-1			x		x		x	x	x	x	x
P3-3			x			25	x	x	x	x	x
I				x		20	x		x	x	
II				x		20	x	x	x	x	
III				x		20			x	x	
IV						20	x		x	x	
V						20	x	x	x	x	
VI						20			x	x	
01				x		30	x		x	x	
02				x		30			x	x	
03				x		30	x		x	x	
04				x		30			x	x	
05				x		20	x		x	x	
06				x		20			x	x	
07				x		20	x		x	x	
08				x		20			x	x	

3.1.1 Texturizado de Sustratos.

Para obtener rugosidad sobre los sustratos, se empleó la técnica de grabado por iones reactivos (RIE), usando equipo RIE – ICP modelo Intercovamex V3 del laboratorio de microelectrónica en INAOE, con fuente de RF a frecuencia de 13.56

MHz, acoplado capacitivamente, con placas paralelas asimétricas, usando como gases reactivos SF₆, O₂ y CH₄. Para obtener 3 niveles de rugosidad, se estimaron 3 tiempos de proceso, 3.5 minutos, 35 minutos y 70 minutos. Los valores de potencia, flujo de gases, presión, y tiempos utilizados para cada muestra se presentan en la Tabla 3.3. Todos los sustratos fueron previamente desengrasados y el óxido nativo fue eliminado usando solución 7:1 (H₂O:HF).

Tabla 3.3 condiciones de texturizado en RIE para los sustratos de silicio. Flujo de gases SF₆/O₂/CH₄: 30/10/4 sccm, Presión = 5 mTorr. Potencia = 100 W.

Texturizado	Muestras	Tiempo (min)
1	Tex1	3.5
	P1-1	
	P1-3	
2	Tex2	35
	P2-1	
	P2-3	
3	Tex3	70
	P3-1	
	P3-3	

3.1.2 Depósito de SRO

Las películas de SRO fueron obtenidas mediante técnica de LPCVD, usando un horno horizontal de 4", con una presión base de 5×10^{-5} Torr. La temperatura de depósito fue de 736°C, con las presiones parciales de los gases reactantes, silano y óxido nitroso, obtenidas mediante la fórmula 3.1.

$$R_0 = F \frac{P_{0N_2O}}{P_{0SiH_4}} \quad 3.1$$

El uso del factor F, o factor de dilución, es necesario porque el gas silano se encuentra diluido en nitrógeno en aproximadamente 5%. Para este factor se debe considerar que el fabricante dice que la mezcla puede tener hasta el 40 % de variación, también se debe considerar el envejecimiento del gas. Este factor se encuentra empíricamente ³⁴. Para los LECs de polisilicio y capacitores con aluminio con monocapas de SRO20, 25 y ML 5/25 se emplea un factor de dilución de 33.

Para las muestras marcadas como 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, P1, P2, P5A y P6 el factor de dilución usado fue de 30 debido al uso de un tanque nuevo de silano que se ajustó previamente a los nuevos depósitos.

Las condiciones de depósito se resumen en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Condiciones de depósito de SRO en LPCVD. Temperatura 736°C

R ₀	Factor	SiH ₄		N ₂ O		Tiempo (min)	Espesor nominal (nm)
		Presión (Torr)	Flujo (slpm)	Presión (Torr)	Flujo (slpm)		
5	33	0.97	2.6	0.2	1.5	2	14
25	33	0.97	2.6	0.74	4.5	8	25
25	33	0.97	2.6	0.74	4.5	25	80
20	33	0.97	2.6	0.74	4.5	21	80
30	30	0.92	2.5	0.92	4.8	31	80
20	30	0.92	2.5	0.62	3.3	26	80

De modo general para todos los depósitos, se enciende el horno hasta alcanzar la temperatura de 736 °C, con 20 minutos de vacío. Posteriormente, inicia un flujo de nitrógeno por 20 minutos. Al introducir las muestras y cerrar el reactor se esperan 5 minutos para alcanzar estabilización térmica antes de introducir los gases de reacción.

Para los depósitos multicapas, se hizo fluir nitrógeno durante 3 minutos entre capa y capa. Los depósitos con enfriamiento consistieron en apagar el horno, introducir nitrógeno durante 30 minutos, con lo que se alcanzó una temperatura de 500 °C y extraer las muestras. Las muestras sin enfriamiento fueron retiradas inmediatamente.

3.1.3 Tratamiento Térmico

El tratamiento térmico o recocido para SRO se llevó a cabo en horno a una temperatura de 1100 °C por 180 minutos con flujo de nitrógeno de 150 ss.

En el caso de las muestras en las que se indica que fueron sometidas a un tiempo de enfriamiento éste consistió en apagar los elementos resistivos del horno a los 150 minutos del recocido, dejando las muestras enfriar dentro del horno hasta alcanzar los 500 °C, después de lo cual fueron retiradas.

3.1.4 Depósito y dopado de polisilicio.

El depósito de las películas de polisilicio se realizó mediante LPCVD, usando como precursor gas SiH_4 , a una temperatura de 653 °C. El depósito se realizó con la presión de silano de 1.5 torr, flujo de silano de 3.3 slpm, el tiempo de depósito fue 15 minutos para un espesor de 250 nm.

Para realizar el dopado de polisilicio con fósforo se usó la técnica Spin On Dopant (SOD), usando como fuente el p509 de Filmtronics diluido con Metanol en proporción 1:4. Después se aplicó mediante goteo la solución y se centrifugó a 1000 rpm durante 60 segundos. La eliminación de solventes se realizó en horno de convección a 110 °C con flujo de nitrógeno durante 15 minutos. La difusión de impurezas se realizó en el horno de difusión a 1000 °C por 10 minutos con flujo de nitrógeno a 30 ss y oxígeno a 10 ss. El vidrio PSG formado se removió con solución $\text{H}_2\text{O}:\text{HF}$ en proporción 7:1.

3.1.5 Litografía de polisilicio.

Para definir el área de contacto de los dispositivos se realizó un proceso de litografía, usando resina positiva AZ 1512 HS y revelador AZ 726 MIF. Para enmascarar el polisilicio se hizo un depósito de óxido de silicio de espesor 100 nm mediante CVD a presión atmosférica (APCVD). Después del proceso fotolitográfico, se grabó el óxido no enmascarado con solución 7:1 H₂O:HF, seguido del grabado de polisilicio con solución de KOH. Se obtuvieron cuadros de polisilicio con un área de 8.95 mm².

3.1.6 Contactos de Aluminio

Se hicieron depósitos de aluminio con espesor de 600 nm en la parte posterior del sustrato para formar el contacto del reverso. Antes de realizarse, se eliminó el óxido nativo usando un hisopo, aplicando la solución 7:1 con movimientos circulares hasta observar hidrofobicidad. Se enjuagó 3 veces en agua D.I. Se evaporó aluminio en evaporadora mediante haz de electrones. La presión de la evaporadora fue 5.3×10^{-5} mBar, la corriente del filamento en 300 mA y el tiempo de depósito fue 15 minutos.

Para definir las compuertas en la parte superior se depositó aluminio con espesor de 600 nm, para después someterse a proceso de litografía con resina positiva AZ1512 HS y revelado con AZ 726 MIF para definir contactos cuadrados de 1.1 x 1.1 mm, con recocido posterior de 15 minutos en horno de 110 °C para endurecer la resina enmascarante.

El grabado de aluminio se realizó en solución Al- Etch, de ácido nítrico, ácido acético glacial y ácido fosfórico en proporción 6 ml /44 ml/ 150 ml. La temperatura de la solución fue de 40 °C. Se sumergieron las muestras por un tiempo de 2.5 minutos. Se enjuagaron 3 veces en agua D.I, se eliminó la resina sobrante con acetona en vibrador ultrasónico por 10 minutos. La aleación se realizó en horno de a 450°C, con flujo de nitrógeno a 60 ss, durante 20 minutos.

3.2 Caracterización

3.2.1 Microscopía de fuerza atómica

La superficie de los sustratos se caracterizó usando microscopía de fuerza atómica (AFM) usando un sistema DFM Nanosurf EasyScan. Las mediciones se realizaron en modo no contacto explorando un área de $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$. Las imágenes fueron analizadas con el software SPIP (Scanning Probe Image Processor) para determinar parámetros estadísticos de rugosidad. La figura 3.4 muestra un diagrama esquemático del AFM empleado.

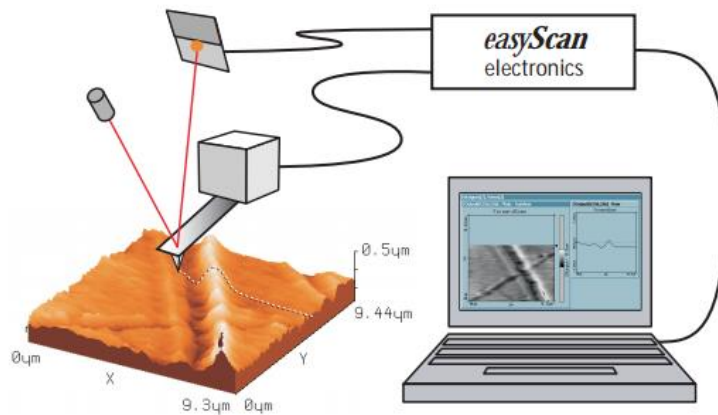


Figura 3.4. Sistema AFM EasyScan Nanosurf³⁵.

3.2.2 Elipsometría

Las películas de SRO fueron caracterizadas con un elipsómetro Gaertner L117 con láser de He-Ne con longitud de onda de $638.2\ \text{nm}$, para determinar sus espesores e índices de refracción.³⁶

3.2.3 FTIR

Se caracterizaron a las pilotos de proceso con películas de SRO mediante espectrometría de infrarrojo con transformada de Fourier para conocer su espectro de absorción molecular y conocer sus modos de vibración asociados. Se realizó usando un espectrómetro Bruker Vector 22 con fuente en infrarrojo medio (MIR) en un rango de 400 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} con resolución de 4 cm^{-1} . Los datos fueron adquiridos y manipulados mediante computadora y software OPUS³⁷. En la figura 3.5 se muestra un esquema de funcionamiento del equipo.

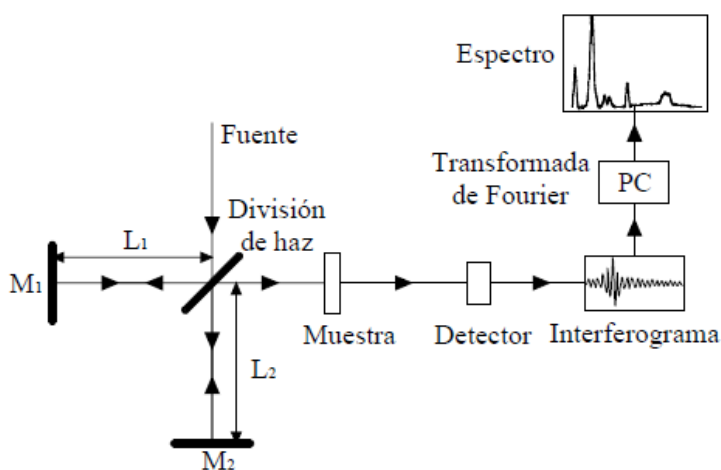


Figura 3.5 Diagrama esquemático de FTIR³⁷

3.2.4 Caracterización Fotoluminiscente.

Para obtener los espectros de emisión fotoluminiscente se usó un espectrofluorómetro Horiba Jobin Yvon Fluoromax 3. Se estimularon las muestras con fuente de luz continua con longitud de onda de 300 nm y se hizo un barrido en el detector de 370 nm a 1000 nm en incrementos de 1 nm . En la figura 3.6 se muestra un esquemático del sistema de medición.

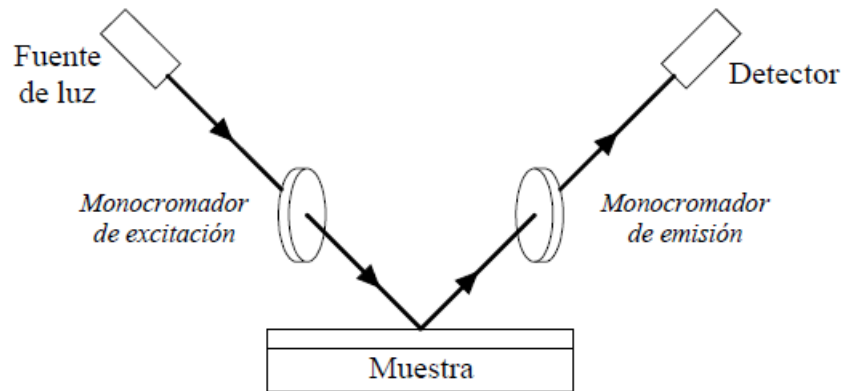


Figura 3.6 Diagrama esquemático de caracterización fotoluminiscente.³⁸

Para obtener los espectros de absorción se centra el detector a una longitud de onda correspondiente al pico máximo de emisión en el espectro visible que para el SRO se encuentra entre 720 nm y 800 nm dependiendo del exceso de silicio y se hace un barrido en longitudes de onda de 200 nm a 400 nm en el monocromador de la fuente para determinar las longitudes de onda que provocan los picos de emisión.

3.2.5 Corriente en función del voltaje

Para obtener las curvas de comportamiento eléctrico corriente contra voltaje se usó una fuente medidora Keithley 2400 en modo fuente de voltaje con medición de corriente, controlada mediante un módulo GPIB de National Instruments y un programa elaborado en LabView, polarizando por compuerta respecto al sustrato. En la figura 3.7 se muestra un esquema de conexiones para la medición.

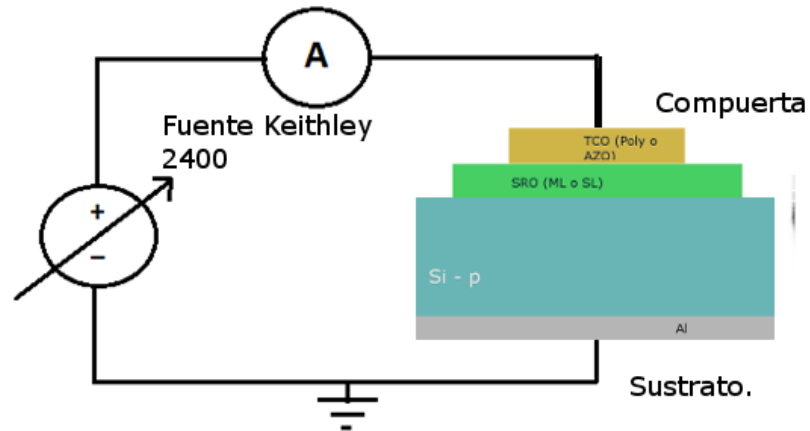


Figura 3.7. Diagrama esquemático para mediciones corriente vs voltaje.

3.2.6 Capacitancia en función del voltaje.

Para obtener las mediciones de capacitancia contra voltaje se utilizó un analizador de parámetros Keithley 4200-SCS usando un módulo CVU dedicado para medición capacitancia. El incremento de voltaje de DC se hizo a una razón de 0.2 V/s. La frecuencia fue 1 MHz y se aplicó una amplitud de 30 mV para la componente de AC. En la figura 3.8 se muestra un esquemático de las conexiones y diagrama de aplicación de voltaje y medición de voltaje y corriente.³⁹

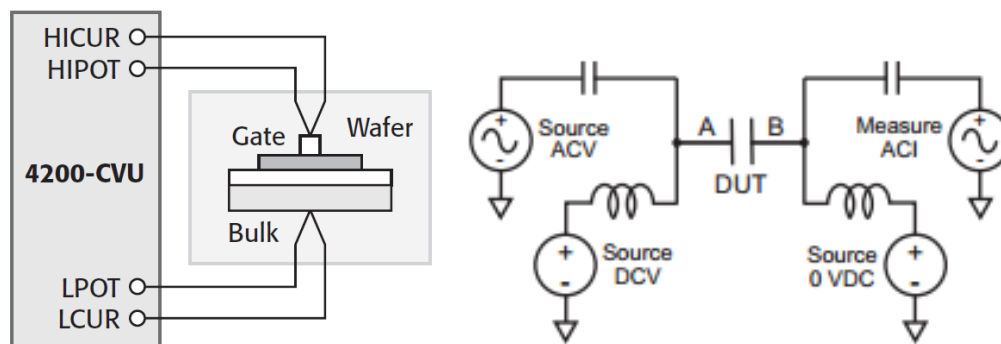


Figura 3.8. Diagrama esquemático para mediciones C-V.³⁹

3.2.7 Electroluminiscencia.

Para realizar las mediciones de electroluminiscencia, se colocó una fibra óptica separada de la compuerta del dispositivo aproximadamente 0.5 cm, la cual condujo la luz emitida hacia el espectrofluorómetro Flouromax 3. Se aplicó corriente directa (DC) mediante una fuente medidora Keithley 2400 al dispositivo y se barrió el monocromador en pasos de 3 nm en el rango de 370 nm a 1000 nm. En la figura 3.9 se muestra un diagrama esquemático de medición usando el espectrofluorómetro, la fuente medidora y la fibra óptica.

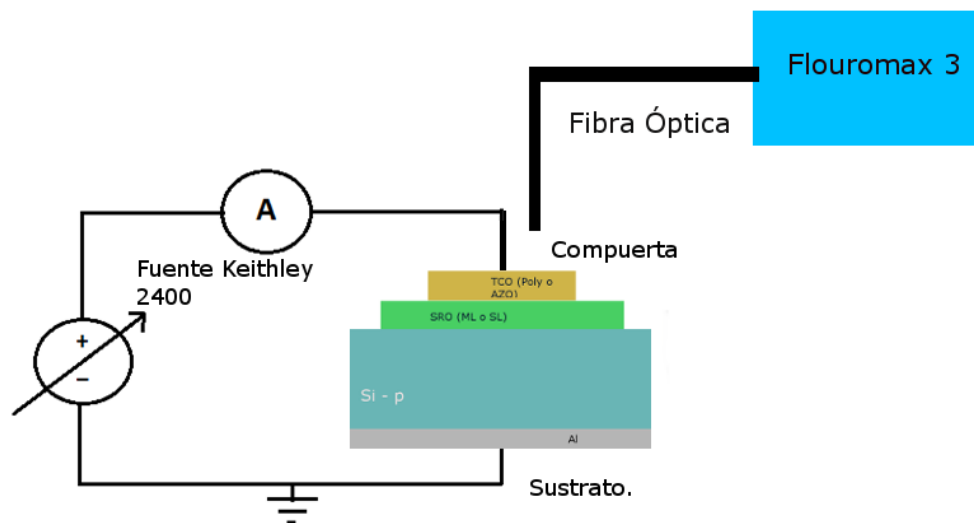


Figura 3.9. Esquema de medición para Electroluminiscencia.

4. Resultados Experimentales y Discusión

4.1 Texturizado de Sustratos

Se presentan los resultados de AFM para las superficies de las muestras Tex1, Tex2 y Tex3 tratadas previamente con RIE. Se obtuvieron imágenes tridimensionales de las superficies. Las condiciones de texturizado y diferentes parámetros estadísticos se muestran en la tabla 4.1.

4.1.1 Rugosidad de Área.

Para analizar la rugosidad de área, se hace uso de los parámetros estadísticos descritos en las formulas 4.1 a 4.7 para un área de dimensiones M y N y altura z, donde z es función de las coordenadas (x, y).⁴⁰

La tabla 4.1 presenta un resumen con los promedios de cada parámetro calculado

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l)| \quad (\text{Rugosidad Promedio}) \quad 4.1$$

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} (z(x_k, y_l))^2} \quad (\text{Rugosidad rms}) \quad 4.2$$

$$S_m = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_k, y_l) \quad (\text{Rugosidad media.}) \quad 4.3$$

$$S_p = \text{ValorMaximo} \quad (\text{Altura del Pico.}) \quad 4.4$$

$$S_v = \text{ValorMinimo} \quad (\text{Profundidad de Valle.}) \quad 4.5$$

$$S_y = S_p - S_v \quad (\text{Distancia Pico - Valle.}) \quad 4.6$$

$$S_{ds} = \frac{\text{Número de Picos}}{\text{Área}} \quad (\text{Densidad de Picos.}) \quad 4.7$$

Esta última cantidad (ecuación 4.7) está definida de forma que un pico es un máximo local, formado por al menos 8 puntos vecinos separados al menos el 1% de la extensión total en las dimensiones X o Y y por arriba de un umbral del 5% de la distancia entre pico y valle. En la figura 4.1 se esquematiza de forma gráfica esta definición.

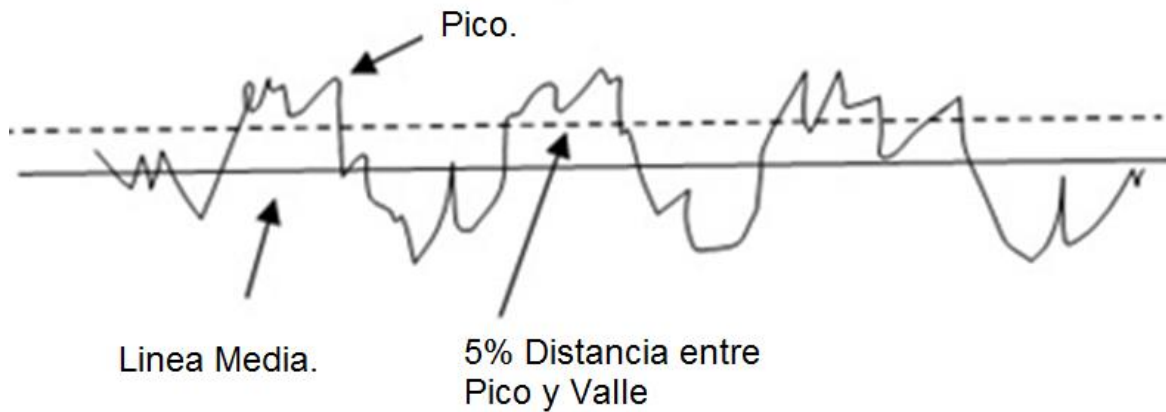


Figura 4.1. Definición de pico para el cálculo de densidad de picos.⁴¹

Tabla 4.1. Resumen de promedios estadísticos y variación para 3 niveles de rugosidad. La potencia fue de 100 W, la presión de 5 mtorr. Los gases usados fueron SF₆/O₂/CH₄ con la relación 30/10/4 sccm.

Muestra	Tiempo (minutos)	S _m (nm)	S _a (nm)	S _q (nm)	S _y (nm)	S _p (nm)	S _v (nm)	S _{ds} (1/μm ²)
Tex1	3.5	0.198 ± 0.102	2.4 ± 0.30	3.10 ± 0.33	27.76 ± 8.45	18.22 ± 6.78	-9.56 ± 2.18	9.61 ± 0.846
Tex2	35	1.06 ± 0.23	11.02 ± 1.46	13.76 ± 1.86	118.16 ± 9.33	48.66 ± 6.66	-69.5 ± 4.0	5.00 ± 0.14
Tex3	70	0.28 ± 0.08	10.01 ± 1.0	12.9 ± 0.8	86.80 ± 6.0	50.4 ± 0.8	-36.4 ± 5.2	3.77 ± 0.46

La densidad de picos muestra un comportamiento inversamente proporcional al tiempo de proceso, y la rugosidad en general tiende a crecer lentamente para un tiempo mayor al correspondiente a Tex2, mostrando una diferencia máxima de un 1 nm con la muestra Tex3 en su valor de rugosidad cuadrática.

En las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran imágenes tridimensionales de las superficies correspondientes a Tex1, Tex2 y Tex3.

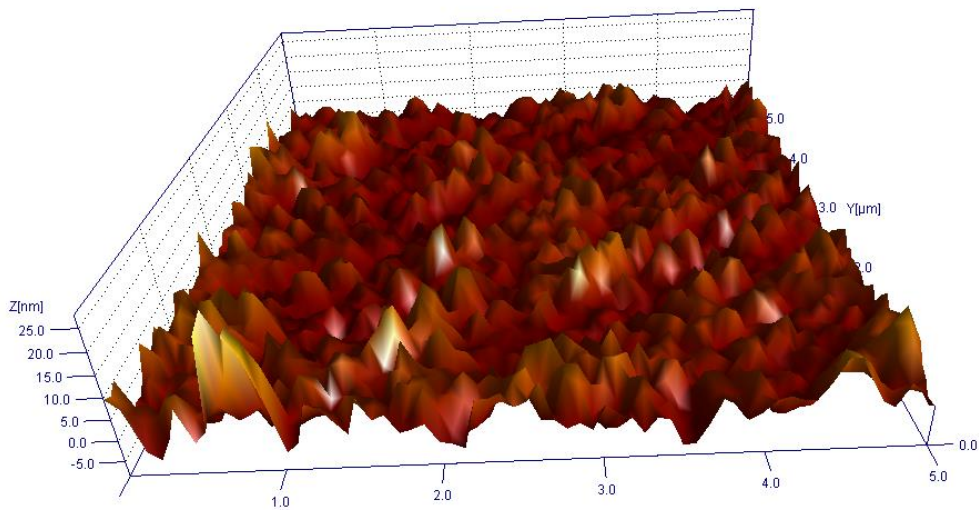


Figura 4.2. Relieve de la superficie en la muestra Tex1.

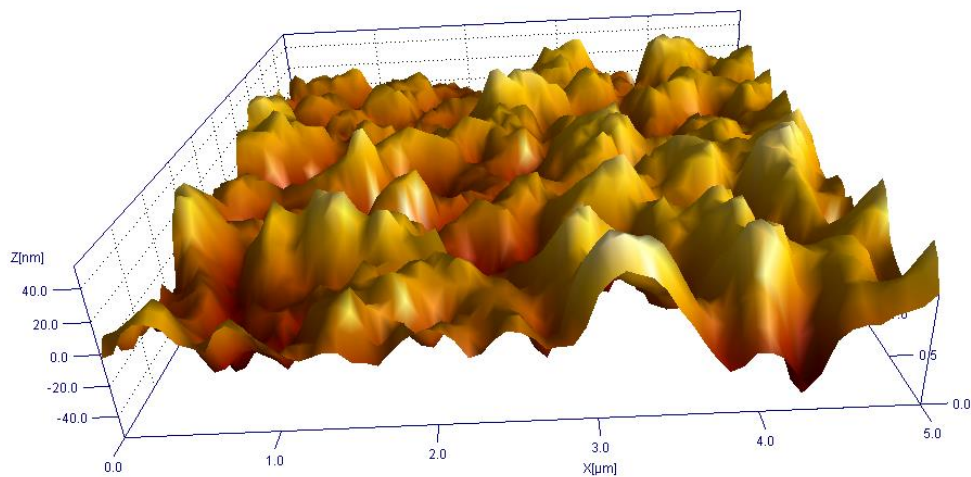


Figura 4.3. Relieve de la superficie para la muestra Tex2.

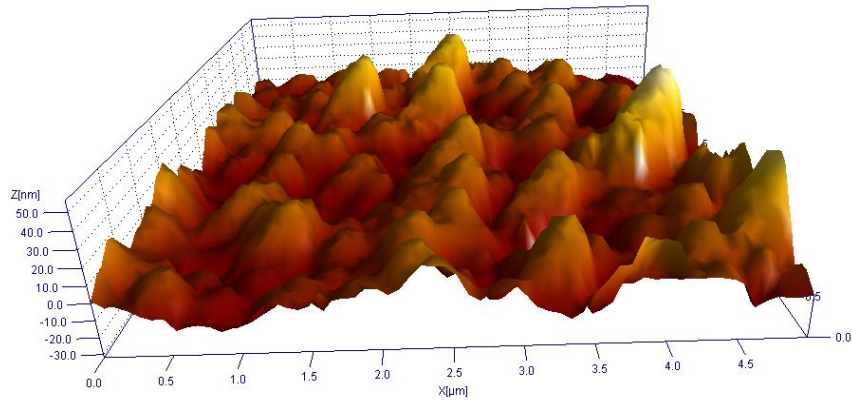


Figura 4.4. Relieve de la superficie para la muestra Tex3.

Las estadísticas confirman que para la muestra Tex1, con tiempo de 3.5 minutos, se forman estructuras afiladas con relativa mayor densidad de picos comparada con las superficies de mayor rugosidad promedio Tex2 y Tex3.

Al analizar la rugosidad en una línea de 5 μm , en diferentes muestras, se aprecia de igual forma que la densidad de picos en bajos niveles de rugosidad es más elevada respecto a los de mayor rugosidad promedio como se muestra en la figura 4.5.

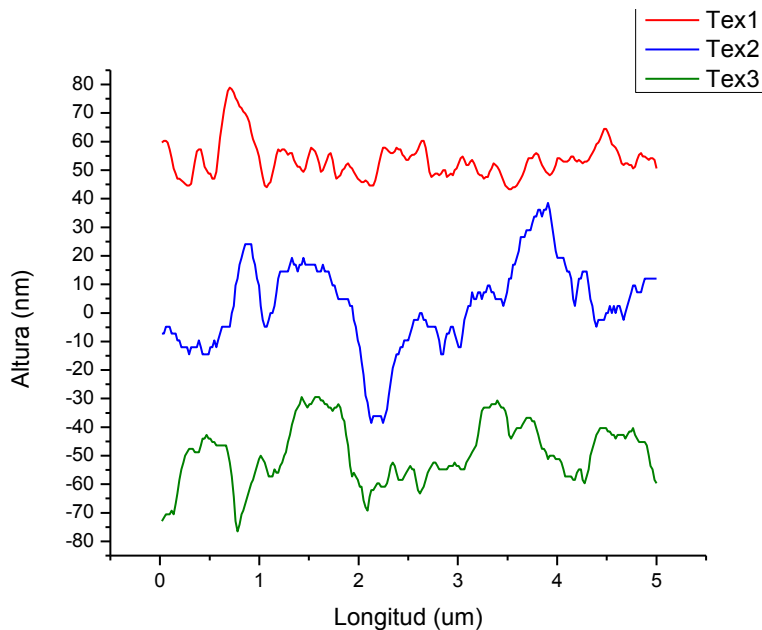


Figura 4.5. Altura de los picos en un corte bidimensional para las 3 muestras con diferentes tiempos de grabado.

Dado que el texturizado implica una competencia entre procesos de grabado y pasivación, puede pensarse que para ciertas condiciones de presión y flujo, en un determinado intervalo de tiempo, el proceso de grabado puede dominar a la pasivación, siendo el enmascaramiento inicial propiciado por el óxido nativo el que determina las estructuras iniciales. En otro intervalo de tiempo, la velocidad de grabado disminuye, empezando a equilibrar grabado y pasivación, dando como resultado un menor incremento en rugosidad promedio; para un tiempo muy elevado, la rugosidad promedio no crece notablemente, resultando en que el proceso llegue a un estado de saturación, en el cual la rugosidad no se ve incrementada. En este punto, ocurre un probable re depósito de residuo o elevada pasivación en los valles, impidiendo que se siga atacando la superficie, solo exponiendo los picos los cuales resultan suavizados por el grabado.⁴²

Además, los resultados estadísticos se pueden ver significativamente afectados por una poca cantidad de picos o valles elevados, dado que estos elevan el valor promedio de la rugosidad total. Sin embargo, si se tiene un mecanismo en el cual solo los picos se ven suavizados, dicho promedio disminuye, mientras que el resto de los puntos permanecen relativamente igual, resultando en un valor promedio más bajo, que puede sugerir conclusiones engañosas.

4.2 Caracterización Óptica de SRO

4.2.1 Elipsometría

En la tabla 4.2 se muestran los valores de espesor e índice de refracción para las películas de SRO obtenidas en la fabricación con y sin tratamiento térmico a 1100 °C por 180 minutos en atmósfera de nitrógeno. Se hicieron 5 mediciones por muestra. Las multicapas también se midieron por elipsometría. Ya se ha comprobado que está técnica es adecuada para medir las multicapas de SRO³¹. Para los detalles del proceso de fabricación se puede ver las tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 4.2. Valores de espesor e índice de refracción obtenidos mediante elipsometría.

Muestra	R ₀	Espesor (nm)	Índice de Refracción
P5	5/25	136.36 ± 8.1	2.11 ± 0.12
P7	25	79.86 ± 1.25	1.58 ± 0.01
P20 (No T.T)	20	86 ± 3.3	1.63±0.00
P20 (T.T 1100°C)	20	79.30 ± 0.4	1.63 ± 0.00
P2	30	78.3 ± 0.8	1.50 ± 0.00
P1	30	76.37 ± 0.47	1.49 ± 0.00
P6	20	71.26 ± 0.96	1.61 ± 0.00
P5A	20	69.46 ± 1.16	1.58 ± 0.01

La técnica de elipsometría está destinada a obtener el índice de refracción y espesor de una capa simple. Para SRO ML 5/25 se esperaba un índice aproximado de entre 1.8 y 1.9, pero resultó en un valor de 2.11. La rampa de enfriamiento en el horno aplicada a estas muestras pudiera haber promovido que esta última capa de óxido no se haya formado, aumentando el índice de refracción.

En la obtención de la muestra P20 se hizo un depósito para SRO20, con un espesor aproximado de 80 nm y un índice de refracción de 1.60. Esta película se obtuvo sin realizar enfriamiento en horno después de tratamiento térmico. Los resultados demostraron que la razón de depósito no varió significativamente, teniendo el espesor una desviación no mayor a 6 nm respecto al valor esperado. Sin embargo el índice de refracción resultó elevado a un valor de, 1.63, lo que indica que exceso de silicio pudiera ser más alto (R₀ entre 20 y 10)⁴³.

Las muestras P1 y P2 corresponden a una película de SRO30 y las muestras P5A y P6, a una de SRO20, con valores esperados de 1.49 y 1.61, y espesor de 80 nm. Los depósitos fueron realizados posteriormente a ajustes en las condiciones de depósito del horno LPCVD. Los valores resultantes para las películas de SRO30 estuvieron dentro de lo esperado, no así para las muestras de SRO20,

donde el depósito resultó con un espesor de 70 nm, por debajo de los 80 nm esperado, variando el índice de refracción posterior al tratamiento térmico.

4.2.2 Fotoluminiscencia

En la figura 4.6 se muestran los espectros de emisión fotoluminiscente para las muestras P5 y P7. Para obtener los espectros de emisión, se estimularon las muestras con luz de una longitud de onda de 300 nm y haciendo un barrido en el detector de 370 nm a 1000 nm en incrementos de 1 nm.

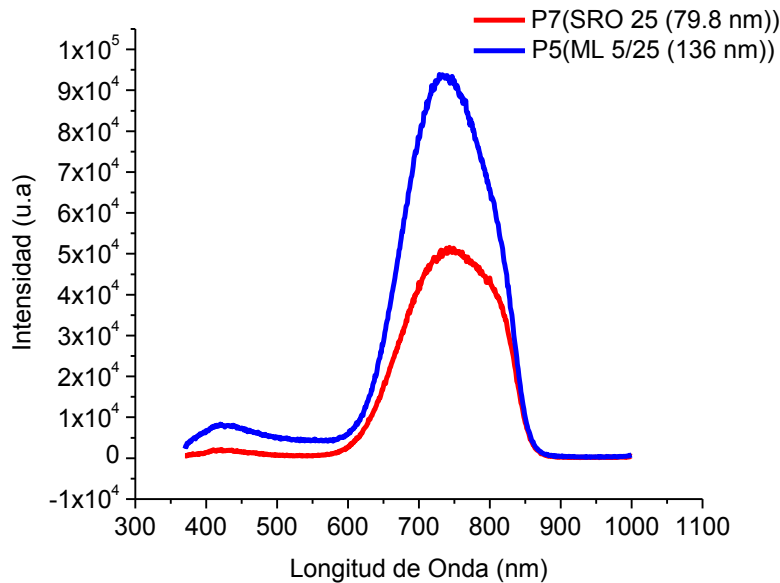


Figura 4.6. Fotoluminiscencia. Muestras P7 y P5. Multicapa y Monocapa.

El pico máximo de emisión se localizó alrededor de los 745 nm, con un espectro amplio de 600 nm a 850 nm. La emisión es característica del SRO, incluyendo los pequeños picos entre 445 nm y 450 nm⁴⁴²⁵.

Para encontrar el espectro de excitación se centró el detector en 745 nm, haciendo un barrido en la fuente de 200 nm a 400 nm. La figura 4.8 muestra los espectros de emisión fotoluminiscente para las muestras P20, P1, P2, P5A y P6.

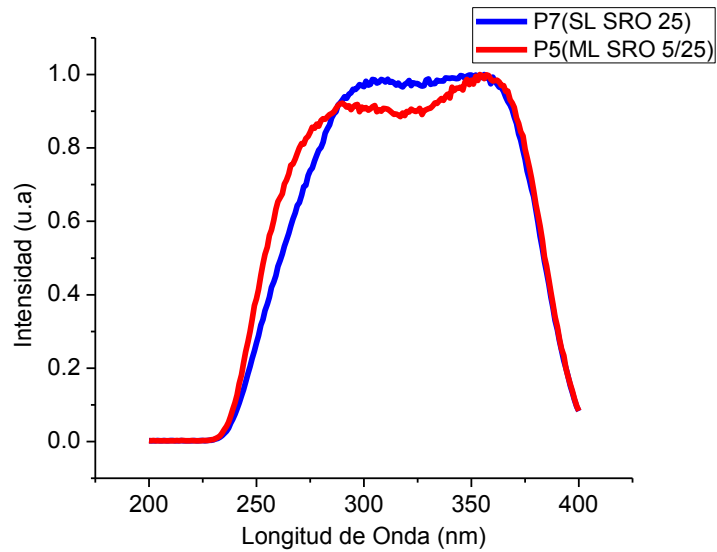


Figura 4.7. Espectro de excitación luminiscente. Centrado a 745 nm.

Los espectros de absorción exponen que en las muestras P5 y P7 se puede obtener alta emisión a 745 nm si son estimuladas con longitudes de onda entre 280 nm y 380 nm. Se observan además dos picos de absorción, uno entre 270 nm y otro a 355 nm.

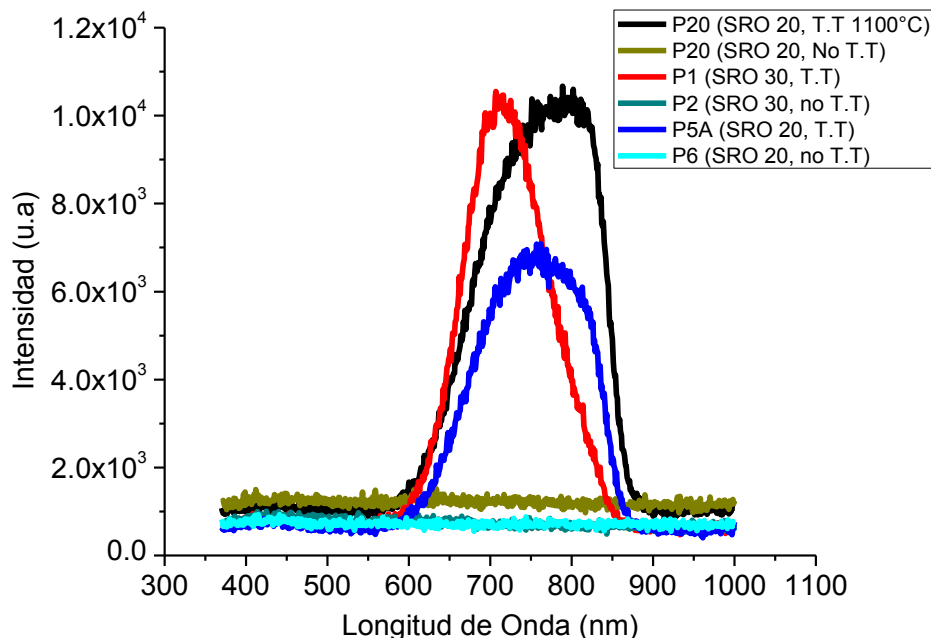


Figura 4.8: Emisión Fotoluminiscente: Muestras P20, P1, P2, P5A, P6, antes y después de Tratamiento térmico 1100°C; $\lambda_{excitación} = 300 \text{ nm}$.

Para la muestra P20 con SRO20, el máximo de emisión se encontró a una longitud de onda de 788 nm. En las muestras P1 y P2, con SRO 30 el máximo se situó en 710 nm; Para P5A con SRO 20, en 750 nm.

Relacionando el resultado de elipsometría con los de fotoluminiscencia, para la muestra P20, se comprueba nuevamente que la película resultante corresponde a una R_0 menor al esperado pero dentro del rango de variación aceptable. Ya que se ha observado que el índice de refracción aumenta conforme disminuye la R_0 , y el máximo de emisión se desplaza a valores ligeramente mayores de longitud de onda.^{18, 44}

Respecto a las muestras P1, el máximo de emisión se encuentra 10 nm abajo del valor esperado (720 nm). Es posible que falta de precisión en el ajuste fino de la presión de Silano en la cámara haya resultado en un R_0 ligeramente mayor a 30.

4.2.3 FTIR

Se obtuvieron espectros de FTIR para las películas monocapa SRO 25 y multicapa 5/25 con tratamiento térmico. En la figura 4.9 se presenta el espectro obtenido en un rango de 4000 cm^{-1} a 2000 cm^{-1} .

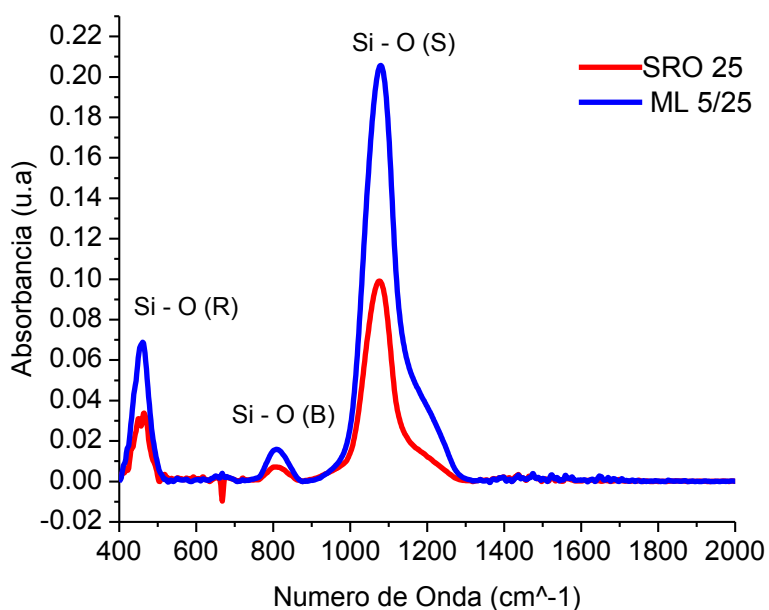


Figura 4.9. Espectros FTIR para monocapa y multicapa con tratamiento térmico.

Se aprecian los 3 picos característicos asociados a los modos de vibración de los enlaces Si – O, balanceo (R), doblamiento (B) y Estiramiento (S), ya reportados anteriormente ^{45, 20}.

En la tabla 4.3 se muestran las posiciones de los 3 máximos de absorción.

Tabla 4.3 Ubicación de los máximos de absorción (cm⁻¹)

Muestra	Balanceo (R)	Doblamiento (B)	Estiramiento (S)
P7	455	805	1075
P5	460	808	1078
P20 (No T.T)	450	808	1058
P20 (T.T 1100°C)	459	806	1076
P1	456	808	1076
P2	452	810	1058
P5A	456	806	1074
P6	450	808	1058

Los valores encontrados son típicos del SRO ^{20, 45}. Se observa que la posición del máximo para el modo de vibración estiramiento (S) se desplaza a un valor de número de onda mayor después del tratamiento térmico.⁴⁶

4.3 Caracterización Eléctrica de Dispositivos.

4.3.1 Corriente en función del voltaje.

4.3.1.1 Dispositivos Poly/SRO / Si -p / Al.

La primera parte de esta caracterización consistió en obtener las gráficas I-V para los dispositivos monocapa y multicapa con compuerta de polisilicio. El barrido de voltaje se realizó a una razón de 2 V/s. En cada grafica se etiquetan las mediciones realizadas, el sentido y el orden en el que se realizaron. Se hicieron 5 mediciones por muestra, las cuales se muestran en forma semilogaritmica. Los detalles de las muestras se pueden ver en la tabla 3.2.

Las figuras 4.10 y 4.11 muestran las curvas corriente en función del voltaje para la muestra P1-1 con la estructura Poly /ML /Si, en los que las multicapas de SRO tienen un espesor total de 136 nm y el sustrato rugoso con texturizado 1.

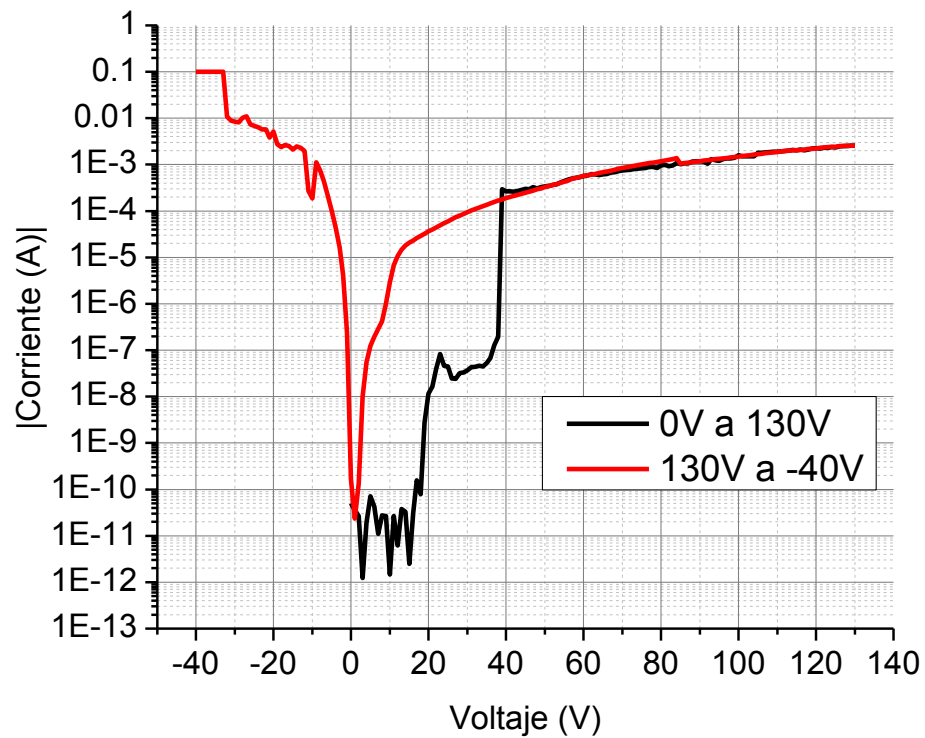


Figura 4.10. Curva I – V del dado 1 de la muestra P1-1 con Poly/ML y texturizado 1.

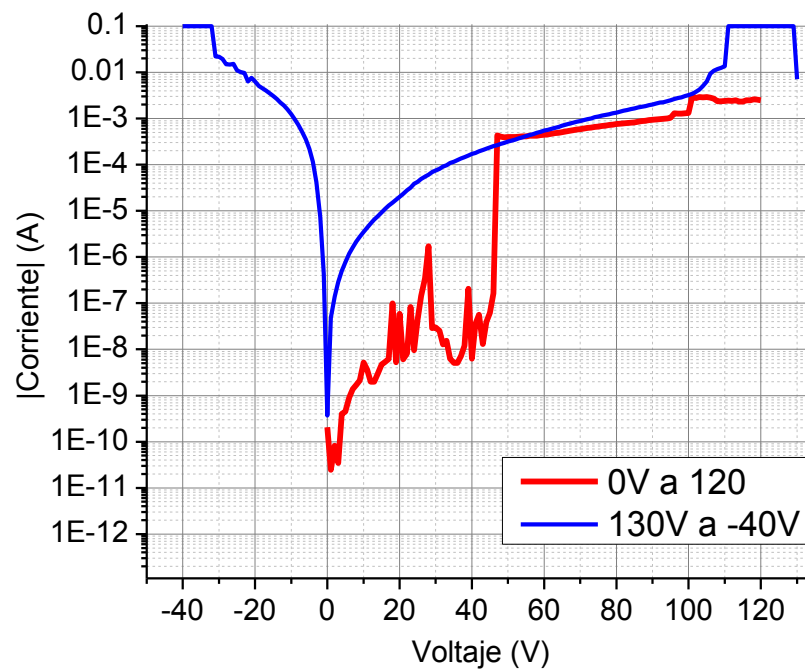


Figura 4.11 Curva I – V del dado 2 de la muestra P1-1 con Poly/ML y texturizado 1.

Para el dispositivo P 1-1, se encontró un régimen de baja corriente en el orden de nanoamperes en voltajes menores a 45 V, después de lo cual el dispositivo se rompe. Como se puede ver en la figura 4.11, la curva roja antes de 45 V tiene variaciones de corriente muy claras que llamamos “brincos de corriente”, tras los cuales el dieléctrico rompe. Sin embargo, en este régimen de alta conducción todavía la corriente mantiene una relación no lineal con el voltaje. Posteriormente, existe otro rompimiento en el cual la corriente aumenta demasiado y alcanza 100 mA que es el límite de la fuente. Se observó electroluminiscencia por puntos cerca de los 100V.

De manera similar en la figura 4.10, hasta 18 volts la corriente es del orden de los nA, y después hay un “rompimiento” y la corriente aumenta hasta cerca de 10^{-7} A, al alcanzar los 38 volts vuelve a “romper”. Esto podría indicar que el SRO en algunos puntos, donde los picos son muy altos, es más delgado y el rompimiento va ocurriendo en función del grueso entre el pico y la compuerta de polisilicio.

En las figuras 4.12 y 4.13 se muestran los resultados obtenidos para la muestra P1-3. A diferencia de la P1-1 ahora se tiene una monocapa de SRO25 con un espesor de 80 nm y el mismo texturizado 1.

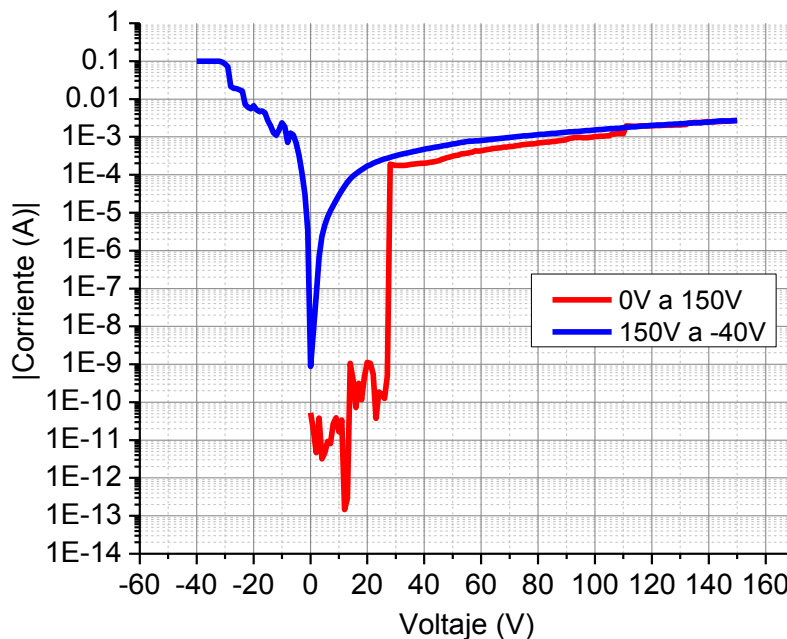


Figura 4.12 Curva I – V. Muestra P1-3: LEC Poly/SRO25, con texturizado 1.

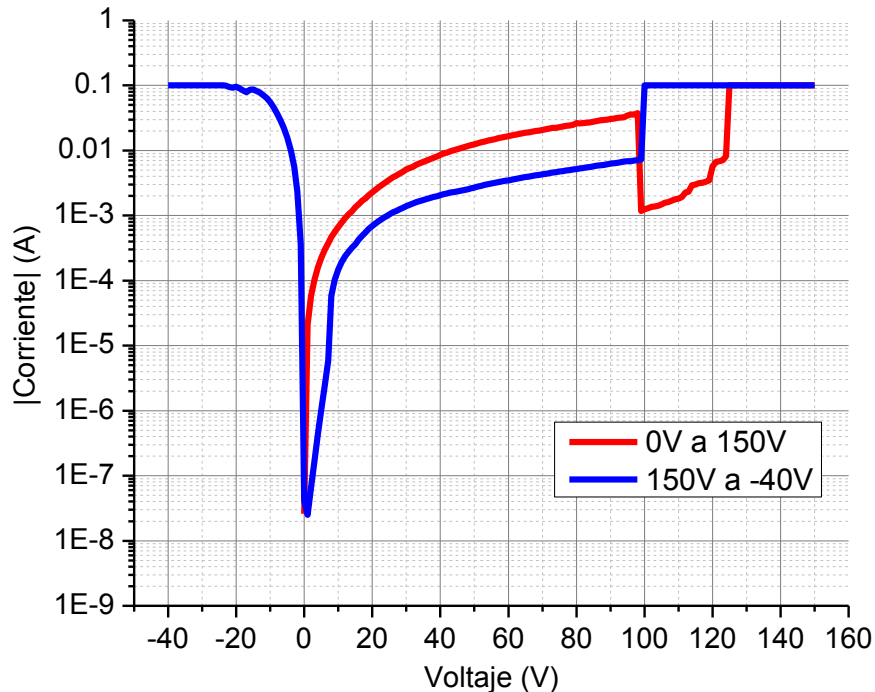


Figura 4.13 Curva I – V. Muestra P1-3: LEC Poly /SRO25, con texturizado 1.Dado 2.

Para la muestra P1- 3 de la figura 4.12, se polarizó ascendentemente desde 0 V hasta 150 V. Mantuvo una corriente baja de pocos nanoamperes hasta que se rompió a 30V. Aun cuando el dieléctrico rompió, se observó electroluminiscencia por puntos (no de área completa) a un valor cercano a 65 V, con una corriente alrededor de 15 mA. Incrementándose la densidad de puntos luminiscentes conforme aumentaba el voltaje. Al alcanzar 100 V el dispositivo deja de emitir. Aparentemente hay una segunda ruptura y se destruye el dieléctrico. Al hacerse el barrido descendente, no se observa emisión, probablemente debido a que el dieléctrico se destruyó. Es interesante notar que después del primer rompimiento la corriente aumenta lentamente con el voltaje, es decir a pesar de este rompimiento el dieléctrico sigue controlando la corriente. También se debe notar que originalmente el mínimo de la corriente a bajos voltajes esta desplazada de cero volts, probablemente debido al atrapamiento de carga en el SRO. En las

siguientes mediciones la corriente más baja corresponde a 0 volts, confirmando la destrucción del SRO.

La corriente del dado 2, mostrada en la figura 4.13, crece muy rápido con el voltaje desde el inicio, como si se hubiera roto el dieléctrico. Sin embargo, al llegar a los 15 volts la pendiente se reduce y el SRO ahora controla la corriente. De manera similar a la primera ruptura observada en el dado 1. También, como el dado 1, se observó a simple vista emisión luminiscente en puntos dispersos a los 65 V, con la corriente cercana a 15 mA. Cerca de los 100 V existe una disminución significativa de la corriente en aproximadamente 2 órdenes de magnitud, posiblemente debido al calentamiento de la punta de prueba por manejar mucha corriente, seguramente ocurre el segundo rompimiento y deja de emitir. En el voltaje descendente no se observó emisión. Por inspección visual se pudo comprobar daño en la compuerta en el área de contacto.

En las figuras 4.14 y 4.15 se muestran las curvas de corriente contra voltaje para la muestra P2-1 con texturizado 3 y multicapa.

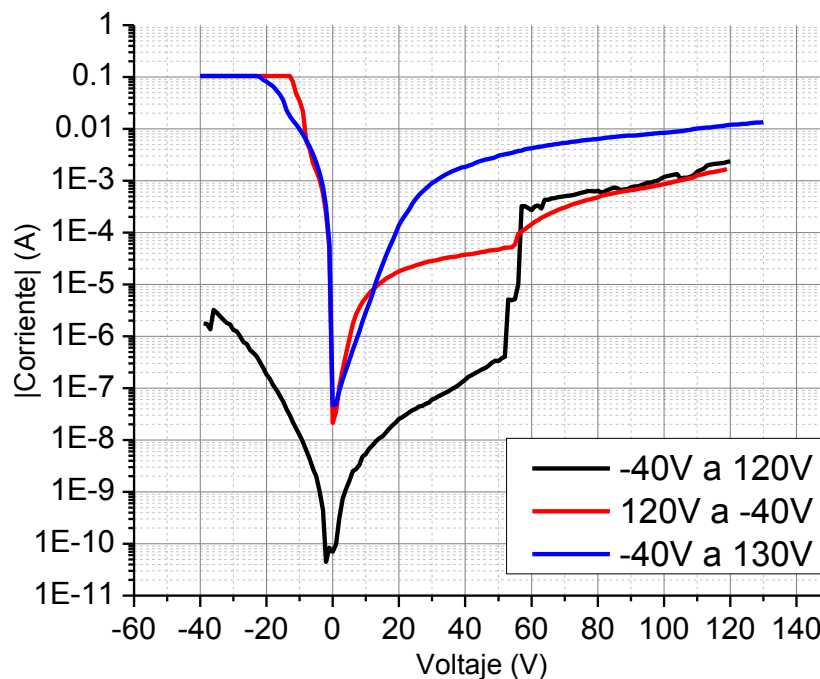


Figura 4.14 Curva I – V. Muestra P2-1, dado 1: Poly /ML con texturizado 2.

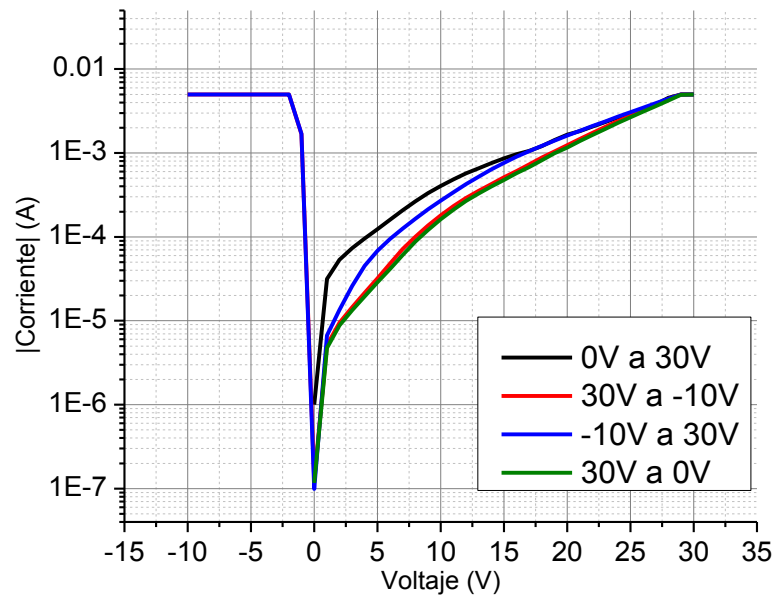


Figura 4.15. Curva I – V. Muestra P2-1: LEC Poly N/ML, con texturizado 2. Dado 2.

En las figuras 4.16 y 4.17 se muestran las curvas de corriente en función del voltaje para la muestra P2-3 (Poly /SRO 25/ Tex2)

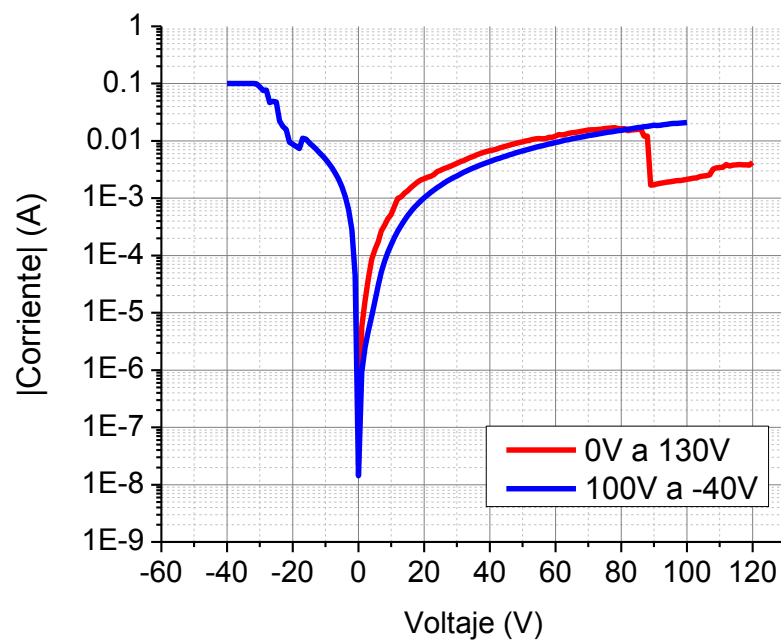


Figura 4.16. Curvas I – V. Muestra P2-3: LEC Poly /SRO25, con texturizado 2. Dado 1.

En el caso del texturizado 2, el comportamiento de la corriente es similar al del texturizado 1. Sólo que en este caso el primer cambio de corriente ocurre a 5 volts como se ve en la figura 4.17. En este caso se observó emisión visible por puntos a partir de 20 V y una corriente de 1 mA. Al incrementarse a un voltaje en el rango de 80 V a 100 V se alcanza la ruptura, observándose una caída de corriente con pérdida de la emisión. Es decir, el texturizado 2 provoca que se alcancen los mismos fenómenos que el texturizado 1, pero a voltajes menores.

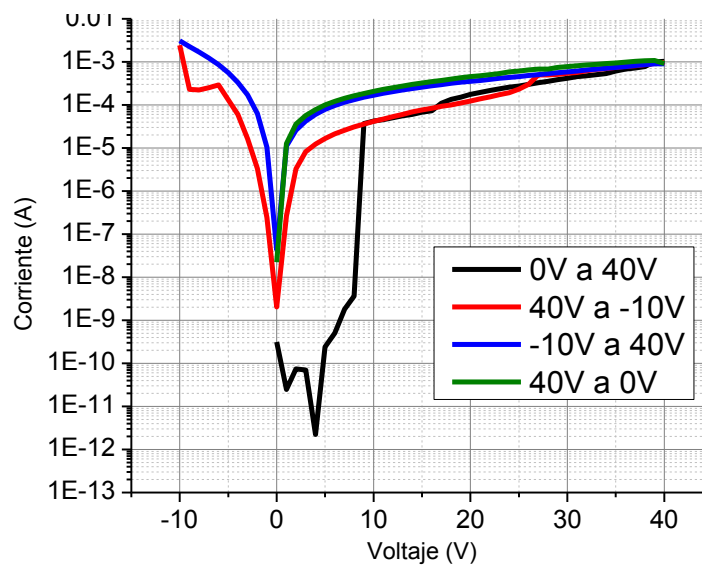


Figura 4.17. Curvas I – V. Muestra P2-3: LEC Poly /SRO25, con texturizado 2. Dado 2.

Las figuras 4.18 y 4.19 muestran las curvas de corriente en función del voltaje para los dispositivos P3-1, con espesor total de SRO de 136 nm y el nivel de texturizado correspondiente a Tex3.

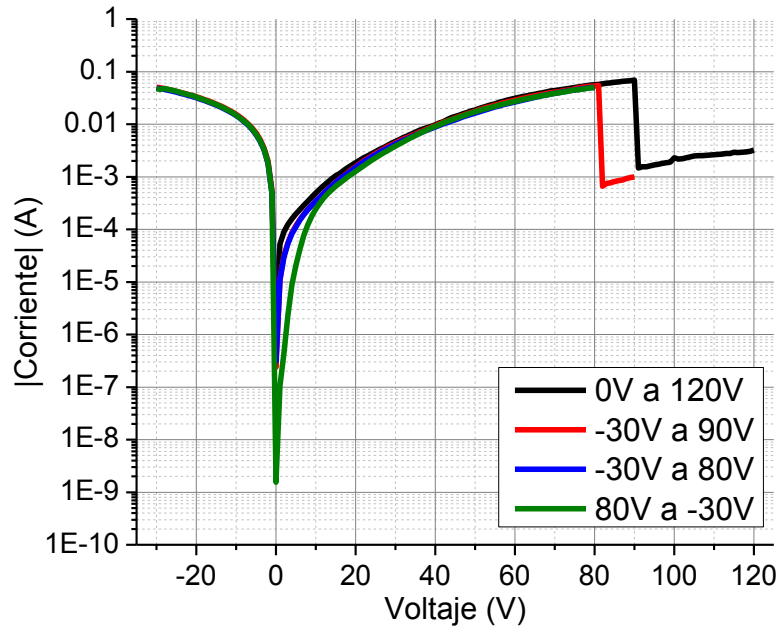


Figura 4.18. Curva I – V. P3-1: LEC Poly /ML /Tex3. Dado 1

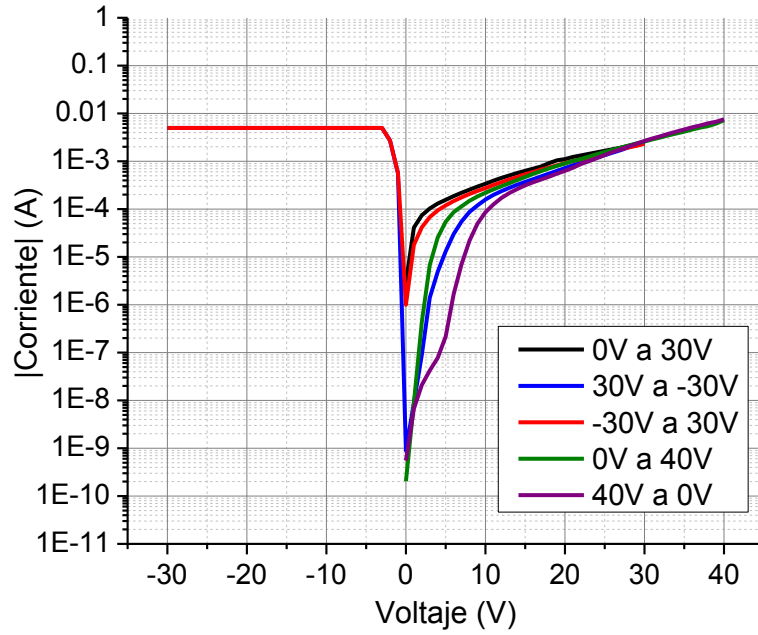


Figura 4.19. Curva I – V. P3-1: LEC Poly /ML /Tex3. Dado 2

En las figuras 4.20 y 4.21 se muestran las curvas de corriente y voltaje para los dispositivos P3-3, con espesor total de óxido de 80 nm y el nivel de texturizado 3.

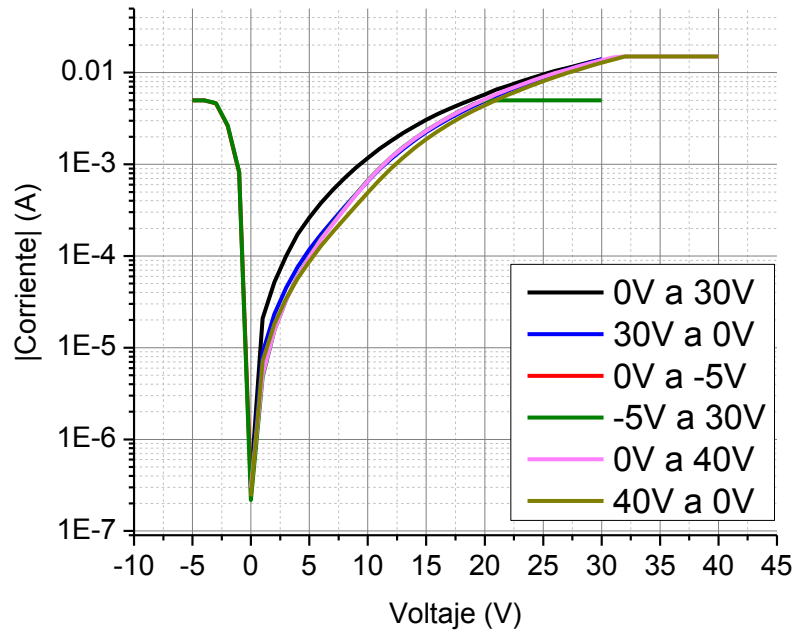


Figura 4.20. Curva I – V. P3-3: LEC Poly /SRO 25/Tex3. Dado 1.

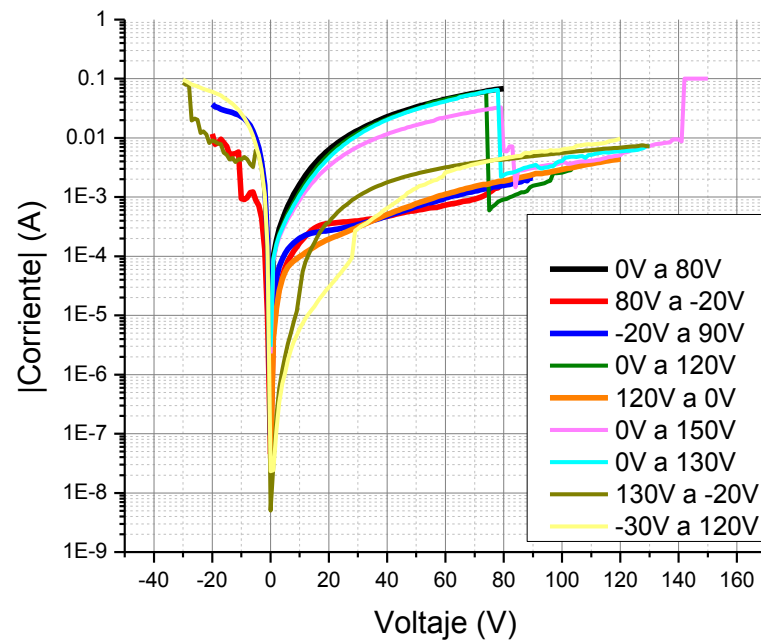


Figura 4.21. Curva I – V .P3-3: LEC Poly /SRO 25/Tex3. Dado 2.

En las curvas de corriente contra voltaje mostradas en las figuras 4.10 a la 4.21 el comportamiento eléctrico más repetido resultó alejado del de un capacitor tipo MOS con SRO¹³. Esto da evidencia de que pueden existir contactos directos entre el sustrato y la compuerta en algunos puntos, probablemente propiciados por los picos formados en el texturizado, o caminos conductivos consecuencia de una muy alta densidad de defectos en el óxido.

4.3.1.2 Dispositivos Al/SRO/Si-p/Al.

Se fabricaron y caracterizaron eléctricamente dispositivos Al/SRO20/ Si-p/Al, de 80 nm y sustrato pulido. Variando parámetros del proceso para descartar que los cambios observados en la corriente de los dispositivos se deba efectivamente al texturizado. Los parámetros de proceso analizados se muestran en la tabla 3.2.

Los factores de proceso que se estudiaron fueron:

1. La formación de óxido estequiométrico en la superficie de las muestras debido al choque térmico al sacar las obleas de los hornos calientes. En la tabla 3.2 este factor se marca como “enfriamiento.”
2. La limpieza RCA contra un desengrasado usando sólo solventes. En la tabla 3.2 este factor se enlista como “RCA.”
3. El Tratamiento térmico a 1100 °C durante 3 horas. En este caso se usa T.T para distinguirlo en la tabla 3.2.

Los resultados obtenidos en todos estos casos muestran las curvas características por lo que no se encontró anomalías debidas al proceso. A continuación sólo mostramos un par de curvas correspondientes a las muestra I y 02.

La figura 4,22 y 4.23 muestra la corriente de los dispositivos de la muestra I y 02. La característica de estas muestras, como se puede observar, es que la corriente se mantiene baja a bajos voltajes, y después alcanza el régimen de alta conducción como es esperado en estos dispositivos⁴⁷, lo que indicaría que el tener altas corrientes desde el inicio se debe al texturizado.

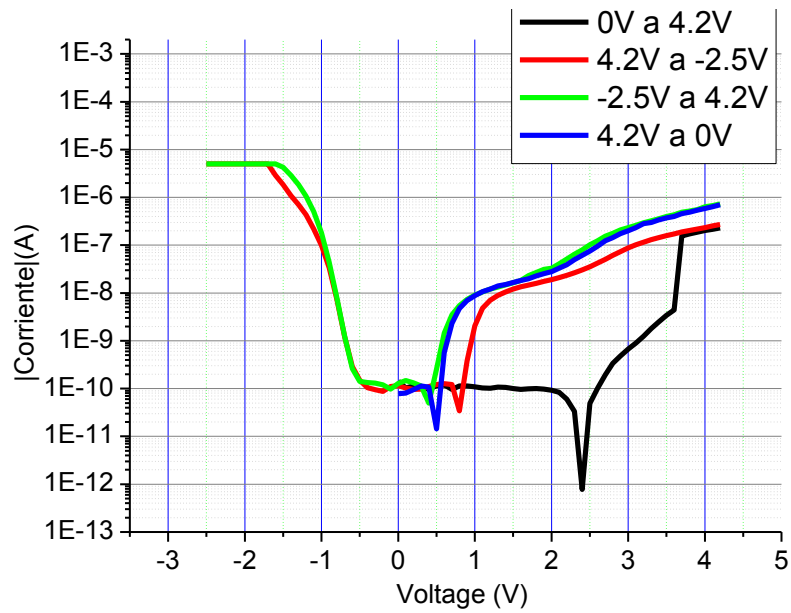


Figura 4.22. Muestra I: Al/SRO20/Si-p/Al. RCA y T.T 1100°C, 180 minutos, sin enfriamiento. Espesor 80 nm.

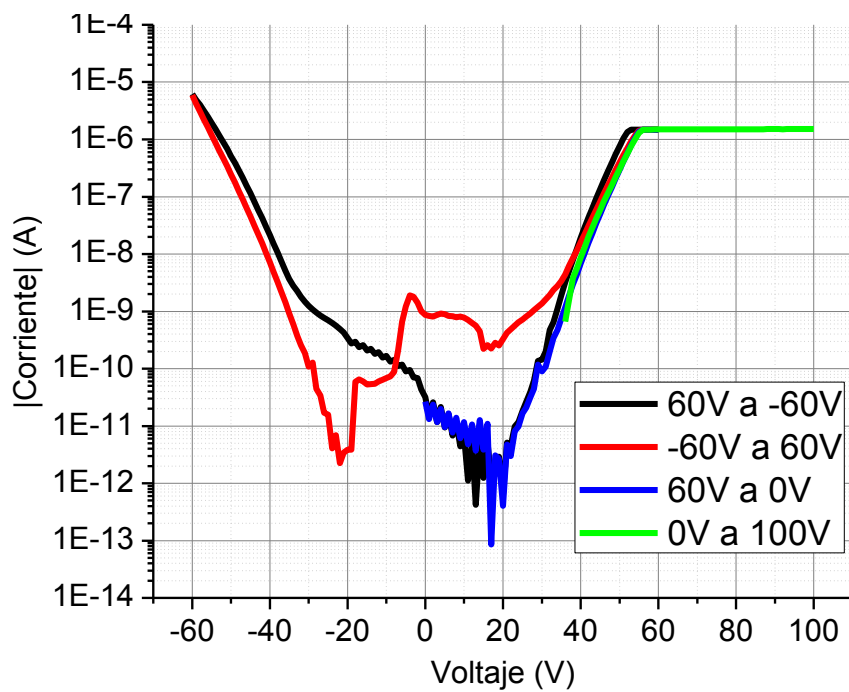


Figura 4.23. Muestra 02: Al/SRO30/Si-p, grabado de óxido nativo sin Tratamiento Térmico.

4.3.2 Capacitancia en función del Voltaje.

4.3.2.1 C – V Poly /SRO/Tex

En las figuras 4.24 a 4.27 se presentan algunas curvas C-V para dispositivos con polisilicio, P1-3, P2-1 y P3-1. Al aplicar 10 V de voltaje durante 3 minutos para cargar las trampas, en la mayoría de los casos no se observó un desplazamiento significativo de la curva por la existencia de trampas o cargas atrapadas. Esto posiblemente se debe a la gran corriente de fuga mostrada por estas muestras, (ver figura 4.13). Sin embargo, la muestras con texturizado 3 (figura 4.26) el desplazamiento es notable.

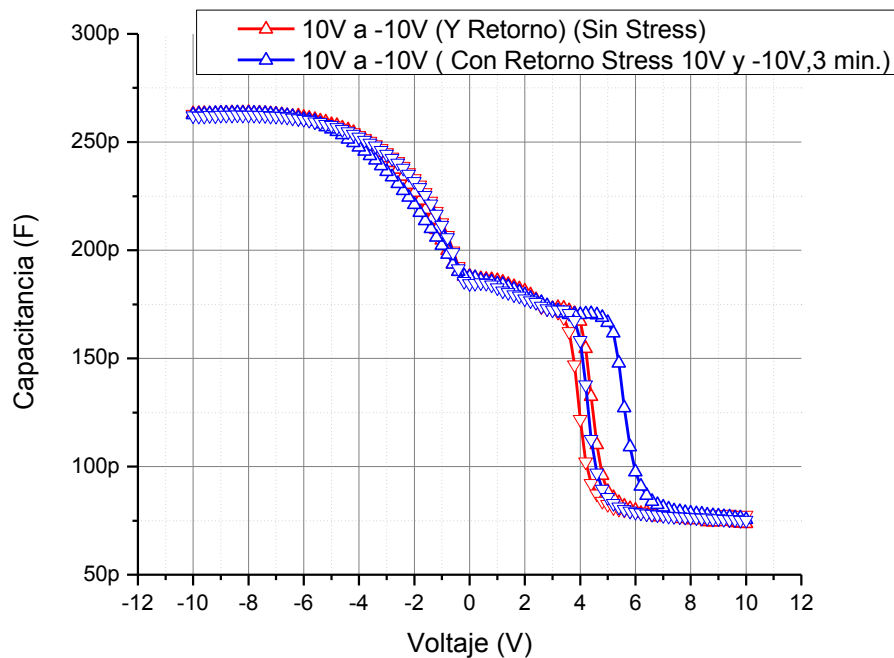


Figura 4.24. Curvas C – V Muestra P1-3: Poly/SRO25/Tex1,

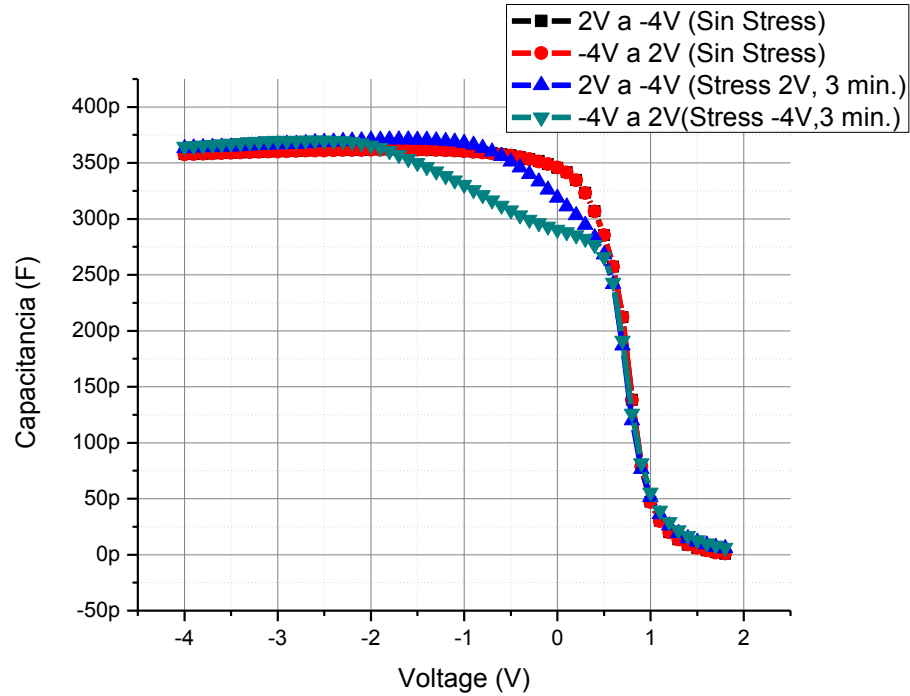


Figura 4.25. Curvas C-V Dispositivo P2-1: Poly / ML /Tex2.

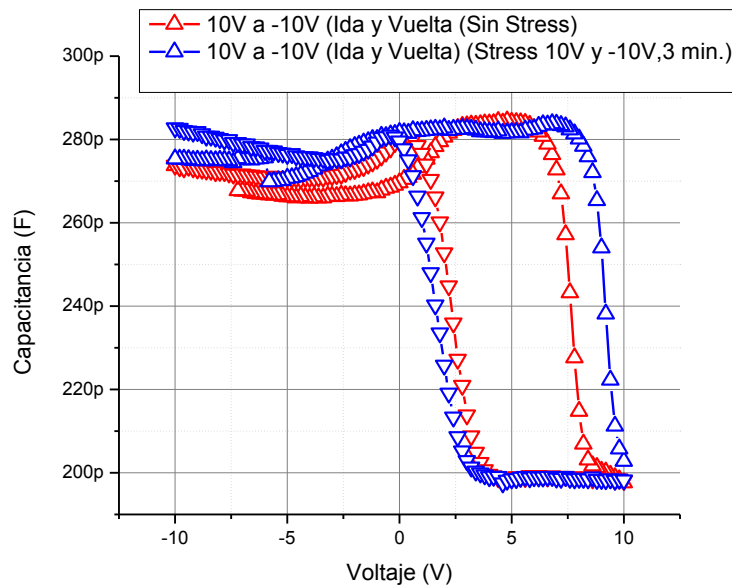


Figura 4.26. Curvas C-V Dispositivo P3-1: Poly /ML /Tex3.

La capacitancia máxima o de acumulación se puede calcular a partir de la ecuación 4.8, donde K_{SRO} es la constante dieléctrica del material en este caso SRO, basados en ³¹ y ²⁷ esta tiene un valor de 4.1; A el área de la compuerta que

fue medida con microscopía óptica y tiene un valor de 0.0895 cm^2 ; t_{SRO} , el espesor de óxido, que para multicapas 5/25 obtenido por elipsometría tiene un valor de 136 nm.

$$C_{\text{SRO}} = K_{\text{SRO}} \varepsilon_0 \frac{A}{t_{\text{SRO}}} \quad (4.8)$$

La capacitancia teórica fue de 2388 pF. Al comparar con los valores de capacitancia máxima obtenidos en las diferentes curvas, tanto para multicapas como monocapas, con un valor entre 260 pF y 365 pF, se puede suponer que la existencia de rugosidad y defectos en el óxido han generado trayectorias de baja resistencia, incrementando la corriente de fuga y en consecuencia la disminución de la capacitancia.

4.3.2.2 C-V Al/SRO/Si-p/Al.

En las figuras 4.27 y 4.28 se muestran las curvas de capacitancia voltaje para los capacitores Al/SRO/Si-p/Al, con sustrato pulido, SRO30 (muestras 01, 02, 03 y 04), SRO 20 (muestras 05, 06, 07 y 08), con espesores de 80 nm y 70 nm respectivamente.

La figura 4.27 muestra la curva de capacitancia contra voltaje para los capacitores con SRO30. La capacitancia máxima o de acumulación se encontró entre 700 pF y 800 pF. La capacitancia mínima está cerca de 150 pF. Un cálculo idealizado de capacitancia máxima se aproxima a 650 pF.

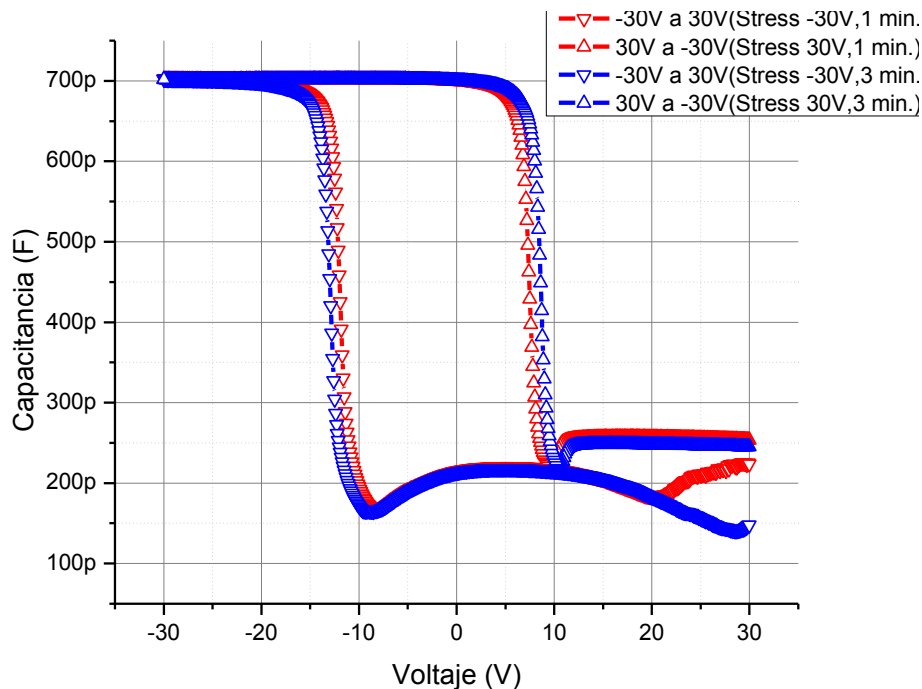


Figura 4.27. C-V Al/SRO30/Si-p/Al, grabado de óxido nativo sin tratamiento térmico.

La figura 4.28 muestra el comportamiento encontrado para los dispositivos con SRO20. Nótese que la capacitancia máxima resulta mayor al mostrado en la figura 4.27, que corresponde al caso con SRO30 (Muestras 01, 02, 03, 04). En estos capacitores, la capacitancia máxima se encontró alrededor de 850 pF a 950 pF y la capacitancia mínima entre 200 pF y 250 pF. Se mostró en la sección de elipsometría que el espesor obtenido resultó en 70 nm. Usando t_{SRO} igual a 70 nm, K_{SRO} igual a 4.1 y el área igual a 0.015 cm^2 , se obtuvo un valor máximo de 777 pF.

Las muestras 05, 06, 07 y 08 también se midieron y se obtuvieron los resultados para un capacitor de este tipo, como el mostrado en la figura 4.39. Las variaciones de proceso no mostraron cambios significativos en las curvas C-V, confirmando que la causa de la disminución de capacitancia e incremento en la corriente se debe al texturizado.

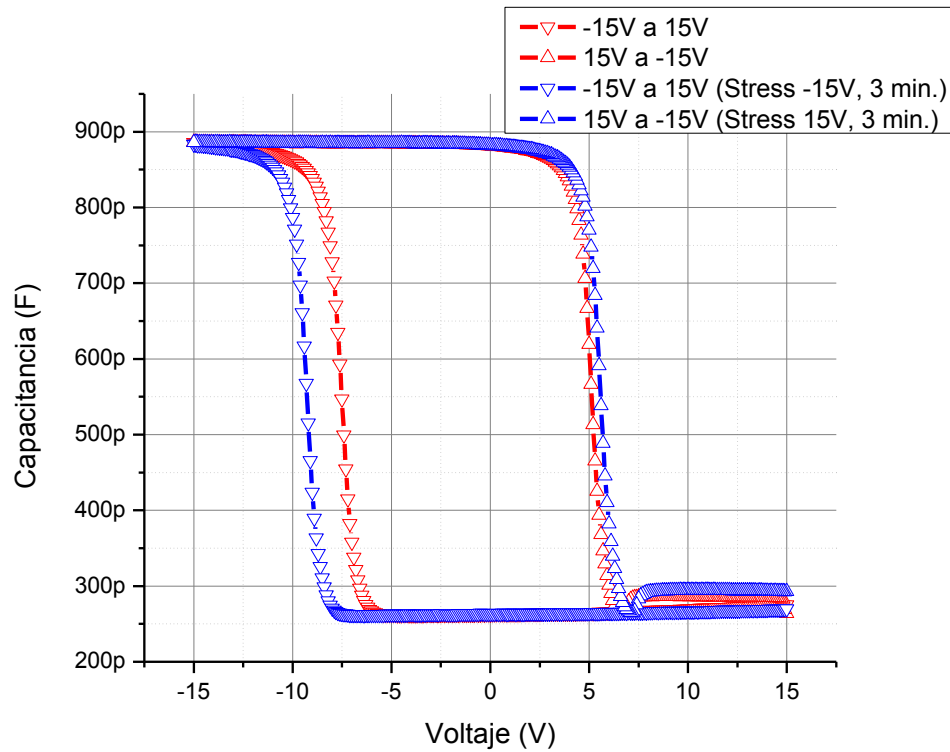


Figura 4.28. C-V .Al/SRO20/Si-p/Al. Grabado de óxido nativo y tratamiento térmico.

4.3.3 Electroluminiscencia

Los dispositivos mostrados en las figura 4.29, 4.30 y 4.31 corresponden a las muestras P1-3, P2-3, P3-3, los cuales son dispositivos monocapa de SRO25 con sustrato tipo P y compuerta de Polisilicio N+, con los 3 niveles de rugosidad descritos en la sección 4.1. Se midieron 3 dispositivos por oblea, y se muestra la curva típica.

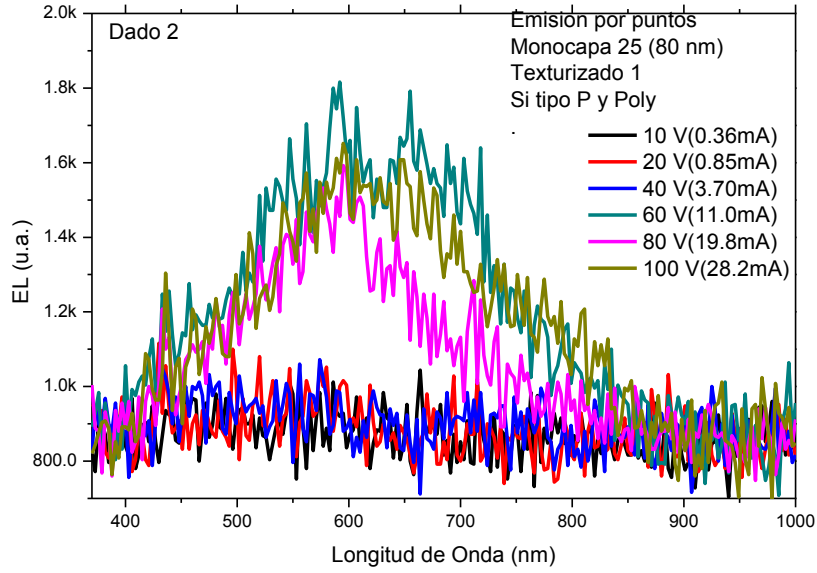


Figura 4.29. Emisión Electroluminiscente Muestra P1-3: Poly /SRO 25/ Tex1.

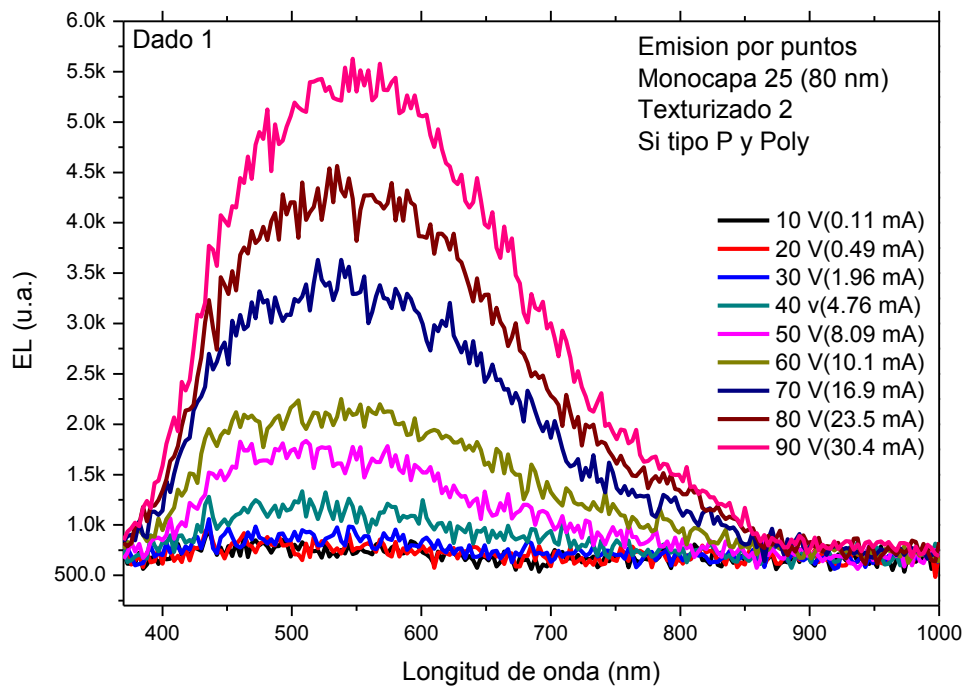


Figura 4.30. Emisión Electroluminiscente. Muestra P2-3: Poly N/SRO 25/Tex2.

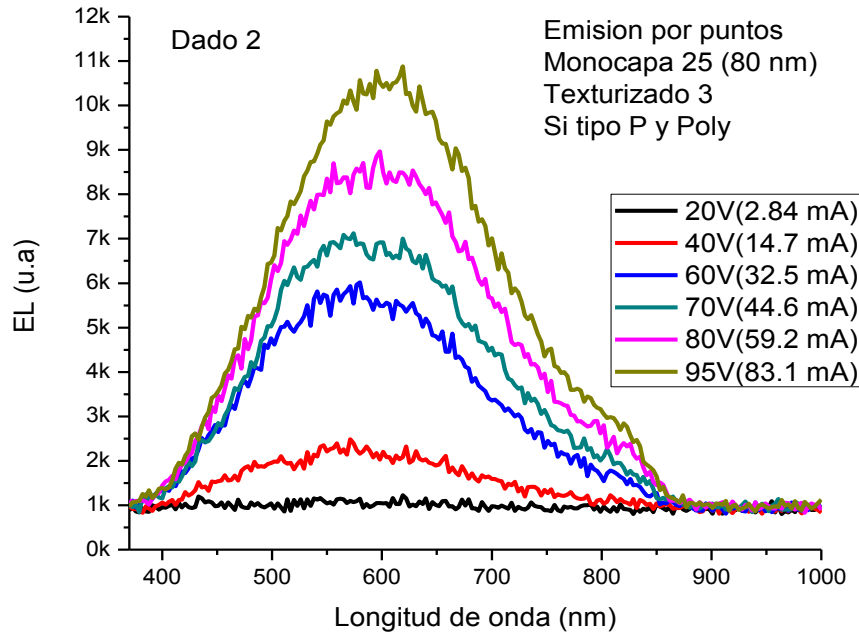


Figura 4.31. Emisión Electroluminiscente. Muestra P3-3: Poly N/SRO 25/ Tex3.

En todos los dispositivos con monocapa SRO25 se obtuvo emisión por puntos luminiscentes con un máximo centrado en 520 nm para el caso con Tex2 y 600 nm, para Tex1 y Tex3.

La figura 4.32 muestra la EL de dispositivos cuya principal característica es el diferente texturizado, y al mismo voltaje aplicado. Como se puede ver podemos afirmar que la intensidad, y ligeramente la posición del pico, varía con el texturizado.

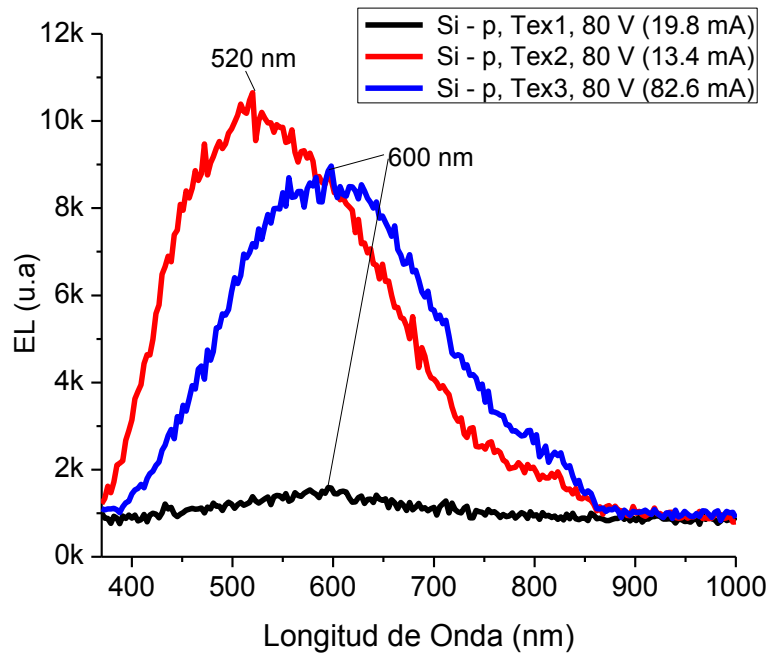


Figura 4.32: Dispositivos Monocapa SRO 25 con compuerta de Poly N+, diferentes texturizados a voltajes iguales.

En las figuras 4.33, 4.34 y 4.35 se muestran los espectros de emisión electroluminiscente para las muestras P1-1, P2-1 y P3-1, que son dispositivos con multicapas de SRO 5/25, compuerta de polisilicio y sustrato tipo p con los 3 niveles de rugosidad mencionados anteriormente.

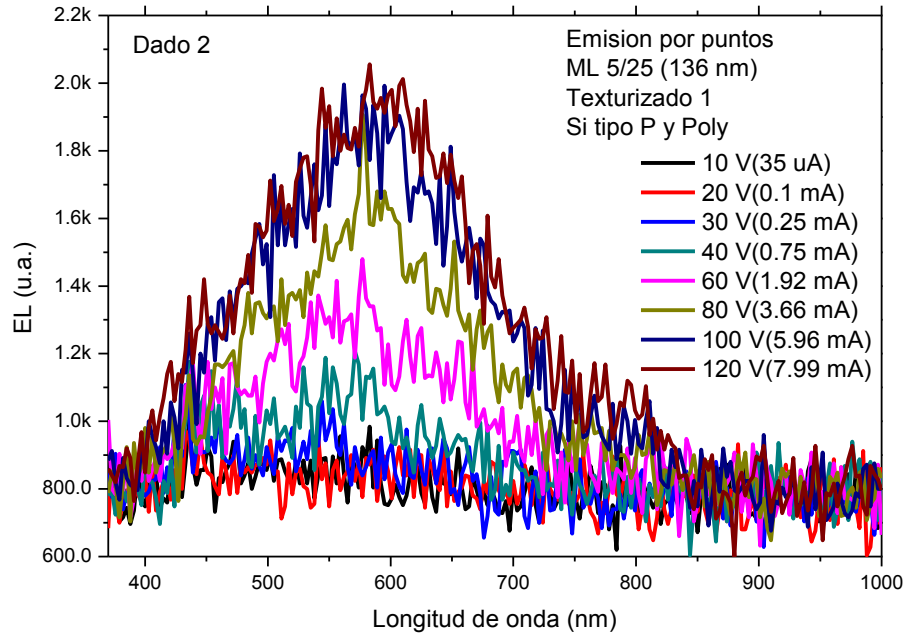


Figura 4.33. Espectro de electroluminiscencia. Muestra P1-1: Poly /ML 5/ Tex1.

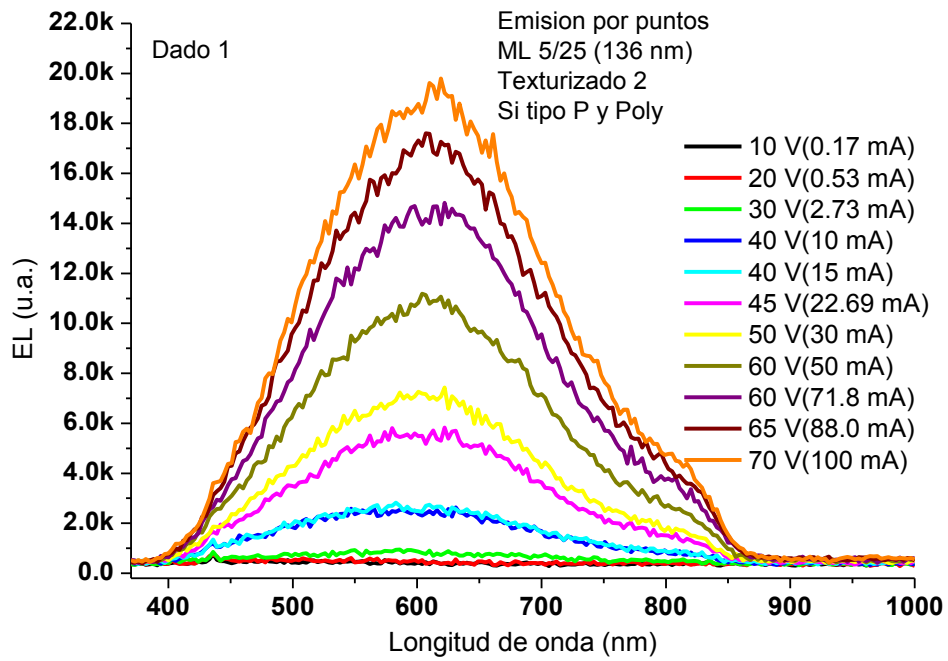


Figura 4.34: Espectro de electroluminiscencia. Muestra P2-1: Poly /ML /Tex2.

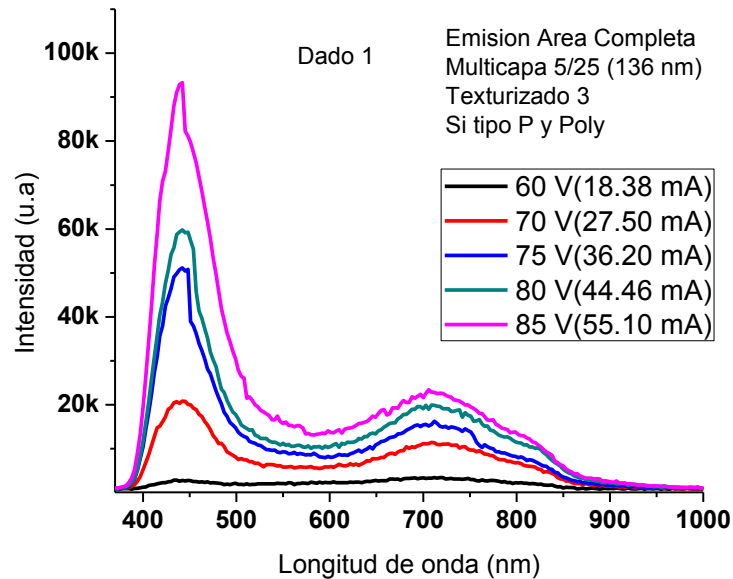


Figura 4.35: Espectro de electroluminiscencia. Muestra P3-1: Poly /ML /Tex3.

Como se puede observar, sólo la muestra P3-1 mostró la bien conocida Electroluminiscencia de área completa, encontrándose los picos de emisión de 445 nm y 685 nm ¹⁵. Las otras muestras mostraron emisión por puntos como las de las figuras 4.29 a 4.31. Las características de la muestra con emisión de área completas son: texturizado 3, cuya rugosidad cuadrática promedio es 12.9 nm y la diferencia pico cresta promedio es 86.8 nm, y el grueso de la multicapa es de 136 nm. Entonces podríamos establecer que esta relación de rugosidad a grueso sería adecuada para iniciar los experimentos futuros.

La tabla 4.4 muestra una comparación del grueso de las diferentes capas usadas en los dispositivos y la distancia entre pico y valle. Como se puede observar la distancia entre pico y valle es comparable con el grueso de las capas. Esto seguramente produce que algunos picos estén prácticamente haciendo contacto con la compuerta. Esto puede producir una corriente muy alta como la observada en nuestros dispositivos.

La figura 4.36 y 4.37 muestran fotografías de la superficie de los dispositivos con Tex2 (P2-1 y P2-3) tomada en el SEM. Como se puede observar la capa sigue la topografía de la rugosidad. Sin embargo se esperaría que el SRO aplanara la

superficie. Claramente la superficie no se aplanó por lo que en las crestas la capa fue demasiado delgada, confirmando que la corriente anómala observada se puede deber a esta causa.

Tabla 4.4 Comparación del grueso de las diferentes capas y la distancia entre pico y valle.

Muestra	R ₀	Espesor (nm)	Distancia Pico – Valle (nm)		
			Tex1	Tex2	Tex3
P5	5/25	136.36 ± 8.1	28	118	87
P7	25	79.86 ± 1.25			
P20	20	86 ± 3.3			
P1	30	78.3 ± 0.8			
P6	20	71.26 ± 0.96			

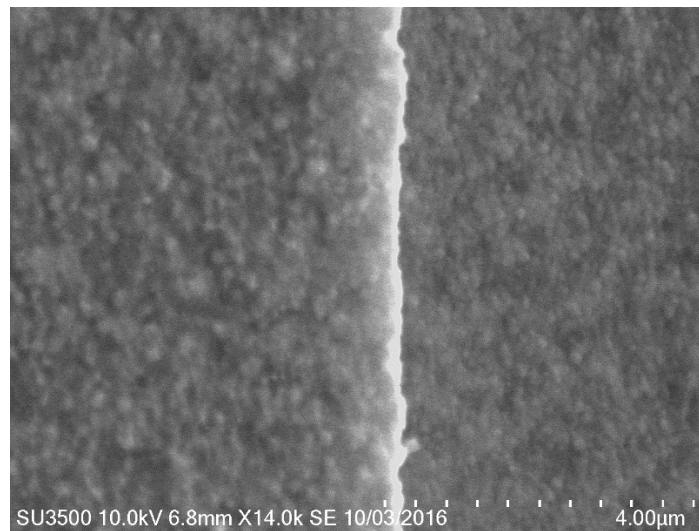


Figura 4.36. Fotografía tomada en el SEM de los dispositivos P2-1.

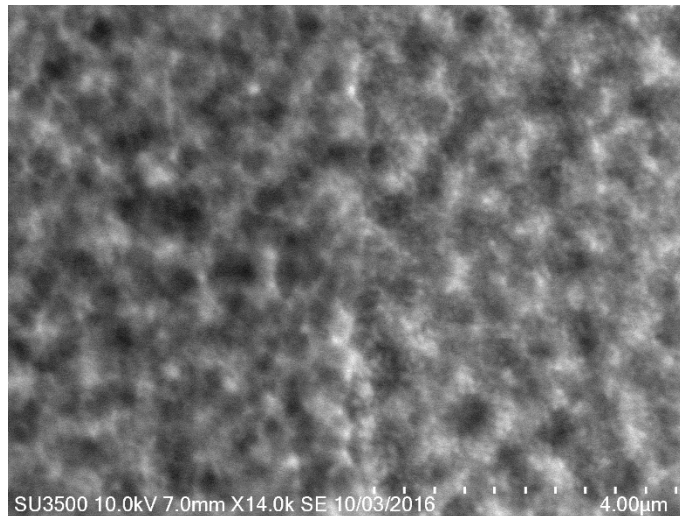


Figura 4.37. Fotografía tomada en el SEM de los dispositivos P2-3.

5. Conclusiones y trabajo futuro.

En esta tesis se hizo un trabajo exploratorio para conocer las condiciones de rugosidad adecuadas para fabricar capacitores emisores de luz optimizados usando SRO como capa activa. La intención es aumentar la emisión por la inyección mejorada de los picos de la rugosidad. Se fabricaron estructuras con capas simples y bicapas de SRO, y con tres condiciones de texturizado mediante RIE. También se fabricaron estructuras con monocapas de SRO y compuerta de aluminio para verificar que las diferentes etapas del proceso no alteraron los resultados.

Este primer experimento aporta conocimiento sobre el efecto de la rugosidad obtenido bajo diferentes condiciones de grabado en el comportamiento eléctrico y luminiscente. Los resultados experimentales muestran que los dispositivos rugosos tienen corrientes muy altas en general comparadas con dispositivos con estructura similar en sustratos pulidos.^{31,33}. Sin embargo, se encontró que aun cuando la corriente es alta se produce emisión electroluminiscente por puntos que a diferencia con el caso sin texturizar a estos altos niveles de corriente se tendría un dispositivo totalmente dañado y sin emisión luminiscente. En los dispositivos

P3-1 (Poly/ML/Tex3) se encontró la emisión esperada de área completa, lo que indica que este método sería adecuado para optimizar las fuentes de luz. El valor de rugosidad promedio y distancia de pico y valle se encuentran por debajo del espesor de SRO.

Se ha encontrado que la existencia de rugosidad en la superficie de los dispositivos tiene influencia en sus características luminiscentes. Es necesario hacer experimentos para determinar con mayor precisión qué nivel de rugosidad es el más adecuado para obtener la mayor eficiencia. Esto involucra investigar acerca de la mejor forma geométrica en la superficie, su periodicidad, su densidad superficial de estas y la distancia entre pico –valle óptima.

Se obtuvieron las primeras condiciones experimentales para usar como base en experimentos futuros tales como el uso de una mezcla de gases SF₆, O₂ y CH₄ en el proceso de texturizado con RIE. Se descarta que las etapas de fabricación, por ejemplo el enfriamiento, los procesos de limpieza y la existencia de óxido nativo en la interfaz entre sustrato y capa de SRO, afecten las propiedades eléctricas y ópticas del SRO. Se encontró que la relación pico – valle del texturizado es importante para obtener emisión de área completa. Esta relación debe ser en principio menor al espesor de la capa activa para prevenir contactos directos entre sustrato y compuerta, y la capa, o multicapa, de SRO debe tener un grueso suficiente para aplanar la rugosidad superficial. Esto es importante para garantizar un contacto superior plano y uniforme tanto en área como espesor.

Dado el valor de voltaje de encendido alto, la capa activa de SRO implica que sea muy delgada para encender a bajos voltajes, existe aquí un compromiso. Se necesita garantizar un espesor óptimo que aplane la superficie rugosa y al mismo tiempo que no provoque el incremento del voltaje de encendido. Por lo que se propone usar como base las condiciones obtenidas en este trabajo que son: Multicapa 5/25 con grueso igual o mayor a 136 nm, Texturizado con las siguientes condiciones: rugosidad promedio de 12.9 nm, distancia entre pico y valle de 87 nm; obtenidos mediante RIE con la mezcla de gases SF₆/O₂/CH₄ en proporción 30/10/4 sccm con presión de la cámara a 5 mTorr y potencia de la fuente a 100W.

5.1 Propuestas de trabajo futuro.

Fabricar dispositivos emisores de Luz con SRO usando sustratos texturizados tomando como base las condiciones experimentales encontradas en este trabajo

Texturizar sustratos de silicio con RIE usando SF_6 como gas principal mezclado con otros gases con diferentes razones de flujo. Analizar estadísticamente la rugosidad, la forma, la distancia entre pico y valle.

Depositar SRO monocapa y multicapa con diferentes espesores garantizando que este sea mayor a la distancia entre pico y valle del sustrato rugoso y comparar su comportamiento eléctrico y luminiscente.

Debido a la baja transmitancia del polisilicio es necesario seguir investigando en el uso de óxidos conductores transparentes como material de compuerta. Una opción es fabricar dispositivos LECs con las condiciones descritas utilizando óxido de Zinc dopado con aluminio (AZO) que cuenta con alta densidad de portadores y transmitancia alta y comparar con dispositivos con polisilicio dopado.⁴⁸⁻⁵⁰.

6. Referencias.

1. Miller, D. A. B. Physical Reasons for Optical Interconnection. *J. Optoelectron.* **11**, 155–168 (1997).
2. Miller, D. A. B. Device Requirement for Optical Interconnects to Silicon Chips. *Proc. IEEE Spec. Issue Silicon Photonics* **97**, 1166–1185 (2009).
3. Ismail, Y. I. On-chip inductance cons and pros. *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst.* **10**, 685–694 (2002).
4. Chen, G. *et al.* Predictions of CMOS compatible on-chip optical interconnect. *Integr. VLSI J.* **40**, 434–446 (2007).
5. Intel. The 50G Silicon Photonics Link. *White Pap.* 1–5 (2010).
6. Demir, H. V. & Sabnis, V. Highly-integrated multi-functional optoelectronic chip for next generation optical networks. *Proc. Stanford-Berkeley Innov. Chall.* 3–5 (2003).
7. Chen, G. *et al.* Electrical and optical on-chip interconnects in scaled microprocessors. *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst.* 2514–2517 (2005).
8. Lee, K. H. *et al.* Integration of GaAs, GaN, and Si-CMOS on a common 200mm Si substrate through multilayer transfer process. *Appl. Phys. Express* **9**, (2016).
9. Guo, W.-F. *et al.* Design and Fabrication of a Monolithic Optoelectronic Integrated Circuit Chip Based on CMOS Compatible Technology. *Chinese Phys. Lett.* **29**, 44209 (2012).
10. Canham, L. T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers. *Appl. Phys. Lett.* **57**, 1046 (1990).
11. Tan, W. K. *et al.* Dual-Color Electroluminescence ($\lambda \approx 450$ nm and 650-700 nm) From a Silicon-Based Light Source. *IEEE Electron Device Lett.* **29**, 344–346 (2008).

12. Gaburro, Z., Pucker, G., Bellutti, P. & Pavesi, L. Electroluminescence in MOS structures with Si/SiO₂ nanometric multilayers. *Solid State Commun.* **114**, 33–37 (2000).
13. González Fernández, A. A., Aceves Mijares, M., Yu, Z., Morales Sánchez, A. & Leyva, K. M. MOS-like electroluminescent devices using silicon-rich oxide obtained by LPCVD. *2009 6th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Sci. Autom. Control. CCE 2009* **2**, 3–7 (2009).
14. Tai, H. Y., Lin, Y. H. & Lin, G. R. Wavelength-shifted yellow electroluminescence of si quantum-dot embedded 20-pair SiN_x/SiO_x superlattice by ostwald ripening effect. *IEEE Photonics J.* **5**, (2013).
15. Fernández, A. A. G., Mijares, M. A., Sánchez, A. M. & Leyva, K. M. Intense whole area electroluminescence from low pressure chemical vapor deposition-silicon-rich oxide based light emitting capacitors. *J. Appl. Phys.* **108**, (2010).
16. Juvert, J. *et al.* DC electroluminescence efficiency of silicon rich silicon oxide light emitting capacitors. *J. Light. Technol.* **31**, 2913–2918 (2013).
17. Lin, G.-R., Lin, C.-J. & Lin, C.-K. Enhanced Fowler-Nordheim tunneling effect in nanocrystallite Si based LED with interfacial Si nano-pyramids. *Opt. Express* **15**, 2555 (2007).
18. Aceves-Mijares, M. *et al.* On the origin of light emission in silicon rich oxide obtained by low-pressure chemical vapor deposition. *J. Nanomater.* **2012**, (2012).
19. López-estopier, R., Aceves-mijares, M. & Falcony, C. Cathodo- and Photo-Luminescence of Silicon Rich Oxide Films Obtained by LPCVD. *Cathodoluminescence* **2**, (2012).
20. Rom, S. Comparison of structural and luminescent characteristics between SiO_x / SiO_y multilayer structures and single layers deposited by LPCVD. 1–8

21. Morales, A. *et al.* Comparative study between silicon-rich oxide films obtained by LPCVD and PECVD. *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures* **38**, 54–58 (2007).
22. Sánchez, A. M. Correlation between optical and electrical properties of materials containing nanoparticles. Ph.D Thesis. Universidad Autónoma de Barcelona. (2008).
23. Iwayama, T. S., Hama, T., Hole, D. E. & Boyd, I. W. Enhanced luminescence from encapsulated silicon nanocrystals in SiO₂ with rapid thermal anneal. *Vacuum* **81**, 179–185 (2006).
24. DiMaria, D. J. *et al.* Charge transport and trapping phenomena in off-stoichiometric silicon dioxide films. *J. Appl. Phys.* **54**, 5801–5827 (1983).
25. López-Estopier, R., Aceves-Mijares, M., Yu, Z., Zuñiga, C. & Falcony, C. Photo-And cathodo- luminescence of hydrogenated silicon rich oxide. *2008 5th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Sci. Autom. Control. CCE 2008* 489–494 (2008).
26. Morales-Sánchez, A. *et al.* DC and AC electroluminescence in silicon nanoparticles embedded in silicon-rich oxide films. *Nanotechnology* **21**, 85710 (2010).
27. González-Fernández, A. A. *et al.* Comparison of electrical and electro-optical characteristics of light-emitting capacitors based on silicon-rich Si-oxide fabricated by plasma-enhanced chemical vapor deposition and ion implantation. *J. Appl. Phys.* **111**, (2012).
28. Román-López, S., Aceves-Mijares, M., Carrillo-López, J. & Pedraza-Chávez, J. Fabrication and characterization of nanometric SiO_x/SiO_y multilayer structures obtained by LPCVD. *AIP Conf. Proc.* **1598**, 47–50 (2014).
29. Quiroga-González, E. *et al.* On the photoluminescence of multilayer arrays of silicon rich oxide with high silicon content prepared by low pressure chemical vapor deposition. *Thin Solid Films* **519**, 8030–8036 (2011).

30. Chen, Z. *et al.* Enhancing the Brightness of Quantum Dot Light-Emitting Diodes by Multilayer Heterostructures Enhancing the Brightness of Quantum Dot Light-Emitting Diodes by Multilayer Heterostructures. **8**, (2016).
31. Alarcón-Salazar, J., Zaldívar-Huerta, I. E. & Aceves-Mijares, M. Electrical and electroluminescent characterization of nanometric multilayers of SiOX/SiOY obtained by LPCVD including non-normal emission. *J. Appl. Phys.* **119**, 215101 (2016).
32. Liu, C. W., Lee, M. H., Chen, M. J., Lin, C. F. & Chern, M. Y. Roughness-enhanced electroluminescence from metal oxide silicon tunneling diodes. *IEEE Electron Device Lett.* **21**, 601–603 (2000).
33. J. Alarcón-Salazar, M. A. Vásquez-Agustín, E. Quiroga-González, I. E. Z.-H. and M. A.-M. Poly-Si/SRO/p-Si MOS-like devices with enhanced light emission through ionic Si surface roughening. *by Publ.* (2016).
34. Alarcón-Salazar, J. *et al.* in *Chemical Vapor Deposition - Recent Advances and Applications in Optical, Solar Cells and Solid State Devices* (InTech, 2016)
35. Sum, R. & Van Schendel, P. easyScan DFM 1.1 Operating Instructions. 1–44 (2003).
36. Bell, S. Gaertner L117 Ellipsometer SOP. 7 (2010).
37. Schroder, D. K. *SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE CHARACTERIZATION Third Edition. Physics Today* **44**, (2006).
38. López-Estopier, R. E. Estudio de Efecto del Nitrógeno en la fotoluminiscencia de películas de SRO depositadas por LPCVD. *INAOE.* (2005).
39. Instruments, K. Model 4200-SCS Semiconductor Characterization System User 's Manual. 328 (2013).
40. Franco, L. A. & Sinatora, A. 3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of Spk and its relationship to Vmp. *Precis. Eng.* **40**, 106–111 (2015).
41. Michigan Metrology. Surface Texture Parameters Glossary. (2014).

42. Murias, D. Texturizado de sustratos de silicio cristalino para aplicaciones en celdas solares. Tesis de Maestría. INAOE. (2011).
43. Luna-López, J. A., Aceves-Mijares, M. & Malik, O. Absorption Spectra of Silicon Rich Oxide Films with Different Annealing Time to be Used in Optical Sensor. *Ibersensor* 1–5 (2006).
44. Morales-Sánchez, A. *et al.* Photoluminescence enhancement through silicon implantation on SRO-LPCVD films. *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.* **174**, 119–122 (2010).
45. Morales-Sánchez, A., Barreto, J., Domínguez-Horna, C., Aceves-Mijares, M. & Luna-López, J. A. Optical characterization of silicon rich oxide films. *Sensors Actuators, A Phys.* **142**, 12–18 (2008).
46. Luna-López, J. A. A. Research of the Structural, Optical and Electrical Characteristics of SRO for Possible Applications to Devices. 118 (2007).
47. Aceves, M., Falcony, C., Reynoso, A. & Calleja, W. The Conduction Properties Of The Silicon/Off-Stoichiometric-SiO₂/Diode. *Solid State Electron.* **39**, 637–644 (1996).
48. Gonzalez Arroyo, M. P. Fabricación de heterouniones con un Óxido Conductor Transparente (TCO) y Óxido de Silicio fuera de estequiometría(SRO). Tesis de Maestría. INAOE (2015).
49. Dhakal, T. *et al.* Transmittance from visible to mid infra-red in AZO films grown by atomic layer deposition system. *Sol. Energy* **86**, 1306–1312 (2012).
50. Jung, Y. S., Park, Y. S., Kim, K. H. & Lee, W. J. Properties of AZO/Ag/AZO multilayer thin film deposited on polyethersulfone substrate. *Trans. Electr. Electron. Mater.* **14**, 9–11 (2013).