



**INAOE**

**“Análisis, diseño, fabricación y caracterización de los elementos básicos para integración de un circuito fotónico totalmente en silicio”**

por

Jesús Alarcón Salazar

Tesis sometida como requisito parcial  
para obtener el grado de

**DOCTOR EN CIENCIAS CON LA  
ESPECIALIDAD EN ELECTRÓNICA**

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica,  
Óptica y Electrónica**

Abril 2017

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

**Dr. Ignacio Enrique Zaldívar Huerta**

y

**Dr. Mariano Aceves Mijares**

©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





*“Los límites de mi lenguaje son los límites de mi mundo”*

***Ludwig Wittgenstein***

## ***AGRADECIMIENTOS***

En primer lugar agradezco a CONACyT por el apoyo económico para realizar mis estudios de Doctorado, específicamente por la beca no. 353251. No obstante, es pertinente mencionar que CONACyT es el organismo encargado de administrar los recursos para ciencia y tecnología que el *Pueblo de México* proporciona, siendo ellos la fuente primaria... A todos ustedes que trabajan duro, perseveran ante las desigualdades (sociales, políticas y económicas), demuestran integridad en sus acciones y sienten orgullo por nuestras raíces agradezco profundamente. Gracias por esta beca y por dar significado al ser *mexicano* y *mexicana*. Espero haber transmitido lo mismo a conacionales y extranjeros en todas las actividades que realicé durante mis estudios.

Agradezco a mis asesores: Dr. Ignacio E. Zaldívar Huerta y Dr. Mariano Aceves Mijares. Ambos son ejemplo de trabajo, dedicación y responsabilidad. Siempre impulsando y orientando mis iniciativas. Reconozco que hubo momentos difíciles debido a la diferencia de opiniones pero siempre encontramos la forma de dialogar y llegar a un acuerdo. Esas largas discusiones me permitieron enfocar adecuadamente mis energías. Además agradezco su apoyo tanto académico como profesional, e incluso personal, en todo momento sentí comprensión de ustedes.

Gracias al Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) y sus laboratorios, a los departamentos de electrónica y formación académica, al personal técnico y administrativo, y toda la comunidad *INAOENSE*. Una mención especial al laboratorio de Microelectrónica y sus técnicos, en ese lugar y con su colaboración realicé la mayor parte del trabajo de tesis. También agradezco a mis compañeros: Sergio, Marco Antonio, Santiago, Liliana, Hiram, Alejandro, Manolo, Ricardo, Rene, Manuel, Daniela, etc. Los considero como amigos y en algunos casos fuimos colaboradores.

Doy las gracias al Instituto de Microelectrónica de Barcelona (IMB-CNM) y al Dr. Carlos Domínguez Horna. Durante mi estancia en el instituto crecí profesionalmente y dio un giro completo mi perspectiva. Creo firmemente que todos los estudiantes de posgrado deben vivir este tipo de experiencias.

Finalmente agradezco al Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) y a la Dra. Verónica Vázquez. En la breve pero valiosa estancia consolidé mi conocimiento sobre guías de onda. También doy las gracias a los Dres. Enrique Quiroga y Alfredo Morales. La ayuda con mediciones, interpretación de datos y discusión de los resultados es invaluable. Gracias por su colaboración.

## ***DEDICATORIAS***

A ***Dios***, porque en mi constante aprendizaje del mundo y sus fenómenos me he percatado que el origen de algunas cosas aún no puede ser explicado. En ese momento la existencia de un *Ser Supremo* esclarece las dudas, alivia nuestras angustias y nos da fuerzas para seguir con nuestra constante búsqueda.

A ***Elizabeth H. A.*** Supiste proveerme de cariño, apoyo y coraje en los momentos adecuados. Me acompañaste en cada tarea, fungiste como bastón en mis tropiezos, acicate cuando no avanzaba, animadora en situaciones complicadas y tribuna con mis problemas internos; pero sobre todo mi cómplice en la vida. Eres una gran esposa y amiga *TACTEC*. Gracias, este trabajo también es tuyo.

A ***Jesús A. L.*** y ***Violeta A. S.*** Hemos pasado por situaciones muy desafiantes y seguimos adelante. Además de la evidente relación familiar, los considero mis mejores amigos. Gracias por su apoyo incondicional. En todo momento trataré de estar ahí para ustedes. Los quiero y admiro. Mi Chavín con el pasar de los años sigues siendo un ejemplo a seguir en tantos aspectos... cuando crezca quiero ser como tú. Carnalita, nuestro carácter es diferente e increíblemente parecido, amplias mi visión del mundo en muchos aspectos.

A ***Ma. Paula S. A.***<sup>†</sup>, cuyo *tonalli* era acompañarme durante mi vida; está, aunque no en la misma dimensión. Su cariño y enseñanzas se quedaron tatuados en mis huesos.  
Siempre te querré.

A ***Elodia L. G.*** y ***Socorro O. A. L.***; siempre me han demostrado un gran cariño, apoyándome en todas mis inquietudes. La primera es ejemplo de fortaleza física y espiritual. La segunda es un modelo a seguir académico y familiar, su apoyo incondicional permitió que la realización de este trabajo viniera acompañada de innumerables alegrías. Todo esto también te pertenece.

Por último pero no menos importante, a toda ***mi familia sanguínea y adquirida***. En especial a ***Gerarda A. L.*** y ***Sigifredo V. C.*** por estar pendientes en todo momento. Espero estar a la altura de sus expectativas cuando sea necesario. A ***Gloria Q.*** y ***Gerardo A. A.*** por impulsarme mediante otras actividades, porque la pasión por el *Trail running* no se comparte fácilmente.

## RESUMEN

En este trabajo se estudia la integración monolítica en silicio de una fuente de luz, una guía de onda óptica y un fotodetector. El objetivo es fabricar mediante técnicas microelectrónicas un circuito fotónico integrado (PIC, del inglés *Photonic Integrated Circuit*) completamente en Si, el cual genere, transmita y detecte luz visible. La ventaja de utilizar estas técnicas de fabricación es la completa compatibilidad con procesos Metal-Óxido-Semiconductor Complementario (CMOS), permitiendo utilizar una variedad de herramientas y abaratando los costos de fabricación. Actualmente, la demanda de procesamiento de información está llevando los circuitos integrados (CIs) al límite de su capacidad. El nivel de integración en CI es tan grande que los dispositivos se enfrentan a nuevos problemas, como es información cruzada, consumo de potencia y efectos resistivo-capacitivos. Una opción viable para superar estas limitaciones es migrar de CIs que manejan electrones al uso de fotones, es decir a PICs. Por tal motivo, es obligatorio desarrollar una celda base para el manejo de información mediante luz.

El dispositivo crucial en el sistema integrado es el emisor de luz, también denominado LEC (del inglés, *Light Emitting Capacitor*). Como es bien conocido, el silicio es un semiconductor de banda indirecta, haciéndolo un ineficiente emisor de luz; sin embargo desde algunas décadas atrás se ha demostrado que materiales basados en silicio presentan propiedades luminiscentes en el visible. En nuestro caso, el material activo para el LEC es el óxido de silicio enriquecido con silicio (SRO) obtenido por depósito químico en fase vapor a baja presión (LPCVD). Después de un tratamiento térmico a 1100 °C ha demostrado tener una respuesta foto- y electro-luminiscente. A pesar de esto, los LECs con SRO siguen teniendo un desempeño ineficiente debido a altos voltajes de encendido (cercaos al voltaje de ruptura del dieléctrico), baja emisión electroluminiscente y rangos de operación muy cortos. En este trabajo se estudiaron dos tipos de LECs: capa simple de SRO (S-LEC) y multicapas nanométricas de SRO (M-LEC). En el caso de S-LEC se texturizó la superficie del sustrato para generar inyectores de corriente que propiciaran una mejora en la respuesta electro-óptica del dispositivo. En los M-LEC se alternó entre capas emisoras y conductoras para superponer propiedades y mejorar el desempeño del dispositivo. Ambos dispositivos presentan un espectro amplio de emisión (400 nm a 850 nm) con dos picos, uno centrado en el azul y otro en el rojo. El análisis de la caracterización foto- y electroluminiscente (EL) demostró que la emisión es debida a estados energéticos relacionados a defectos de oxígeno presentes en el SRO. El dispositivo S-LEC<sub>TI</sub>, el cual utiliza un sustrato texturizado por iones reactivos (RIE) con una rugosidad de  $(4.0 \pm 0.2)$  nm y  $(3.7 \pm 1.8) \times 10^{10}$  picos/cm<sup>2</sup>, disminuyó 17 % el campo eléctrico de encendido ( $E_{enc}$ ) respecto a un S-LEC<sub>p</sub> (con sustrato pulido). Además se demostró que existe una mejora en la inyección de portadores en bajos campos eléctricos ( $< 1.5$  MV/cm), propiciando la disminución de  $E_{enc}$  y el incremento en la intensidad EL, respecto a S-LEC<sub>p</sub>. El mecanismo de conducción responsable de la emisión es el *Trap-Assisted*

*Tunneling* (TAT). Al utilizar multicapas de SRO sobre sustrato pulido en lugar de capa simple de SRO, el  $E_{enc}$  se disminuye hasta un 64 % y se incrementa el rango de operación de 3 MV/cm a 6 MV/cm. El rango de operación se divide en dos secciones. La primera sección muestra que el mecanismo Limitado por carga espacial, del inglés *Space-Charge-Limited*, controla la emisión de luz, pero al llegar a la segunda sección (> 6 MV/cm), la intensidad incrementa exponencialmente y los mecanismos TAT e ionización por impacto son responsables de la emisión. La potencia óptica en dispositivos M-LEC aumenta por lo menos 10 veces respecto a dispositivos S-LEC. La desventaja del M-LEC es su alto consumo de potencia eléctrica, siendo del orden de W, tres órdenes de magnitud superior al consumo de un S-LEC. Sin embargo, las figuras de mérito más importantes para seleccionar el emisor de luz son la potencia óptica y el campo eléctrico de encendido, motivos por los cuales un dispositivo M-LEC es la mejor opción para el sistema integrado.

Respecto a la guía de onda, existe un gran número de reportes sobre guías fabricadas en silicio. La principal aplicación es para longitudes en el infrarrojo, es decir comunicaciones. También se encuentran reportes de guías para propagación de luz visible. En esta investigación se estudió el material del núcleo y la geometría de la guía. El material del núcleo seleccionado es nitruro de silicio fuera de estequiometría ( $Si_xN_y$ ) obtenido por LPCVD. Se estudiaron sus propiedades ópticas y morfológicas para películas recién depositadas y después de un tratamiento térmico a 1100 °C. El objetivo del tratamiento térmico era conocer los efectos en el  $Si_xN_y$  en caso que la guía de onda sea sometida al recocido necesario en el SRO. Algunas de las técnicas utilizadas fueron espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia por rayos X (XPS), fotoluminiscencia y transmitancia. Se analizó una geometría tipo costilla mediante simulación. Para la simulación se utilizó *COMSOL Multiphysics*®. Los resultados mostraron que la guía de onda tipo costilla permite controlar el número de modos sólo con la razón de aspecto. Con base en los resultados de caracterización del material y los resultados de simulación, se fabricaron guías de onda tipo costilla en silicio con 500 nm de  $Si_xN_y$  como material del núcleo y 1.5  $\mu m$  de  $SiO_2$  como recubrimiento inferior. Las condiciones de fabricación del  $Si_xN_y$  producen películas con una transparencia mayor al 70 % en el rango visible, y estables al tratamiento térmico, es decir sin cambios significativos en su composición. La propagación de luz en las guías de onda fue caracterizada por acoplamiento por los bordes. Se utilizaron dos longitudes de onda: 473 nm y 633 nm. En ambos casos se observó propagación multimodal con confinamiento del campo electromagnético por debajo de la costilla. La estructura con mejor desempeño obtuvo un coeficiente de atenuación de 11.06 dB/cm, para una guía con ancho de costilla igual a 5  $\mu m$ . Sin embargo, estructuras con ancho de 5  $\mu m$  a 10  $\mu m$  obtuvieron valores de pérdidas por propagación muy similares.

El sensor seleccionado es una unión PN, uno de los dispositivos más estudiados y desarrollados en tecnología de silicio. En este trabajo se caracterizaron eléctricamente dos tipos de diodo, denominados respectivamente como diodos discreto e integrado. El diodo discreto es un diodo PN individual sin interacción eléctrica u óptica con otro

dispositivo. El diodo integrado interactúa con el núcleo de una guía de onda. La diferencia principal entre ambos dispositivos es que el diodo integrado tiene una capa de 30 nm de nitruro de silicio (núcleo de la guía) entre la región P y el óxido de campo. Ambos dispositivos se estudiaron bajo diferentes condiciones de iluminación. Los resultados de caracterización demuestran una variación de la corriente de oscuridad y fotocorriente en función del tipo de diodo y tamaño del área sensible. Respecto al diodo integrado, la película de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  pasiva la superficie de silicio de una forma diferente, propiciando cambios en la corriente de oscuridad. Sin embargo, se concluyó que diodos con áreas menores a  $0.8 \text{ mm}^2$  tienen la mejor respuesta de corriente fotogenerada por unidad de área. Posterior a la caracterización, se estudió el acoplamiento guía-sensor mediante simulación utilizando el software SILVACO®, específicamente los módulos de ATHENAS y ATLAS. A partir de ellos se simuló el proceso de fabricación de la estructura y la estimulación eléctrica del diodo. En la simulación se variaron las condiciones de fabricación para formar la unión PN, la profundidad de la cavidad donde se colocará la guía de onda y la distribución de campo eléctrico en la unión PN bajo diferentes condiciones de polarización. Se demostró que la mejor opción es embeber la guía dentro de la región de carga espacial y utilizar una cavidad con profundidad suficiente para evitar la incidencia de luz fuera de la región de agotamiento. Embeber la guía de onda implica formar primero la región P y después grabar la cavidad de la guía y parte de la difusión lateral de la región P. Además, se demostró que al embeber la guía en un diodo planar aumentará significativamente la respuesta del sistema. Con estas consideraciones es posible utilizar substratos de baja resistividad y voltajes de polarización del diodo alrededor de -10 V. Asimismo, se podrá detectar luz desde 400 nm hasta 800 nm ya que la luz incidirá directamente en la región de carga espacial.

Finalmente, se desarrolló una propuesta del PIC, donde el emisor de luz queda auto-alineado con la guía de onda, la cual a su vez encara directamente la región sensible del diodo. El presente trabajo demuestra la funcionalidad del emisor de luz, la guía de onda óptica y el diodo individualmente. Asimismo, se establecen las condiciones de fabricación del emisor de luz y la guía para la optimización del sistema integrado. Además, se fundamentan las características del sensor de luz y el acoplamiento con la guía, con la finalidad de que cada fotón contribuya a la fotocorriente. Si bien no se fabricó el sistema integrado, sí se establecen bases para el diseño y elaboración del mismo utilizando una tecnología de fabricación con dimensión mínima de  $5 \mu\text{m}$ , presente en el laboratorio de microelectrónica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

## ABSTRACT

This work studies the monolithic integration on silicon of a light source, an optical waveguide and a photodetector. The aim is to make a photonic integrated circuit (PIC) using Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) techniques of fabrication. PICs work with photons instead of electrons to manage information data massively and at low cost. To develop an elemental system composed of a light source, a waveguide and a sensor in order to probe the functionality of more complex PICs is mandatory.

The development of a silicon light source, also named light emitting capacitor (LEC), is the most challenging task, because the silicon is an indirect band gap semiconductor that makes it an inefficient light emitter. One material based on silicon and with light emitting properties is the silicon rich oxide (SRO). The SRO deposited by low-pressure chemical vapor deposition (LPCVD) and annealed at 1100 °C has photo- and electroluminescence properties. LECs with SRO have demonstrated successful emission of light. However, some disadvantages of LECs are the high electric fields needed to turn on the electroluminescence ( $E_{enc}$ ), the low emission intensity and short operation ranges. The operation range is defined as the difference between maximum and minimal electric fields that produce emission without damaging the device. In order to solve such problems, in this work, four LECs were studied: two LECs with a single layer of SRO (S-LEC) and two LECs with a multilayered structure of nanometric SRO layers (M-LEC). S-LECs and M-LECs showed photo- and electroluminescence (EL) response associated to energy levels of oxygen defects in the SRO matrix. In the case of S-LECs, two different silicon substrates were used: one polished (S-LEC<sub>p</sub>) and the other textured (S-LEC<sub>TI</sub>). On both substrates a single layer 70 nm thick of SRO was deposited. The M-LECs were deposited only on polished substrates and alternate emitting and conductive layers in order to have high enough electric conductivity and intense light emission, preserving the characteristics of each layer. One M-LEC uses SRO<sub>5</sub> as conductive layer (M-LEC<sub>525</sub>) and the other uses SRO<sub>10</sub> (M-LEC<sub>1025</sub>), and as emitting layer they use SRO<sub>25</sub> for both devices. These devices reduce 64 % the  $E_{enc}$  and increase twice the operation range compared with S-LEC<sub>p</sub>. Also, M-LECs have two electric field regimes. The first regime is between 3 MV/cm and 6 MV/cm in which EL spectra grow with a power of ~4 as function of the electric field and the charge transport is controlled by the Space-Charge-Limited mechanism. The second regime is for electric fields higher than 6 MV/cm. In this case, EL spectra grow with a power of ~10.5 as function of the electric field and TAT and impact ionization mechanisms dominate the conduction.

The device S-LEC<sub>TI</sub>, which has a textured substrate with average roughness of (4.0±0.2) nm and (3.7±1.8) × 10<sup>10</sup> spikes/cm<sup>2</sup>, reduces 17 % the  $E_{enc}$  compared to the S-LEC<sub>p</sub>. The S-LEC<sub>TI</sub> showed to enhance carrier injection at low electric fields and this improves emission at high electric fields. At high electric fields (> 6 MV/cm), Trap-

Assisted Tunneling (TAT) mechanism is responsible for the charge transport through the dielectric.

Comparing the optical power, M-LECs achieve higher values than S-LECs, at least ten times. Nevertheless, M-LECs consume more electrical power than S-LECs, around 3 orders of magnitude. However, the main figures in a PIC are the optical power and the operation range. As a consequence, M-LECs are a better option to be used in an integrated system.

The waveguide has been studied and fabricated on silicon in the past. Its main application is on infrared wavelengths, i.e. communications. However, some works report optical waveguides fully fabricated in Si technology and with low optical losses in the visible range. In this work, the core material and the geometry of an optical waveguide were analyzed. Off stoichiometry silicon nitride ( $\text{Si}_x\text{N}_y$ ) obtained by LPCVD was selected as core material and  $\text{SiO}_2$  as cladding. Its optical and morphological properties were studied in as-deposited layers and after a thermal treatment at 1100 °C in  $\text{N}_2$ . This annealing was used considering that optical waveguides could be annealed with the SRO, which requires the thermal treatment to activate emission. Techniques as infrared spectroscopy (FTIR), X-ray spectroscopy (XPS), photoluminescence and transmittance were used to determine morphological and optical characteristics of  $\text{Si}_x\text{N}_y$  layers.  $\text{Si}_x\text{N}_y$  showed transparency higher than 70 % in the visible range, conserving its morphological characteristics after the thermal treatment.

Also, rib optical waveguides were simulated using COMSOL Multiphysics®. Results of computational simulations show that rib geometries produce multi-modal optical waveguides. Based on the characterization of the core material, and the simulation results, rib waveguides with  $\text{Si}_x\text{N}_y$  500 nm thick as core material and  $\text{SiO}_2$  1.5  $\mu\text{m}$  thick as cladding, and different widths were fabricated. Propagation of the optical waveguides was characterized by end coupling, using two wavelengths: 473 nm and 633 nm. In both cases, light confinement was observed under the rib and multimodal propagation. The lowest optical losses were achieved for a structure with 5  $\mu\text{m}$  width, which coefficient of attenuation ( $\alpha$ ) is 11.06 dB/cm. However, similar values of  $\alpha$  were obtained in structures with widths of 7 and 9  $\mu\text{m}$ .

In this work two kinds of photodetector were electrically tested. The first one is a discrete diode. The second one is an integrated diode with a coupled waveguide. Both devices were studied under different illumination conditions. Results showed dependency of dark current and photocurrent with the kind and size of the diode. Finally, it is concluded that diodes with 0.8  $\text{mm}^2$  or lower area have the highest photocurrent per area unit.

Subsequently, the fabrication process and electrical behavior of a waveguide-diode coupled were simulated using ATHENAS and ATLAS modules of SILVACO® software package. The optical waveguide was simulated inside of a cavity such that output port of the waveguide faces the wall of the diode and then the depleted region of the sensor. During simulations, the fabrication steps, cavity depth and electrical polarizations of the diode were varied in order to know the electric field distribution and

orientation on the depleted zone. Based on simulation results, the best coupling of the waveguide and the sensor is to fabricate the optical waveguide etching part of p region of a planar diode, and build a cavity to put the waveguide with enough depth to let photons impact on the space charge region on the etched wall of the diode. As consequence, low resistivity substrates and polarization voltages around -10 V for the diode could be used in order to generate photocurrent of light with wavelengths from 400 nm to 800 nm.

Finally, a topology of the PIC is suggested, and the technological conditions to fabricate the PIC composed of a LEC, an optical waveguide and a photodetector, are proposed. In this PIC, LEC is self-aligned to the input port of the optical waveguide, and the output port of the optical waveguide faces directly the space charge region of a planar diode. It is important to mention that the PIC could be fabricated with the minimal dimensions (5  $\mu\text{m}$ ) of the process used in the microelectronic laboratory at the National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics.

## LISTA DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS

$\mu$	Movilidad
$A_C$	Área de compuerta
AFM	Atomic Force Microscope
ARROW	Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide
$C_{max}$	Capacitancia máxima en F
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
$C_{SRO}$	Capacitancia del SRO en F/cm <sup>2</sup>
$E$	Campo Eléctrico
$E_{enc}$	Campo eléctrico de encendido de emisión
EL	Electroluminiscencia
EQ	Grabado electroquímico
Er	Erbio
FEM	Finite Element Method
FN	Fowler-Nordheim Tunneling
FTIR	Fourier Transform Infrared spectroscopy
Ge	Germanio
$h$	Constante de Planck
HCS	High Conduction State
$I_{ph}$	Fotocorriente
$J$	Densidad de corriente
$k$	Constante de Boltzmann
$K_{SRO}$	Constante dieléctrica del SRO
LCS	Low Conduction State
LEC	Light Emitting Capacitor
LPCVD	Low-Pressure Chemical Vapor Deposition
$m^*$	Masa efectiva del electrón
$m^*_T$	Masa efectiva de tuneleo
M-LEC	LEC basado en multicapas de SRO
MOS	Metal-Oxide-Semiconductor
$N_a$	Concentración de impurezas aceptoras
$N_d$	Concentración de impurezas donadoras
$N_2$	Nitrógeno
$N_2O$	Óxido nitroso
NBOHC	Non-Bridging Oxygen Hole Center
$N_C$	Densidad de estados en la banda de conducción
NCs-Si	Nano-cristales de Si
NIIs-Si	Nano-islas de silicio
nm	Nanómetro
NOV	Neutral Oxygen Vacancy
nps-Si	Nano-partículas de silicio
$N_t$	Densidad de trampas por unidad de volumen

ODC	Oxygen Deficient Center
Pe	Potencia eléctrica consumida
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition
PF	Poole-Frenkel
PIC	Photonic Integrated Circuit
PL	Photoluminescence
Poly	Polisilicio
$P_{op}$	Potencia óptica
$q$	Carga del electrón
$Q_t$	Densidad de trampas por unidad de área
$q\phi_B$	Altura de la barrera
$q\phi_T$	Nivel de energía de trampa
$R_0$	Razón de presiones parciales para SRO
RIE	Reactive Ion Etching
$RN$	Razón de presiones parciales para SRN
SCL	Space-Charge Limited
Si	Silicio
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Nitruro de Silicio
Si-db	Silicon-dangling bonds
SiH <sub>4</sub>	Silano
SiO <sub>2</sub>	Óxido de Silicio
S-LEC	LEC basado en capa simple de SRO
SRN	Silicon Rich Nitride
SRO	Silicon Rich Oxide
$T$	Temperatura en escala absoluta
TAT	Trap-Assisted Tunneling
TE	Modo Transversal Eléctrico
TEM	Transmission Electron Microscopy
TM	Modo Transversal Magnético
$t_{SRO}$	Espesor del SRO
$V_{TFL}$	Voltaje para el límite de trampas libres
$V_{tr}$	Voltaje de tránsito
$\epsilon_0$	Permitividad eléctrica del vacío
$\epsilon_i$	Permitividad relativa del medio
$\epsilon_{Si}$	Permitividad dieléctrica del silicio
$\mu_i$	Permeabilidad relativa del medio
$\mu_0$	Permeabilidad magnética del vacío
$\eta_{ext}$	Eficiencia externa

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de un circuito electrofotónico en silicio, integrando una fuente de luz, una guía de onda y un detector. Los recuadros resaltan los acoplamientos entre elementos.	3
Figura 2.1. (a) LEC de capa simple y (b) LEC con multicapa de SRO. Ambos esquemas no están a escala y muestran los espesores de cada película. (c) Espectro de transmitancia de la compuerta de polisilicio dopado N <sup>+</sup> y espesor de 250 nm.	11
Figura 2.2. Esquema de medición para obtener curvas I-V y C-V.	13
Figura 2.3. Esquema de medición de (a) EL y (b) P <sub>op</sub> en función del voltaje aplicado. El montaje para medir P <sub>op</sub> también se utilizó para medir la potencia óptica en función del ángulo de detección. Se varió angularmente la posición del sensor de 0° a 60° respecto a la normal de la superficie de la compuerta.	14
Figura 2.4. Perfil de profundidad para sustratos de Si texturizados por iones reactivos (RIE) y grabado electroquímico (EQ). El perfil en color negro corresponde a la muestra S-LEC <sub>T1</sub> y en color rojo a la muestra S-LEC <sub>T2</sub> .	16
Figura 2.5. Vista superficial y 3D de la superficie de silicio texturizada por RIE (izq.) y grabado electroquímico (der.). Las superficies corresponden a las muestras S-LEC <sub>T1</sub> y S-LEC <sub>T2</sub> , respectivamente.	17
Figura 2.6. Espectro de absorción obtenido por FTIR para capa simple de SRO <sub>30</sub> y multicapas M <sub>525</sub> y M <sub>1025</sub> , antes y después de un tratamiento térmico a 1100 °C 2 horas en N <sub>2</sub> . Se aprecian los principales modos de vibración relacionados a enlaces Si-O.	18
Figura 2.7. Deconvolución del modo de vibración <i>stretching</i> en dos Gaussianas, asociadas al modo <i>stretching</i> en fase (S) y fuera de fase (a-S). Análisis realizado para película de SRO <sub>30</sub> y multicapas M <sub>525</sub> y M <sub>1025</sub> antes y después de un tratamiento térmico a 1100 °C en N <sub>2</sub> por 2 horas.	19
Figura 2.8. Imágenes obtenidas por TEM para las multicapas (a) M <sub>525</sub> y (b) M <sub>1025</sub> . Se puede apreciar capas nano-métricas bien definidas, NIs-Si entre el sustrato y la primera capa, así como el alto contenido de NCs-Si en capas de SRO <sub>5</sub> y SRO <sub>10</sub> .	21
Figura 2.9. (a) Gráfica comparativa del espesor total obtenido por elipsometría y TEM para las multicapas. (b) Variación del tamaño de NCs-Si presentes en capas de SRO <sub>25</sub> en función de las capas adyacentes.	22
Figura 2.10. Espectros de Fotoluminiscencia (PL) para capas simples (SRO <sub>25</sub> y SRO <sub>30</sub> ) y multicapas (M <sub>525</sub> y M <sub>1025</sub> ) de SRO, antes y después del tratamiento térmico a 1100 °C 2 horas en N <sub>2</sub> . (a) Espectro medido y (b) espectro normalizado respecto al espesor de la capa emisora.	23
Figura 2.11. Descomposición de la banda roja del espectro de PL en dos contribuciones para capas simples (SRO <sub>25</sub> y SRO <sub>30</sub> ) y multicapas (M <sub>525</sub> y M <sub>1025</sub> ) de SRO, después del tratamiento térmico. La contribución alrededor de 820 nm es debida a nps-Si en un matriz de SiO <sub>2</sub> y la mayor emisión alrededor de 710 nm a 740 nm es debida a defectos Si-O en el SRO.	24
Figura 2.12. Curvas capacitancia-voltaje para LECs con (a) capas simples y (b) multicapas de SRO. Los dispositivos S-LEC <sub>p</sub> y S-LEC <sub>T1</sub> presentan el comportamiento más parecido a un capacitor MOS.	25
Figura 2.13. Curvas corriente-voltaje para estructuras LEC con capas simples (a) y multicapas (b) de SRO. Las estructuras S-LEC <sub>p</sub> y S-LEC <sub>T1</sub> presentan el comportamiento más parecido a un capacitor MOS.	29
Figura 2.14. Gráfica comparativa de la densidad de corriente en función del campo eléctrico para estructuras LEC de capa simple y multicapa de SRO. En la gráfica se indica el campo eléctrico de encendido para algunos dispositivos. Los voltajes de encendido para los dispositivos M-LEC <sub>525</sub> , M-LEC <sub>1025</sub> , S-LEC <sub>T1</sub> y S-LEC <sub>p</sub> son 38V, 35 V, 48 V y 56 V.	30
Figura 2.15. Espectro de electroluminiscencia para dispositivos (a) S-LEC <sub>p</sub> , (b) S-LEC <sub>T1</sub> , (c) S-LEC <sub>T2</sub> , (d) M-LEC <sub>525</sub> y (e) M-LEC <sub>1025</sub> , obtenidos con diferentes voltajes aplicados.	31

- Figura 2.16. Espectro de electroluminiscencia para los dispositivos M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>, antes y después de un tratamiento eléctrico (TE). El tratamiento consistió en un barrido de voltaje de 0 a 100 V limitando la corriente a 10 mA. 32
- Figura 2.17. Espectros de EL para los dispositivos de capa simple (S-LEC<sub>p</sub>, S-LEC<sub>T1</sub> y S-LEC<sub>T2</sub>) y multicapa (M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>). El espectro EL de los dispositivos M-LEC es 10 veces más grande. Se comparan los espectros con mejor respuesta electroluminiscente. Los dispositivos M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>, S-LEC<sub>p</sub> y S-LEC<sub>T1</sub> presentan emisión de área completa, mientras el dispositivo S-LEC<sub>T2</sub> tiene emisión por puntos. 33
- Figura 2.18. Descomposición del espectro de EL en 4 Gaussianas (contribuciones) para los dispositivos (a) S-LEC<sub>p</sub>, (b) S-LEC<sub>T1</sub>, (c) M-LEC<sub>525</sub> y (d) M-LEC<sub>1025</sub>. 34
- Figura 2.19. Ajustes de los mecanismos de conducción involucrados en la emisión de luz para dispositivos S-LEC y M-LEC. (a) Curva  $J$  vs  $E$  en campos eléctricos de 0 a 1.5 MV/cm para los dispositivos S-LEC<sub>p</sub> y S-LEC<sub>T1</sub>. Se aprecia un incremento de  $J$  del dispositivo S-LEC<sub>T1</sub> respecto a S-LEC<sub>p</sub>. (b) y (c) son el ajuste para el mecanismo *Trap-Assisted Tunneling* en los dispositivos S-LEC<sub>p</sub> y S-LEC<sub>T1</sub>, respectivamente. (d) y (e) son ajustes de los mecanismos *Poole-Frenkel*, *Fowler-Nordheim tunneling* – recuadro en (c) – y *Space-Charge Limited conduction* para los dispositivos M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>. (f) y (g) son gráficas de  $\ln(P_{opt})$  en función de  $V^{-1/2}$  para la banda azul de M-LEC<sub>525</sub> y las dos bandas de M-LEC<sub>1025</sub>. Un ajuste lineal sugiere la presencia del mecanismo ionización por impacto. 38
- Figura 2.20. Diagrama de bandas para los dispositivos a) de capa simple y b) multicapa bajo la influencia de un campo eléctrico externo (voltaje aplicado al dispositivo). Se puede observar la altura de la barrera y el nivel de trampa obtenido por los mecanismos de conducción TAT y FN. Las imágenes son de propósito ilustrativo y no se encuentran a escala. 39
- Figura 2.21. Intensidad EL en función del campo eléctrico para dispositivos LEC. Estructuras multicapa muestran mayor rango de operación e intensidad EL. 41
- Figura 2.22. Campo eléctrico vs Intensidad EL para cada banda de los dispositivos M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>. Las líneas solidas indican un ajuste lineal. La banda azul de M-LEC<sub>525</sub> y las dos bandas de M-LEC<sub>1025</sub> presentan un cambio en pendiente al alcanzar 6 MV/cm. 42
- Figura 3.1. Esquema de la sección transversal de un sistema guiado compuesto por tres medios: núcleo, recubrimiento superior y recubrimiento inferior. El espesor ( $d$ ) e índice de refracción ( $n$ ) de cada medio esta etiquetados con los subíndices  $n_s$ ,  $r_s$  y  $r_i$ , respectivamente. 45
- Figura 3.2. (a) Solución gráfica de los modos propagados para un sistema guía con  $n_n = 2.01$ ,  $n_r = 1.46$ ,  $\lambda = 633$  nm y espesor del núcleo de 250 nm (línea roja) y 1250 nm (línea vino). Para  $d_n = 250$  nm se indican los modos permitidos como la intersección (puntos negros) del semi-círculo con los modos pares e impares. (b) Gráfica de índice guiado normalizado,  $b$ , en función de la frecuencia normalizada,  $V$ , para los modos de propagación TE. 48
- Figura 3.3. Relación de dispersión en función de los parámetros normalizados  $a$  y  $b$ , para los modos (a) TE y (b) TM considerando diferentes alturas fraccionales,  $r$ . 49
- Figura 3.4. (a) Esquema de la guía de onda simulada, indicando las dimensiones y los puertos de entrada y salida. (b) Tabla de parámetros considerados durante la simulación. Para el núcleo se varió la altura, mientras para el recubrimiento se varió altura y ancho. 50
- Figura 3.5. Distribución de campo eléctrico para una estructura con  $h=1.25$   $\mu\text{m}$ , en el (a) puerto de entrada y (b) a lo largo de la guía de onda para una longitud de onda de 550 nm y 680 nm. (c) Energía eléctrica total propagada a lo largo de la guía en función de la longitud de onda y altura de la guía de onda. 51
- Figura 3.6. Mascarilla utilizada (izquierda) para la fabricación de las guías de onda [87]. De lado derecho se agrega una descripción de los anchos de guía para cada sección. 53
- Figura 3.7. Montaje para observar confinamiento de luz y modos de propagación. Las flechas rojas indican la dirección de propagación de la luz. La variación del espesor de las flechas se utiliza para ilustrar el cambio del diámetro del haz a través de cada elemento del montaje. 54
- Figura 3.8. Variación del índice de refracción en función de  $R_N$  en películas de nitruro de silicio recién depositadas y después de un tratamiento térmico a 1100 °C en  $N_2$  durante 2 horas. 56

- Figura 3.9. (a) Concentración atómica de silicio (Si), nitrógeno (N) y oxígeno (O) en función del  $R_N$  para películas de nitruro de silicio depositadas por LPCVD. Las líneas punteadas son de carácter ilustrativo para observar la tendencia de la concentración atómica de cada elemento. (b) Perfil de composición para una película de  $Si_xN_y$  depositada con  $R_N = 120$ . 57
- Figura 3.10. Espectro de fotoluminiscencia para películas de nitruro de silicio recién depositadas y después de un tratamiento térmico (TT) a 1100 °C en  $N_2$  durante 2 horas. 58
- Figura 3.11. Espectro de absorción obtenido por FTIR para películas de nitruro de silicio ( $R_N = 100$  y 120), antes y después de un tratamiento térmico (TT) a 1100 °C 2 horas en  $N_2$ . La película conserva su espectro de absorción con el TT, presentando ligeros cambios (observar recuadro). 60
- Figura 3.12. Descomposición de la banda B del espectro de absorción para las muestras (a)  $NP_{100}$ -TT y (b)  $NP_{120}$ -TT con recocido a 1100 °C en  $N_2$  durante 2 horas. 60
- Figura 3.13. Espectro de transmitancia de muestras  $NQ_{100}$  y  $NQ_{120}$ . Las películas de nitruro fueron obtenidas depositadas sobre cuarzo con  $R_N = 100$  y 120 con espesor aproximado de 500 nm. Después del depósito fueron sometidas a tratamiento térmico a 1100 °C en  $N_2$  por 2 horas. 61
- Figura 3.14. Rugosidad promedio para estructuras  $Si_xN_y/Si$  (BP) y  $Si_xN_y/SiO_2/Si$  con nitruro de silicio depositado usando (a)  $R_N = 100$  y (b)  $R_N = 120$ . 62
- Figura 3.15. Estrés residual para estructuras  $Si_xN_y/Si$  (BP) y  $Si_xN_y/SiO_2/Si$  (B) con nitruro de silicio depositado usando (a)  $R_N = 100$  y (b)  $R_N = 120$ . El estrés se estimó a partir del radio de curvatura, comparando substratos (Si) sin películas y estructuras. 63
- Figura 3.16. Espectro de los modos acoplados mediante prisma en función del índice de refracción efectivo para la muestra  $B_{100}$ -TT. La gráfica anterior fue obtenida mediante acoplamiento de luz por prisma. Cuando la luz es reflejada se obtiene un máximo de intensidad y cuando se propaga por la película se detectan mínimos de intensidad (modos acoplados). 64
- Figura 3.17. Perfil superficial de las muestras con guías de onda para un nitruro de silicio con (a)  $R_N = 100$  y (b)  $R_N = 120$ . Se observa diferente altura de las guías debido al tiempo de grabado. Se obtuvieron dos guías tipo costilla con diferente altura fraccional y una guía tipo bloque. 65
- Figura 3.18. Imagen de la sección transversal de la muestra  $W_{120}$ -TT-3 obtenida por SEM. Se aprecian tres tonalidades de grises, correspondiendo a diferente material. Las dimensiones se encuentran en el rango de lo obtenido por elipsometría y perfilometría. 66
- Figura 3.19. Modos transversales típicos para guías de onda tipo costilla ( $r = 0.5$ ) para nitruro de silicio con a)  $R_N = 100$  y b)  $R_N = 120$ . Su distribución de intensidad dentro de la guía se asocian a modos  $TEM_{00}$ ,  $TEM_{10}$ ,  $TEM_{20}$  y  $TEM_{30}$  principalmente, tanto para luz roja ( $\lambda=633$  nm) como azul ( $\lambda=473$  nm). 68
- Figura 3.20. Coeficiente de atenuación en función del ancho de la guía de onda para una  $\lambda = 633$  nm. Se consideraron resultados de guías de onda cuyo nitruro fue depositado con  $R_N=100$  (cuadros azules) y  $R_N=120$  (círculos rojos). 69
- Figura 4.1. Esquema del corte transversal (arriba) y vista superior (abajo) de los diodos (a) discretos e (b) integrados. El corte transversal indica las capas y materiales que componen el dispositivo. La vista superior indica los parámetros geométricos. 76
- Figura 4.2. (a) Esquema de medición diodo. (b) espectro de emisión de lámpara con diferente potencia óptica. 77
- Figura 4.3. Esquema de la región de agotamiento en un diodo discreto con polarización (a)  $V = 0$  V y (b)  $V = -10$  V. Con una polarización de -10 V fotones con  $\lambda$  de 630 nm a 740 nm serán absorbidas dentro de la región de carga espacial, contribuyendo a la fotocorriente. 78
- Figura 4.4. Curvas típicas de corriente – voltaje para diodos (a) discretos e (b) integrados, bajo diferentes condiciones de iluminación. Se aprecia un incremento en la corriente fotogenerada ( $I_{ph}$ ) debido al cambio en condición de iluminación. 79
- Figura 4.5. Gráficas de corriente de oscuridad ( $I_0$ ),  $I_0$  por área ( $A_T$ ) e  $I_0$  por perímetro (P) para diodos discretos (gráficas (a), (b) y (c)) y diodos integrados (gráficas (d), (e) y (f)). 80

Figura 4.6. Gráficas de fotocorriente ( $I_{ph}$ ),  $I_{ph}$  por área de detección ( $A_{DE}$ ) e  $I_{ph}$  por perímetro ( $P$ ) para diodos discretos – (a), (b) y (c) respectivamente – y diodos integrados – (d), (e) y (f) respectivamente –.82

Figura 5.1. Esquema de diodos con configuración (a) estándar y (b) planar. 86

Figura 5.2. Sección transversal del acoplamiento guía de onda – diodo  $PN$ , para diodo con topologías (a) estándar con  $V_g=0$  y (b) planar con  $V_g=-10$ .  $M$ ,  $S$  y  $C$  son la profundidad de cavidad, separación entre la guía de onda y la unión  $PN$ , y la longitud del contacto, respectivamente.  $V_g$  es la polarización eléctrica que se aplica a la compuerta respecto al sustrato. (c) Distribución de campo eléctrico para un diodo planar acoplado a la guía de onda. Las regiones en rojo y morado corresponden a un  $E= 9 \times 10^5$  V/cm y  $E= 0$  V/cm. (d) Ancho de la región de carga espacial en función de la resistividad del sustrato y el voltaje de polarización eléctrica del diodo. 87

Figura 5.3. Gráfica de profundidad de penetración para silicio intrínseco a 300 K en función de la longitud de onda [98] y espectro de electroluminiscencia del dispositivo M-LEC<sub>1025</sub>. 88

Figura 5.4. Escala de colores para el campo eléctrico ( $E$ ) dentro de la región de agotamiento cuando el diodo es polarizado con (a)  $V_g = 0$  V, (b)  $V_g = -5$  V y (c)  $V_g = -10$  V. Las regiones en rojo corresponden a la mayor magnitud, en azul a la menor magnitud y en morado a  $E = 0$  V/m. En estos casos se utilizó un sustrato con resistividad de  $30 \Omega \times \text{cm}$  y  $120 \text{ min}$  para re-difundir impurezas. La dirección y magnitud de  $E$  es representado por flechas para (d) un diodo estándar. En este casos se utilizó un sustrato de  $5 \Omega \times \text{cm}$  y  $V_g = -40$  V. 89

Figura 5.5. (a) Vista superior del sistema emisor de luz (LEC), guía de onda y detector integrado monolíticamente. La guía de onda se encuentra embebida en la región de agotamiento y es perpendicular a la separación  $S_C$ . (b) Sección transversal de la región definida por la línea punteada A-B. Se observa que la salida de la guía de ondas encara directamente la región de agotamiento. Ambas figuras son de carácter ilustrativo. 90

Figura 5.6. (a) un diodo con la guía embebida y cavidad de  $1.5 \mu\text{m}$ , y (b) un diodo con la guía embebida y cavidad de  $3 \mu\text{m}$ . En estos casos se utilizó un sustrato de  $5 \Omega \times \text{cm}$  y  $V_g = -40$  V. (c) Sección transversal de un diodo planar con escala de colores para describir la magnitud de campo eléctrico. Las zonas en rojo se asocian con la mayor magnitud de  $E$ , las zonas azules con menor magnitud de  $E$  y las zonas moradas se relacionan con  $E = 0$  V/m. (b) Dirección y magnitud de campo eléctrico en la separación entre las regiones  $N+$  y  $P$  cuando un diodo planar es polarizado con  $-10$  V. Las flechas blancas son ilustrativas de la orientación de  $E$  en el sustrato. 91

Figura 5.7. Esquemas de la sección transversal de la topología mixta con 2 guías de onda fabricadas en la separación  $S_C$ . (a) diodo polarizado con voltaje  $V_1$ , provocando la detección de la luz de la guía B. (b) Mismo sistema que en (a) pero alternando la posición de las guías. Con el mismo voltaje se detecta la luz de la guía A. (c) y (d) Polarización del diodo con  $V_2$ , produciendo que ambas guías sean embebidas por la región de agotamiento independiente a su posición. Todos los esquemas muestran una metodología para fabricar sistemas con selectividad de la longitud de onda de detección. 92

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Descripción de los dispositivos LEC y pilotos fabricados. En la columna de texturizado se usa RIE y EQ para indicar texturizado por grabado de iones reactivos o electroquímico.	12
Tabla 2.2. Espesores e índices de refracción para capas simples y multicapas de SRO, obtenidos por elipsometría a muestras con y sin tratamiento térmico.	15
Tabla 2.3. Rugosidad promedio y densidad de picos en sustratos de silicio texturizados por grabado de iones reactivos (RIE) y grabado electroquímico (EQ).	16
Tabla 2.4. Posición y área bajo la curva de los modos de vibración <i>stretching</i> en fase (S) y fuera de fase (a-S) para muestras SRO <sub>30</sub> , M <sub>525</sub> y M <sub>1025</sub> antes y después de tratamiento térmico. También se agrega el porcentaje de contribución de cada modo al área total.	19
Tabla 2.5. Tamaño y densidad de NCs-Si en las capas de SRO <sub>25</sub> , SRO <sub>10</sub> y SRO <sub>5</sub> .	23
Tabla 2.6. Resumen de la posición, intensidad y porcentaje del área total de la curva para cada contribución del espectro de fotoluminiscencia. Se presentan los resultados para capas simples (SRO <sub>25</sub> y SRO <sub>30</sub> ) y multicapas (M <sub>525</sub> y M <sub>1025</sub> ) de SRO.	24
Tabla 2.7. Valores de capacitancia máxima, capacitancia de SRO, constante dieléctrica y densidad de trampas obtenidos a partir de curvas C-V, en estructuras LEC de capa simple y multicapa.	27
Tabla 2.8. Constante dieléctrica de los NCs-Si ( $\epsilon_{\text{NCs-Si}}$ ), capacitancia de cada capa de SRO ( $C_{\text{SRO-C}}$ ), capacitancia de la multicapa ( $C_{\text{SRO-M}}$ ) y capacitancia máxima ( $C_{\text{max}}$ ). Se considera una distribución homogénea de NCs-Si en cada capa de SRO.	28
Tabla 2.9. Posición y porcentaje del área total de cada contribución al espectro de EL, de los dispositivos S-LEC <sub>p</sub> , S-LEC <sub>T1</sub> , M-LEC <sub>525</sub> y M-LEC <sub>1025</sub> .	35
Tabla 2.10. Parámetros obtenidos mediante el ajuste de los mecanismos de conducción en dispositivos de capa simple (S-LEC <sub>p</sub> y S-LEC <sub>T1</sub> ) y multicapa (M-LEC <sub>525</sub> y M-LEC <sub>1025</sub> ). $\Phi_T$ , $\Phi_B$ , $N_t$ y $V_{\text{TFL}}$ son el nivel de energía de trampa, la altura de la barrera FN, la densidad de trampas por unidad de volumen y el voltaje para el límite de trampas libres.	37
Tabla 2.11. Valores de voltaje, Campo eléctrico, potencia eléctrica, potencia óptica y eficiencia externa para cada dispositivo emisor de luz.	40
Tabla 3.1. Descripción de las películas, estructuras bicapa y guías de onda fabricadas.	52
Tabla 3.2. Espesor e índice de refracción para películas de Si <sub>x</sub> N <sub>y</sub> y pilotos tanto de bicapas como guías de onda. Se incluye el índice de refracción después de un tratamiento térmico.	56
Tabla 3.3. Posición y área bajo la curva para las bandas A y B de los espectros de absorción obtenidos de las muestras BP <sub>100</sub> y BP <sub>120</sub> , antes y después de tratamiento térmico.	60
Tabla 3.4. Resumen de las características (altura externa – $rh$ –, altura fraccional – $r$ – y tipo de guía de onda) obtenidas mediante el perfil superficial.	66
Tabla 3.5. Tamaño de la distribución transversal a la salida de las guías y el coeficiente de atenuación para luz en el azul ( $\lambda = 473$ nm) y rojo ( $\lambda = 633$ nm).	67
Tabla 4.1. Descripción de los parámetros geométricos de diodos discretos ( $D_D$ ) y diodos integrados ( $D_I$ ).	76

# ÍNDICE

<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Objetivo	3
1.2.1. Metas	3
1.3. Organización de la tesis	4
<b>Capítulo 2. Emisor de Luz</b>	<b>6</b>
2.1. Material activo	7
2.2. Mecanismos de transporte en dispositivos LEC	8
2.3. Procedimiento experimental	9
2.3.1. Fabricación	10
2.3.2. Caracterización	12
2.4. Resultados: Capa simple y Multicapa	15
2.4.1. Características morfológicas	15
2.4.2. Respuesta eléctrica	25
2.4.3. Respuesta electro-óptica y eficiencia	30
2.5. Discusión: Capa simple vs Multicapa	39
2.6. Conclusión	42
<b>Capítulo 3. Guía de Onda Óptica</b>	<b>44</b>
3.1. Fundamentos y simulación	45
3.2. Procedimiento experimental	51
3.2.1. Caracterización del material	53
3.2.2. Caracterización de la guía	53
3.3. Resultados: Material y Estructura	55
3.3.1. Características morfológicas del material del núcleo	55
3.3.2. Características de la estructura $Si_xN_y/SiO_2/Si$	61
3.3.3. Guía de onda tipo costilla: análisis del elemento discreto	64
3.4. Conclusión	70
<b>Capítulo 4. Sensor de Luz</b>	<b>72</b>
4.1. Elemento fundamental: Unión PN	72
4.2. Figuras de mérito	74
4.3. Procedimiento experimental	75
4.3.1. Fabricación	75
4.3.2. Caracterización	77

4.4. Resultados eléctricos del sensor	78
4.5. Conclusión	82
<b><u>Capítulo 5. Circuito Fotónico Integrado en Silicio: Simulación y Resultados</u></b>	<b>85</b>
5.1 Simulación del acoplamiento guía de onda - sensor	85
5.2 Resultados del acoplamiento guía de onda - sensor	86
5.3. Topología propuesta	89
5.4. Conclusión	93
<b><u>Capítulo 6. Conclusiones y Trabajo Futuro</u></b>	<b>95</b>
<b><u>Referencias</u></b>	<b>98</b>
<b><u>Lista de Publicaciones</u></b>	<b>106</b>
<b><u>Apéndices</u></b>	<b>108</b>
A.1. Proceso de fabricación para LEC de capa simple	108
A.2. Proceso de fabricación para LEC con multicapas de SRO	110
A.3. Guía de onda óptica	113
A.4. Rutina de programación: acoplamiento guía de onda - sensor	115

## Capítulo 1. Introducción

El silicio (Si) es el material semiconductor básico en la fabricación de los circuitos integrados, y lo ha sido desde varias décadas atrás. Como se ha demostrado con el paso del tiempo, la industria microelectrónica basada en la tecnología de Si ha superado limitaciones para alcanzar altos niveles de integración y un menor costo de producción. Sin embargo, estos avances trajeron nuevas dificultades tales como un mayor consumo de potencia, efectos de “*cross-talk*” (información cruzada) y calentamiento debido a fenómenos resistivos y/o capacitivos. Aunado a esto, la creciente demanda de procesamiento de información en mayor cantidad y velocidad [1], así como las aplicaciones para monitoreo *in-situ* de problemas de salud o ambientales [2] [3] [4], están orillando a la tecnología de silicio a buscar nuevos enfoques para solventar estas demandas. Uno de los enfoques consiste en utilizar el fotón, en lugar del electrón, como partícula elemental en procesamiento de información. Para lograrlo es necesario desarrollar dispositivos opto-eléctricos capaces de generar, manipular y detectar luz. Esta idea fue presentada por Soref en 1993 [5], donde menciona que el desarrollo de un circuito fotónico integrado (PIC, del inglés *Photonic Integrated Circuit*) utilizando tecnología de silicio permitiría una infinidad de aplicaciones.

En la actualidad, gracias a procesos de fabricación micro- y nano-electrónicos bien controlados, existe una fuerte investigación de circuitos electrofotónicos en silicio, también conocido como Fotónica en silicio. Algunas de las aproximaciones para el desarrollo de estos dispositivos son: integración híbrida (uso de substratos de silicios integrando fuentes de luz basadas en compuestos III-V) [6] [7] e integración monolítica en silicio [8] [9] [10] [11]. Esta última es la más prometedora debido a su compatibilidad con los procesos de fabricación CMOS (del inglés, *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*). Actualmente se ha demostrado la fabricación de guías de onda [12], sensores [13], y emisores de luz [14] en una línea de fabricación CMOS. Así mismo, se ha reportado la integración entre una guía de onda y un fotodetector [15], o un emisor de luz con una guía de onda [8]. En un trabajo más reciente se reportó la fabricación de un circuito compuesto de un emisor de luz, una guía de onda y un sensor, utilizando tecnología CMOS [16]. Este trabajo establece un primer acercamiento con el desarrollo de un PIC básico que permite la generación, guiado y detección de luz. Sin embargo, la baja potencia de emisión de las fuentes de luz, aunado a las pérdidas de propagación en la guía de onda, provoca que el sensor opere en el límite de su sensibilidad. Por tal motivo es necesario optimizar el PIC para obtener un sistema más robusto.

La principal limitación de los circuitos electrofotónicos con integración monolítica son las deficientes fuentes de luz, debido a que el silicio es un semiconductor de banda indirecta, y por tanto un material con deficiente emisión de luz. Desde el

## 1. INTRODUCCIÓN

descubrimiento de la emisión de luz a temperatura ambiente en silicio poroso [17], la continua investigación de las propiedades opto-eléctricas de materiales basados en silicio ha desarrollado compuestos con características adecuadas para formar fuentes de luz y compatibles con procesos CMOS. Uno de los materiales con respuesta luminiscente en el rango visible es el óxido de silicio rico en silicio (SRO, *Silicon Rich Oxide*), también llamado óxido de silicio fuera de estequiometría. Algunas de las técnicas de fabricación utilizadas para su obtención son: depósito químico en fase vapor a baja presión o asistido por plasma (LP- y PE-CVD, del inglés *Low-Pressure- y Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition*), implantación iónica y *sputtering* [18] [19] [20] [21] [22]. Sin embargo, el SRO obtenido por LPCVD y recocido a 1100 °C durante 3 horas en ambiente de nitrógeno ha demostrado tener una gran respuesta luminiscente [18]. La elaboración de estas fuentes de luz ha permitido el desarrollo de aplicaciones en telecomunicaciones con emisión en el infrarrojo [1] [9] [23], o aplicaciones en el rango visible [1] [8] [14] [16].

Las guías de onda son otro componente básico en la formación de un PIC. Este componente se ha fabricado utilizando tecnologías CMOS, obteniendo estructuras altamente funcionales debido a sus bajas pérdidas de propagación [12]. Sus aplicaciones son en el rango visible e infrarrojo y utilizan Si, SiO<sub>2</sub> o Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> como medio activo para la propagación de luz [12] [15] [24] [25] [26]. Sin embargo, no son los únicos elementos ópticos. En la literatura también se encuentra reportes de dispositivos como divisores de haz y acopladores [25] [27] fabricados con tecnología de silicio.

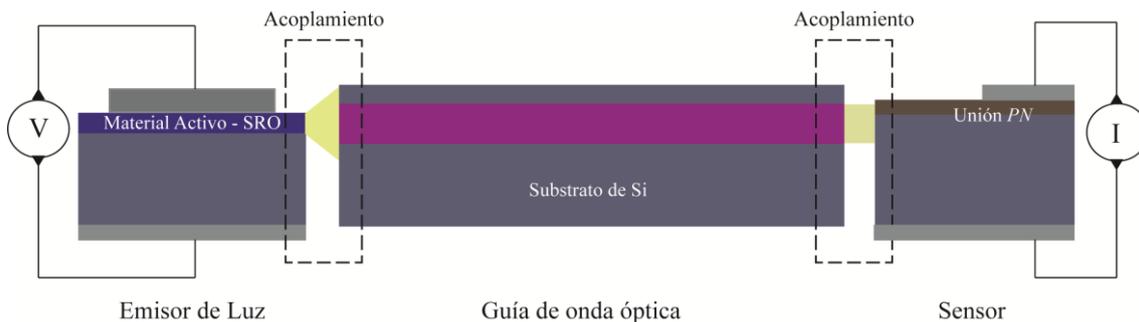
Por su parte, los dispositivos detectores de luz (fotodetectores) tienen ya varias décadas de desarrollo. Es la unión *PN* el elemento base de estos dispositivos y es uno de los dispositivos opto-eléctricos más estudiados y con grandes avances utilizando tecnología de silicio [7] [27] [28]. Si bien se ha probado su buen funcionamiento como elemento discreto, en pocos casos se presenta la integración con varios dispositivos. En la literatura se ha reportado la integración entre guías de onda y diodos [15] [29]; sin embargo, no se abordan las restricciones de la integración monolítica.

Los puntos críticos para la integración monolítica de un circuito electrofotónico recaen en las limitaciones tecnológicas y problemas ópticos, como son: la diferencia de coeficientes de expansión entre los materiales (Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Poly, Al, etc.), efectos de “*cross-talk*”, efectos de incompatibilidades tecnológicas, efectos ópticos no-deseables en las interfaces, pobre acoplamiento de luz y por supuesto una deficiente fuente de luz. El objetivo de esta tesis es desarrollar una fuente de luz, una guía de onda y un fotodetector, y establecer los parámetros de diseño y fabricación de un PIC básico que optimice su funcionamiento.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

En la Fig. 1.1 se presenta un esquema de un circuito electrofotónico en silicio, integrando una fuente de luz, una guía de onda y un detector. Asimismo, se aprecian los acoplamientos de la integración. Si bien esta configuración no tiene una aplicación directa, representa la celda elemental para diversas aplicaciones.



**Figura 1.1. Esquema de un circuito electrofotónico en silicio, integrando una fuente de luz, una guía de onda y un detector. Los recuadros resaltan los acoplamientos entre elementos.**

En este trabajo de tesis se estudiará cada elemento individualmente y se propondrá un diseño para la fabricación de un PIC. Para la fuente de luz, se investigarán diferentes estructuras y materiales, y se elegirá la configuración más adecuada para obtener suficiente potencia óptica. En el caso de la guía de onda, se estudiarán diversas geometrías y materiales con la finalidad de optimizar el dispositivo. Asimismo, se investigará la topología del sensor que garantice una mayor detección y permita la integración. Finalmente, se analizará la configuración más adecuada para el acoplamiento guía-detector.

### 1.2. Objetivo

- Diseñar, fabricar y caracterizar un emisor de luz, una guía de onda óptica y un sensor, con la finalidad de ser integrados en un PIC.

#### 1.2.1. Metas

## 1. INTRODUCCIÓN

- Fabricar y optimizar una fuente de luz basada en SRO-LPCVD para la integración en el circuito electrofotónico.
- Diseñar y fabricar una guía de onda que permita la mayor propagación de luz proveniente del material activo.
- Diseñar un sensor capaz de detectar la mayor cantidad de luz que salga de la guía de onda.
- Estudiar las limitaciones tecnológicas en el acoplamiento de los tres dispositivos.
- Diseñar una propuesta del circuito electrofotónico integrado.

### 1.3. Organización de la tesis

El manuscrito cuenta con 6 capítulos. El capítulo 1 contiene la introducción general del trabajo, el planteamiento del problema y los objetivos de la investigación.

El capítulo 2 presenta el análisis del emisor de luz. Al principio, se encuentra una breve descripción del estado del arte en capacitores emisores de luz compatibles con tecnología de silicio. En seguida, se presenta la metodología experimental y los resultados. Esta última parte contiene un análisis del material y fenómenos físicos presentes en la emisión de luz, así como el análisis del desempeño del dispositivo. Finalmente, se menciona las características del dispositivo con mejor desempeño y apto para la integración.

El capítulo 3 aborda el estudio de la guía de onda. Similar al procedimiento en el capítulo 2, se inicia con una breve descripción del marco teórico y después se describe la metodología experimental. En el apartado de resultados se divide en dos partes: la caracterización del material, y la fabricación y caracterización de la guía de onda óptica. Por último, se establecen las características de la guía de onda con mejor desempeño.

En el capítulo 4 se caracteriza un sensor fabricado en el Instituto de Microelectrónica de Barcelona (IMB-CNM). Al principio, se menciona el funcionamiento de un diodo *PN* y sus figuras de mérito. A continuación, se describe la metodología experimental y se presentan los resultados de caracterización del diodo. En la última parte del capítulo se detallan los lineamientos geométricos y de fabricación del sensor con mejor desempeño.

El capítulo 5 contiene los resultados del análisis mediante simulación del acoplamiento guía de onda – sensor. Con base en el análisis se propone una configuración del PIC. Además, se mencionan algunas consideraciones generales para la fabricación del circuito electrofotónico con base en la topología diseñada.

Por último, el capítulo 6 incluye las conclusiones del trabajo de investigación y la perspectiva del trabajo futuro.

## 1. INTRODUCCIÓN

## Capítulo 2. Emisor de Luz

El emisor de luz representa la mayor limitación para fabricar un circuito electrofotónico en Si. En la actualidad existen varias tendencias en el desarrollo de estos dispositivos, por ejemplo: emisores basados en uniones PN, heterouniones con materiales de la familia III-V y emisores tipo capacitor MOS [8] [19] [20] [30]. Sin embargo, la última opción, también conocida como capacitores emisores de luz (LEC, del inglés *Light Emitting Capacitor*) presenta emisión de luz en el visible y es compatible con la tecnología de Si, y por tanto representa una ventaja para la integración monolítica de un PIC.

Desde del descubrimiento de emisión de luz en silicio poroso a temperatura ambiente [17], se inició una ardua labor para obtener materiales con respuesta luminiscente en el rango visible y basados en silicio. Entre los materiales más destacados se encuentran el SRO, el nitruro de silicio rico en silicio (SRN, *Silicon Rich Nitride*), estructuras multicapa alternando capas nanométricas de Si y SiO<sub>2</sub>, así como matrices de SiO<sub>2</sub> implantadas con Si, Ge o tierras raras (principalmente Erblio - Er -) [9] [11] [18] [19] [21] [22] [31]. En el caso de matrices implantadas con Er se ha encontrado emisión en el infrarrojo cercano (1.5 μm), por lo que las aplicaciones se han enfocado a telecomunicaciones [9] [23]. Para la obtención de estos materiales se utilizan técnicas de fabricación, tales como depósito químico en fase vapor (CVD, *Chemical Vapor Deposition*), implantación iónica y *sputtering* [18] [20] [21] [32]. Al modificar las condiciones de depósito, así como las condiciones de los tratamientos térmicos post-depósito, se obtiene materiales con diferentes respuestas luminiscentes. Si bien no se ha establecido contundentemente el origen de la emisión, ésta se atribuye principalmente a dos teorías: confinamiento cuántico o emisión debida a defectos [33] [34]. El confinamiento cuántico domina en películas con gran densidad de nano-cristales de Si (NCs-Si), cuyo diámetro es menor a 5 nm, y en estructuras que alternan capas dieléctricas con capas con alto contenido de NCs-Si, presentando ambas capas espesores nanométricos [34] [35] [36] [37]. La emisión debida a defectos se asocia a defectos de oxígeno como: vacancias de oxígeno neutras (NOV, del inglés *Neutral Oxygen Vacancy*), centros deficientes de oxígeno (ODC, del inglés *Oxygen Deficient Center*), centros E', centros de oxígeno no enlazados (NBOHC, del inglés *Non-Bridging Oxygen Hole Center*), enlaces sueltos de silicio (Si-db, del inglés, *Silicon – dangling bonds*), entre otros [22] [33]. Tanto el efecto cuántico como la emisión debida a defectos son resultado del proceso de depósito y el tratamiento térmico post-depósito. En ambas etapas se presentan fenómenos como segregación, nucleación, aglomeración y crecimiento, definiendo las características ópticas y eléctricas del material.

Actualmente, los LEC basados en materiales compatibles con silicio tienen eficiencias externas muy bajas, del orden de 10<sup>-6</sup> %, debido a su baja potencia de emisión o alto consumo de potencia eléctrica [38] [39]. Para aumentar la potencia óptica

## 2. EMISOR DE LUZ

y disminuir el voltaje de emisión se ha recurrido a estructuras multicapas, dispositivos de capa simple con nano-estructuras en la interfaz y reducción del espesor de la capa activa [19] [20] [21] [40] [41] [42].

En este apartado se estudiará tanto el material activo como el dispositivo emisor de luz. Respecto al material, se analizarán sus propiedades ópticas y morfológicas. En el caso del LEC, se analizarán dos tipos. El primer LEC utilizará una capa simple de SRO sobre un sustrato de Si texturizado. El segundo LEC tendrá multicapas de SRO con diferente exceso de silicio. Se estudiarán sus características eléctricas y electro-ópticas para determinar el dispositivo más adecuado en la integración, enfocándose en el voltaje de encendido, rango de operación y potencia de emisión.

### 2.1. Material activo

Se seleccionó el SRO como material activo. Específicamente, el obtenido por LPCVD pues ha demostrado una respuesta luminiscente [43], incluso mayor que el obtenido por otras técnicas [18]. Las características ópticas y eléctricas del material varían en función del exceso de silicio. Para controlar el exceso de silicio se utiliza la razón de presiones parciales ( $R_0$ ) de los gases reactivos definida como:

$$R_0 = \frac{F * P_{N_2O}}{P_{SiH_4}} \quad (2.1)$$

donde  $P_{SiH_4}$  y  $P_{N_2O}$  son las presión parciales en el reactor al haber flujo de silano ( $SiH_4$ ) y óxido nitroso ( $N_2O$ ) dentro de la cámara.  $F$  es el factor de conversión en caso de utilizar un tanque de silano diluido en  $N_2$ . Los valores que puede tomar este factor van desde 1 (tanque no diluido) hasta ~33 (tanque diluido al 3 % en  $N_2$ ). Para determinar el valor de  $F$  adecuado, es necesaria una caracterización experimental del sistema. En [44] se encuentra un procedimiento que permite obtener resultados reproducibles aun cuando el factor sea modificado.

La película de SRO con mayor respuesta luminiscente es aquella con un exceso de silicio entre 4-5 % at., asociado a un  $R_0 = 30$  ( $SRO_{30}$ ) [43]. Para  $R_0 > 30$ , la emisión se atenúa rápidamente debido a que el material tiende a ser  $SiO_2$  [43] [45] [46] [47]. En el caso contrario ( $R_0 < 30$ ), también se observa una disminución en la intensidad luminiscente, pero existe un compromiso con la conducción eléctrica del material, de tal manera que un  $R_0 = 5$  ( $SRO_5$ ) tiene una alta conducción y una respuesta luminiscente casi despreciable [22] [48]. Debido a la técnica de fabricación, se tiene un buen control en la razón de crecimiento, las películas depositadas presentan baja rugosidad y no son porosas [49] [50]. Estos factores son de gran importancia cuando se desea obtener capas nanométricas bien definidas.

## 2.2. Mecanismos de transporte en dispositivos LEC

Con la finalidad de conocer el mecanismo de transporte de carga responsable de la electroluminiscencia (EL), se estudiaron los mecanismos de conducción en dispositivos tipo MOS. En [51] se puede encontrar una revisión completa de los mecanismos de conducción limitados por el electrodo o el dieléctrico. Uno de los mecanismos de conducción presentes en este tipo de dispositivos es: *Poole-Frenkel* (PF), el cual define la densidad de corriente ( $J$ ) como:

$$J_{PF} = q\mu N_C E \exp \left[ \frac{-q \left( \phi_T - \sqrt{\frac{qE}{\pi\epsilon_i\epsilon_0}} \right)}{kT} \right] \quad (2.2)$$

Donde  $q$  es la carga del electrón,  $E$  es el campo eléctrico aplicado,  $k$  es la constante de Boltzmann,  $T$  es la temperatura en escala absoluta,  $\mu$  es la movilidad,  $N_C$  es la densidad de estados en la banda de conducción,  $q\phi_T$  ( $\Phi_T$ ) es el nivel de energía de trampa,  $\epsilon_i$  es la constante dieléctrica del material y  $\epsilon_0$  es la permitividad eléctrica del vacío. En este mecanismo, un portador dentro de una trampa puede ser excitado térmicamente y fluye a otra trampa dentro del dieléctrico superando la barrera de potencial debido a un campo eléctrico aplicado.

Otro mecanismo presente en dispositivos LEC es el *Fowler-Nordheim Tunneling* (FN). Este modelo define la densidad de corriente como:

$$J_{FN} = \frac{q^3 E^2}{8\pi h q \phi_B} \exp \left[ \frac{-8\pi \sqrt{2qm_T}}{3hE} \phi_B^{3/2} \right] \quad (2.3)$$

Donde  $m_T$  es la masa efectiva de tuneleo en el dieléctrico,  $q\phi_B$  ( $\Phi_B$ ) es la altura de la barrera y  $h$  es la constante de Planck. El resto de parámetros fueron definidos previamente. Al aplicar un campo eléctrico existe un doblamiento de bandas, incrementando la probabilidad de que un portador sin superar la altura de la barrera pueda tunelar un estado dentro de la banda del dieléctrico (una trampa o la banda de conducción). Si el espesor del óxido es suficientemente delgado (<10 nm) se puede presentar tuneleo directo [51]. En caso contrario, para dispositivos con espesores mayores a 10 nm y estresados por un campo eléctrico, se presenta el tuneleo por FN.

El mecanismo Tuneleo Asistido por Trampas, del inglés *Trap-Assisted Tunneling* (TAT), se presenta comúnmente en dispositivos con dieléctricos con una gran variedad y densidad de defectos, como es el caso de SRO. La densidad de corriente está definida por:

## 2. EMISOR DE LUZ

$$J_{TAT} \propto \left( -\frac{8\pi\sqrt{2qm^*}\phi_B^{3/2}}{3hE} \right) \quad (2.4)$$

Donde  $m^*$  es la masa efectiva del electrón y depende del material. Los parámetros restantes ya fueron definidos. Al aplicar un campo eléctrico suficientemente alto (óxidos gruesos) las bandas se doblan disminuyendo su ancho, entonces los portadores atrapados en el dieléctrico pueden tunelar de una trampa a otra, sin superar la barrera de potencial. Este mecanismo puede excitar portadores en niveles de trampa profundos ( $> 1$  eV), debido a los campos eléctricos aplicados.

El mecanismo de conducción Limitado por Carga Espacial, del inglés *Space-Charge Limited* (SCL), presenta un comportamiento más complicado. Dispositivos con capas inyectoras de electrones han mostrado conducción por este mecanismo [52]. En este caso, la densidad de corriente mantiene relación con el voltaje dado por:

$$J_{SCL} \propto V^n \quad (2.5)$$

Siendo  $n$  un número entero que toma valores de 1, 2 o muy grande (tiende a infinito) dependiendo del voltaje aplicado. El transporte de carga está limitado por el número de trampas presentes en el dieléctrico. Al aplicar un campo eléctrico pequeño existe un débil flujo de electrones hacia el dieléctrico ( $n$  se aproxima a 1, conducción óhmica), hasta alcanzar un voltaje de tránsito ( $V_{tr}$ ). En este punto, los portadores comienzan a llenar las trampas libres y se observa que  $n$  tiende a ser muy grande. Cuando todas las trampas fueron llenadas (a un voltaje denominado  $V_{TFL}$ ), los portadores muestran un comportamiento denominado “libre de trampas”. A partir de este punto la densidad de corriente tiene una relación cuadrática con el voltaje ( $n=2$ ).

### 2.3. Procedimiento experimental

Se fabricaron estructuras LEC basadas en capas simples y multicapas de SRO obtenido por LPCVD. En lo subsecuente, ambas estructuras serán etiquetadas como S-LEC y M-LEC, respectivamente. En las estructuras S-LEC se modificó la rugosidad superficial del sustrato (sustratos texturizados) para estudiar el efecto en el desempeño del dispositivo. Respecto a las estructuras M-LEC, se estudió el desempeño del dispositivo al alternar capas conductoras con capas emisoras de SRO.

## 2. EMISOR DE LUZ

### 2.3.1. Fabricación

Un total de 5 estructuras LEC fueron fabricadas. Como sustrato se utilizó silicio tipo P, orientación (100) y baja resistividad (2 a 4  $\Omega$  x cm). Las películas de SRO fueron depositadas por LPCVD a 736 °C. Previo al depósito, los sustratos fueron limpiados mediante un proceso estándar CMOS.

Tres dispositivos S-LEC se fabricaron con diferente texturizado superficial del sustrato (diferente rugosidad). La misma película de SRO<sub>30</sub> fue depositada sobre cada sustrato, esperando obtener un espesor de 70 nm. Uno de los dispositivos conservó un sustrato pulido como estructura de referencia (S-LEC<sub>P</sub>). El segundo dispositivo (S-LEC<sub>T1</sub>) usó un sustrato texturizado mediante iones reactivos (RIE, *Reactive Ion Etching*) por 1 min, empleando Ar y SF<sub>6</sub> como precursores del plasma en una proporción 7:3 y una potencia de 300 W. El tercer dispositivo (S-LEC<sub>T2</sub>) utilizó un sustrato texturizado por grabado electroquímico (EQ) con una rampa de 3 mA a 23 mA en 30 segundos.

Dos dispositivos M-LEC fueron fabricados. En ambas estructuras se alternaron 4 capas conductoras con 3 capas emisoras. La primera estructura (M-LEC<sub>525</sub>) utilizó SRO<sub>5</sub> con SRO<sub>25</sub> y la segunda (M-LEC<sub>1025</sub>) SRO<sub>10</sub> con SRO<sub>25</sub>. Se esperaba obtener un espesor nominal de 115 nm, de tal forma que las capas conductoras (SRO<sub>5</sub> y SRO<sub>10</sub>) fueran de 10 nm y las emisoras (SRO<sub>25</sub>) de 25 nm. También se depositó una película de SRO<sub>25</sub> de espesor similar al utilizado en las multicapas para contrastar las características morfológicas de una capa simple con multicapas.

Una vez depositadas las películas, todas fueron sometidas a un tratamiento térmico a 1100 °C en N<sub>2</sub> por 2 horas. En el proceso de fabricación se utilizaron pilotos (monitores) para la caracterización óptica y morfológica del material. El último paso para obtener la estructura LEC fue depositar una película de polisilicio (Poly), doparlo tipo N y definir un área de compuerta mediante litografía y grabado. Al final del proceso, se obtuvo una compuerta de Poly-N<sup>+</sup> con un espesor de 250 nm, con áreas de compuerta (A<sub>C</sub>) de  $(1.54 \pm 0.01 \times 10^{-2}) \text{ cm}^2$  y  $(4.056 \pm 0.017 \times 10^{-2}) \text{ cm}^2$ , para los dispositivos S-LEC y M-LEC, respectivamente.

La Fig. 2.1 muestra un esquema de ambos tipos de LEC y el espectro de transmitancia de la película Poly-N<sup>+</sup> utilizada como compuerta. Para obtener su espectro de transmitancia la película fue depositada sobre cuarzo con una transparencia promedio de 95% en el rango UV-VIS (ver. Fig. 2.1. (c)). La compuerta de Poly-N<sup>+</sup> absorbe la radiación UV y comienza a transmitir a los 380 nm. En el rango de 400 a 850 nm, la transmitancia incrementa de 2 a 60 % como se observa en la Fig. 2.1 (c).

## 2. EMISOR DE LUZ

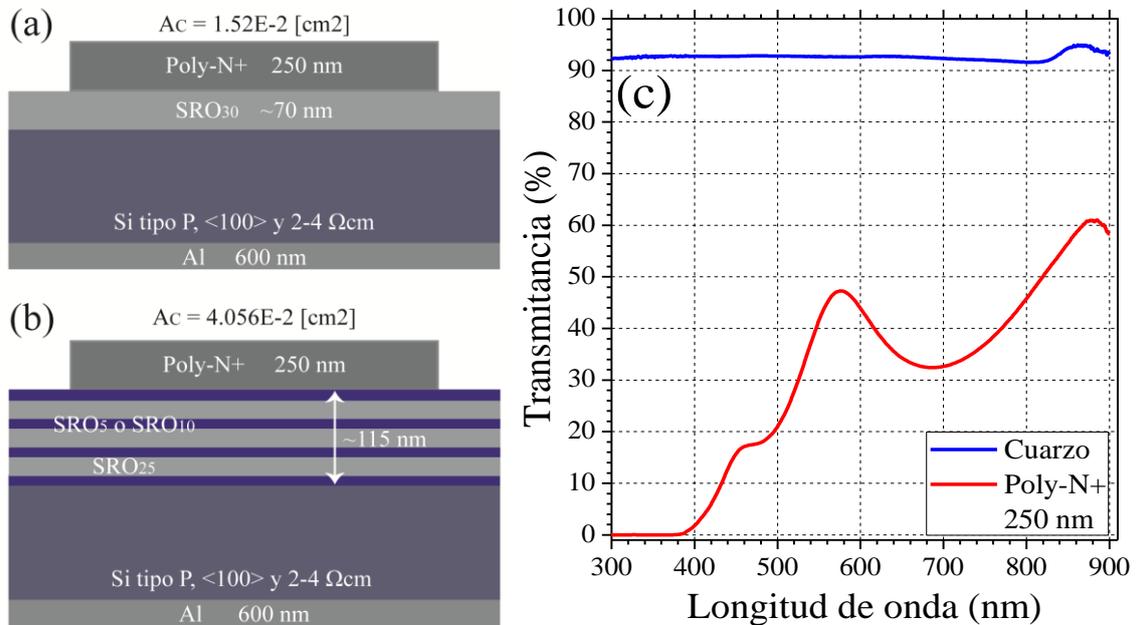


Figura 2.1. (a) LEC de capa simple y (b) LEC con multicapa de SRO. Ambos esquemas no están a escala y muestran los espesores de cada película. (c) Espectro de transmitancia de la compuerta de polisilicio dopado N+ y espesor de 250 nm.

En la tabla 2.1 se resume el proceso de fabricación para cada muestra (dispositivos y pilotos), resaltando los puntos más importantes. En caso de requerir más detalles se puede consultar el proceso de fabricación completo para las estructuras S-LEC y M-LEC en los apéndices A.1 y A.2, respectivamente. Además, en [44] se puede consultar las condiciones de depósito y procedimiento para obtener características reproducibles en las películas de SRO depositadas por LPCVD.

## 2. EMISOR DE LUZ

**Tabla 2.1. Descripción de los dispositivos LEC y pilotos fabricados. En la columna de texturizado se usa RIE y EQ para indicar texturizado por grabado de iones reactivos o electroquímico.**

Muestra	Tipo	T*	Película de SRO		P <sub>N2O</sub> /P <sub>SiH4</sub> [torr]/[torr]	TT**	
			Capa simple	Multicapa			
S <sub>P</sub>	Piloto	No	SRO <sub>30</sub>	-----	0.84/0.95		
S <sub>T1</sub>		RIE					
S <sub>T2</sub>		EQ					
S <sub>P</sub> -TT		No					X
S <sub>T1</sub> -TT		RIE					X
S <sub>T2</sub> -TT		EQ					X
S-LEC <sub>P</sub>		Dispositivo				No	
S-LEC <sub>T1</sub>	RIE			X			
S-LEC <sub>T2</sub>	EQ			X			
S <sub>25</sub> -TT	Piloto	No	SRO <sub>25</sub>	-----	0.74/0.97	X	
M <sub>525</sub>	Pilotos	No	-----	SRO <sub>5</sub> /SRO <sub>25</sub>	[SRO <sub>5</sub> ]		
M <sub>1025</sub>				SRO <sub>10</sub> /SRO <sub>25</sub>	0.2/0.97		
M <sub>525</sub> -TT				SRO <sub>5</sub> /SRO <sub>25</sub>	[SRO <sub>10</sub> ]	X	
M <sub>1025</sub> -TT				SRO <sub>10</sub> /SRO <sub>25</sub>	0.3/0.97	X	
M-LEC <sub>525</sub>	Dispositivos			SRO <sub>5</sub> /SRO <sub>25</sub>	[SRO <sub>25</sub> ]	X	
M-LEC <sub>1025</sub>				SRO <sub>10</sub> /SRO <sub>25</sub>	0.74/0.97	X	

\*Texturizado

\*\*Tratamiento térmico a 1100 °C en N<sub>2</sub> por 2 horas

### 2.3.2. Caracterización

El espesor e índice de refracción se obtuvieron mediante un elipsómetro Gaertner L117, dotado de un láser de He-Ne (632.8 nm) que incide a 70° respecto a la superficie de la muestra. Esta es una técnica de no contacto y no invasiva que permite obtener resultados con precisión. En la literatura se puede encontrar una descripción detallada del principio de operación y sus variantes [53] [54].

La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, *Fourier Transform Infrared*) permitió estudiar la composición molecular de las diferentes películas, enfocando el análisis en el contenido de enlaces Si-O asociados a diferentes modos de vibración. Se utilizó un equipo Brucker modelo Vector 22 para obtener la absorción de 400 cm<sup>-1</sup> a 4000 cm<sup>-1</sup>. En todas las mediciones se restó el espectro de una referencia (silicio sin SRO) para observar las características de la película (simple o multicapa).

La rugosidad superficial se inspeccionó mediante una microscopio de fuerza atómica (AFM, *Atomic Force Microscope*) Nanosurf easyScan. Las mediciones se realizaron en áreas de 5x5 μm<sup>2</sup> en modo de no contacto. En algunos casos se estudiaron áreas de 2x2 μm<sup>2</sup>. A partir de las imágenes se obtuvo la rugosidad promedio y la densidad de picos.

## 2. EMISOR DE LUZ

La respuesta fotoluminiscente (PL, *Photoluminescence*) fue analizada mediante un espectro-fluorómetro Horiba Ybon modelo Fluoro-Max3. El sistema cuenta con una lámpara de xenón como fuente de luz y un tubo foto-multiplicador como detector. Las muestras fueron excitadas con radiación UV, típicamente 300 nm, y se midió la respuesta de 370 nm a 1000 nm con una resolución de 1 nm y tiempo de integración de 0.5 segundos. Las aperturas de los monocromadores (fuente y detector) se mantuvieron a 3 nm. Se utilizaron un filtro pasa-banda a la salida de la fuente y un filtro pasa-alta a la entrada del detector para evitar efectos de interferencia.

Mediante microscopía por transmisión de electrones (TEM, *Transmission Electron Microscopy*) se observó la formación de las multicapas, así como el contenido de NCs-Si en películas de SRO. Mediante el análisis de estas imágenes, se obtuvo el tamaño promedio y la densidad de NCs-Si.

La caracterización eléctrica se realizó mediante dos técnicas: curvas corriente – voltaje (I-V) y curvas capacitancia – voltaje (C-V). La primera de ellas se obtuvo mediante una fuente-medidora Keithley modelo 2400 controlada mediante un programa de LabVIEW®. Las curvas C-V se midieron con un analizador de parámetros Keithley modelo 4200. Se utilizó una señal AC senoidal y 30 mV de amplitud a una frecuencia de 100 kHz. Antes de realizar la medición, el equipo fue calibrado con base en las indicaciones del fabricante. Una breve descripción puede ser encontrada en [55]. En la Fig. 2.2 se presenta el esquema de medición para ambas técnicas.

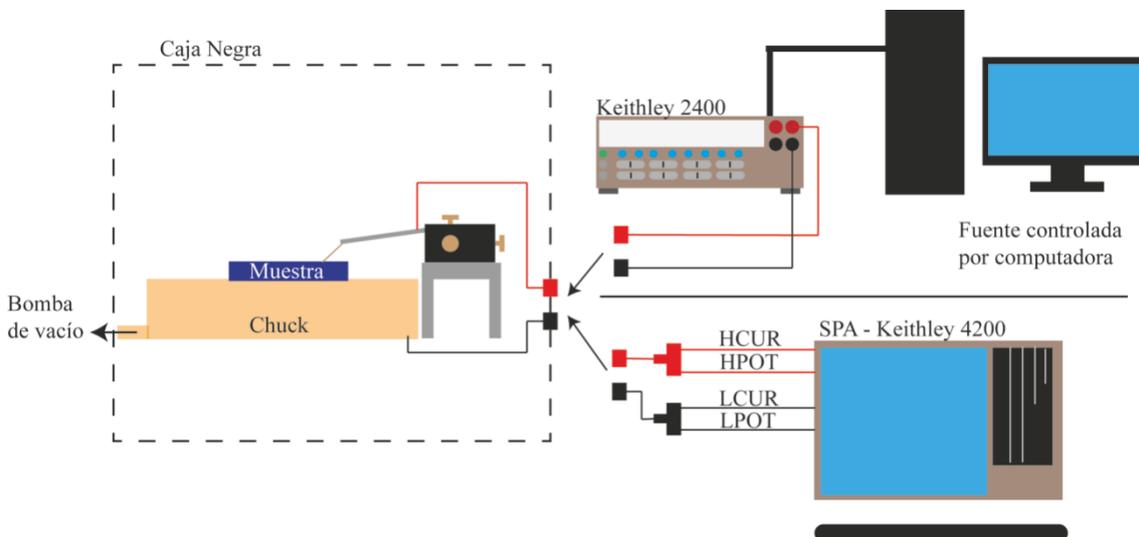
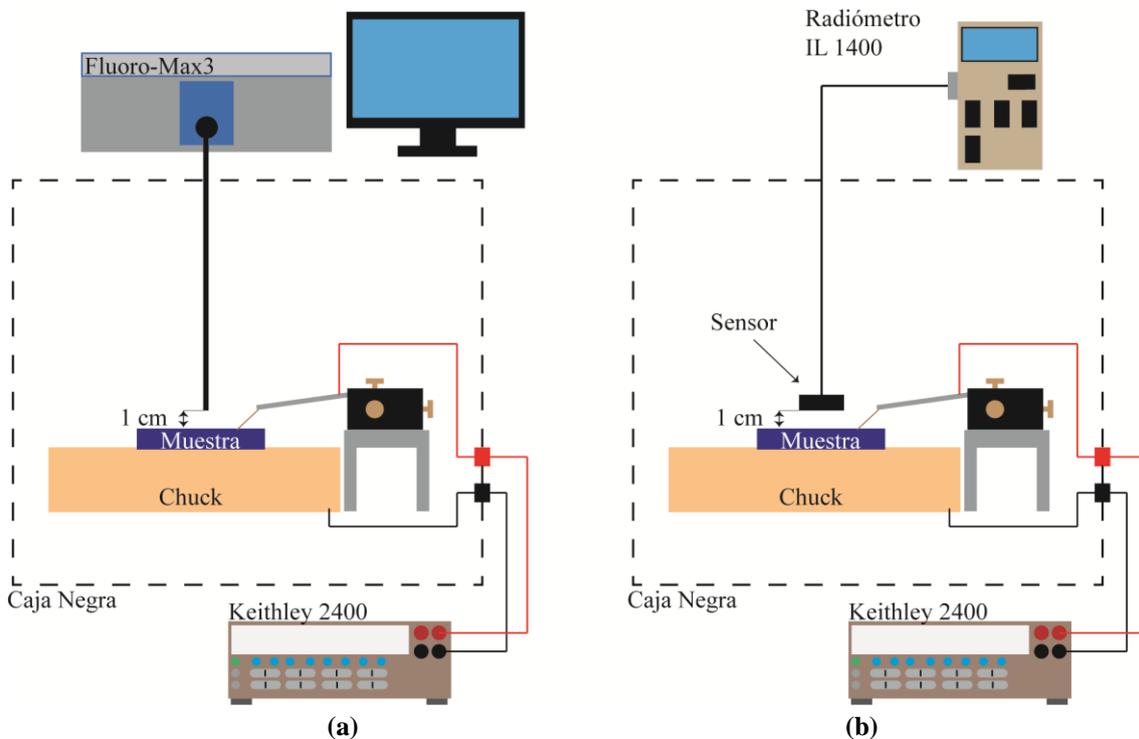


Figura 2.2. Esquema de medición para obtener curvas I-V y C-V.

## 2. EMISOR DE LUZ

La caracterización electro-óptica se realizó mediante dos experimentos. El primero de ellos fue medir la respuesta electroluminiscente (EL) bajo polarización directa. En la Fig. 2.3 (a) se muestra el esquema de medición, donde el dispositivo se polarizó mediante la fuente-medidora 2400 y la luz emitida fue detectada por el Fluoro-Max3. Para colectar la luz emitida se utilizó un paquete de fibras ópticas. Uno de sus extremos se colocó frente a la compuerta del dispositivo, conservando una distancia de 1 cm para todas las pruebas. El extremo restante se acopló al detector del Fluoro-Max3. El espectrómetro se configuró para realizar un barrido de 370 a 1000 nm, con incrementos de 3 nm y tiempo de integración de 0.25 segundos. La apertura del monocromador del detector se mantuvo a 5 nm.

El segundo experimento consistió en medir la potencia óptica ( $P_{op}$ ) como función del voltaje aplicado. Para ello se polarizó con la fuente-medidora 2400 y se detectó la luz emitida con un sensor UV-VIS conectado a un radiómetro modelo IL 1400. El detector se colocó a 1 cm sobre el dispositivo medido. El esquema montado se observa en la Fig. 2.3 (b). Este mismo esquema se empleó para obtener un patrón de radiación en función del ángulo de detección. Para ello, se varió la posición del detector de  $0^\circ$  (normal a la compuerta) a  $60^\circ$  respecto de la superficie de la compuerta, mientras se detectaba la potencia óptica.



**Figura 2.3.** Esquema de medición de (a) EL y (b)  $P_{op}$  en función del voltaje aplicado. El montaje para medir  $P_{op}$  también se utilizó para medir la potencia óptica en función del ángulo de detección. Se varió angularmente la posición del sensor de  $0^\circ$  a  $60^\circ$  respecto a la normal de la superficie de la compuerta.

## 2.4. Resultados: Capa simple y Multicapa

### 2.4.1. Características morfológicas

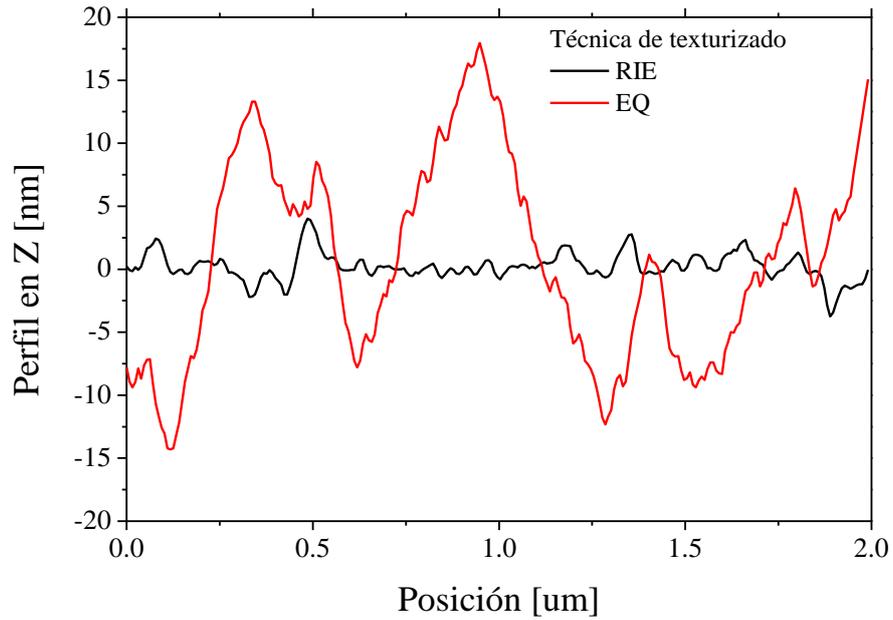
Los espesores (th) e índices de refracción (n) obtenidos por elipsometría se resumen en la tabla 2.2. Se midieron 5 puntos diferentes en cada muestra, de los cuales 1 punto estaba al centro y los 4 restantes a los extremos. En el caso de películas simples, el cambio del índice de refracción con el tratamiento térmico es despreciable y los valores concuerdan con trabajos previos [18] [22] [56] [43] [56]. Para las multicapas, el cambio en índice de refracción con el recocido fue mayor. Es posible que las capas de SRO con alto exceso de Si se “diluyan” al salir del tratamiento térmico a 1100 °C. Cuando las muestras salen muy calientes de una atmósfera inerte dentro del horno y entran en contacto con el aire del ambiente, se propicia la formación de compuestos Si-O. Seguramente este efecto predomina en la capa superior, la cual corresponde a una capa con alto contenido de silicio. Si bien existe una disminución del índice de refracción, ambos valores (antes y después del recocido) indican un mayor contenido de Si respecto a capas simples de SRO<sub>25</sub> o SRO<sub>30</sub>.

**Tabla 2.2. Espesores e índices de refracción para capas simples y multicapas de SRO, obtenidos por elipsometría a muestras con y sin tratamiento térmico.**

Tipo	Película	Muestra		Espesor [nm]	Índice de refracción	
		Sin TT	Con TT		Sin TT	Con TT
Capa simple	SRO <sub>30</sub>	S <sub>p</sub>	S <sub>p</sub> -TT	65.9±0.4	1.51±0.01	
		S <sub>T1</sub>	S <sub>T1</sub> -TT	68.8±1.7	1.53±0.01	
		S <sub>T2</sub>	S <sub>T2</sub> -TT	68.7±1.6	1.49±0.01	
	SRO <sub>25</sub>		S <sub>25</sub> -TT	36.9±0.7	1.56±0.01	
Multicapa	SRO <sub>5</sub> /SRO <sub>25</sub>	M <sub>525</sub>	M <sub>525</sub> -TT	131.1±7.6	1.759±0.052	1.689±0.002
	SRO <sub>10</sub> /SRO <sub>25</sub>	M <sub>1025</sub>	M <sub>1025</sub> -TT	116.7±1.6	1.728±0.003	1.696±0.003

En la Fig. 2.4 se muestra un perfil de rugosidad obtenido para dos substratos texturizados (S-LECT<sub>1</sub> y S-LECT<sub>2</sub>). Ambas técnicas (RIE y EQ) forman picos sobre la superficie de silicio, sin embargo, el grabado por RIE produce mayor densidad de picos con un menor tamaño; mientras que el grabado electroquímico genera poca densidad y picos de mayor tamaño. Este perfil sugiere que la muestra con grabado electroquímico (S-LECT<sub>2</sub>) puede presentar ruptura del dieléctrico al ser polarizada eléctricamente, debido a una diferencia de ~30 nm entre valles y picos. En las regiones con picos más grandes el espesor del dieléctrico entre compuerta y substrato puede alcanzar los 40 nm. En la tabla 2.3 se resumen los valores de rugosidad promedio y densidad de picos por unidad de área para los substratos texturizados.

## 2. EMISOR DE LUZ



**Figura 2.4.** Perfil de profundidad para substratos de Si texturizados por iones reactivos (RIE) y grabado electroquímico (EQ). El perfil en color negro corresponde a la muestra S-LECT<sub>T1</sub> y en color rojo a la muestra S-LECT<sub>T2</sub>.

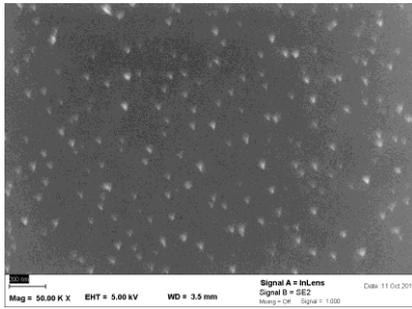
**Tabla 2.3.** Rugosidad promedio y densidad de picos en substratos de silicio texturizados por grabado de iones reactivos (RIE) y grabado electroquímico (EQ).

Muestra	Texturizado	Rugosidad [nm]	Densidad de Picos [cm <sup>-2</sup> ]
S <sub>p</sub>	No	0.5	0
S <sub>T1</sub>	RIE	4.0±0.2	(3.7±1.8) x 10 <sup>10</sup>
S <sub>T2</sub>	EQ	20.9±10.3	(8.9±7.3) x 10 <sup>9</sup>

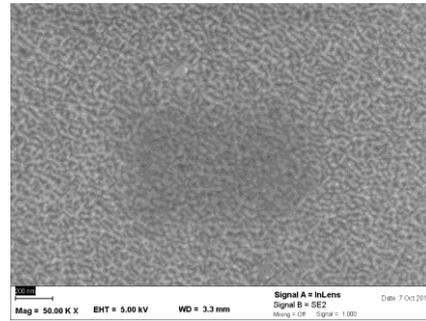
En la Fig. 2.5 se presenta una vista superior y en 3D de la superficie de los substratos texturizados. Como se aprecia, se obtienen las mismas características por AFM y SEM.

## 2. EMISOR DE LUZ

S-LEC<sub>T1</sub>, Texturizado por RIE



S-LEC<sub>T2</sub>, Texturizado por grado electroquímico



SEM

AFM

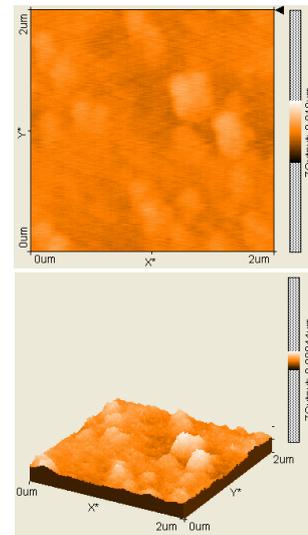
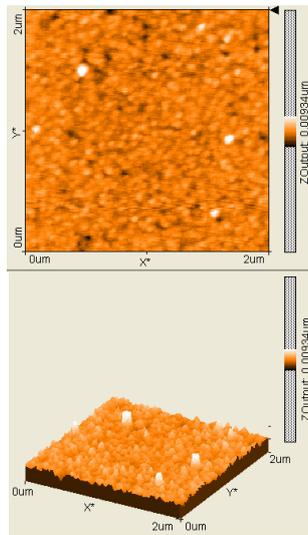
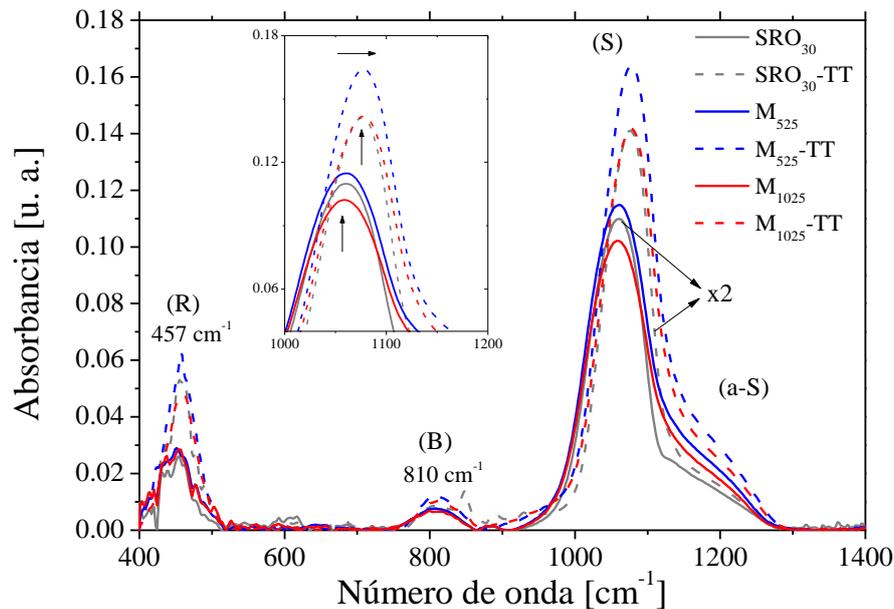


Figura 2.5. Vista superficial y 3D de la superficie de silicio texturizada por RIE (izq.) y grabado electroquímico (der.). Las superficies corresponden a las muestras S-LEC<sub>T1</sub> y S-LEC<sub>T2</sub>, respectivamente.

En la Fig. 2.6 se observa el espectro de absorción (FTIR) para una capa simple de SRO<sub>30</sub> y las multicapas M<sub>525</sub> y M<sub>1025</sub>, antes y después del tratamiento térmico. El espectro del SRO<sub>30</sub> se multiplicó por un factor de 2 para compararse con los espectros de las multicapas. Esta diferencia en intensidad se debe al espesor de la película de SRO<sub>30</sub>, siendo alrededor de la mitad del espesor de las multicapas (ver. Tabla 2.2). Como se puede apreciar, los 3 modos de vibración *Rocking* (R), *Bending* (B) y *Stretching* en fase (S) y fuera de fase (a-S) están presentes en todas las películas. Estos modos se relacionan a enlaces Si-O. Después del tratamiento térmico, los modos de vibración presentan un cambio en intensidad y posición. Para los modos (R) y (B) se incrementa su intensidad principalmente, implicando un incremento en la cantidad de enlaces Si-O [45] [57]. Los modos (S) y (a-S) presentan cambio en posición e incremento de intensidad, sugiriendo incremento de enlaces y cambio en la naturaleza de la matriz. En la Fig. 2.7 se presenta la deconvolución a dos Gaussianas de la curva situada de 900 cm<sup>-1</sup> a 1300 cm<sup>-1</sup>. Cada Gaussiana se relaciona a los modos (S) y (a-S). A

## 2. EMISOR DE LUZ

partir de este análisis se obtuvo su posición, el área de cada curva y el porcentaje del área total. En la tabla 2.4 se muestran los valores obtenidos para las muestras antes y después del recocido. Para el  $\text{SRO}_{30}$  se observa una mayor contribución del modo (S), cambiando de  $1057$  a  $1072$   $\text{cm}^{-1}$  con el tratamiento térmico. Además, se registra un incremento en el porcentaje de su área de  $85$  a  $89$  %, indicando una separación de fases entre  $\text{SiO}_2$  y  $\text{SiO}_x$  (donde  $0 < x < 2$ ) con la mayor contribución de enlaces Si-O asociados a  $\text{SiO}_2$ . Estos resultados son esperados debido al bajo exceso de silicio, de tal manera que la matriz dieléctrica tiende a mostrar características similares al  $\text{SiO}_2$  después del tratamiento térmico [45] [43] [57].

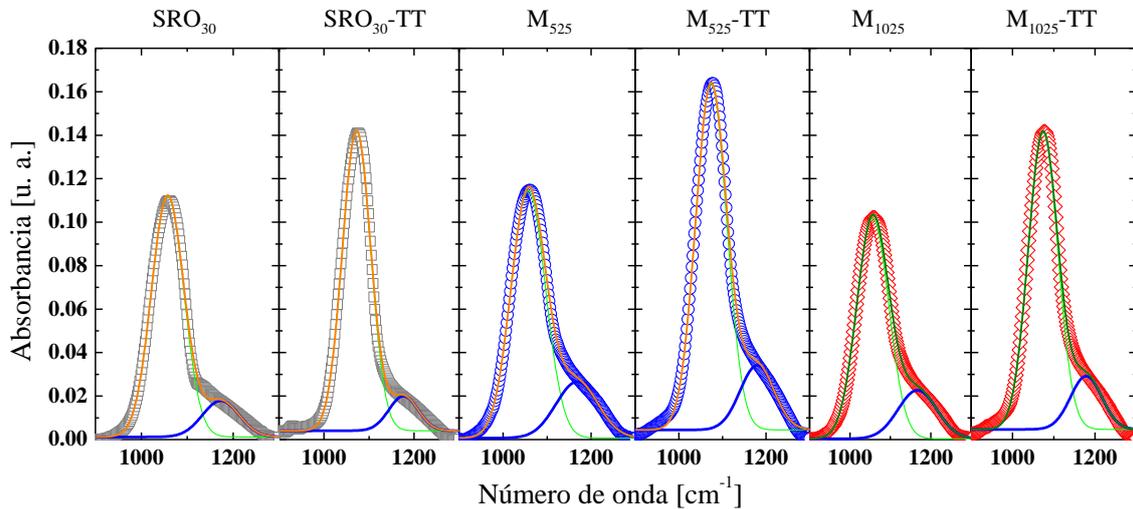


**Figura 2.6.** Espectro de absorción obtenido por FTIR para capa simple de  $\text{SRO}_{30}$  y multicapas  $\text{M}_{525}$  y  $\text{M}_{1025}$ , antes y después de un tratamiento térmico a  $1100$  °C 2 horas en  $\text{N}_2$ . Se aprecian los principales modos de vibración relacionados a enlaces Si-O.

En caso de las multicapas, el modo (S) presenta un corrimiento a mayores números de onda ( $1057$   $\text{cm}^{-1}$  a  $1074$   $\text{cm}^{-1}$ ), así como un incremento en intensidad (ver Fig. 2.6) después del recocido. Se puede inferir que existe una segregación y aglomeración de material con fase dieléctrica similar al  $\text{SiO}_2$  [45] [46] [57]. En muestras recién depositadas, las multicapas muestran una mayor contribución del modo (a-S) al área total de la curva, aproximadamente el doble del observado en la película de  $\text{SRO}_{30}$  (ver Tabla 2.4). Lo anterior indica una mayor cantidad de enlaces Si-O relacionados a una fase de  $\text{SiO}_x$ , cuya composición puede adjudicarse a tres estados de oxidación con átomos de Si enlazados a 1, 2 o 3 oxígenos [58]. Con el tratamiento térmico se observan dos efectos: un corrimiento a mayores números de onda ( $1168$   $\text{cm}^{-1}$  a  $1179$   $\text{cm}^{-1}$ ), y una disminución en la contribución del área total (cerca del 5 % para ambas multicapas). Los cambios en los modos (S) y (a-S) son indicativos de la separación de fases ( $\text{SiO}_2$  y  $\text{SiO}_x$ ) y una migración del  $\text{SiO}_x$  a formar  $\text{SiO}_2$ , concordando con el cambio en índice de

## 2. EMISOR DE LUZ

refracción [45] [46] [57]. La oxidación que sufren las muestras al salir del recocido a 1100 °C impacta el contenido de Si y cualquier sub-especie de la fase  $\text{SiO}_x$  formando  $\text{SiO}_2$ . Esto se traduce en una disminución tanto del índice de refracción como de la contribución del modo (a-S).



**Figura 2.7.** Deconvolución del modo de vibración *stretching* en dos Gaussianas, asociadas al modo *stretching* en fase (S) y fuera de fase (a-S). Análisis realizado para película de  $\text{SRO}_{30}$  y multicapas  $\text{M}_{525}$  y  $\text{M}_{1025}$  antes y después de un tratamiento térmico a 1100 °C en  $\text{N}_2$  por 2 horas.

**Tabla 2.4.** Posición y área bajo la curva de los modos de vibración *stretching* en fase (S) y fuera de fase (a-S) para muestras  $\text{SRO}_{30}$ ,  $\text{M}_{525}$  y  $\text{M}_{1025}$  antes y después de tratamiento térmico. También se agrega el porcentaje de contribución de cada modo al área total.

Muestra	(S)			(a-S)		
	Posición [ $\text{cm}^{-1}$ ]	Área [ $\text{u. a.} \cdot \text{cm}^{-1}$ ]	% de $A_T$	Posición [ $\text{cm}^{-1}$ ]	Área [ $\text{u. a.} \cdot \text{cm}^{-1}$ ]	% de $A_T$
$\text{SRO}_{30}$	1057	9.81	85.45	1173	1.67	14.55
$\text{SRO}_{30}\text{-TT}$	1072	10.84	89.37	1176	1.29	10.63
$\text{M}_{525}$	1057	11.19	78.31	1168	3.10	21.69
$\text{M}_{525}\text{-TT}$	1074	14.18	82.92	1179	2.92	17.08
$\text{M}_{1025}$	1056	10.08	79.00	1167	2.68	21.00
$\text{M}_{1025}\text{-TT}$	1074	12.25	84.02	1178	2.33	15.98

$A_T$ ; Área total bajo la curva

En la Fig. 2.8 se muestran imágenes obtenidas por TEM para las estructuras multicapas. Ambas muestras presentan capas nano-métricas bien definidas, nano-islas de Si (NIs-Si) formadas del sustrato hacia la primera capa de SRO ( $R_0 = 5$  o 10) y gran contenido NCs-Si.

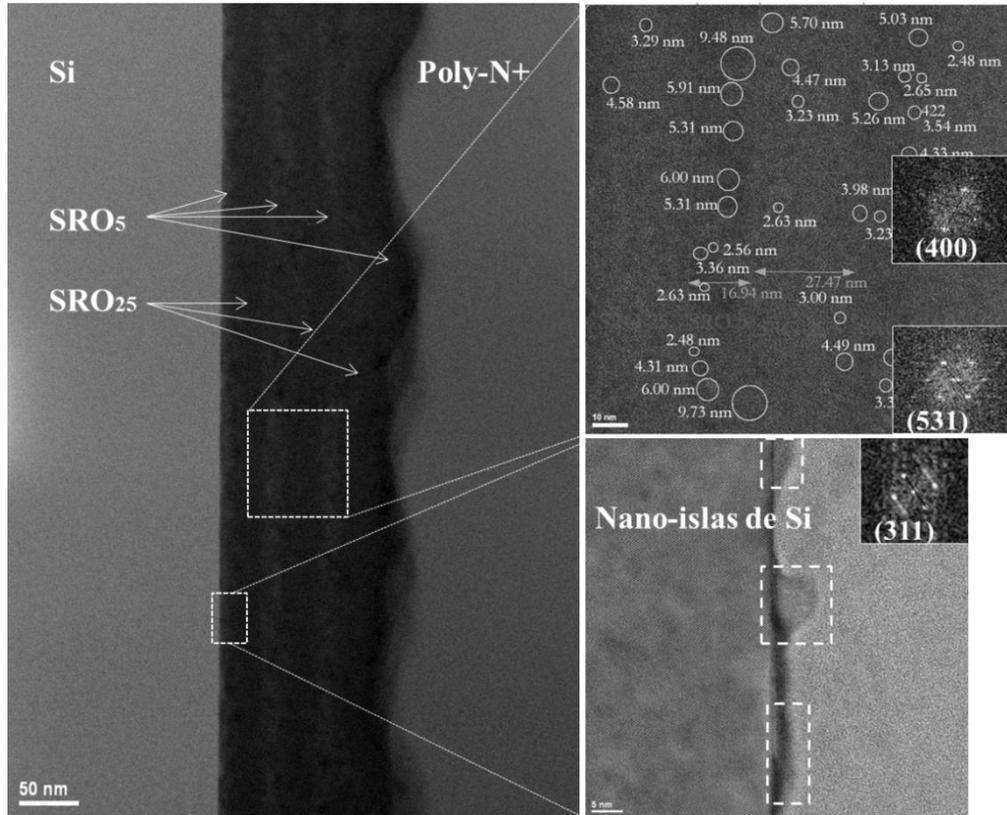
En trabajos previos se había reportado la formación de NIs-Si entre sustrato y capas de SRO con bajo  $R_0$  [59]. Además se ha reportado la formación de NCs-Si en capas y multicapas con SRO de bajo  $R_0$  [22] [60]. En el caso contrario, el SRO con

## 2. EMISOR DE LUZ

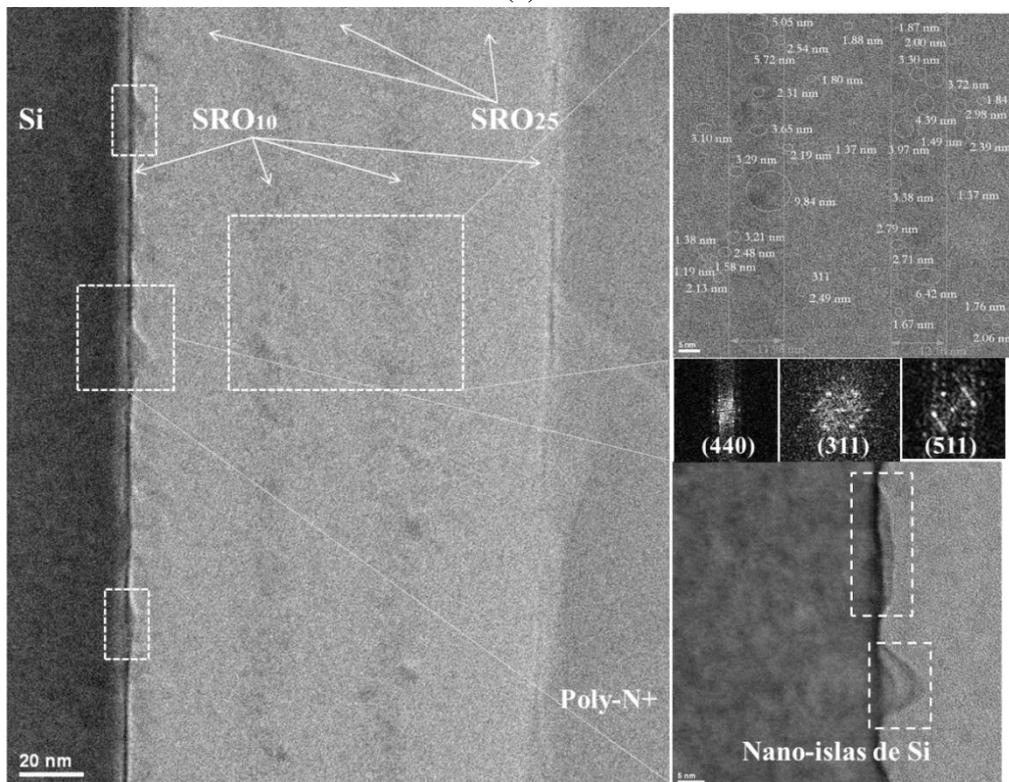
mayor  $R_0$  y formación de NCs-Si corresponde al  $SRO_{20}$  [40] [61]. Sin embargo, en nuestro caso también se encontró la formación de NCs-Si en la capas de  $SRO_{25}$ . Durante el depósito se forman nano-aglomerados amorfos de Si con enlaces sueltos. Con el tratamiento térmico se propicia la migración de un aglomerado amorfo a una red cristalina nano-métrica, es decir, NCs-Si. Cuando los átomos no enlazados se encuentran cerca de la superficie del sustrato de silicio, entonces se promueve el crecimiento epitaxial de NIs-Si sobre la formación de NCs-Si en la matriz de  $SiO_2$  [59] [61]. Como se puede observar, la capa superior de las multicapas no exhibe un cambio de color bien definido como las capas intermedias. Es posible que el tratamiento térmico diluya las fronteras entre las diferentes capas, de tal forma que las características del material se modifiquen. Es posible que el contenido de Si se mezcle entre capas adyacentes con el tratamiento térmico, lo cual concuerda con el cambio en índice de refracción y espectro de FTIR. Después del recocido las multicapas presentan características de SRO con  $R_0$  entre 25, 10 y 5. Sin embargo, la formación de NCs-Si es evidenciada por imágenes de TEM y es consistente con la alta contribución del modo (a-S) en el espectro FTIR. Este modo indica un alto contenido de una fase  $SiO_x$ , la cual a su vez puede deberse a Si elemental.

Utilizando el software *Gatan Microscopy*® se analizaron los patrones de difracción producida por las NIs-Si y los NCs-Si. Las NIs-Si mostraban una orientación  $\langle 400 \rangle$ , coincidiendo con la orientación del sustrato ( $\langle 100 \rangle$ ). Los NCs-Si exhibían diferentes orientaciones, sin embargo las más observadas corresponden a  $\langle 311 \rangle$ ,  $\langle 440 \rangle$ ,  $\langle 511 \rangle$  y  $\langle 531 \rangle$ . En la Fig. 2.8 se pueden encontrar imágenes de los patrones de difracción para estas orientaciones. También se midió el espesor de cada capa y el espesor nominal de las multicapas, y se comparó con los resultados obtenidos por elipsometría. En la Fig. 2.9 (a) se presenta los valores obtenidos por cada técnica. Como se puede observar ambas técnicas arrojan resultados del mismo orden; sin embargo el espesor obtenido por TEM presenta mayor variación. Generalmente, para obtener espesores de estructuras con múltiples capas se utiliza elipsometría espectroscópica [53], sin embargo elipsometría nula (una sola longitud de onda) mostró resultados adecuados debido a que los materiales son muy parecidos y la longitud de onda del láser observa una sola capa. Por último, se realizó un análisis estadístico para obtener el tamaño promedio de NCs-Si y su densidad por unidad de área. Se asumió una forma estándar de los NCs-Si. En algunos casos se encontraron NCs-Si con formas rectangulares o amorfas y se observó dependencia con el espesor de la película, como es reportado en [22] y [60].

## 2. EMISOR DE LUZ



(a)

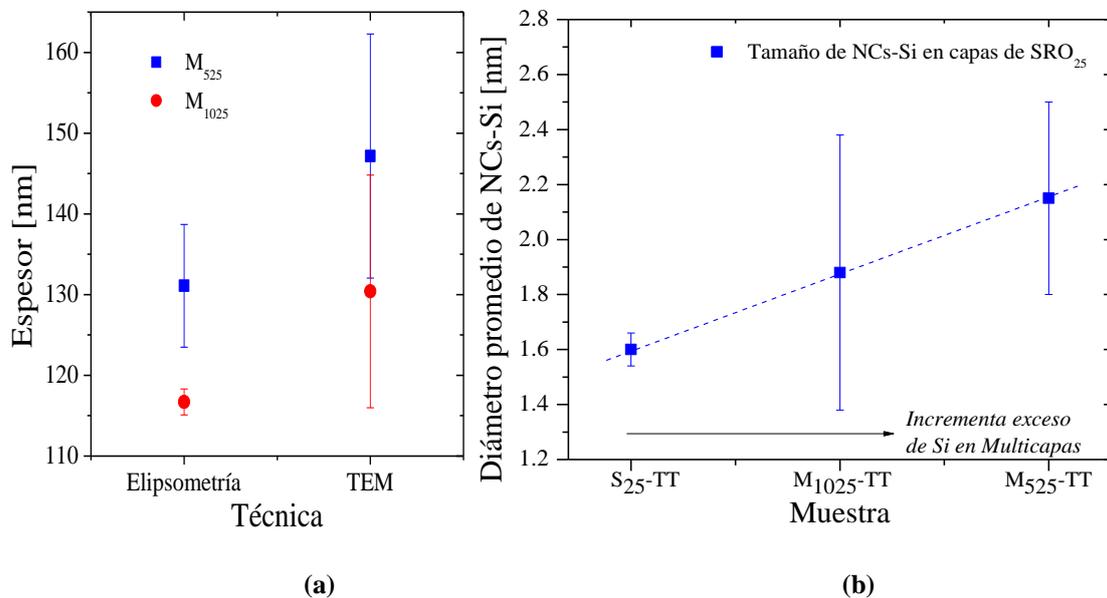


(b)

Figura 2.8. Imágenes obtenidas por TEM para las multicapas (a)  $M_{525}$  y (b)  $M_{1025}$ . Se puede apreciar capas nano-métricas bien definidas, NIs-Si entre el sustrato y la primera capa, así como el alto contenido de NCs-Si en capas de  $SRO_5$  y  $SRO_{10}$ .

## 2. EMISOR DE LUZ

Se inspeccionaron imágenes de las diferentes capas y se midieron los tamaños de NCs-Si. Con los datos se realizó un histograma y se ajustó a una distribución normal. A partir del ajuste se obtuvo el tamaño promedio y la variación ( $\pm 3\sigma$ , siendo  $\sigma$  la desviación estándar) de los NCs-Si. La densidad de NCs-Si se calculó contabilizando el número de nano-cristales por unidad de área. En la tabla 2.5 se resumen los valores de tamaño y densidad de NCs-Si de las muestras  $M_{525}$ -TT,  $M_{1025}$ -TT y  $S_{25}$ -TT. Aparentemente, la capa adyacente al  $SRO_{25}$  influye en el tamaño de los NCs-Si. La capa simple ( $S_{25}$ -TT) obtuvo un diámetro promedio de 1.6 nm, siendo el  $R_0$  más grande con presencia de NCs-Si hasta ahora reportado [40] [61]. Al incrementar el exceso de silicio en las capas contiguas, el diámetro promedio aumenta de 1.86 nm a 2.15 nm para las multicapas  $M_{1025}$ -TT y  $M_{525}$ -TT, respectivamente. En la Fig. 2.9 (b) se muestra la dependencia del tamaño de NCs-Si en las capas de  $SRO_{25}$  respecto a las capas contiguas, es decir, con respecto al exceso de silicio de dichas capas. Las capas de  $SRO_{10}$  y  $SRO_5$  tienen un diámetro promedio de 3.61 nm y 4.01 nm, respectivamente. Para cada caso se observó la presencia de NCs-Si rectangulares del orden de 9.5 nm y 11.5 nm en capas de  $SRO_{10}$  y  $SRO_5$ , con una población muy pequeña (1 a 3 nano-cristales). El diámetro de estos NCs-Si es limitado por el tamaño de la capa, concordando con trabajos previos [22] [60]. La densidad de NCs-Si en capas con alto exceso de silicio es del orden de  $10^{12}$  [cm<sup>-2</sup>], mientras las capas de  $SRO_{25}$  presentan una densidad de  $10^{11}$  [cm<sup>-2</sup>], independiente de la capa adyacente.



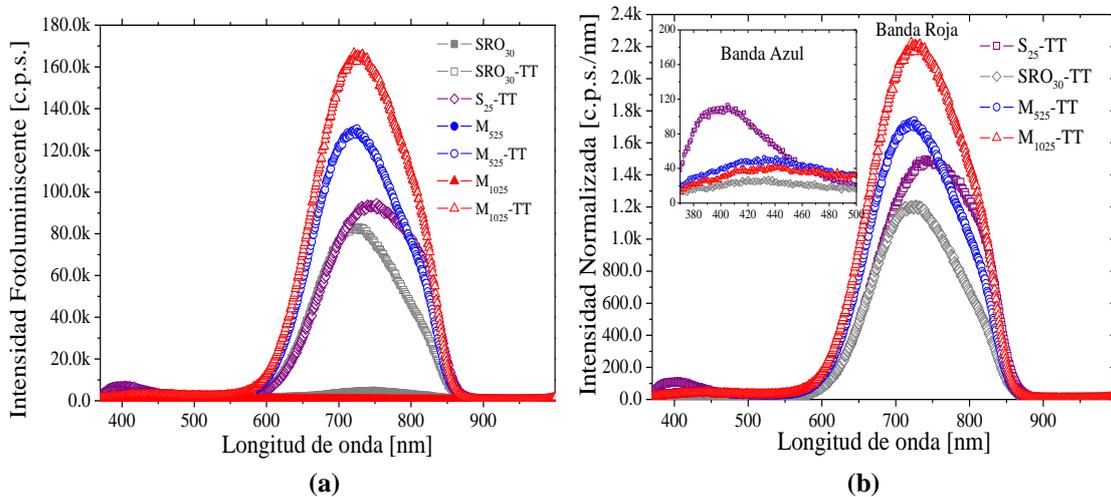
**Figura 2.9.** (a) Gráfica comparativa del espesor total obtenido por elipsometría y TEM para las multicapas. (b) Variación del tamaño de NCs-Si presentes en capas de  $SRO_{25}$  en función de las capas adyacentes.

## 2. EMISOR DE LUZ

**Tabla 2.5. Tamaño y densidad de NCs-Si en las capas de SRO<sub>25</sub>, SRO<sub>10</sub> y SRO<sub>5</sub>.**

Muestra	Diámetro promedio de NCs-Si [nm]			Densidad de NCs-Si [cm <sup>-2</sup> ]		
	SRO <sub>5</sub>	SRO <sub>10</sub>	SRO <sub>25</sub>	SRO <sub>5</sub>	SRO <sub>10</sub>	SRO <sub>25</sub>
M <sub>525</sub> -TT	4.01±1.53		2.15±0.35	1.06x10 <sup>12</sup>		5.76x10 <sup>11</sup>
M <sub>1025</sub> -TT		3.61±1.48	1.86±0.51		1.30x10 <sup>12</sup>	7.43x10 <sup>11</sup>
S <sub>25</sub> -TT			1.60±0.06			1.0x10 <sup>10</sup>

En la Fig. 2.10 (a) se observan los espectros de PL para capas simples (SRO<sub>25</sub> y SRO<sub>30</sub>) y multicapas (M<sub>525</sub> y M<sub>1025</sub>) de SRO antes y después del tratamiento térmico. Como se puede observar, la emisión se activa con el tratamiento térmico y la respuesta más intensa corresponde a las multicapas. Para eliminar la dependencia del espesor se normalizaron los espectros respecto al espesor de las capas emisoras (SRO<sub>25</sub> o SRO<sub>30</sub>). El resultado se presenta en la Fig. 2.10 (b). Se puede apreciar que la mayor respuesta PL corresponde a las multicapas. Además, la capa de SRO<sub>25</sub> supera ligeramente al SRO<sub>30</sub>. La forma del espectro se conserva, pero la muestra S<sub>25</sub>-TT presenta un hombro más pronunciado en longitudes de onda mayores. Esto es un indicativo que existen diferentes contribuciones a la emisión para cada SRO (25 o 30). Debido a que el espectro de PL no presenta un corrimiento al incrementar el tamaño del nanocrystal, se descarta que la emisión se deba a efectos cuánticos en NCs-Si; más bien se sugiere que la emisión es debida a defectos de oxígeno presentes en el SRO [33] [43] [60]. En el recuadro de la Fig. 2.10 (b) se observa que el SRO<sub>25</sub> tiene una tenue emisión en el azul (~400 nm), sin que ninguna otra muestra la presente.



**Figura 2.10. Espectros de Fotoluminiscencia (PL) para capas simples (SRO<sub>25</sub> y SRO<sub>30</sub>) y multicapas (M<sub>525</sub> y M<sub>1025</sub>) de SRO, antes y después del tratamiento térmico a 1100 °C 2 horas en N<sub>2</sub>. (a) Espectro medido y (b) espectro normalizado respecto al espesor de la capa emisora.**

En la Fig. 2.11 se presenta la descomposición de la banda roja del espectro de PL en dos contribuciones centradas alrededor de 720 nm y 805 nm. La emisión alrededor de 720 nm se ha relacionado con defectos de oxígeno presentes en la película de SRO [43] [60]. Por su parte, emisión de 805 nm a 820 nm se vincula a nano-

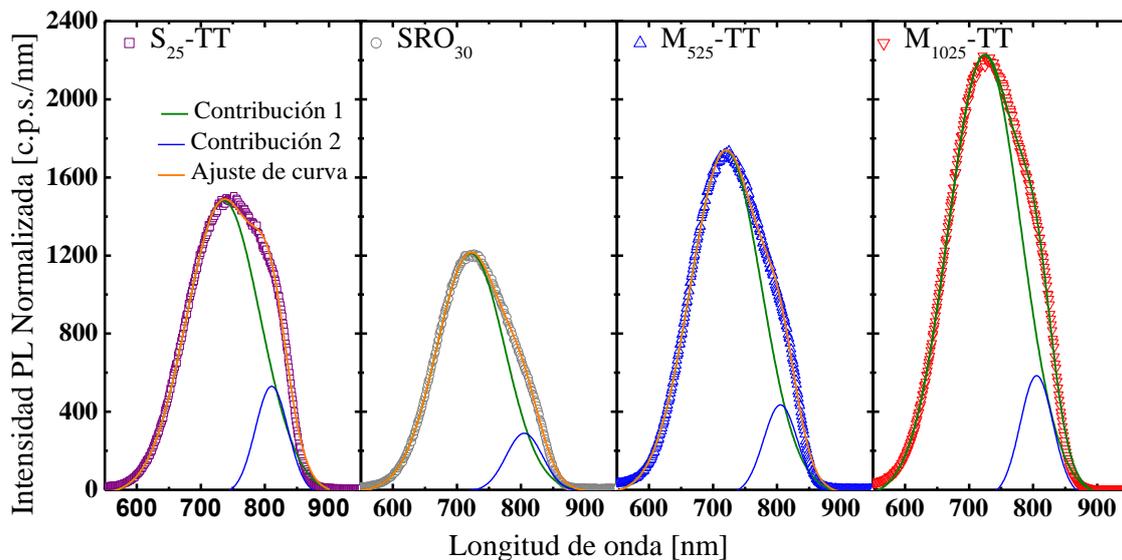
## 2. EMISOR DE LUZ

partículas de silicio (nps-Si) dentro de una matriz de SiO<sub>2</sub> [62]. En la Tabla 2.6 se resumen la longitud de onda de cada contribución y el porcentaje del área total. El espectro de PL de las multicapas tiene una contribución del 89 % a los 720 nm y 11 % a los 805 nm. En el caso de la película de SRO<sub>30</sub> las contribuciones son del 88.3 % y 11.7 % para cada longitud de onda, respectivamente. En la película de SRO<sub>25</sub> se aprecia una relación diferente, ya que la contribución es del 86 % y 14 % para 735 nm y 810 nm, respectivamente. Esto coincide con que el SRO<sub>25</sub> tiene NCs-Si. Como se puede inferir, la emisión del SRO, tanto en capas simples como multicapas, se debe a dos mecanismos: defectos de oxígeno y NCs-Si; sin embargo, la emisión debida a defectos domina sobre los NCs-Si. En el caso de la película de SRO<sub>25</sub> se encontró una mayor contribución por parte de los NCs-Si, es decir, tiene más NCs-Si que participan en transiciones ópticas (recombinación radiativa) a través de la estructura [37] [63]. En consecuencia, la película de SRO<sub>25</sub> genera una mayor intensidad PL respecto a la película de SRO<sub>30</sub>.

**Tabla 2.6. Resumen de la posición, intensidad y porcentaje del área total de la curva para cada contribución del espectro de fotoluminiscencia. Se presentan los resultados para capas simples (SRO<sub>25</sub> y SRO<sub>30</sub>) y multicapas (M<sub>525</sub> y M<sub>1025</sub>) de SRO.**

Muestra	Contribución 1			Contribución 2		
	Posición [nm]	Intensidad [c.p.s.]	% de A <sub>T</sub>	Posición [nm]	Intensidad [c.p.s.]	% de A <sub>T</sub>
S <sub>25</sub> -TT	735	1502	85.98	810	552	14.02
SRO <sub>30</sub> -TT	721	1219	88.36	805	296	11.64
M <sub>525</sub> -TT	720	1757	89.00	805	454	11.00
M <sub>1025</sub> -TT	724	2257	89.08	805	616	10.92

A<sub>T</sub>; Área total bajo la curva

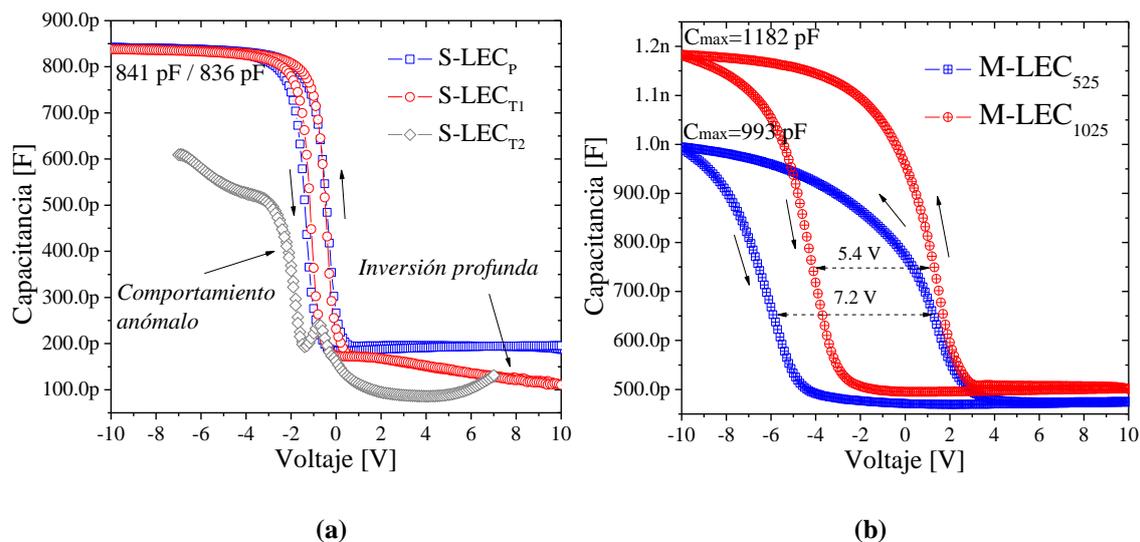


**Figura 2.11. Descomposición de la banda roja del espectro de PL en dos contribuciones para capas simples (SRO<sub>25</sub> y SRO<sub>30</sub>) y multicapas (M<sub>525</sub> y M<sub>1025</sub>) de SRO, después del tratamiento térmico. La contribución alrededor de 820 nm es debida a nps-Si en un matriz de SiO<sub>2</sub> y la mayor emisión alrededor de 710 nm a 740 nm es debida a defectos Si-O en el SRO.**

## 2. EMISOR DE LUZ

### 2.4.2. Respuesta eléctrica

La Fig. 2.12 muestra las curvas capacitancia-voltaje (C-V) para capas simples (a) y multicapas (b). La estructura S-LECP mostró un comportamiento parecido a un capacitor MOS con SRO como dieléctrico. El barrido se realizó de inversión a acumulación y de regreso, produciendo una histéresis de voltaje ( $\Delta V$ ) hacia valores negativos, sugiriendo un atrapamiento de carga positiva. Para este tipo de material se ha demostrado el atrapamiento de cargas positivas y negativas [64]. La muestra S-LECT1 presentó un comportamiento similar a S-LECP, sin embargo se observa una región de inversión profunda debida al intercambio de carga entre el SRO y el sustrato. Las formas cónicas en la superficie de Si de la muestra S-LECT1 producen una inyección de portadores por tunelamiento entre los electrodos (sustrato o compuerta) y el dieléctrico [65]. La estructura S-LECT2 presenta un comportamiento anómalo y sin un aparente atrapamiento de carga, contrario a lo esperado en capacitores MOS con SRO. Con base en el perfil de profundidad obtenido por AFM (ver Fig. 2.4) se infiere que existen regiones del dispositivo donde la separación entre sustrato y electrodo es sumamente delgada (algunos nanómetros de SRO) o inexistente (contacto directo sustrato y compuerta), provocando que el dispositivo se encuentre en corto circuito. La Fig. 2.12 (b) presenta las curvas C-V para las estructuras M-LEC525 y M-LEC1025. Ambas presentan gran histéresis y un pronunciado hombro en la región de acumulación siendo más evidente para la muestra M-LEC525. Este fenómeno se ha observado en capacitores con óxido delgado, donde los portadores tunelean del sustrato a la compuerta y provocan altas corrientes de fuga [65]. Si bien no se puede concluir que suceda este fenómeno en nuestras muestras, es posible inferir que existe una corriente de fuga que propicia el hombro en la región de acumulación.



**Figura 2.12.** Curvas capacitancia-voltaje para LECs con (a) capas simples y (b) multicapas de SRO. Los dispositivos S-LECP y S-LECT1 presentan el comportamiento más parecido a un capacitor MOS.

## 2. EMISOR DE LUZ

Mediante el análisis de las curvas C-V se obtuvo la constante dieléctrica ( $K_{SRO}$ ) y densidad de trampas en las películas y multicapas de SRO. En [28] puede encontrarse un estudio completo de capacitores MOS para extraer características del material. La  $K_{SRO}$  se estimó como:

$$K_{SRO} = \frac{C_{SRO} t_{SRO}}{\epsilon_0} \quad (2.6)$$

Siendo  $t_{SRO}$  y  $\epsilon_0$  el espesor de la película o multicapa y la permitividad dieléctrica del vacío. Además, la capacitancia del SRO ( $C_{SRO}$ ) es la capacitancia máxima ( $C_{max}$ ) por unidad de área (A), donde  $C_{max}$  se extrae de las curvas C-V. Para estimar la densidad de trampas por unidad de área y unidad de volumen ( $Q_t$  y  $N_t$ , respectivamente), se utilizó [28]:

$$Q_t = \frac{C_{SRO} \Delta V}{q} \quad (2.7)$$

y

$$N_t = \frac{Q_t}{t_{SRO}} \quad (2.8)$$

Donde  $\Delta V$  es la histéresis de voltaje extraída de las curvas C-V.

En la tabla 2.7 se resumen los valores obtenidos para cada estructura. Para el dispositivo S-LECT<sub>2</sub> no fue posible extraer datos. Todas las muestras presentan un valor de constante dieléctrica mayor al SiO<sub>2</sub> (3.9) y menor al Si (11.9), aun considerando su variación. La mayoría de las muestras rondan un valor de 4.07, siendo S-LECT<sub>1</sub> la de mayor valor (4.22). Los resultados de constante dieléctrica arrojan tres conclusiones: la primera es que el texturizado de la superficie de silicio no impacta el atrapamiento de carga, el cual recae solo en el dieléctrico. La segunda es que el alto contenido de Si en las multicapas no impacta la constante dieléctrica. Comparando las constantes dieléctricas de los dispositivos, se podría pensar que todos tienen capas simples de SRO. La última conclusión es que las estructuras multicapa forman mayor cantidad de trampas por unidad de área respecto a capas simples ( $10^{11}$  y  $10^{12}$  cm<sup>-2</sup> respectivamente), consecuencia de la gran cantidad de defectos puntuales formados por los NCs-Si tanto en los aglomerados de Si como en la interfaz Si-SiO<sub>2</sub>.

## 2. EMISOR DE LUZ

**Tabla 2.7. Valores de capacitancia máxima, capacitancia de SRO, constante dieléctrica y densidad de trampas obtenidos a partir de curvas C-V, en estructuras LEC de capa simple y multicapa.**

Dispositivo	$C_{\max}$ [pF]	$C_{\text{SRO}}$ [pF/cm <sup>2</sup> ]	$K_{\text{SRO}}$	$\epsilon_{\text{SRO}}$ [pF/cm]	$\Delta V$ [V]	Densidad de trampas	
						Superficial [cm <sup>-2</sup> ]	Volumétrica [cm <sup>-3</sup> ]
S-LECP	841	$5.46 \times 10^4$	$4.07 \pm 0.02$	0.36	0.87	$2.96 \times 10^{11}$	$4.50 \times 10^{16}$
S-LECT <sub>1</sub>	836	$5.43 \times 10^4$	$4.22 \pm 0.11$	0.37	0.69	$2.34 \times 10^{11}$	$3.40 \times 10^{16}$
M-LEC <sub>525</sub>	993	$2.45 \times 10^4$	$4.07 \pm 0.05$	0.36	7.2	$1.10 \times 10^{12}$	$7.48 \times 10^{16}$
M-LEC <sub>1025</sub>	1140	$2.81 \times 10^4$	$4.09 \pm 0.14$	0.37	5.4	$0.95 \times 10^{12}$	$7.36 \times 10^{16}$

En [66] se determina la constante dieléctrica de los NCs-Si embebidos en una matriz de SiO<sub>2</sub> a partir del diámetro promedio de los NCs-Si, mediante:

$$\epsilon_{\text{NCs-Si}} = 1 + \left( \frac{\epsilon_{\text{Si}} - 1}{1 + (1.38/d)^{1.37}} \right) \quad (2.9)$$

donde  $\epsilon_{\text{Si}}$  y  $d$  son la constante dieléctrica del Si y el diámetro de los NCs-Si inmersos en la matriz de SiO<sub>2</sub>. Dado que las multicapas contienen NCs-Si podemos estimar la capacitancia que tendría el dispositivo si se debiera a los nano-cristales. Retomando los resultados de TEM (ver Tabla 2.5) y aplicando la Ec. 2.5 se determinó la constante dieléctrica para cada tamaño de NCs-Si. En la tabla 2.8 se encuentran los resultados. Para el análisis se consideró una distribución homogénea de NCs-Si en cada película de SRO y se utilizó  $\epsilon_{\text{Si}} = 11.4$  [66]. A partir de los resultados obtenidos por la Ec. (2.5) y utilizando la Ec. (2.2) se calculó la capacitancia de cada capa ( $C_{\text{SRO-C}}$ ). Después se determinó la capacitancia de la multicapa ( $C_{\text{SRO-M}}$ ) como la suma en serie de la capacitancia de cada capa. Por último se estimó la capacitancia máxima de la estructura ( $C_{\max}$ ) al multiplicar  $C_{\text{SRO-M}}$  por el área de compuerta. Mediante este método se obtuvieron valores de  $C_{\max}$  entre 3 y 4 veces menores a los calculados mediante las curvas C-V. En el caso opuesto, si los valores de capacitancia se debieran principalmente a la matriz de SiO<sub>2</sub>, entonces un capacitor MOS cuyo SiO<sub>2</sub> tiene un espesor similar al de las multicapas (115 nm) alcanzaría una  $C_{\max} = 1220$  pF, cercano al obtenido para los dispositivos M-LEC. Entonces, se puede inferir que el atrapamiento de carga se debe a la matriz de SiO<sub>2</sub> más que a los NCs-Si. Estos últimos generan el hombro en la región de acumulación debido a mecanismos de atrapamiento de carga en la interfaz NCs-Si/SiO<sub>2</sub> [67], y el incremento en la histéresis debido al atrapamiento de carga en los NCs-Si [66] [67].

## 2. EMISOR DE LUZ

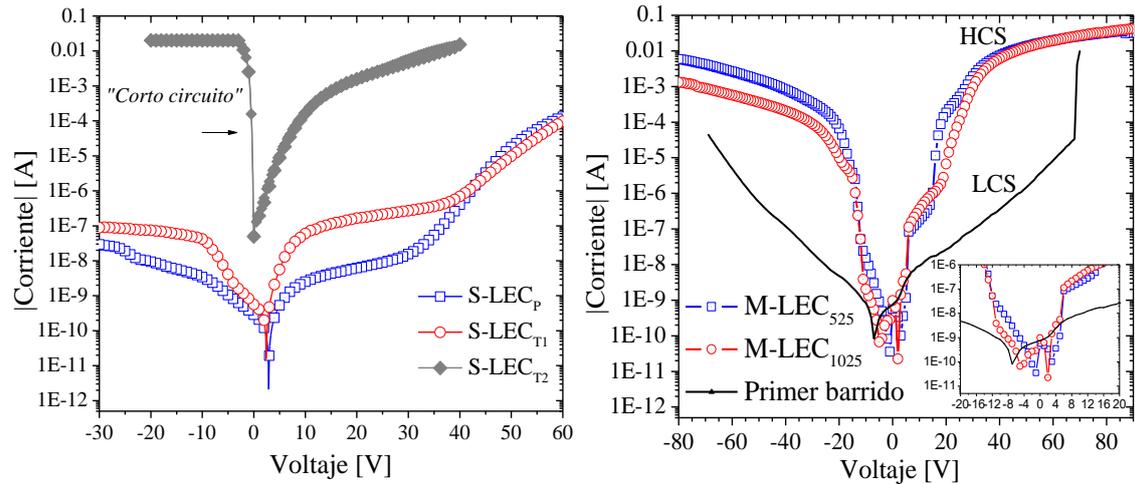
**Tabla 2.8. Constante dieléctrica de los NCs-Si ( $\epsilon_{\text{NCs-Si}}$ ), capacitancia de cada capa de SRO ( $C_{\text{SRO-C}}$ ), capacitancia de la multicapa ( $C_{\text{SRO-M}}$ ) y capacitancia máxima ( $C_{\text{max}}$ ). Se considera una distribución homogénea de NCs-Si en cada capa de SRO.**

Dispositivo	Capa	Diámetro de NCs-Si [nm]	$\epsilon_{\text{NCs-Si}}$	Espesor [nm]	$C_{\text{SRO-C}}$ [pF/cm <sup>2</sup> ]	$C_{\text{SRO-M}}$ [pF/cm <sup>2</sup> ]	$C_{\text{max}}$ [pF]
M-LEC <sub>525</sub>	SRO <sub>5</sub>	4.01	9.44	15	$5.57 \times 10^5$	$2.49 \times 10^4$	384
	SRO <sub>25</sub>	2.15	7.73	75	$9.13 \times 10^4$		
M-LEC <sub>1025</sub>	SRO <sub>10</sub>	3.61	9.20	10	$5.43 \times 10^5$	$2.03 \times 10^4$	312
	SRO <sub>25</sub>	1.86	7.24	75	$8.56 \times 10^4$		

En la Fig. 2.13 se muestra las curvas corriente-voltaje (I-V) para los dos tipos de LECs. Los dispositivos S-LEC<sub>P</sub> y S-LEC<sub>T1</sub> muestran un comportamiento de baja corriente a bajos voltajes, igual al observado en otros dispositivos con SRO<sub>30</sub> [40] [68]. Sin embargo, el dispositivo S-LEC<sub>T2</sub> presenta corrientes del orden de mA a bajos voltajes. Como se mencionó anteriormente, es posible que el sustrato y la compuerta hayan quedado en contacto directo. En lo subsecuente se mencionarán los resultados de esta estructura, pero no se considerará como una opción viable para ser integrada en el circuito electrofotónico.

Los dispositivos M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub> tienen un comportamiento I-V diferente a los S-LEC<sub>P</sub> y S-LEC<sub>T1</sub>, como se puede observar en la Fig. 2.13 (b). En la primera medición se obtiene un estado de baja corriente (LCS, del inglés *Low Conduction State*). Al alcanzar un voltaje aproximado de 70 V cambia a un estado de alta conducción (HCS, del inglés *High Conduction State*) que se conserva en todas las siguientes mediciones. El primer barrido de voltaje orienta los NCs-Si para formar caminos conductivos preferentes asociados a HCS; sin embargo, esta condición se perdía con los siguientes barridos [40] [69] [70] en dispositivos de capa simple. Este proceso se le conoce como electroformado y fue demostrado mediante TEM *in situ* [71]. En el caso de las multicapas, los caminos conductivos preferentes no se aniquilan con las subsecuentes mediciones, provocando que el electroformado sea permanente. Es por esto que las multicapas tienen una condición HCS en todo momento, similar con otros reportes de estructuras multicapa [21] [62] [72]. Es importante mencionar, que aun cuando el dispositivo mantiene un estado de alta conducción, se observan efectos del atrapamiento de carga. En el recuadro de la Fig. 2.13 se muestra un acercamiento a bajos voltajes evidenciando brincos en corriente asociados con atrapamiento de carga en el SRO.

## 2. EMISOR DE LUZ



**Figura 2.13.** Curvas corriente-voltaje para estructuras LEC con capas simples (a) y multicapas (b) de SRO. Las estructuras S-LECP y S-LECT1 presentan el comportamiento más parecido a un capacitor MOS.

En la Fig. 2.14 se muestra la densidad de corriente ( $J$ ) en función del campo eléctrico ( $E$ ) para los dispositivos S-LECP, S-LECT1, M-LEC525 y M-LEC1025. Siendo  $J$  y  $E$  definidos como:  $J=I/A$  y  $E=V/t$ , donde  $I$ ,  $A$ ,  $V$  y  $t$  son la corriente eléctrica, el área de compuerta, el voltaje aplicado y el espesor total del SRO.

Todas las curvas fueron obtenidas aplicando un voltaje positivo a la compuerta, condición bajo la cual se observa EL. Al polarizar positivamente la compuerta los electrones son inyectados del sustrato hacia el SRO. Como se observa en la Fig. 2.14, los dispositivos M-LEC registran  $J$  mayores en 3 órdenes de magnitud respecto aquellos de capa simple y ambos tienen un comportamiento similar. Además, presentan alta densidad de corriente con bajo campo eléctrico. Esto se traduce en una reducción del  $E$  necesario para encender la emisión ( $E_{enc}$ ). Por su parte los dispositivos de capa simple presentan diferencias en campos eléctricos bajos a intermedios (0 a 4.5 MV/cm), donde el dispositivo S-LECT1 obtiene una mayor densidad de corriente, indicando una mejor inyección de portadores debido al texturizado de la superficie de silicio. En grandes campos eléctricos ( $>7$  MV/cm), la densidad de corriente de los dispositivos S-LECP y S-LECT1 es similar.

Al comparar dispositivos M-LEC con S-LEC se observa un incremento de la densidad de corriente en varios órdenes de magnitud, como se aprecia en la Fig. 2.14. Las Ni-Si presentes en las interfaces Si/SRO5 y Si/SRO10 funcionan como inyectores entre sustrato y multicapa [42] [59]. Además, las capas con alto contenido de Si (SRO5 y SRO10) propician la formación de caminos conductivos mejorando la inyección de portadores hacia las capas con bajo  $R_0$  (SRO25). Hasta este momento, los dispositivos M-LEC demuestran una exitosa superposición de características ópticas y eléctricas al alternar capas conductoras ( $R_0 = 5$  o  $10$ ) y emisoras ( $R_0 = 25$ ) de SRO.

## 2. EMISOR DE LUZ

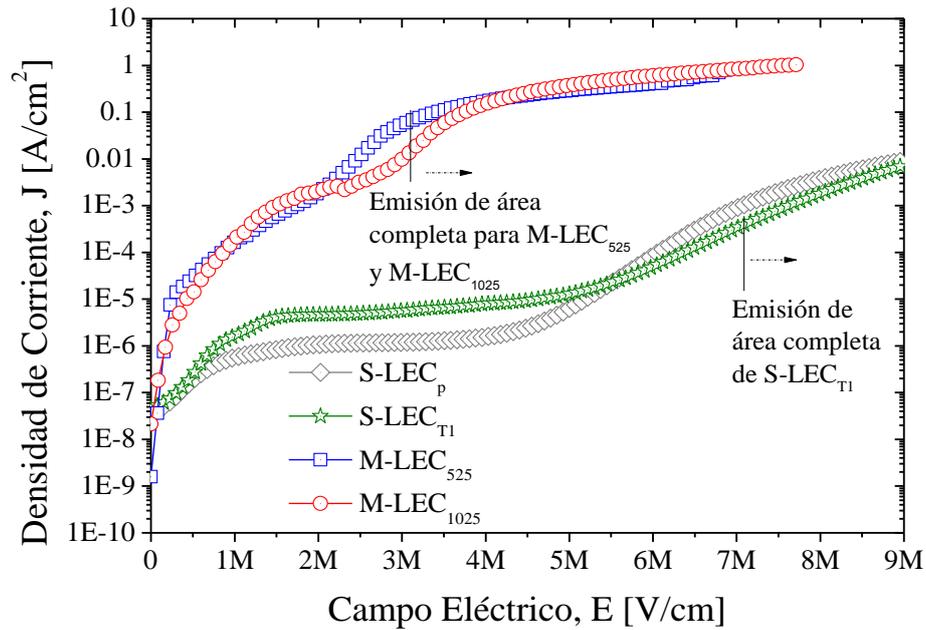


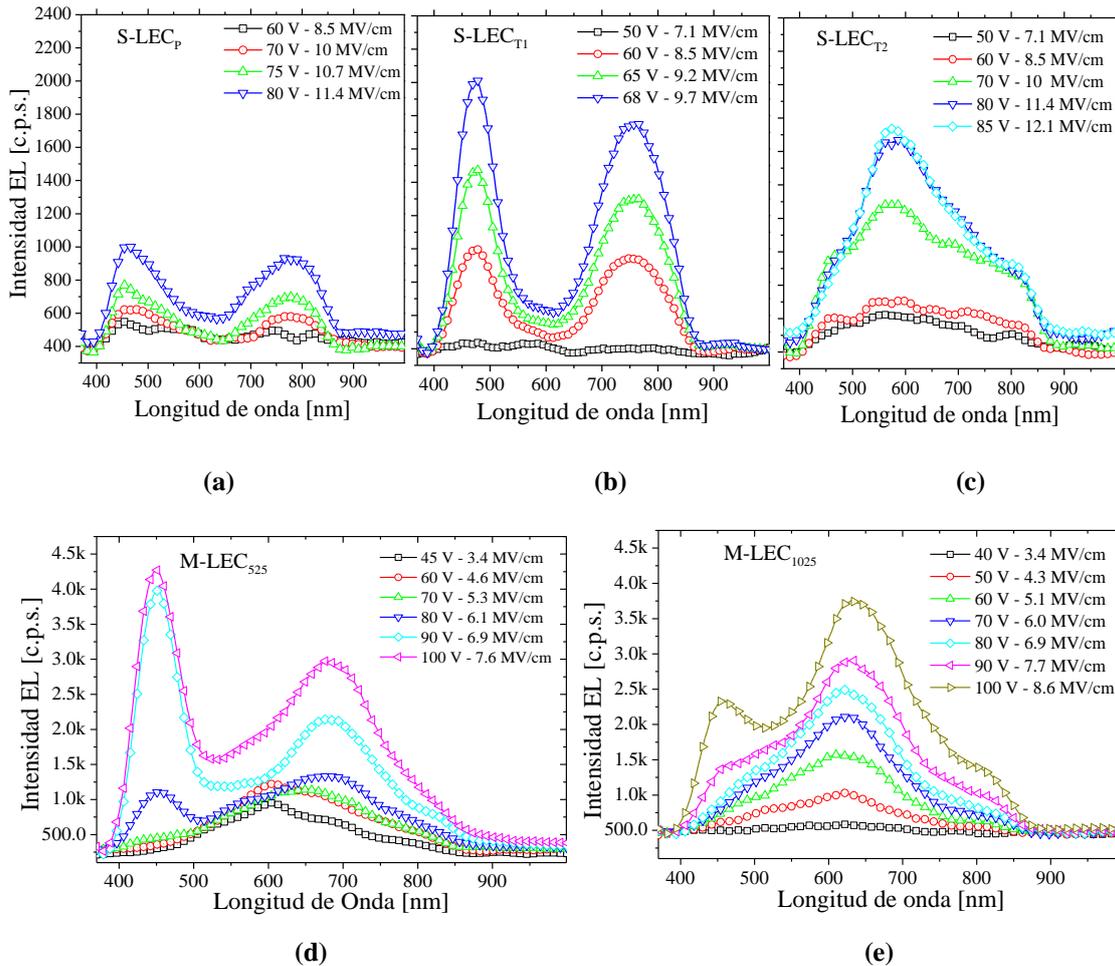
Figura 2.14. Gráfica comparativa de la densidad de corriente en función del campo eléctrico para estructuras LEC de capa simple y multicapa de SRO. En la gráfica se indica el campo eléctrico de encendido para algunos dispositivos. Los voltajes de encendido para los dispositivos M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>, S-LEC<sub>T1</sub> y S-LEC<sub>P</sub> son 38V, 35 V, 48 V y 56 V.

### 2.4.3. Respuesta electro-óptica y eficiencia

En la Fig. 2.15 se observan los espectros de electroluminiscencia (EL) obtenidos para cada dispositivo. Todos muestran un espectro amplio de 400 nm a 850 nm y su intensidad es dependiente del voltaje (mayor voltaje aplicado, mayor intensidad). En los dispositivos S-LEC<sub>P</sub> y S-LEC<sub>T1</sub> se obtuvo emisión de área completa y la forma del espectro muestra dos contribuciones: una centrada en 475 nm (banda en el azul) y otra centrada en 754 nm (banda en el rojo). Dicha forma se conserva al incrementar el voltaje. Por su parte, la muestra S-LEC<sub>T2</sub> tiene un solo pico a 580 nm. Este tipo de espectro se asocia a emisión por puntos y no ser originados por los defectos en el SRO [68] [70].

Por su parte, las estructuras multicapas presentan dos contribuciones principales, una banda en el azul centrada a los 450 nm y otra banda en el rojo centrada en 688 nm y 646 nm para M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>, respectivamente. Ambas logran emisión de área completa. En este caso, toda la compuerta del dispositivo presenta emisión de luz. Dependiendo de la capa conductora una de las bandas contribuye más al espectro de EL. La muestra M-LEC<sub>525</sub> tiene una mayor contribución en el azul, mientras la banda roja adquiere más intensidad en M-LEC<sub>1025</sub>.

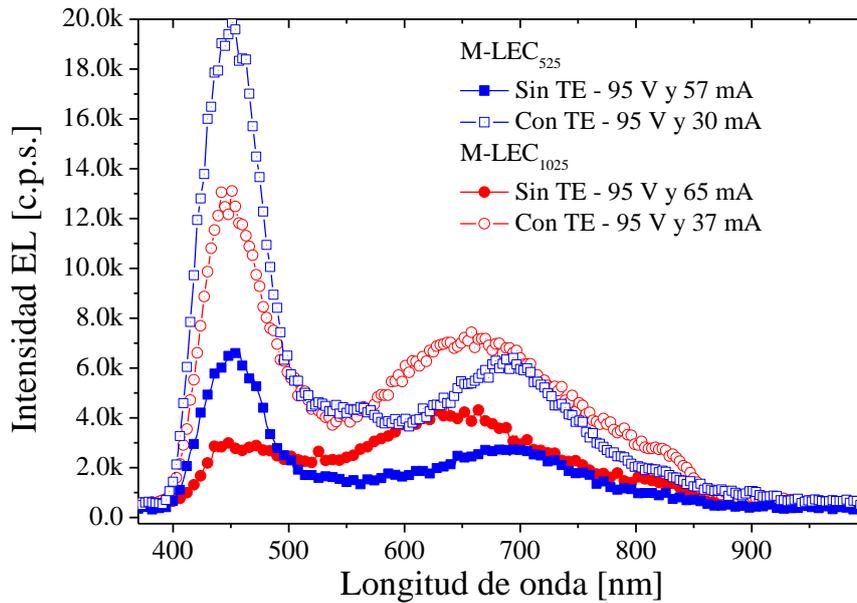
## 2. EMISOR DE LUZ



**Figura 2.15.** Espectro de electroluminiscencia para dispositivos (a) S-LEC<sub>P</sub>, (b) S-LEC<sub>T1</sub>, (c) S-LEC<sub>T2</sub>, (d) M-LEC<sub>325</sub> y (e) M-LEC<sub>1025</sub>, obtenidos con diferentes voltajes aplicados.

Debido a que los dispositivos M-LEC sufrían un cambio en su comportamiento eléctrico, se decidió realizar un tratamiento eléctrico (TE) y después medir la respuesta EL. El tratamiento consistió en realizar un barrido de voltaje de 0 V a 100 V limitando la corriente a 10 mA. En la Fig. 2.16 se muestra el cambio en intensidad con el tratamiento eléctrico. Se incrementó dos a tres veces la intensidad y se disminuyó la corriente. La forma del espectro se mantuvo casi en su totalidad, sólo se observó un ligero corrimiento de la banda roja. Suponemos que el tratamiento eléctrico orientó homogéneamente los caminos conductivos evitando la formación de grandes aglomerados de NCs-Si. Los filamentos formados deben contener gran densidad de NCs-Si pequeños, lo cual propicia que los electrones fluyan con mayor facilidad por la multicapa. Al fluir fácilmente, los electrones tienen mayor probabilidad de producir recombinaciones radiativas en los defectos localizados en la vecindad del NCs-Si. Entonces, se incrementan las transiciones ópticas (incremento en intensidad) y se disminuye el voltaje de encendido.

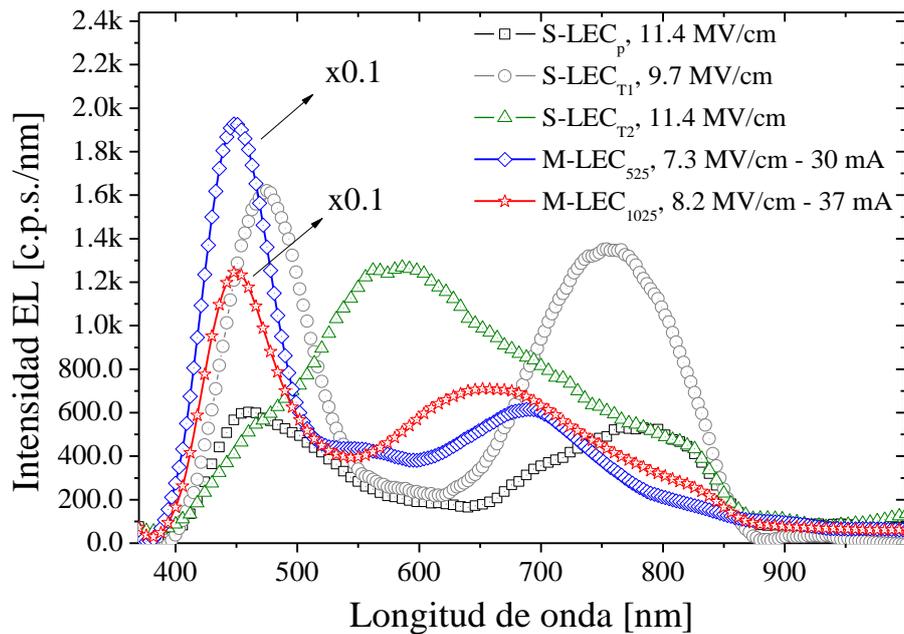
## 2. EMISOR DE LUZ



**Figura 2.16.** Espectro de electroluminiscencia para los dispositivos M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>, antes y después de un tratamiento eléctrico (TE). El tratamiento consistió en un barrido de voltaje de 0 a 100 V limitando la corriente a 10 mA.

En la Fig. 2.17 se muestran los espectros de EL para los 5 dispositivos. Los espectros fueron seleccionados considerando la mejor respuesta luminiscente. Como se observa, el espectro de los dispositivos M-LEC se multiplicaron por un factor de 0.1 (son 10 veces más intensos) para poder compararlos con los dispositivos S-LEC. Entre los dispositivos de capa simple, el S-LEC<sub>T1</sub> tuvo la mejor respuesta, siendo 2.6 veces más intenso que el S-LEC<sub>p</sub>. En el caso de la estructura S-LEC<sub>T2</sub> se observa una respuesta más intensa que el dispositivo sin texturizado (S-LEC<sub>p</sub>), pero las condiciones de polarización (voltaje y corriente) se encuentran cercanos al voltaje de ruptura del dieléctrico. En el caso de los dispositivos M-LEC, el contenido de NCs-Si permite circular más corriente sin dañar el dieléctrico. Esto se corroboró al medir la respuesta C-V después de caracterizar los dispositivos por I-V y EL, obteniendo curvas similares a las mostradas en la Fig. 2.12. Al comparar los dispositivos S-LEC con M-LEC, se puede ver que los dispositivos S-LEC tienen un espectro de EL cuyas bandas (azul y rojo) tienen intensidades muy similares; sin embargo, los dispositivos M-LEC presentan un espectro con la banda azul más intensa que la roja, registrando esta última un desplazamiento de ~70 nm a longitudes de onda menores.

## 2. EMISOR DE LUZ



**Figura 2.17.** Espectros de EL para los dispositivos de capa simple (S-LEC<sub>p</sub>, S-LEC<sub>T1</sub> y S-LEC<sub>T2</sub>) y multicapa (M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>). El espectro EL de los dispositivos M-LEC es 10 veces más grande. Se comparan los espectros con mejor respuesta electroluminiscente. Los dispositivos M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>, S-LEC<sub>p</sub> y S-LEC<sub>T1</sub> presentan emisión de área completa, mientras el dispositivo S-LEC<sub>T2</sub> tiene emisión por puntos.

Se realizó la descomposición de los espectros de EL en 4 contribuciones. Además se estimó el porcentaje que aportaba cada Gaussiana al área total de la curva. En la Fig. 2.18 se presenta la descomposición del espectro de EL para los dispositivos S-LEC<sub>p</sub>, S-LEC<sub>T1</sub>, M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>. En el azul, la emisión entre 435 nm y 500 nm es asociada a defectos NOV (del inglés *Neutral Oxygen Vacancy*), mientras que la emisión alrededor de 520 nm se adscribe a enlaces sueltos de silicio (Si-db), también llamados defectos E'<sub>δ</sub> [33] [68] [73]. En el caso de la banda de emisión en el rojo, los defectos NBOHC (del inglés, *Non-Bridging Oxygen Hole Center*) son responsables de emisión a 670 nm [39] [73], y nano-partículas embebidas en una matriz de SiO<sub>2</sub> (Si-np) generan emisión de 805 a 810 nm [62]. Existen dos posturas respecto a emisión de 700 nm a 760 nm: confinamiento cuántico y defectos de oxígeno; sin embargo se ha demostrado que el SRO obtenido por LPCVD debe su emisión a defectos de oxígeno presentes en la matriz de SRO (d-SiO<sub>x</sub>) [22] [73]. En la tabla 2.9 se resumen la posición y el porcentaje del área total de cada Gaussiana.

En el dispositivo S-LEC<sub>p</sub>, el espectro de EL tiene mayor aportación de los picos centrados en 512 nm y 738 nm asociada a centros E'<sub>δ</sub> y defectos d-SiO<sub>x</sub>, respectivamente. Sin embargo al texturizar la superficie de silicio (dispositivo S-LEC<sub>T1</sub>), la mayor contribución se centra en 472 nm y 742 nm, relacionados con los defectos NOV y d-SiO<sub>x</sub>, respectivamente. Los picos en la superficie de silicio propician la excitación de defectos NOV sobre los centros E'<sub>δ</sub>.

## 2. EMISOR DE LUZ

Respecto a las multicapas, el espectro de EL del dispositivo M-LEC<sub>525</sub> presenta una mayor contribución a los 450 nm, seguido de emisiones centradas en 685 nm y 810 nm, ambas con porcentajes similares. Estas emisiones se pueden adscribir a defectos NOV, NBOHC y Si-np [33] [39] [62] [68] [73]. Al cambiar la película conductora SRO<sub>5</sub> por SRO<sub>10</sub> cambia las principales contribuciones, recayendo principalmente en 660 nm seguido de 445 nm y 480 nm. El pico en 660 nm se relaciona con defectos NBOHC, mientras la emisión en 445 nm y 480 nm se asocia a defectos NOV [39] [68] [73]. Además, la contribución de Si-np en el dispositivo M-LEC<sub>1025</sub> se reduce a menos de la mitad respecto a M-LEC<sub>525</sub>.

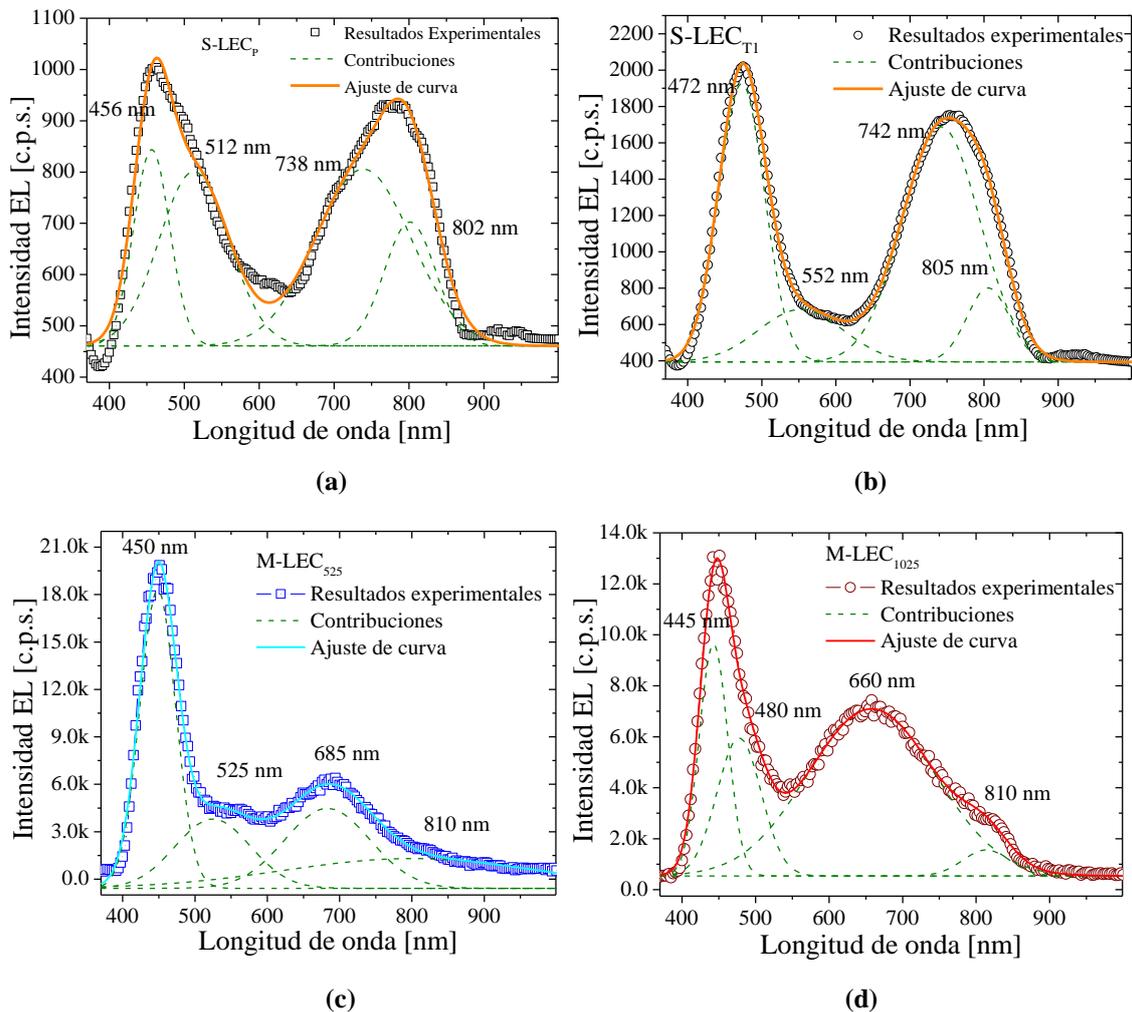


Figura 2.18. Descomposición del espectro de EL en 4 Gaussianas (contribuciones) para los dispositivos (a) S-LEC<sub>p</sub>, (b) S-LEC<sub>T1</sub>, (c) M-LEC<sub>525</sub> y (d) M-LEC<sub>1025</sub>.

## 2. EMISOR DE LUZ

**Tabla 2.9. Posición y porcentaje del área total de cada contribución al espectro de EL, de los dispositivos S-LECP, S-LECT1, M-LEC525 y M-LEC1025.**

Dispositivo	Contribución 1		Contribución 2		Contribución 3		Contribución 4	
	Posición [nm]	% AT						
S-LECP	456	16.6	512	28.6	738	39.8	802	14.9
S-LECT1	472	33.1	552	11.5	742	47.1	805	8.2
M-LEC525	450	35.5	525	17.2	685	22.5	810	24.8
M-LEC1025	445	15.1	480	14.5	660	58.2	810	12.2

AT; Área total bajo la curva

Al comparar la respuesta eléctrica con la respuesta EL se encontraron diferentes relaciones dependiendo del tipo de dispositivo.

En el caso de los dispositivos S-LEC se encontró una mejora en el desempeño al texturizar la superficie del sustrato. El dispositivo S-LECT1 incrementa 2.6 veces la respuesta EL respecto al dispositivo S-LECP. Este incremento se asocia con el aumento de inyección de portadores en bajos campos eléctricos (0 MV/cm a 1.5 MV/cm). En la Fig. 2.19 (a) se encuentra una curva  $J$  vs  $E$  para bajos campos eléctricos, donde se aprecia un comportamiento lineal para el dispositivo S-LECP, mientras el dispositivo S-LECT1 incrementa la densidad de corriente exponencialmente al aumentar el campo eléctrico. Esto es indicativo del aumento en la inyección de electrones del sustrato a la matriz de SRO. En medianos campos eléctricos (1.5 MV/cm a 5 MV/cm) el transporte de carga está dominado por el mecanismo FN. Es evidente que existe una diferencia de densidad de corriente en esta región, pero la pendiente es muy similar entre ambas curvas, como se puede observar en la Fig. 2.14. La respuesta EL se obtiene en  $E > 7$  MV/cm. En este régimen el transporte de carga está dominado por el mecanismo TAT. Trabajos previos han reportado resultados similares debido a la gran densidad de defectos presentes en el SRO [40] [70] [68]. Mediante el ajuste lineal de una curva  $\ln(J)$  vs  $1/E$  se obtuvo el nivel de trampa. En la Fig. 2.19 (b) y (c) se presenta el ajuste para S-LECP y S-LECT1, respectivamente. Niveles de trampa de 1.49 eV y 1.55 eV se obtuvieron para dispositivos S-LECP y S-LECT1, respectivamente.

El análisis anterior sugiere que al texturizar el sustrato se obtiene una mejora en la respuesta eléctrica y óptica. Los picos formados en la superficie de silicio permiten inyectar más electrones hacia el SRO. El SRO es un material con gran contenido de defectos, y durante bajos  $E$  los electrones que llegan al material pueden propagarse por trampas debidas a defectos poco energéticos, de tal forma que pueden fluir hacia el contacto (camino preferenciales). Algunos electrones quedan atrapados por trampas más energéticas. A medianos  $E$  existen más electrones y muchos de ellos serán obstruidos por aquellos previamente atrapados. Debido al  $E$  aplicado, los electrones disponen de más energía y pueden superar la barrera formada por electrones atrapados (mecanismo FN). Sin embargo, al alcanzar grandes  $E$  los electrones disponen de energía para fluir no sólo por caminos preferenciales, sino decaer y recombinarse entre niveles

## 2. EMISOR DE LUZ

de trampa más profundos. Al disponer de más electrones desde bajos  $E$  el número de procesos involucrados aumenta, de tal forma que al llegar a  $E > 7$  MV/cm se aumenta el número de decaimientos y recombinaciones, es decir procesos radiativos que producen un aumento de la intensidad EL. En caso de requerir una descripción más detallada del transporte de carga en estos dispositivos se puede consultar la referencia [74].

Los dispositivos M-LEC tienen un comportamiento más complejo. En ambos casos existe más de un mecanismo responsable de la conducción. En campos eléctricos menores a 2 MV/cm el mecanismo de emisión termoiónica, del inglés *Thermionic Emission*, controla el transporte de carga a través de la multicapa. Para  $E > 2$  MV/cm los mecanismos FN y PF dominan la conducción hasta alcanzar un voltaje  $\sim 38$  V (ver Fig. 2.19 (d)). Una vez superado este voltaje, el mecanismo SCL es responsable del transporte de carga (ver Fig. 2.19 (e)) y coincide con el inicio de la EL. Este mecanismo controla el transporte de carga hasta los 6 MV/cm. Después de este valor, TAT e ionización por impacto incrementa substancialmente la respuesta EL. En la Fig. 2.19 (f) y (g) se muestran una dependencia lineal del  $\ln(P_{op})$  en función de  $V^{-1/2}$  para los dispositivos M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>, respectivamente. Este comportamiento se asocia a ionización por impacto [75]. Aparentemente la emisión en las multicapas comienza cuando las trampas comienzan a llenarse, dando lugar a recombinación entre electrones libres y atrapados. Al incrementar el  $E$  estas trampas se van llenando hasta alcanzar la condición “libre de trampas”. Al superar este límite, es decir para  $E > 6$  MV/cm los electrones son acelerados al punto de generar diversas colisiones y acelerar otras partículas. Debido a la presencia de una gran densidad de NCs-Si en las multicapas, éstos se desempeñan como puntos de dispersión para los electrones acelerados desde el sustrato, y funcionan como fuentes de bombeo para producir otros electrones después de colisionar electrones con NCs-Si [63]. Al disponer de más electrones libres, se incrementan las recombinaciones radiativas de modo que se mejora la intensidad de emisión. Además, al disponer de un gran número de trampas debido al SRO, existe una contribución del mecanismo TAT, el cual, como ya se mencionó anteriormente, origina decaimiento y recombinación entre distintos niveles de trampa. En caso de requerir una descripción completa del transporte de carga para los dispositivos M-LEC se puede consultar la referencia [48].

Para los dispositivos M-LEC, se determinó una altura de la barrera ( $\Phi_B$ ) mediante el ajuste lineal de la curva  $\ln(J/E^2)$  vs  $1/E$  (mecanismo FN). Alturas de 0.71 eV y 0.91 eV fueron obtenidas para M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>. Una menor altura se obtiene al utilizar capas de SRO con mayor exceso de silicio. Por medio del análisis del mecanismo SCL se obtuvo la densidad de trampas y el  $V_{TFL}$ . En la tabla 2.10 se resumen los parámetros obtenidos mediante el ajuste lineal de los diferentes mecanismos. Además, en el ajuste del mecanismo TAT se obtuvieron niveles de trampa de 0.39 eV y 0.58 eV para M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>, respectivamente. Es posible que las capas conductoras permitan que los electrones fluyan fácilmente a través de la estructura, requiriendo campos eléctricos bajos y permitiendo que los electrones sean

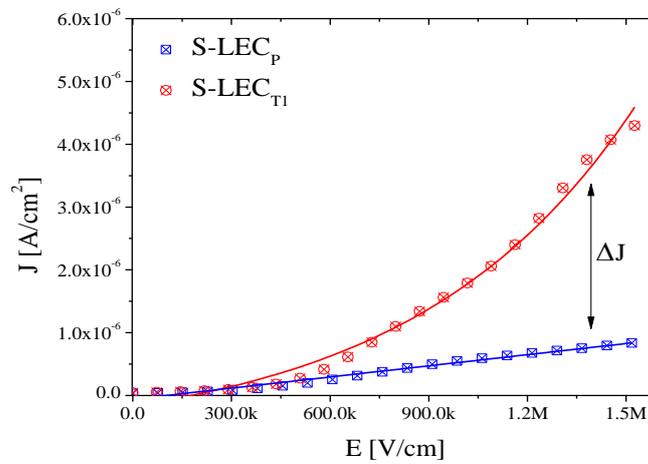
## 2. EMISOR DE LUZ

atrapados en trampa superficiales, contrario a los dispositivos S-LEC donde niveles más profundos fueron excitados (ver Tabla 2.10).

Como se puede concluir, el transporte de carga en una estructura multicapa es complejo. Resultados similares se han reportado tanto en estructuras multicapa como estructuras con capas inyectoras de electrones [20] [21] [52] [41]. En la Fig. 2.20 se esquematiza un diagrama de bandas para los dispositivos de capa simple y multicapa resaltando parámetros obtenidos bajo grandes campos eléctricos.

**Tabla 2.10. Parámetros obtenidos mediante el ajuste de los mecanismos de conducción en dispositivos de capa simple (S-LEC<sub>P</sub> y S-LEC<sub>T1</sub>) y multicapa (M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>).  $\Phi_T$ ,  $\Phi_B$ ,  $N_t$  y  $V_{TFL}$  son el nivel de energía de trampa, la altura de la barrera FN, la densidad de trampas por unidad de volumen y el voltaje para el límite de trampas libres.**

Dispositivo	Mecanismo			
	TAT	FN	SCL	
	$\Phi_T$ [eV]	$\Phi_B$ [eV]	$N_t$ [cm <sup>-3</sup> ]	$V_{TFL}$ [V]
S-LEC <sub>P</sub>	1.49	---	---	---
S-LEC <sub>T1</sub>	1.55	---	---	---
M-LEC <sub>525</sub>	0.39	0.71	$8.84 \times 10^{17}$	38
M-LEC <sub>1025</sub>	0.58	0.91	$1.11 \times 10^{18}$	36



(a)

## 2. EMISOR DE LUZ

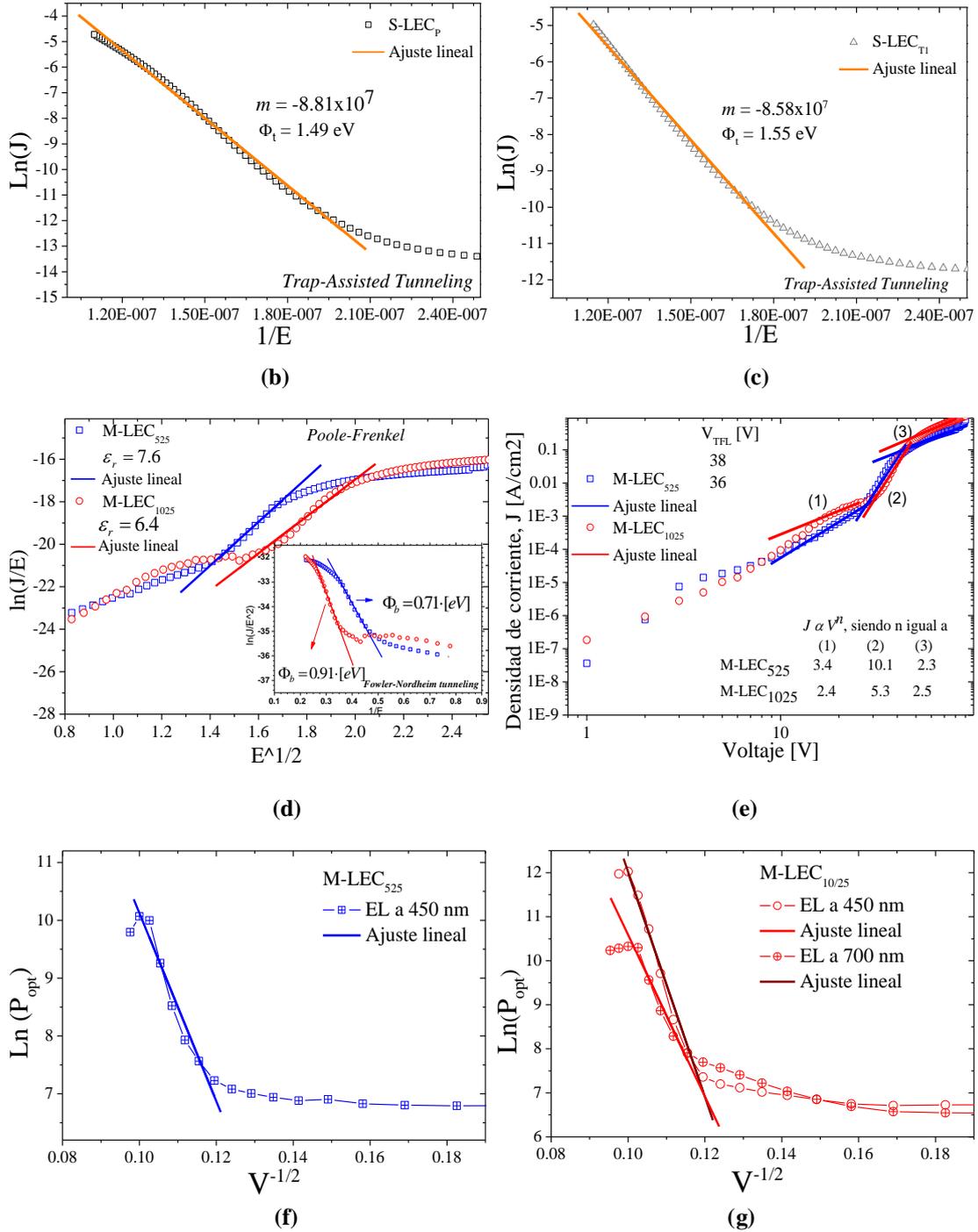


Figura 2.19. Ajustes de los mecanismos de conducción involucrados en la emisión de luz para dispositivos S-LEC y M-LEC. (a) Curva  $J$  vs  $E$  en campos eléctricos de 0 a 1.5 MV/cm para los dispositivos S-LEC<sub>p</sub> y S-LEC<sub>T1</sub>. Se aprecia un incremento de  $J$  del dispositivo S-LEC<sub>T1</sub> respecto a S-LEC<sub>p</sub>. (b) y (c) son el ajuste para el mecanismo *Trap-Assisted Tunneling* en los dispositivos S-LEC<sub>p</sub> y S-LEC<sub>T1</sub>, respectivamente. (d) y (e) son ajustes de los mecanismos *Poole-Frenkel*, *Fowler-Nordheim tunneling* – recuadro en (c) – y *Space-Charge Limited conduction* para los dispositivos M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>. (f) y (g) son gráficas de  $\ln(P_{opt})$  en función de  $V^{-1/2}$  para la banda azul de M-LEC<sub>525</sub> y las dos bandas de M-LEC<sub>1025</sub>. Un ajuste lineal sugiere la presencia del mecanismo ionización por impacto.

## 2. EMISOR DE LUZ

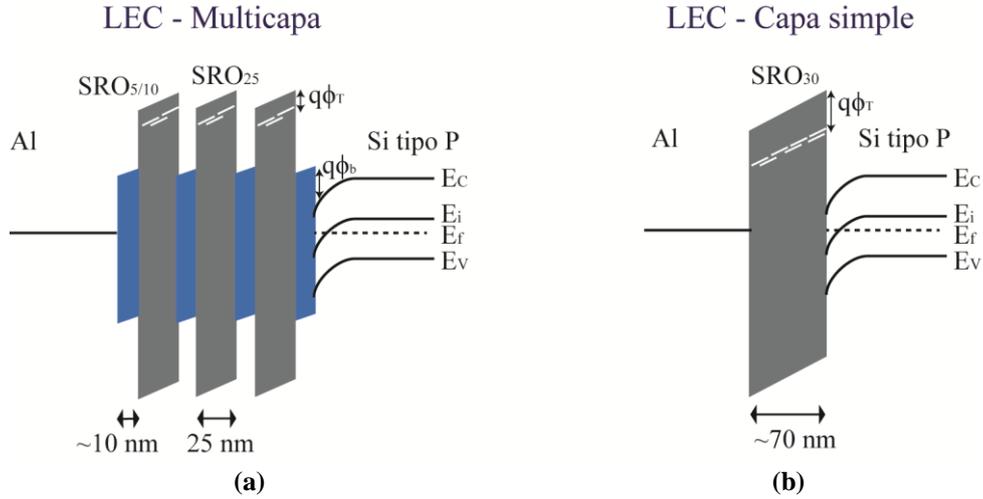


Figura 2.20. Diagrama de bandas para los dispositivos a) de capa simple y b) multicapa bajo la influencia de un campo eléctrico externo (voltaje aplicado al dispositivo). Se puede observar la altura de la barrera y el nivel de trampa obtenido por los mecanismos de conducción TAT y FN. Las imágenes son de propósito ilustrativo y no se encuentran a escala.

### 2.5. Discusión: Capa simple vs Multicapa

Los dispositivos S-LECT<sub>1</sub> y M-LECC<sub>525</sub> mostraron mejores características electro-ópticas al ser comparados con dispositivos de su misma categoría, es decir, capa simple o multicapa. Sin embargo, es necesario establecer cuál de ellos representa una mejor opción para ser integrada en un circuito electrofotónico. Los aspectos que se compararán son el campo eléctrico de encendido ( $E_{enc}$ ), la potencia eléctrica consumida ( $P_e$ ), la potencia óptica ( $P_{opt}$ ) y la eficiencia externa de los dispositivos ( $\eta_{ext}$ ). Esta última definida como:

$$\eta_{ext} = \frac{P_{opt}}{P_e} \quad (2.10)$$

El  $E_{enc}$  fue disminuyendo de S-LECC<sub>p</sub> a M-LECC<sub>525</sub>, pasando por S-LECT<sub>1</sub> y M-LECC<sub>1025</sub>. Se obtuvieron valores de 8.5 MV/cm, 7 MV/cm, 3.1 MV/cm y 2.9 MV/cm respectivamente. El texturizado de la superficie de Si reduce el  $E_{enc}$  en un 17% respecto a un sustrato pulido. Al cambiar la capa activa por una estructura multicapa se observa un mayor decremento en el  $E_{enc}$ . El dispositivo M-LECC<sub>1025</sub> necesita 3.1 MV/cm para comenzar a emitir, 64 % y 55 % menos que S-LECC<sub>p</sub> y S-LECT<sub>1</sub>, respectivamente. Sin embargo, al substituir el SRO<sub>10</sub> (12 % de exceso de Si) por SRO<sub>5</sub> (14 % de exceso de Si), el  $E_{enc}$  disminuye hasta 2.9 MV/cm, 6 % menos que el necesario en el dispositivo M-LECC<sub>1025</sub>.

## 2. EMISOR DE LUZ

Todos los dispositivos se compararon cuando presentaron la mejor intensidad EL y por lo tanto la mayor  $P_{opt}$ . De esta forma se aborda el principal problema de las fuentes de luz en silicio, su baja intensidad de emisión. En la tabla 2.11 se encuentran los valores de voltaje, campo eléctrico ( $E$ ), corriente, potencia eléctrica ( $P_e$ ), potencia óptica ( $P_{opt}$ ) y eficiencia externa ( $\eta_{ext}$ ) para la mejor respuesta EL de cada dispositivo. Como se puede intuir de la Fig. 2.14, los dispositivos basados en estructuras multicapa consumen mayor potencia eléctrica.

**Tabla 2.11. Valores de voltaje, Campo eléctrico, potencia eléctrica, potencia óptica y eficiencia externa para cada dispositivo emisor de luz.**

Muestra	Voltaje [V]	$E$ [MV/cm]	Corriente [ $\mu$ A]	$P_e$ [mW]	$P_{opt}$ [ $\mu$ W]	$\eta_{ext}$ [ $10^{-6}$ %]
S-LECP	80	11.4	113	9.04	0.17	18.7
S-LECT <sub>1</sub>	68	9.7	78	5.30	0.34	64.1
M-LEC <sub>525</sub>	95	7.3	$30 \times 10^3$	$2.85 \times 10^3$	2.75	1.0
M-LEC <sub>1025</sub>	95	8.2	$37 \times 10^3$	$3.52 \times 10^3$	2.71	0.9

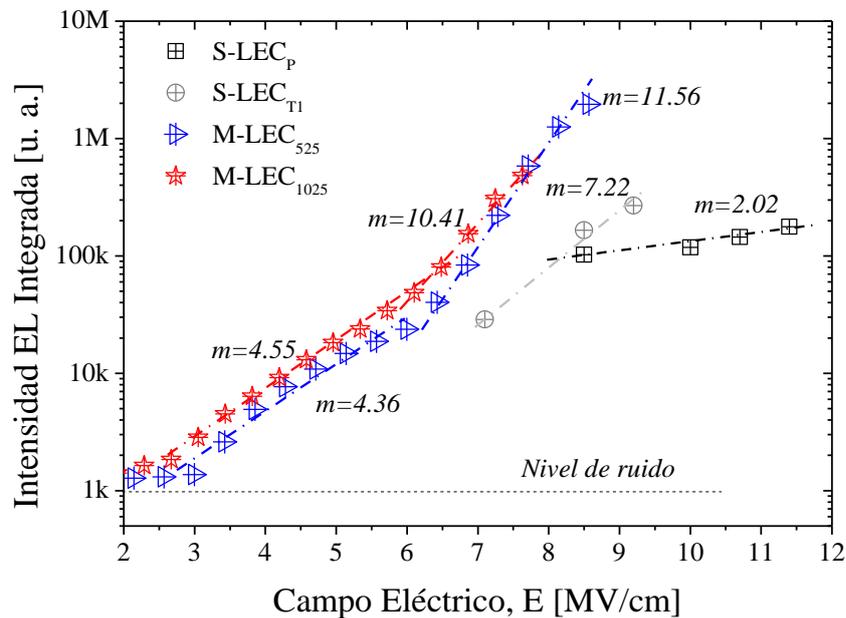
El S-LECT<sub>1</sub> logra una reducción de la corriente del  $\sim 30$  % respecto a S-LECP. También reduce el voltaje de encendido y el necesario para la máxima emisión. La potencia eléctrica consumida para el S-LECP y S-LECT<sub>1</sub> es de 9.04 mW y 5.30 mW, respectivamente. El dispositivo con superficie texturizada (S-LECT<sub>1</sub>) reduce a la mitad la potencia consumida respecto al dispositivo S-LECP. La potencia óptica es baja para ambos dispositivos, siendo de algunos cientos de nW. A pesar de su baja intensidad de emisión, los dispositivos S-LEC obtienen valores de eficiencia de  $18.7 \times 10^{-6}$  % y  $64.1 \times 10^{-6}$  %, respectivamente. Es evidente que el texturizado de la superficie mejora las características electro-ópticas, incrementando 3.4 veces la eficiencia de los dispositivos.

En el caso de los dispositivos M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub> el consumo de potencia es mayor, registrando corrientes de mA, tres órdenes de magnitud mayor que los dispositivos S-LEC. Si bien, el campo eléctrico de encendido es menor, los voltajes requeridos para obtener máxima emisión siguen siendo altos, posiblemente debido al espesor de la estructura. Las capas con alto exceso de silicio propician mayores corrientes sin que se dañe el dispositivo, sin embargo las capas emisoras siguen siendo gruesas. Como resultado, se consume una potencia eléctrica de 2.85 W y 3.52 W para los dispositivos M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>, respectivamente. Existe la ventaja de una mayor potencia óptica, siendo un orden de magnitud más grande que los dispositivos S-LEC. En circuitos que integran guías de onda, esta diferencia es substancial, pues la atenuación de la guía, aun cuando sea baja, puede evitar que la luz salga de la misma y sea detectada. El gran consumo de corriente repercute en una baja eficiencia, a pesar de tener la mayor potencia óptica. La eficiencia externa para los dispositivos M-LEC es  $\sim 1 \times 10^{-6}$  %.

Para el desarrollo de un circuito electrofotónico en Si la figura de mérito en las fuentes de luz es la intensidad de emisión irradiada. En la Fig. 2.21 se presenta la intensidad EL integrada como función del  $E$ . Como se puede observar los dispositivos M-LECs tienen un rango de operación de 6 MV/cm, siendo el rango de operación el

## 2. EMISOR DE LUZ

conjunto de valores de  $E$  en las cuales existe una respuesta EL sin dañar el dispositivo. Por su parte, los dispositivos de capa simple tienen un rango de operación corto (3MV/cm) y se requiere de altos campos eléctricos ( $> 7$  MV/cm) para iniciar la emisión. El dispositivo S-LECP logró soportar campos superiores a 11 MV/cm pero la potencia radiada no incrementaba substancialmente. Al realizar un ajuste lineal a los datos se obtuvo una pendiente de 2.02 para el S-LECP. Al texturizar la superficie de Si (S-LECT<sub>1</sub>) se logró disminuir el  $E_{enc}$  de 8.5 MV/cm a 7 MV/cm y el campo eléctrico de máxima emisión (11.6 MV/cm a  $\sim 10$  MV/cm). El rango de operación para los dispositivos S-LECP y S-LECT<sub>1</sub> es de  $\sim 3$  MV/cm. Por su parte, los dispositivos M-LEC tienen un mejor control de la intensidad EL en función del campo eléctrico. Además, se disminuye el  $E_{enc}$  a 2.9 MV/cm y 3.1 MV/cm para M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub> respectivamente. Menos de la mitad del requerido por S-LECT<sub>1</sub>. Además existe un aumento de intensidad más pronunciado al alcanzar los 6 MV/cm. En la gráfica se observa un cambio de pendiente de 4.36 a 11.56 y 4.55 a 10.41 en los dispositivos M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>. Es consecuencia, los dispositivos M-LEC tienen dos ventajas. Primero, la intensidad EL es un orden de magnitud mayor. Segundo, el rango de operación es de  $\sim 6$  M/cm, el doble al presentado en dispositivos S-LEC. Esta característica permite operar los dispositivos en un rango de voltajes adecuado, sin llegar a la ruptura del dieléctrico.

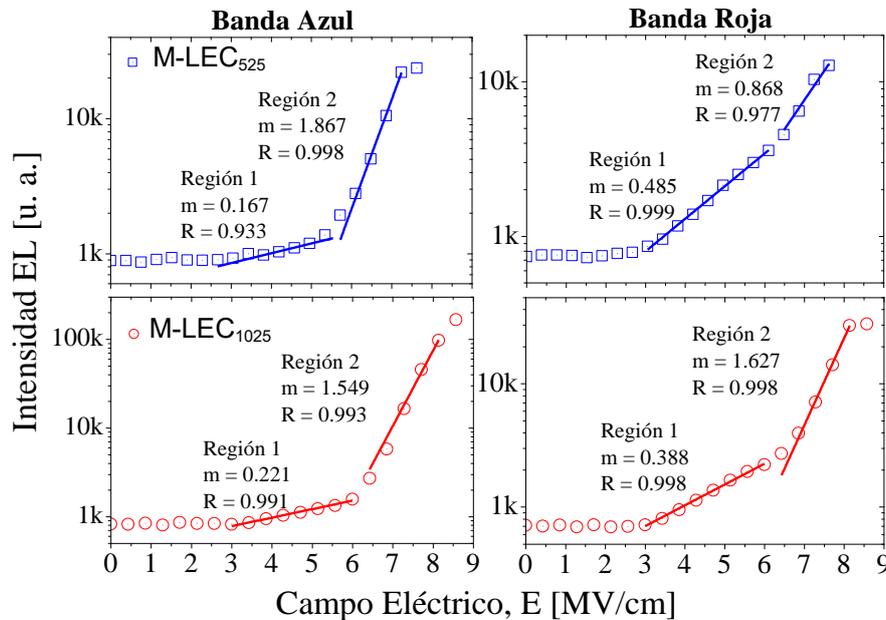


**Figura 2.21. Intensidad EL en función del campo eléctrico para dispositivos LEC. Estructuras multicapa muestran mayor rango de operación e intensidad EL.**

Como se puede observar de la Fig. 2.21, la intensidad EL de los dispositivos M-LEC tiene diferente dependencia con el campo eléctrico. En la Fig. 2.22 se observa la intensidad de las bandas centradas a 450 nm (azul) y 700 nm (rojo) en función del campo eléctrico. En el caso de la muestra M-LEC<sub>525</sub>, la banda azul presenta un cambio

## 2. EMISOR DE LUZ

en pendiente, similar al observado en la Fig. 2.21. Sin embargo, la banda roja tiene una pendiente casi constante en todo el rango. Respecto a la muestra M-LEC<sub>1025</sub>, ambos bandas presentan un cambio en pendiente al superar los 6 MV/cm. Esto sugiere que el incremento exponencial en la intensidad EL se debe a otro mecanismo. Los mecanismos responsables de este cambio en pendiente son TAT e ionización por impacto, como fue presentado en la sección anterior.



**Figura 2.22.** Campo eléctrico vs Intensidad EL para cada banda de los dispositivos M-LEC<sub>525</sub> y M-LEC<sub>1025</sub>. Las líneas sólidas indican un ajuste lineal. La banda azul de M-LEC<sub>525</sub> y las dos bandas de M-LEC<sub>1025</sub> presentan un cambio en pendiente al alcanzar 6 MV/cm.

### 2.6. Conclusión

Los dispositivos LEC basados en multicapas de SRO representan una mejor alternativa para integrarse a un circuito electrofotónico en silicio. Presentan menor voltaje de encendido de emisión, intensidades de emisión un orden de magnitud mayor y un rango de operación 2 veces mayor a dispositivos de capa simple. En este momento su principal desventaja son los altos voltajes de operación. Será necesario optimizarlos y disminuirlos, con la finalidad de requerir valores cercanos a voltajes electrónicos. Una opción es reducir el espesor de las capas y fabricar estructuras multicapa con un espesor nominal de 50 nm, conservando el número de capas conductoras y emisoras. Esta idea se ha demostrado en trabajos de superredes, donde se mejora en el desempeño electro-óptico y se disminuye el voltaje de operación del dispositivo [41].

## 2. EMISOR DE LUZ

### Capítulo 3. Guía de Onda Óptica

En la década de los 80s surge la idea de fabricar circuitos ópticos integrados que permitan migrar a una tecnología que utiliza fotones en lugar de electrones para el manejo de información [5] [76]. Los circuitos estarían compuestos de dispositivos capaces de generar, dirigir, dividir, almacenar y detectar la luz. Además de incrementar la velocidad de procesamiento, se disminuiría la potencia aplicada y se evitarían problemas asociados al calentamiento [27]. Debido a esto, mucha investigación se ha realizado para obtener dispositivos ópticos mediante técnicas microelectrónicas. Un ejemplo son las guías de onda, las cuales han sido fabricadas y estudiadas para aplicaciones con longitudes de onda en el infrarrojo [9] [76]. Una de las limitaciones para caracterizar las guías de onda es la diferencia en tamaño entre las fuentes de luz y las guías fabricadas. Un láser tiene un diámetro de haz del orden de mm, mientras las guías de ondas tienen espesores del orden de  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, estructuras tipo ARROW (del inglés, *Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide*) ha facilitado la alineación con fibras ópticas para estudiar las pérdidas de propagación en la guía [77]. Otras propuestas para acoplar la luz dentro de la guía son mediante lentes, rejillas y objetivos [15] [29] [30] [26].

Como se mencionó anteriormente, el silicio presenta gran atenuación en el rango visible, por lo cual es necesario estudiar materiales compatibles con Si y con baja absorción en este rango. Materiales como óxidos de silicio no estequiométrico ( $\text{SiO}_x$ ), oxinitruro ( $\text{SiO}_x\text{N}_y$ ) y nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) son materiales con baja absorción en el visible, y es posible obtenerlos mediante técnicas como: LPCVD y PECVD [77] [26] [78]. En función de la técnica de depósito, se puede obtener  $\text{Si}_3\text{N}_4$  con índices de refracción de 1.8 a 2.1 [79]. Además, al enriquecer con Si el nitruro de silicio (SRN, *del inglés Silicon Rich Nitride*) se disminuye el estrés residual de la película [80], siendo un indicador del bajo número de defectos generados durante el depósito y la baja absorción. Altos valores de estrés residual puede provocar fallas estructurales en dispositivos con múltiples niveles y materiales [81]. En [82] se estudió la viabilidad para utilizar oxinitruro o nitruro de silicio como material para el núcleo de una guía de onda óptica. El nitruro de silicio ( $\text{Si}_x\text{N}_y$ ) obtenido por LPCVD resultó ser la mejor opción. Las características del  $\text{Si}_x\text{N}_y$  son definidas por el exceso de silicio, el cual se controla mediante la razón de gases precursores ( $R_N$ ), definida como:

$$R_N = \frac{F * P_{\text{NH}_3}}{P_{\text{SiH}_4}} \quad (3.1)$$

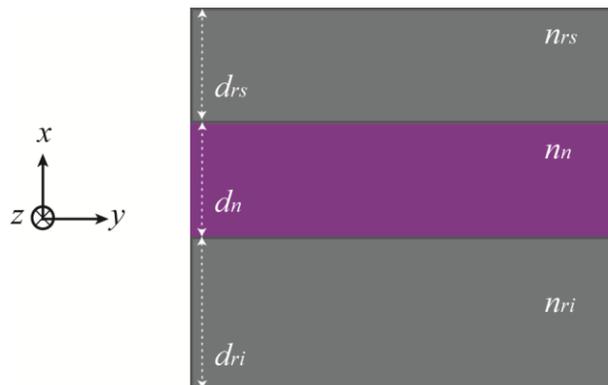
siendo  $P_{\text{NH}_3}$  y  $P_{\text{SiH}_4}$  las presiones parciales del flujo de amoníaco y silano, dentro del reactor.  $F$  es el factor de conversión debido a dilución de silano en  $\text{N}_2$ . Se utilizó el mismo valor del factor al utilizado para depositar las películas de SRO [44].

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

En esta sección se revisará brevemente el fundamento teórico para el guiado de luz. Después se abordará el diseño de la guía de onda y la caracterización morfológica del material (núcleo). La caracterización del material muestra las condiciones de fabricación para obtener las mejores características (homogeneidad, rugosidad, índice de refracción, absorción y transmisión). En la última parte se analizará la guía de onda óptica, enfocándose en sus características estructurales y ópticas, así como el confinamiento y propagación de luz. Es importante recordar que la guía de onda debe propagar luz proveniente del LEC (400 nm a 850 nm) con la menor atenuación posible.

#### 3.1. Fundamentos y simulación

En la Fig. 3.1 se esquematiza la sección transversal de un sistema de 3 medios definidos como núcleo, recubrimiento inferior y recubrimiento superior. Generalmente a este tipo de estructura se le conoce como guía de onda tipo bloque. Con base en el sistema de referencia, la propagación de luz se hará en el eje  $z$ . En la figura  $d_n$ ,  $d_{rs}$  y  $d_{ri}$  se utilizan para indicar los espesores de las capas del núcleo y recubrimientos superior e inferior. Además,  $n_n$ ,  $n_{rs}$  y  $n_{ri}$  denotan los índices de refracción de los mismos medios. Dependiendo de la técnica de fabricación es posible obtener cambios abruptos o graduales en el índice de refracción del núcleo. En nuestro caso nos enfocamos en guías con cambio abrupto.



**Figura 3.1.** Esquema de la sección transversal de un sistema guiado compuesto por tres medios: núcleo, recubrimiento superior y recubrimiento inferior. El espesor ( $d$ ) e índice de refracción ( $n$ ) de cada medio está etiquetado con los subíndices  $n$ ,  $rs$  y  $ri$ , respectivamente.

Considerando que la luz es una onda electromagnética, se puede estudiar su propagación mediante las ecuaciones de Maxwell que describen la relación del campo eléctrico y magnético en una onda en movimiento. Para un medio isotrópico, dieléctrico homogéneo y libre de cargas, las ecuaciones se definen como:

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \mu\vec{H} = 0 \quad (3.4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \varepsilon\vec{E} = 0 \quad (3.5)$$

donde  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  representan los vectores de campo eléctrico y magnético, respectivamente.  $\mu$  y  $\mu_0$  son la permeabilidad relativa del medio y la permeabilidad magnética del vacío.  $\varepsilon$  y  $\varepsilon_0$  son la permitividad relativa del medio y la permitividad eléctrica del vacío. Al aplicar el rotacional a la Ec. 3.2 y considerar la Ec. 3.5 se puede obtener la ecuación de onda, dada como:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E(x) + (k^2 n_i^2 - \beta^2) E(x) = 0 \quad (3.6)$$

La solución a la ecuación de onda es una onda plana de la forma:

$$\vec{E} = E_0 \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad (3.7)$$

el cual representa una onda plana moviéndose en dirección  $z$ , con un campo electromagnético constante a lo largo del eje  $y$ . El medio donde se propaga es no magnético y donde  $E_0$  solo depende de  $x$ . Los parámetros  $k$  y  $\beta$  se conocen como el vector de propagación y la constante de propagación de onda, respectivamente.  $\beta$  determinará cómo se confina la luz dentro de la guía. Al sustituir la Ec. 3.7 en 3.6 se obtiene una ecuación diferencial de segundo orden con funciones exponenciales como solución. Para la variación de  $E(x)$  a lo largo del eje  $y$ , las soluciones son de la forma:

$$E_y(x) = A e^{-p(|x|-d_n/2)} \quad |x| \geq d_n/2$$

$$E_y(x) = \begin{cases} B \cos(hx) \\ B \sin(hx) \end{cases} \quad |x| \leq d_n/2 \quad (3.8)$$

siendo  $p$  y  $h$  las constantes de propagación transversal. La Ec. 3.8 indica que el campo electromagnético es concentrado en el núcleo de la guía y decrece exponencialmente al ir hacia fuera de él. Tomando en cuenta el campo eléctrico y magnético, se obtienen 6 ecuaciones donde se relacionan las componentes de ambos campos. La solución a las ecuaciones que relacionan  $E_y$ ,  $H_x$  y  $H_z$  se le conoce como modos transversales eléctricos (TE), mientras que la solución con  $H_y$ ,  $E_x$  y  $E_z$  se llaman modos

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

transversales magnéticos (TM). Al considerar que las componentes tangenciales de  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  son continuas en la frontera ( $x=\pm d_n/2$ ) entre dos medios con diferentes características, se determina los valores de  $p$  y  $h$  que son posibles. Al resolver la Ec. 3.8 tomando en cuenta los aspectos antes mencionados, se obtiene:

$$\begin{aligned} p(d_n/2) &= h(d_n/2) \tan[h(d_n/2)] && \text{modos pares} \\ p(d_n/2) &= -h(d_n/2) \cot[h(d_n/2)] && \text{modos impares} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Al sustituir la Ec. 3.8 en la ecuación de onda y comparar el resultado con la Ec. 3.9, se puede obtener la siguiente relación:

$$\left[ p\left(\frac{d_n}{2}\right) \right]^2 + \left[ h\left(\frac{d_n}{2}\right) \right]^2 = (n_n^2 - n_r^2) k^2 \left(\frac{d_n}{2}\right)^2 = V^2 \quad (3.10)$$

donde

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{d_n}{2}\right) \sqrt{(n_n^2 - n_r^2)} \quad (3.11)$$

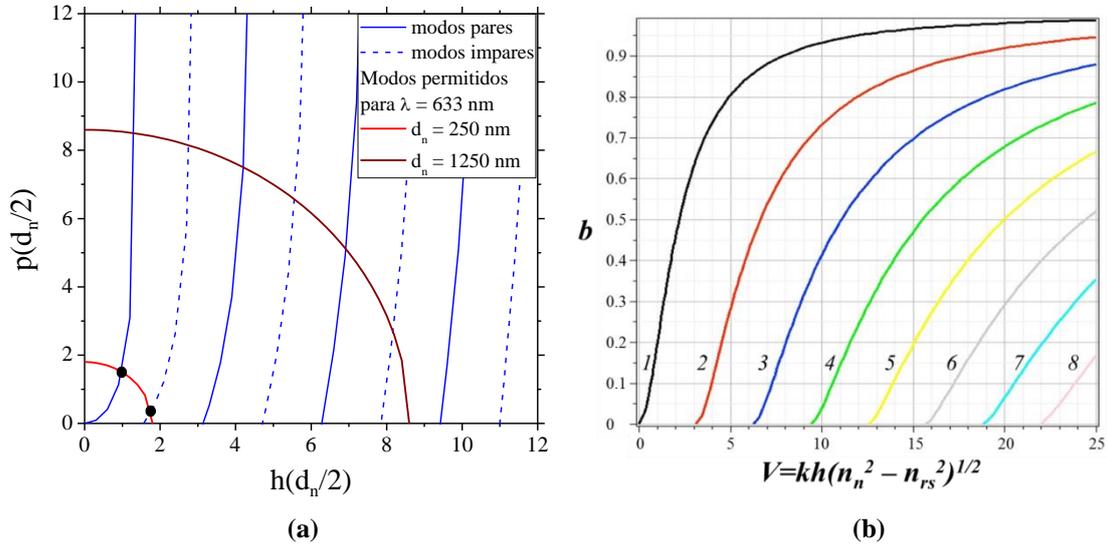
y se conoce como la frecuencia normalizada.  $\lambda$  es la longitud de onda en el vacío y  $k$  es la constante de propagación. El sistema de ecuaciones conformado por las ecuaciones 3.9 y 3.10 se resuelve para obtener  $p(d_n/2)$  y  $h(d_n/2)$ . En la Fig. 3.2 (a) se muestra la solución gráfica de ambas ecuaciones para una guía de onda simétrica (las características de ambos recubrimientos son iguales). Los puntos en el eje horizontal donde interceptan las curvas de la Ec. 3.9 se conocen como frecuencias de corte y corresponden al valor de  $V$  para el cual el modo ya no es una solución. En [83] [84] se puede encontrar un amplio análisis de una guía de onda mediante teoría electromagnética.

En [85], *Kogelnik y Ramaswamy* establecieron los modos permitidos en función de la frecuencia normalizada ( $V$ ), el índice guiado generalizado ( $b$ ) y medida de asimetría ( $a$ ), definidos como:

$$\begin{aligned} V &= \frac{2\pi}{\lambda} h \sqrt{n_n^2 - n_{ri}^2} \\ b &= \frac{N^2 - n_{ri}^2}{n_n^2 - n_{ri}^2} \\ a &= \frac{n_{ri}^2 - n_{rs}^2}{n_n^2 - n_{ri}^2} \end{aligned} \quad (3.12)$$

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

Siendo  $N$  el índice efectivo modal. Al resolver la relación de dispersión, ya sea para modos TE o TM, se pueden obtener gráficas de los modos permitidos en función de los parámetros generalizados. En la Fig. 3.2 (b) se muestran las gráficas para los modos de propagación TE en función de los parámetros normalizados.



**Figura 3.2.** (a) Solución gráfica de los modos propagados para un sistema guía con  $n_n = 2.01$ ,  $n_r = 1.46$ ,  $\lambda = 633$  nm y espesor del núcleo de 250 nm (línea roja) y 1250 nm (línea vino). Para  $d_n = 250$  nm se indican los modos permitidos como la intersección (puntos negros) del semi-círculo con los modos pares e impares. (b) Gráfica de índice guiado normalizado,  $b$ , en función de la frecuencia normalizada,  $V$ , para los modos de propagación TE.

La tecnología planar permite fabricar guías de onda con diversas geometrías tales como: rectangular, bloque, costilla y micro-cinta. Tecnológicamente, las guías más simples corresponden a estructuras con menos pasos de fabricación, sin embargo no siempre tienen las mejores características de propagación. En [82] se analizaron dos geometrías y se determinó que una estructura tipo costilla tiene la ventaja de confinamiento mono- o multi-modal en función de la relación de aspecto (específicamente la altura fraccional), y es independiente de las dimensiones de la geometría. En la Fig. 3.4 se esquematiza una guía de onda tipo costilla. Para analizar la propagación de luz en la guía tipo costilla se consideran tres guías tipo bloque, dos de ellas con altura  $rh$  y una tercera con altura  $h$ . Entonces, la relación de dispersión en función de los parámetros normalizados está dada por [86]:

$$V = \frac{\pi}{2} \frac{aw_1}{b} \sqrt{\delta} \quad (3.13)$$

Donde  $\delta = (w_2/rw_1)^2 - 1$ ,  $w_1 = 4\pi b/(q + 4\pi b)$  y  $w_2 = 4\pi r b/(q + 4\pi r b)$ . Por su parte  $q$  está definido como:

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

$$q = \frac{\gamma_0}{\sqrt{n_n^2 - n_{rs}^2}} + \frac{\gamma_2}{\sqrt{n_n^2 - n_{ri}^2}} \quad (3.14)$$

Donde los valores de  $\gamma_0$  y  $\gamma_2$  dependen del tipo de modos (TE o TM). Aplicando el procedimiento propuesto en [86] se obtiene la condición para confinamiento mono-modal en guías tipo costilla, definida como:

$$\frac{a}{b} \leq \left( \frac{q + 4\pi b}{4\pi b} \right) \frac{1 + 0.3 \sqrt{\left( \frac{q + 4\pi b}{q + 4\pi r b} \right)^2 - 1}}{\sqrt{\left( \frac{q + 4\pi b}{q + 4\pi r b} \right)^2 - 1}} \quad (3.15)$$

En la Fig. 3.3 se muestran las gráficas de relación de dispersión para modos TE y TM, considerando diferentes alturas fraccionales ( $r$ ). Para valores de  $a$  y  $a/b$  superiores a las curvas de cada  $r$  se obtienen guías de onda multimodal, mientras valores por debajo de la curva correspondiente producen guías de onda mono-modal. En la Fig. 3.3 se indica ambos casos para un  $r = 0.8$ .

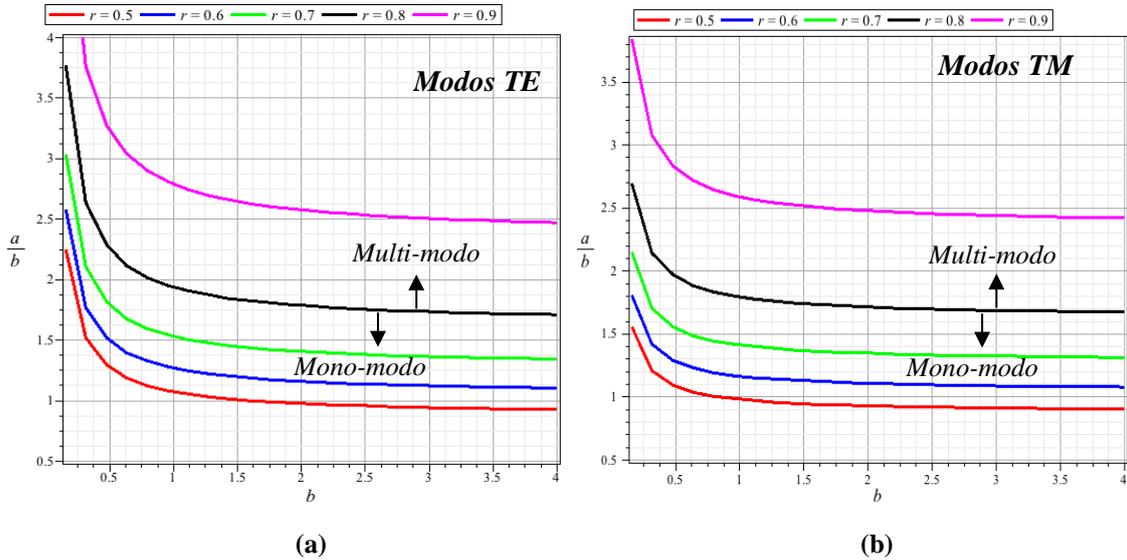


Figura 3.3. Relación de dispersión en función de los parámetros normalizados  $a$  y  $b$ , para los modos (a) TE y (b) TM considerando diferentes alturas fraccionales,  $r$ .

Para evaluar el desempeño de la guía de onda al modificar las dimensiones de la estructura, se simuló una guía tipo costilla que consideraba nitruro de silicio como núcleo ( $n_n = 2.01$ ) y óxido de silicio ( $n_{rs, ri} = 1.46$ ) como recubrimiento superior e inferior. Se varió la altura de la guía ( $h$ ) de  $0.5 \mu\text{m}$  a  $2 \mu\text{m}$  y se fijó un valor de  $r = 0.8$ . Debido a que el emisor de luz tiene un espectro amplio (400 nm a 850 nm) se consideraron 4 longitudes de onda para el análisis: 480 nm, 550 nm, 680 nm y 750 nm.

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

Asimismo, se consideró incidencia normal suponiendo integración monolítica entre el emisor de luz y la guía. En todos los casos se iluminó el puerto de entrada con una potencia óptica de 50 mW. Se estudiaron los modos de propagación fundamentales y la distribución de campo electromagnético a través del método de elemento finito (FEM, del inglés *Finite Element Method*) utilizando el módulo “*Wave Optics*” de COMSOL Multiphysics®. En la Fig. 3.4 se muestra la geometría simulada y algunos de los parámetros considerados. Además se indican los puertos de entrada y salida de la guía de onda.

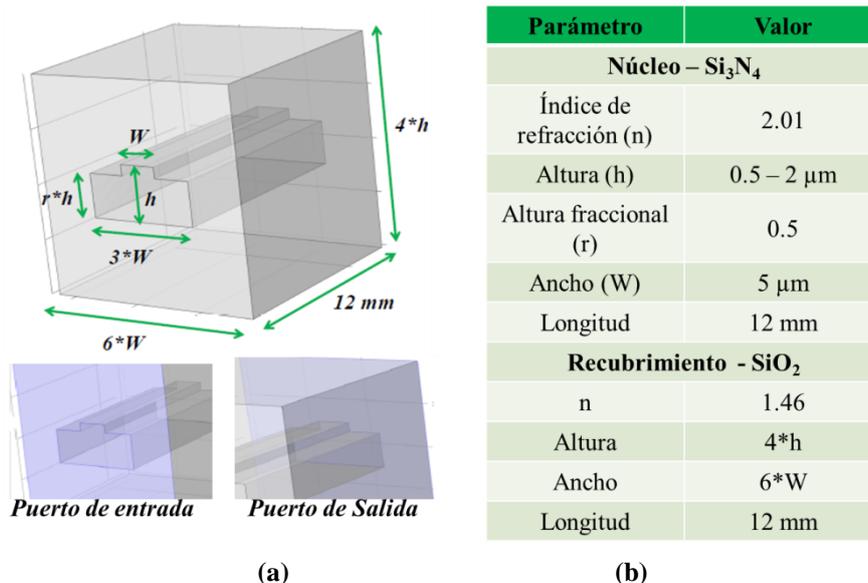


Figura 3.4. (a) Esquema de la guía de onda simulada, indicando las dimensiones y los puertos de entrada y salida. (b) Tabla de parámetros considerados durante la simulación. Para el núcleo se varió la altura, mientras para el recubrimiento se varió altura y ancho.

Para el modo fundamental la mayor magnitud de campo eléctrico o magnético se centra a media altura de la guía por debajo de la costilla ( $x=W/2$ ,  $y=h/2$ ), como se puede observar en la Fig. 3.5. En el mejor de los casos ( $h = 0.5 \mu\text{m}$  y  $\lambda = 550\text{nm}$ ), en el puerto de entrada se logró confinar un campo eléctrico de  $\sim 1 \times 10^8 \text{ V/m}$ . Sin embargo, después de propagarse se disminuye cerca de un orden de magnitud en cada longitud de onda, obteniendo a la salida  $\sim 6 \times 10^7 \text{ V/m}$  para una  $\lambda = 550 \text{ nm}$ . Por su parte, una estructura con  $h = 1.25 \mu\text{m}$  mostró un comportamiento con menos pérdidas. Se confina un campo eléctrico de  $10^6 \text{ V/m}$  a  $10^7 \text{ V/m}$  para valores de  $\lambda$  entre  $480 \text{ nm}$  y  $750 \text{ nm}$ , y decrecen a valores entre  $\sim 5 \times 10^5 \text{ V/m}$  y  $\sim 8 \times 10^6 \text{ V/m}$  al propagarse a lo largo de la guía. Al evaluar la energía eléctrica total normalizada, una guía con  $h = 1.25 \mu\text{m}$  tiene un mejor desempeño respecto a los otros casos, sin embargo valores de altura menores muestran valores aceptables. En la Fig. 3.5 (c) se muestra la energía eléctrica total propagada a lo largo de la guía en función de la longitud de onda y para cada altura de guía. Se puede referir a [82] en caso de requerir más detalles de los parámetros considerados durante la

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

simulación y los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos en la simulación son tomados como base para la fabricación de las guías de onda.

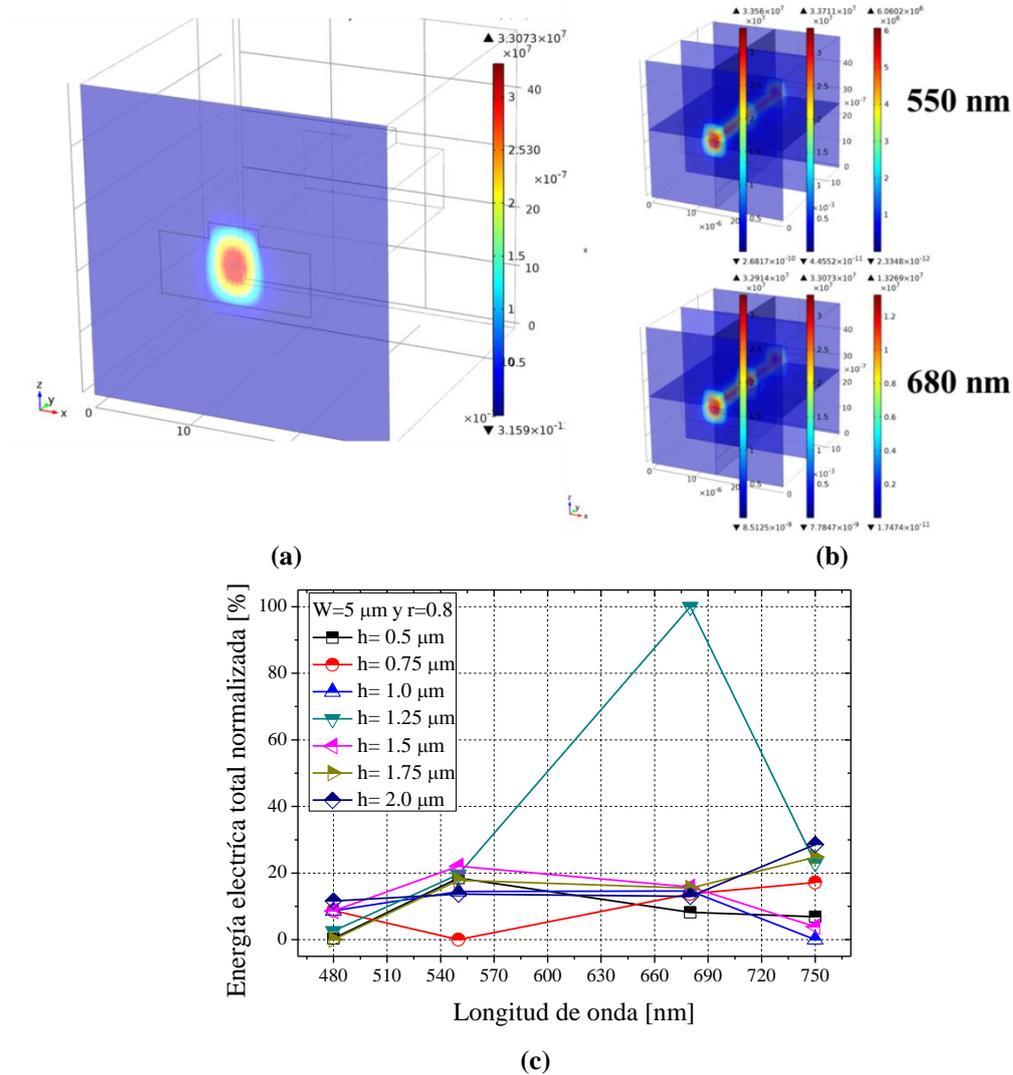


Figura 3.5. Distribución de campo eléctrico para una estructura con  $h=1.25 \mu\text{m}$ , en el (a) puerto de entrada y (b) a lo largo de la guía de onda para una longitud de onda de 550 nm y 680 nm. (c) Energía eléctrica total propagada a lo largo de la guía en función de la longitud de onda y altura de la guía de onda.

### 3.2. Procedimiento experimental

El proceso de fabricación se dividió en 3 corridas. En la primera, se fabricaron películas simples de nitruro de silicio ( $\text{Si}_x\text{N}_y$ ) con  $R_N = 45, 75, 100, 120, 150$  y  $180$ . El depósito de las películas se hizo mediante LPCVD a  $760 \text{ }^\circ\text{C}$  sobre sustratos de silicio. En la segunda corrida se depositaron películas simples de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  sobre sustratos de Si y cuarzo. En este caso se utilizó  $R_N = 100$  y  $120$  repitiendo las condiciones utilizadas en la primera corrida. Además se fabricaron 2 estructuras  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  (una por cada  $R_N$ ) con

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

óxido de silicio crecido térmicamente. Finalmente, en la tercera corrida, se fabricaron guías de onda tipo bloque y tipo costilla. Para ello se partió de estructuras  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  y se agregaron pasos de fotolitografía y grabado por RIE para definir la geometría. En la Fig. 3.6 se muestran las características geométricas de las mascarillas utilizadas. Estas mascarillas fueron diseñadas por W. W. Hernández-Montero para la caracterización de guías ópticas con películas de Si-Ge amorfo [87]; sin embargo, las dimensiones son adecuadas para nuestro caso de estudio. Las condiciones de grabado fueron potencia de 200 W y presión de 300 mT, usando  $\text{CF}_4$  como gas reactivo. Se utilizaron tres tiempos de grabado para definir 2 guías tipo costilla y 1 tipo bloque. En el apéndice A.3 se encuentra el proceso de fabricación de todas las muestras. En todas las corridas se fabricaron dobles muestras de cada tipo, con la finalidad de someter una de ellas a un tratamiento térmico a 1100 °C en  $\text{N}_2$  durante 2 horas. De esta forma, se estudió las características del material antes y después del tratamiento térmico. Los tratamientos térmicos en alta temperatura durante la fabricación de un circuito eléctrico y óptico juegan un papel relevante; pueden modificar el funcionamiento del dispositivo. En la tabla 3.1 se describe las muestras fabricadas.

**Tabla 3.1. Descripción de las películas, estructuras bicapa y guías de onda fabricadas.**

Muestra	$R_N$	Descripción	Tipo de Guía	$P_{\text{NH}_3}/P_{\text{SiH}_4}$ [Torr]/[Torr]	Razón de depósito [nm/min]	TT*
$N_{45}$	45	$\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Si}$	-----	1.4/0.97	3.6	X
$N_{70}$	70			2.1/0.97	4.2	X
$N_{100}$	100			$\text{Si}_x\text{N}_y/\text{cuarzo}$	2.9/0.97	4.5
$NQ_{100}$		X				
$N_{120}$	120	$\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Si}$		2.5/0.71	5.9	X
$NQ_{120}$		$\text{Si}_x\text{N}_y/\text{cuarzo}$		X		
$N_{150}$	150	$\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Si}$		3.1/0.71	6.3	X
$N_{180}$				3.8/0.71	7.0	X
$B_{100}$	100	$\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2/\text{Si}$ $\sim 1 \mu\text{m}$ ( $\text{SiO}_2$ )		-----	2.9/0.97	4.5
$B_{100}\text{-TT}$		$\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Si}$	X			
$BP_{100}$			X			
$BP_{100}\text{-TT}$		X				
$B_{120}$	120	$\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2/\text{Si}$ $\sim 1 \mu\text{m}$ ( $\text{SiO}_2$ )	2.5/0.71		5.9	X
$B_{120}\text{-TT}$		$\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Si}$				X
$BP_{120}$						X
$BP_{120}\text{-TT}$		X				
Guías de onda						
$W_{100}\text{-TT-1}$	100	$\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2/\text{Si} + \text{L\&G}^{**}$ $\sim 1.5 \mu\text{m}$ ( $\text{SiO}_2$ )	Costilla, $r^+ = 0.5$	2.9/0.97	4.5	X
$W_{100}\text{-TT-2}$			Costilla, $r=0.1$			
$W_{100}\text{-TT-3}$			Bloque			
$W_{120}\text{-TT-1}$	120		Costilla, $r = 0.5$	2.5/0.71	5.9	X
$W_{120}\text{-TT-2}$			Costilla, $r=0.1$			
$W_{120}\text{-TT-3}$			Bloque			

\*Tratamiento térmico a 1100 °C en  $\text{N}_2$  por 2 horas a una muestra.

\*\* Litografía y grabado

<sup>+</sup>Altura fraccional (ver Fig. 3.4)

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

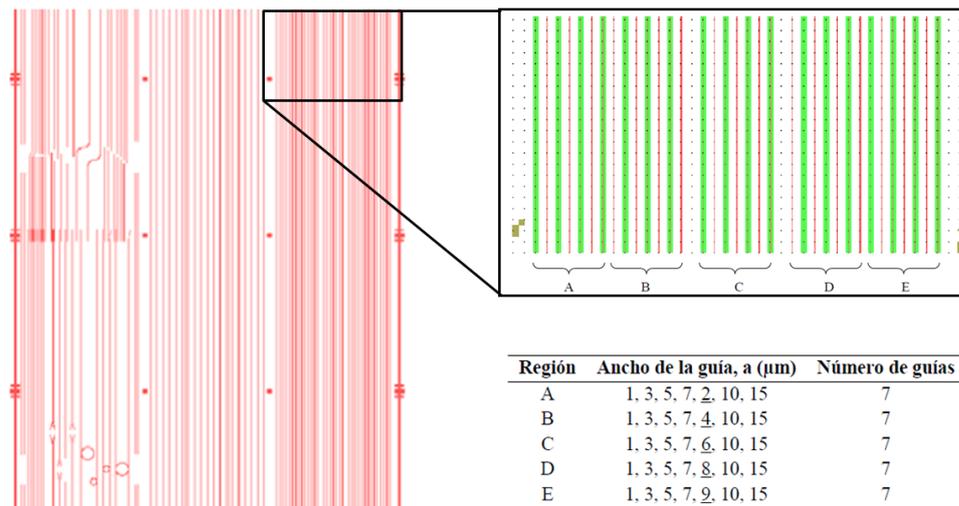


Figura 3.6. Mascarilla utilizada (izquierda) para la fabricación de las guías de onda [87]. De lado derecho se agrega una descripción de los anchos de guía para cada sección.

#### 3.2.1. Caracterización del material

El espesor e índice de refracción, rugosidad superficial, espectroscopia infrarroja (FTIR) y respuesta fotoluminiscente (PL) se determinaron mediante las mismas técnicas descritas en la sección 2.2.2. Adicionalmente, se estudió la composición de las películas a partir de un espectrómetro de fotoelectrones de rayos X (XPS, del inglés *X-Ray Photoelectron Spectroscopy*) modelo Escalab 250Xi de Thermo Scientific. Se obtuvo la transparencia de las películas mediante transmitancia espectral con un equipo Perkin Elmer Lambda 3B. Además, se estudió el estrés residual de capas simples de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , así como estructuras de capa doble ( $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ ) mediante el radio de curvatura medido por un perfilómetro Tencor P7.

#### 3.2.2. Caracterización de la guía

Se inspeccionó la razón de aspecto de las guías mediante un perfilómetro Tencor P7 y se observó la sección transversal de la guía mediante microscopía por barrido de electrones (SEM, *Scanning Electron Microscopy*). Fue necesario realizar un corte mediante FIB (*Focus Ion Beam*) para exponer la sección transversal. Para esta tarea se utilizó un equipo FEI modelo SCIOS con dos columnas: electrones e iones.

Se estudiaron los modos oscuros en estructuras  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$  mediante un acoplador de prima Metricon modelo 2010, el cual emplea un láser He-Ne ( $\lambda = 633$  nm). El prisma, la guía de onda y el detector son montados en una estación rotatoria para inspeccionar los ángulos de los modos propagados en la guía. El índice de refracción del prisma debe ser mayor al de la guía de onda. Para obtener el espectro de modos propagados de la guía de onda, se coloca el prisma en contacto óptico con la

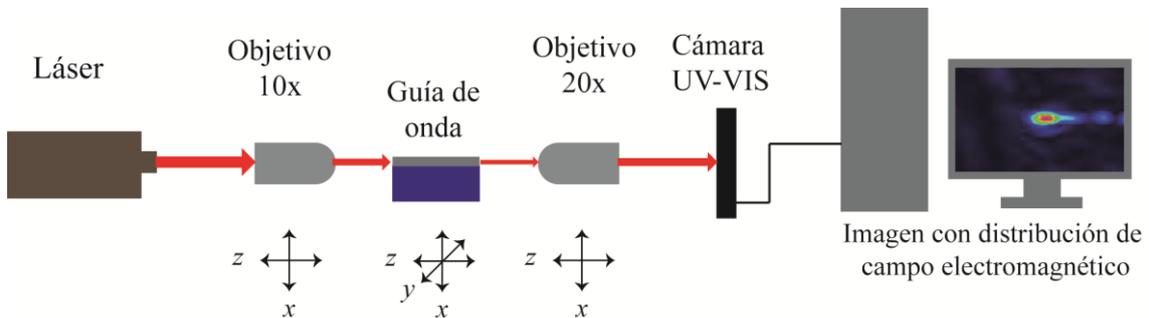
### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

guía, dejando un pequeño espacio (aire) entre la base del prisma y la superficie de la guía. La luz del haz incide sobre el prisma produciendo reflexión interna total en su base. Dependiendo del ángulo, la luz es acoplada dentro de la guía de onda mediante campos evanescentes en la sección de aire. La intensidad de reflectividad se gráfica en función del índice de refracción efectivo ( $n_e$ ), el cual es determinado fácilmente por la Ley de Snell como:

$$n_e = N_p \sin \left( A + \sin^{-1} \left( \frac{\sin \theta}{N_p} \right) \right) \quad (3.16)$$

donde  $N_p$  es el índice del prisma,  $A$  es el ángulo entre la cara donde incide el haz y la base del prisma, y  $\theta$  es el ángulo de la cara de entrada del prisma.

Mediante acoplamiento por los extremos se estudió el confinamiento de luz y los modos de propagación que soportan las guías. En la Fig. 3.7 se presenta el esquema de medición utilizado. Las guías de onda se caracterizaron con dos láseres: uno con  $\lambda = 473$  nm (azul) y otro con  $\lambda = 633$  nm (rojo). Como se aprecia en la Fig. 3.7, el *spot* incide sobre la parte convexa de un objetivo de 10x para reducir el tamaño de haz. El objetivo se alinea con la guía de onda buscando que la luz incida normalmente a su sección transversal (puerto de entrada). A la salida de la guía, o puerto de salida, se coloca un objetivo (20x) para amplificar la imagen. Finalmente se coloca una cámara UV-VIS para observar la distribución de radiación que se propaga en la guía [88] [89].



**Figura 3.7. Montaje para observar confinamiento de luz y modos de propagación. Las flechas rojas indican la dirección de propagación de la luz. La variación del espesor de las flechas se utiliza para ilustrar el cambio del diámetro del haz a través de cada elemento del montaje.**

Por último, se determinó el coeficiente de atenuación,  $\alpha$ , en dB/cm a partir de la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left( \frac{I_0 c T_i^2 T_s^2}{P_i} \right) \quad (3.17)$$

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

Donde  $I_0$  es la potencia incidente,  $P_l$  es la potencia a la salida de la guía,  $c$  es la eficiencia de acoplamiento lente-guía, el cual considera desajuste por tamaño y desalineamiento.  $T_l$  y  $T_s$  son los coeficientes de reflexión de Fresnel para los lentes y la muestra, respectivamente, y  $L$  es la longitud de la guía de onda en cm. Con estas consideraciones, la Ec. 3.17 puede dar una estimación de la pérdida total de la guía de onda para cada longitud de onda, considerando absorción, dispersión y tuneo. En [89] puede encontrarse más detalle sobre las consideraciones para estimar el coeficiente de atenuación. La potencia transmitida se midió substituyendo la cámara por un medidor de potencia óptica Thorlabs y con un sensor para el rango visible en el esquema de la Fig. 3.7.

### 3.3. Resultados: Material y Estructura

#### 3.3.1. Características morfológicas del material del núcleo

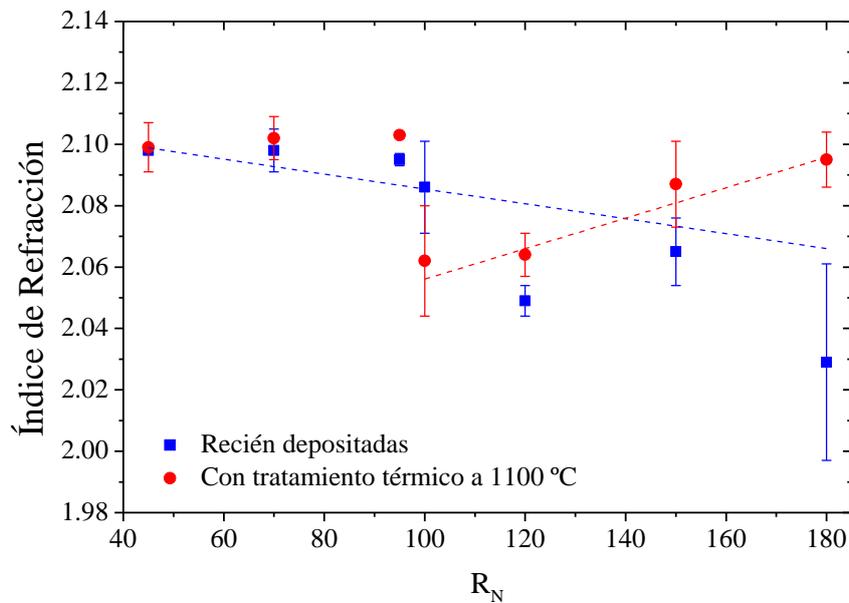
En la tabla 3.2 se muestran los resultados de espesor e índice de refracción, para muestras recién depositadas y después de un tratamiento térmico (TT) a 1100 °C en  $N_2$  durante 2 horas. Las muestras recién depositadas tienen valores de índice de 2.029 a 2.098 al disminuir el  $R_N$  de 180 a 45. Sin embargo, después del tratamiento térmico los valores de índice de refracción se mantuvieron muy similares para  $R_N$  entre 45 y 100. Para nitruros de silicio ( $Si_xN_y$ ) con  $R_N > 100$  se incrementa el índice de refracción. El comportamiento antes mencionado, se puede observar en la Fig. 3.8. Los cuadros en color azul corresponden a valores de índice de refracción obtenidos en muestras sin TT, mientras los círculos rojos para muestras con TT. Se observa una zona de transición entre  $R_N = 100$  y 130. Para valores por debajo de este punto el índice de refracción no muestran cambios significativos al variar el  $R_N$ . Después del punto de transición las películas recocidas tienen índices de refracción al incrementar el  $R_N$ . Debido a que el índice de refracción es un indicativo del contenido o exceso de silicio, los resultados sugieren que para  $R_N > 130$  la estructura y exceso de silicio dentro de la película cambia con el TT, es decir, cambia la estequiometría de la película de  $Si_xN_y$ .

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

**Tabla 3.2. Espesor e índice de refracción para películas de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  y pilotos tanto de bicapas como guías de onda. Se incluye el índice de refracción después de un tratamiento térmico.**

Muestra	Espesor [nm]	Índice de refracción	
		Sin TT	Con TT
Películas			
$\text{N}_{45}$	$78.9 \pm 1.8$	$2.098 \pm 0.001$	$2.099 \pm 0.008$
$\text{N}_{70}$	$88.8 \pm 2.2$	$2.098 \pm 0.007$	$2.102 \pm 0.007$
$\text{N}_{100}$	$94.6 \pm 0.9$	$2.095 \pm 0.002$	$2.103 \pm 0.001$
$\text{N}_{120}$	$119.0 \pm 0.7$	$2.049 \pm 0.005$	$2.064 \pm 0.007$
$\text{N}_{150}$	$125.7 \pm 2.6$	$2.065 \pm 0.011$	$2.087 \pm 0.014$
$\text{N}_{180}$	$139.2 \pm 8.0$	$2.029 \pm 0.032$	$2.095 \pm 0.009$
Pilotos de estructuras bicapa			
$\text{BP}_{100}, \text{NQ}_{100}$	$432.6 \pm 11.9$	$2.070 \pm 0.013$	-----
$\text{BP}_{100}\text{-TT}$		-----	$2.107 \pm 0.053$
$\text{BP}_{120}, \text{NQ}_{120}$	$515.2 \pm 47.4$	$2.360 \pm 0.243$	-----
$\text{BP}_{120}\text{-TT}$		-----	$2.272 \pm 0.113$
$\text{SiO}_2$	$920.6 \pm 6.5$	$1.437 \pm 0.006$	-----
Pilotos de guías de onda			
$\text{W}_{100}$	$429.4 \pm 5.3$	$2.086 \pm 0.015$	-----
$\text{W}_{100}\text{-TT}$		-----	$2.062 \pm 0.018$
$\text{W}_{120}$	$463.4 \pm 3.7$	$2.085 \pm 0.015$	-----
$\text{W}_{120}\text{-TT}$		-----	$2.089 \pm 0.013$
$\text{SiO}_2$	$1657.8 \pm 10.5$	$1.459 \pm 0.001$	-----

\*Tratamiento térmico a  $1100^\circ\text{C}$  en  $\text{N}_2$  por 2 horas a una muestra.



**Figura 3.8. Variación del índice de refracción en función de  $R_N$  en películas de nitruro de silicio recién depositadas y después de un tratamiento térmico a  $1100^\circ\text{C}$  en  $\text{N}_2$  durante 2 horas.**

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

En la Fig. 3.9 (a) se observa la concentración atómica de las películas de nitruro en función del  $R_N$ . En la Fig. 3.9 (b) se encuentra el perfil de composición para una película de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  obtenida con  $R_N = 120$ . Los puntos para la gráfica 3.9 (a) se obtuvieron a la mitad de la película de  $\text{Si}_x\text{N}_y$ , con la finalidad de evitar la influencia de la capa superficial de  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  y el sustrato. Para una película estequiométrica se espera ~57 % de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) por ~43 % de silicio (Si), con 0 % de oxígeno ( $\text{O}_2$ ). En nuestro caso, se observa una concentración de Si superior al  $\text{N}_2$ , con una ligera presencia de  $\text{O}_2$  (~ 2%), sugiriendo la existencia de un oxinitruro enriquecido en silicio ( $\text{SiO}_x\text{N}_y$ ). Sin embargo, hay algunos aspectos que permiten suponer la formación de SRN. El primero es la baja concentración de  $\text{O}_2$  y su alta variación. En algunos casos ( $R_N$  entre 40 y 100), la variación es muy grande e incluye un concentración del 0 % de  $\text{O}_2$ , lo que implica que el porcentaje detectado está en el límite de la sensibilidad del equipo. Para  $R_N > 100$  la concentración de  $\text{O}_2$  crece al incrementar el  $R_N$  con una variación menor, pero sigue siendo una concentración baja. El segundo punto es la concentración de Si y  $\text{N}_2$ , las cuales disminuyen y aumentan, respectivamente, al incrementar el  $R_N$ . La tendencia sugiere que al seguir incrementando el  $R_N$  se llegará a una contribución esperada para una película estequiométrica. Sin embargo, como se puede observar en la Fig. 3.9 (a), la concentración  $\text{O}_2$  también incrementa con el aumento de la  $R_N$ , de tal manera que las películas obtenidas irán de un nitruro de silicio enriquecido en silicio (SRN) a un oxinitruro de silicio ( $\text{SiO}_x\text{N}_y$ ) sin lograr la obtención de un nitruro estequiométrico.

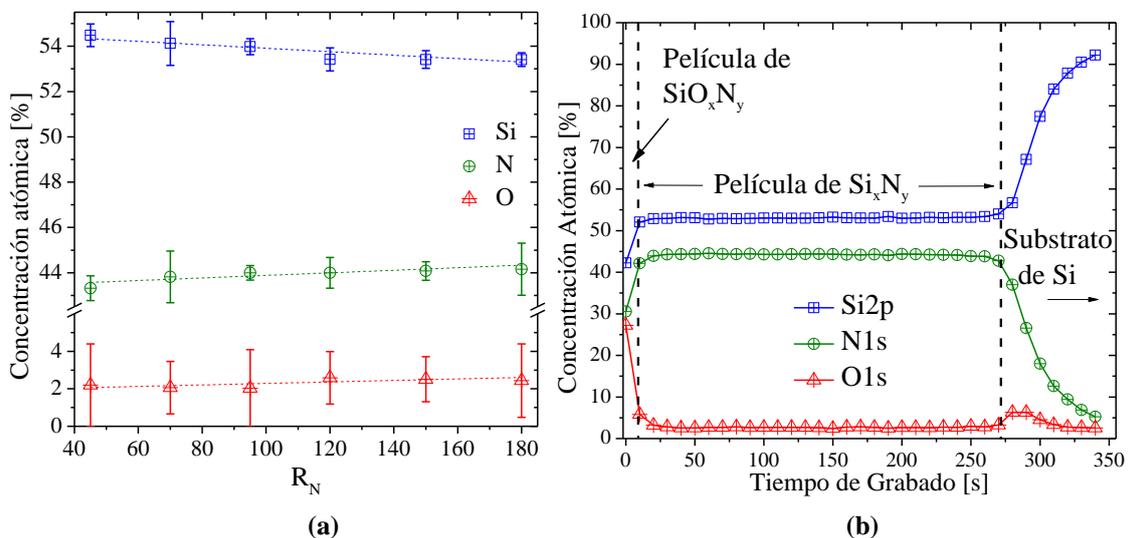


Figura 3.9. (a) Concentración atómica de silicio (Si), nitrógeno (N) y oxígeno (O) en función del  $R_N$  para películas de nitruro de silicio depositadas por LPCVD. Las líneas punteadas son de carácter ilustrativo para observar la tendencia de la concentración atómica de cada elemento. (b) Perfil de composición para una película de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  depositada con  $R_N = 120$ .

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

En la Fig. 3.10 se observan los espectros de fotoluminiscencia (PL) para las películas de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  con diferente  $R_N$ , antes y después del recocido. En todos los casos se observa un espectro amplio de 400 nm a 750 nm. En películas con  $R_N < 100$ , se observa un incremento en intensidad y corrimiento al azul con el tratamiento térmico. En [90] se asocia este corrimiento a enlaces sueltos de silicio o nitrógeno, los cuales cambian de concentración con el recocido. Para películas con  $R_N > 100$  se observa un cambio con el tratamiento térmico. Las películas recién depositadas disminuyen su índice de refracción (contenido de Si) al aumentar la  $R_N$ . Después del recocido el índice incrementa con la  $R_N$ , pero el espectro de PL se atenúa y el corrimiento al azul llega a ser despreciable. Al recocerse, el bajo contenido de oxígeno debe provocar la formación de enlaces Si-O-Si y N-O-Si a partir de enlaces Si-Si (exceso de silicio), influyendo en la respuesta PL debido al cambio de defectos presentes en el material [91]. Sin embargo, el alto contenido de Si también propicia la formación de enlaces Si-Si con el tratamiento térmico, es decir, NCs-Si. Esto concuerda con resultados de índice de refracción y concentración atómica. Tomando como base los resultados anteriores, se seleccionaron dos  $R_N$ : 100 y 120. Películas depositadas con estas condiciones tienen valores de índice de refracción alrededor de 2.07 y no cambia significativamente con el recocido. Además, estas películas presentan una baja concentración atómica de  $\text{O}_2$  y su respuesta PL se atenúa con el tratamiento térmico. En conclusión, películas de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  con  $R_N = 100$  y 120 son películas estables al tratamiento térmico, permiten un buen contraste de índice con el  $\text{SiO}_2$  y no tienen interacción con la luz considerando su baja respuesta PL.

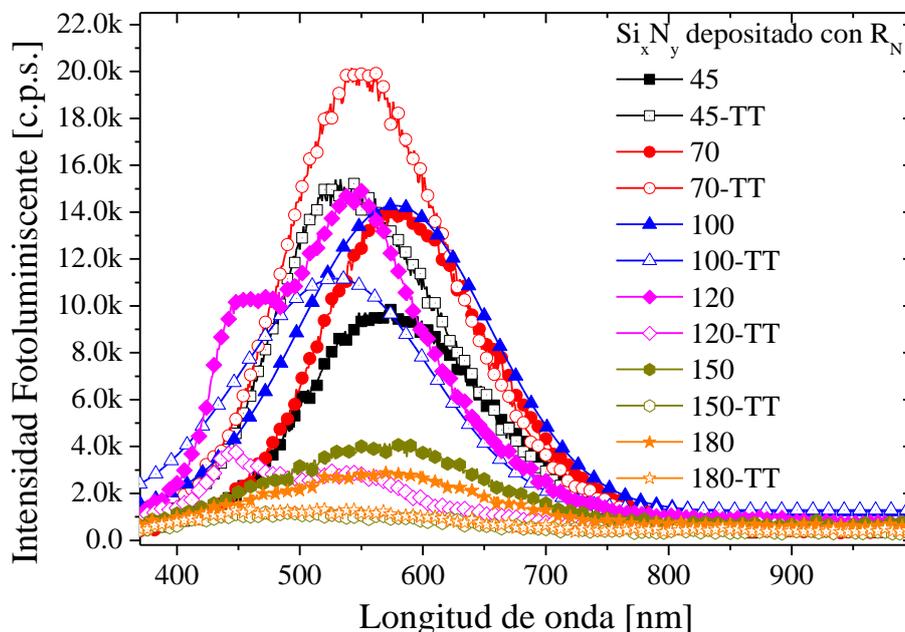


Figura 3.10. Espectro de fotoluminiscencia para películas de nitruro de silicio recién depositadas y después de un tratamiento térmico (TT) a 1100 °C en  $\text{N}_2$  durante 2 horas.

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

En la Fig. 3.11 se observa el espectro de absorción obtenido por FTIR a películas de  $\text{Si}_x\text{N}_y$ . Las muestras tienen las etiquetas  $\text{BP}_{100}$  y  $\text{BP}_{120}$  para identificar al nitruro de silicio depositado con  $R_N = 100$  y  $120$ , respectivamente. En las tablas 3.1 y 3.2 se encuentran los datos de cada muestra. El espesor aproximado de la película es de  $432 \text{ nm}$  para  $\text{BP}_{100}$  y  $515 \text{ nm}$  para  $\text{BP}_{120}$ . Como se puede observar en la Fig. 3.11 existen dos bandas de absorción (A y B). Ambas bandas tiene la misma forma e intensidad antes y después del tratamiento térmico.

En ambas muestras, la banda A está centrada en  $474 \text{ cm}^{-1}$  y se puede asociar al modo de vibración *Rocking* (R) de enlaces Si-O. Este modo es una evidencia de la oxidación superficial de la película (capa nanométrica de  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ ). Dicha capa debe originarse al salir del proceso de depósito (de  $760 \text{ }^\circ\text{C}$  a temperatura ambiente), tal como se observa en la Fig. 3.9 (b).

Al compararse ambas películas, la banda B muestra un desfaseamiento en posición. Esta banda se descompuso en dos Gaussianas y se analizó su contribución. En la Fig. 3.12 se puede encontrar la descomposición de la banda B para cada muestra. Recordemos que el espectro de absorción no cambia con el recocido, por tal razón se utilizaron los espectros de las muestras recocidas ( $\text{BP}_{100}\text{-TT}$  y  $\text{BP}_{120}\text{-TT}$ ) para realizar la descomposición de la banda B. En la película depositada con  $R_N = 100$  se observa una mayor absorción de la Gaussiana centrada en  $961 \text{ cm}^{-1}$ , mientras con  $R_N = 120$  la mayor absorción se centra en  $844 \text{ cm}^{-1}$ . Sin embargo, la anchura a la altura media (FWHM, del inglés *Full Width at Half Maximum*) es diferente para cada curva. Para considerar tanto la intensidad como la FWHM se estimó el porcentaje del área total que ocupa cada Gaussiana. En la tabla 3.3 se resume la posición y el porcentaje del área total (% de  $A_T$ ). En ambos casos la mayor contribución se debe al pico centrado a  $961 \text{ cm}^{-1}$ , el cual se relaciona con el modo de vibración 2T de enlaces Si-Si [92]. Este resultado es consistente con los obtenidos por elipsometría y XPS, donde se encontró exceso de Si en las películas de  $\text{Si}_x\text{N}_y$ . La banda centrada en  $844 \text{ cm}^{-1}$  se asocia al modo de vibración de estiramiento asimétrico (*asymmetric stretching mode*, a-S) de enlaces Si-N [92] [93]. Este modo tiene una mayor contribución en la película con  $R_N = 120$ . Este resultado coincide con los obtenidos por XPS, donde se encontró incremento de la concentración atómica de  $\text{N}_2$  al aumentar la  $R_N$ .

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

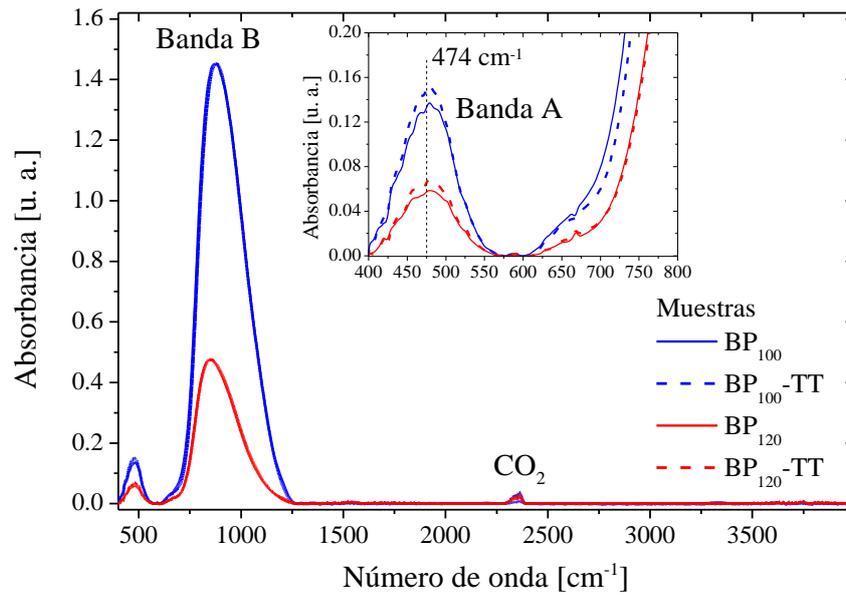


Figura 3.11. Espectro de absorción obtenido por FTIR para películas de nitruro de silicio ( $R_N = 100$  y 120), antes y después de un tratamiento térmico (TT) a 1100 °C 2 horas en  $N_2$ . La película conserva su espectro de absorción con el TT, presentando ligeros cambios (observar recuadro).

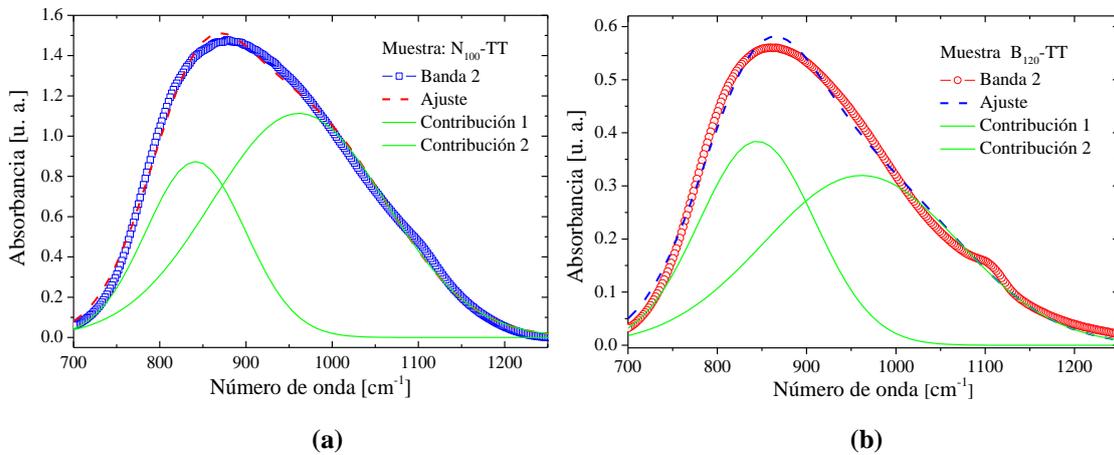


Figura 3.12. Descomposición de la banda B del espectro de absorción para las muestras (a)  $NP_{100}$ -TT y (b)  $NP_{120}$ -TT con recocido a 1100 °C en  $N_2$  durante 2 horas.

Tabla 3.3. Posición y área bajo la curva para las bandas A y B de los espectros de absorción obtenidos de las muestras  $BP_{100}$  y  $BP_{120}$ , antes y después de tratamiento térmico.

Muestra	TT	Banda A [ $cm^{-1}$ ]	Banda B [ $cm^{-1}$ ]			
			1er Pico [ $cm^{-1}$ ]	% de $A_T$	2do Pico [ $cm^{-1}$ ]	% de $A_T$
$BP_{100}$		474	842	31.02	961	68.98
$BP_{100}$ -TT	X					
$BP_{120}$		474	844	41.69	961	58.31
$BP_{120}$ -TT	X					

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

En la Fig. 3.13 se observa el espectro de transmitancia de  $NQ_{100}$  y  $NQ_{120}$ . Estas muestras son películas de  $Si_xN_y$  ( $R_N = 100$  y  $120$ , respectivamente) depositadas sobre cuarzo. Para más detalles referirse a las tablas 3.1 y 3.2. La película depositada con  $R_N = 100$  es opaca de los 300 a 400 nm (transmisión del 1 % al 52 %), mientras la depositada con  $R_N = 120$  es transparente para longitudes mayores a 300 nm (transmisión  $> 60$  %). También puede observarse un espectro de transmitancia con formación de crestas y valles, los cuales deben originarse por efectos de interferencia constructiva y destructiva. Sin embargo, se utiliza una línea punteada para mostrar la tendencia del espectro. La muestra  $NQ_{100}$  tiene una transmitancia  $>70$  % de 450 nm a 850 nm. Por su parte, la muestra  $NQ_{120}$  logra una transparencia  $> 80$  % de 400 nm a 850 nm. Ambas películas tienen altos valores de transmitancia, implicando la baja absorción del material. Sin embargo, la película con  $R_N = 120$  debe utilizarse si se desea propagar luz azul (banda centrada en los 450 nm del espectro de EL del M-LEC). En caso de buscar la propagación de la emisión en rojo, se puede utilizar una película con  $R_N$  de 100 o 120.

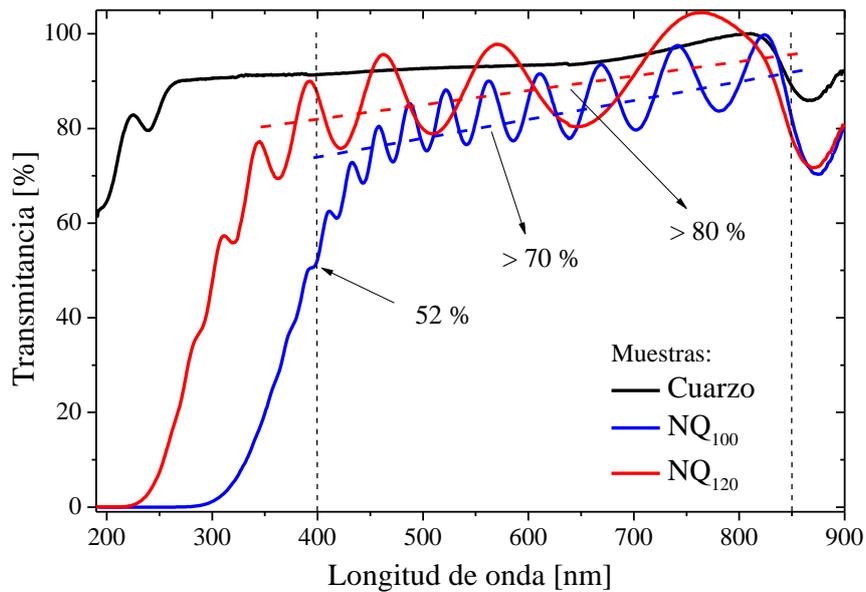


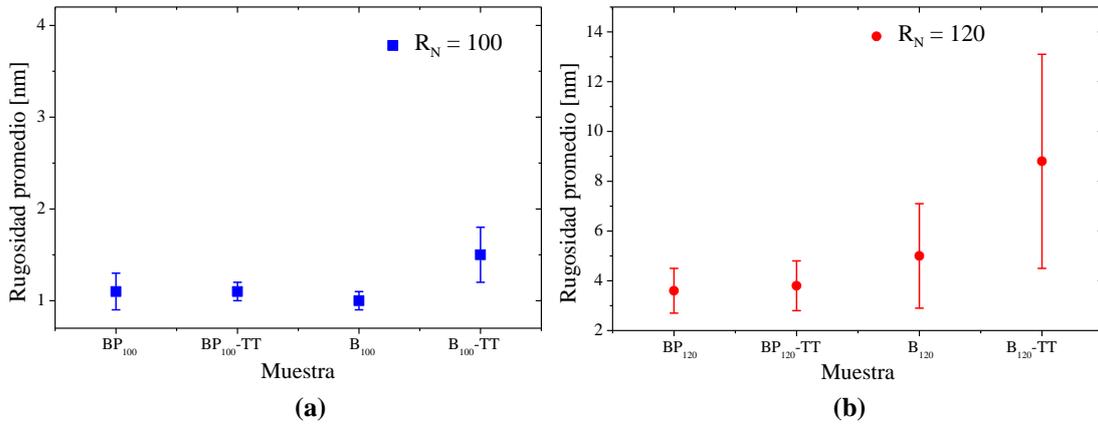
Figura 3.13. Espectro de transmitancia de muestras  $NQ_{100}$  y  $NQ_{120}$ . Las películas de nitruro fueron obtenidas depositadas sobre cuarzo con  $R_N = 100$  y  $120$  con espesor aproximado de 500 nm. Después del depósito fueron sometidas a tratamiento térmico a  $1100$  °C en  $N_2$  por 2 horas.

#### 3.3.2. Características de la estructura $Si_xN_y/SiO_2/Si$

La Fig. 3.14 presenta los resultados de rugosidad promedio para estructuras  $Si_xN_y/Si$  y  $Si_xN_y/SiO_2/Si$  con y sin tratamiento térmico. Como se mencionó anteriormente, el tratamiento térmico consiste en un recocido a  $1100$  °C en  $N_2$  por 2

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

horas. Un  $R_N=100$  produce películas de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  con una rugosidad menor a 2 nm y se conserva en el mismo orden con el recocido. La película de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  depositada con  $R_N=120$  tiene valores de rugosidad superiores a los 2 nm y se aprecia un incremento de al pasar de una estructura  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Si}$  ( $\text{BP}_{120}$ ) a  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2/\text{Si}$  ( $\text{B}_{120}$ ). Además, la rugosidad también incrementa con el tratamiento térmico. Por tal motivo, la muestra  $\text{B}_{120}\text{-TT}$  alcanza valores promedio de  $\sim 9$  nm, la mayor de todas las muestras. Altos valores de rugosidad pueden afectar la propagación de luz al comportarse como puntos de dispersión, absorción o reflexión. Para disminuir las pérdidas durante la propagación de luz es necesario disminuir estos efectos.



**Figura 3.14. Rugosidad promedio para estructuras  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Si}$  (BP) y  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2/\text{Si}$  con nitruro de silicio depositado usando (a)  $R_N = 100$  y (b)  $R_N = 120$ .**

En la Fig. 3.15 se presentan los valores promedio de estrés residual para estructuras  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Si}$  y  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2/\text{Si}$ , con y sin tratamiento térmico. Para estimar el estrés residual ( $\sigma$ ) se utilizó la expresión propuesta en [80], definida como:

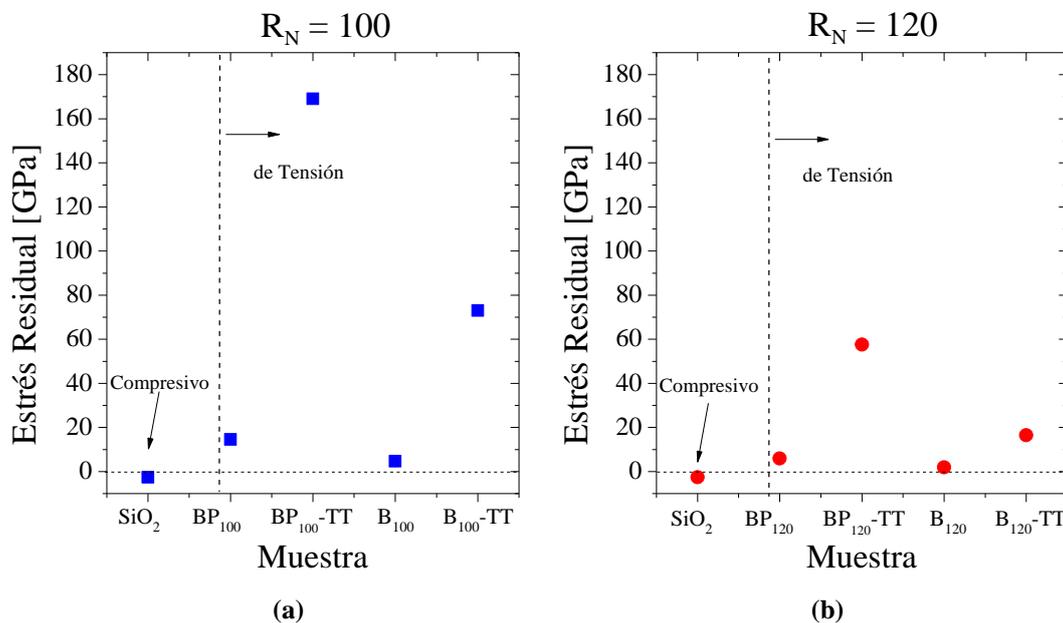
$$\sigma = \frac{E_S t_S^2}{6(1-\nu_S) t_f} \left( \frac{1}{R_l} - \frac{1}{R_p} \right) \quad (3.18)$$

Siendo  $E_S$ ,  $\nu_S$  y  $t_S$  el módulo de Young, coeficiente de Poisson y espesor del sustrato, respectivamente.  $t_f$  es el espesor de la película,  $R_p$  es el radio de curvatura del sustrato virgen y  $R_l$  es el radio de curvatura del sustrato posterior al depósito de la película. Como se observa en la Fig. 3.15, el  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Si}_x\text{N}_y$  presentan estrés residual de compresión y tensión, respectivamente, concordando con trabajos previos [94]. Por su parte, las capas simples de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  y bicapas  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2$  exhiben estrés residual de tensión. El valor más alto se obtuvo en estructuras  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Si}$  con tratamiento térmico, tanto para un  $R_N=100$  como  $R_N=120$ . Al depositar el nitruro de silicio sobre una película de  $\text{SiO}_2$  (utilizada como aislante óptico) el estrés residual disminuye, aun cuando las

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

muestras sean sometidas a tratamiento térmico. Sin embargo, es la estructura bicapa con  $R_N=120$  la que presenta menor estrés residual después del tratamiento térmico.

Para la fabricación de las guías de onda, es necesario el uso de una capa de  $\text{SiO}_2$  como recubrimiento inferior para evitar la propagación de campos evanescentes al substrato de Si; aunado a esto, disminuye el estrés residual en muestras sometidas a un tratamiento térmico. Sin embargo, existe un compromiso entre la rugosidad superficial y el estrés residual. El  $\text{Si}_x\text{N}_y$  con  $R_N=120$  tiene el menor estrés pero la mayor rugosidad. Si bien se disminuye la posibilidad de fracturas, son las pérdidas por dispersión las que se verán incrementadas. En el caso contrario, un  $R_N = 100$  tendrá menos pérdidas por dispersión pero el estrés residual es mayor. Alto estrés residual en las estructuras bicapa puede ocasionar fallas al dispositivo [81].



**Figura 3.15.** Estrés residual para estructuras  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Si}$  (BP) y  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2/\text{Si}$  (B) con nitruro de silicio depositado usando (a)  $R_N = 100$  y (b)  $R_N = 120$ . El estrés se estimó a partir del radio de curvatura, comparando substratos (Si) sin películas y estructuras.

En la Fig. 3.16 se observa el espectro de modos propagados en la muestra  $\text{B}_{100}\text{-TT}$ . El eje de las ordenadas corresponde a la intensidad de luz reflejada y detectada por el sensor. Si la luz incidente en el prisma no logra propagarse en la película de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  al variar el ángulo de incidencia se observará un máximo de intensidad. En caso que la luz se propague, entonces se observará un mínimo de intensidad, indicando la propagación de un modo dentro de la película. En la Fig. 3.16 se aprecian al menos 7 modos propagados. En el caso de la muestra  $\text{B}_{120}\text{-TT}$  no fue posible el acoplamiento por prisma debido a los altos valores de rugosidad, los cuales generaban puntos de dispersión para el haz incidente. Si bien, no se obtuvieron modos oscuros para ambos  $R_N$ 's, el resultado de la Fig. 3.16 es evidencia de que  $\text{Si}_x\text{N}_y$  es un buen candidato para utilizarse como núcleo en guías de onda ópticas.

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

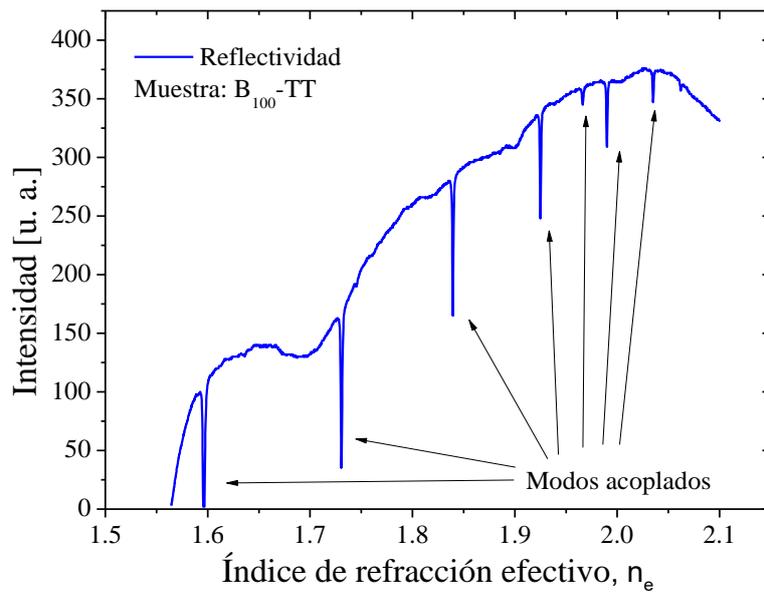
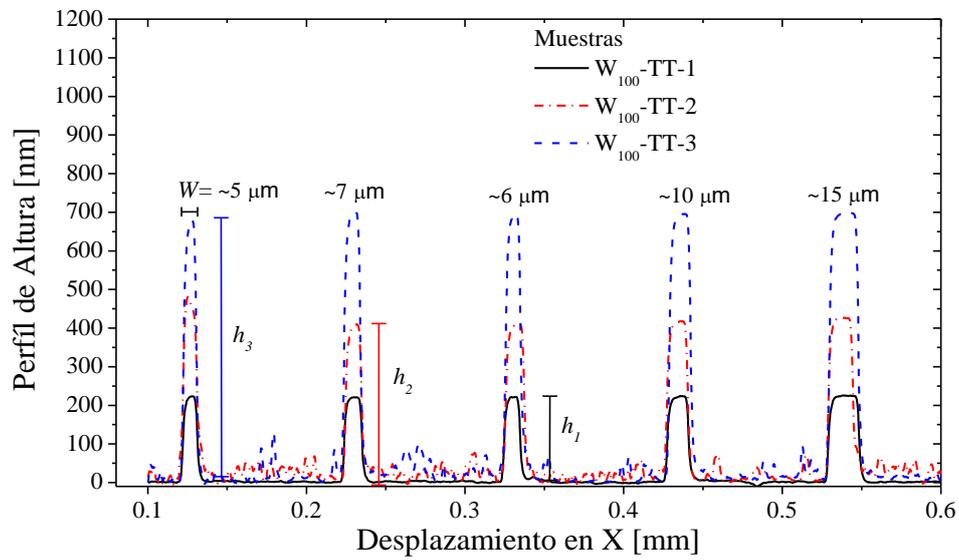


Figura 3.16. Espectro de los modos acoplados mediante prisma en función del índice de refracción efectivo para la muestra B<sub>100</sub>-TT. La gráfica anterior fue obtenida mediante acoplamiento de luz por prisma. Cuando la luz es reflejada se obtiene un máximo de intensidad y cuando se propaga por la película se detectan mínimos de intensidad (modos acoplados).

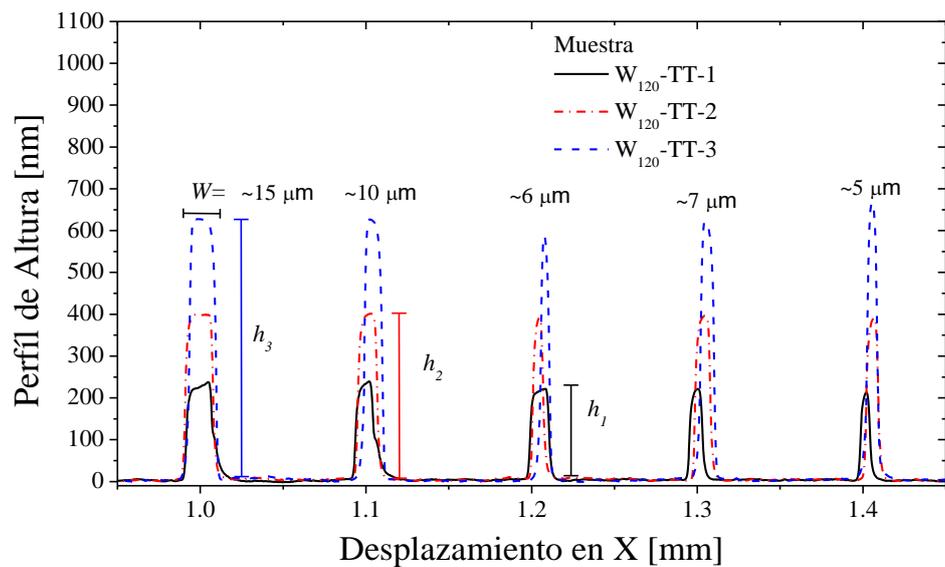
#### 3.3.3. Guía de onda tipo costilla: análisis del elemento discreto

Una vez fabricadas las guías de onda, se inspeccionó el ancho de la guía mediante perfilometría. En la Fig. 3.17 se observan los perfiles para las guías de onda con (a)  $R_N = 100$  y (b)  $R_N = 120$ . Debido a que se utilizaron 3 tiempos de grabado se observan 3 alturas. La técnica utilizada sólo permite conocer la altura y el ancho de la guía. Para identificar el tipo de guía se utilizaron los valores de elipsometría y se contrastaron con los obtenidos por perfilometría para determinar el espesor grabado, la altura externa ( $rh$ ), la altura fraccional ( $r$ ) y el tipo de guía. En la tabla 3.4 se resumen los resultados obtenidos. Se encontró que las muestras con tiempos de grabado 1 y 2 (línea sólida negra y línea punteada roja) corresponden a guías tipo costilla. En caso del perfil azul corresponde a una guía tipo bloque. En este caso se grabó la película de nitruro completamente. El principal inconveniente detectado con la inspección superficial es la relación de aspecto. En la Fig. 3.17 se observan anchos de guía de  $5 \mu\text{m}$  o mayores. En el caso de anchos menores no se presentan resultados debido a un sobre grabado en la parte superior, de tal manera que el ancho en la base de la guía es mayor al de la costilla (similar a un trapecoide). Este cambio en la configuración afecta el desempeño de la guía. Por el contrario, anchos de guía mayores a  $5 \mu\text{m}$  mejoran su aspecto rectangular. Estos resultados son un indicativo del límite tecnológico de nuestro laboratorio, donde la dimensión mínima es de  $5 \mu\text{m}$ .

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA



(a)



(b)

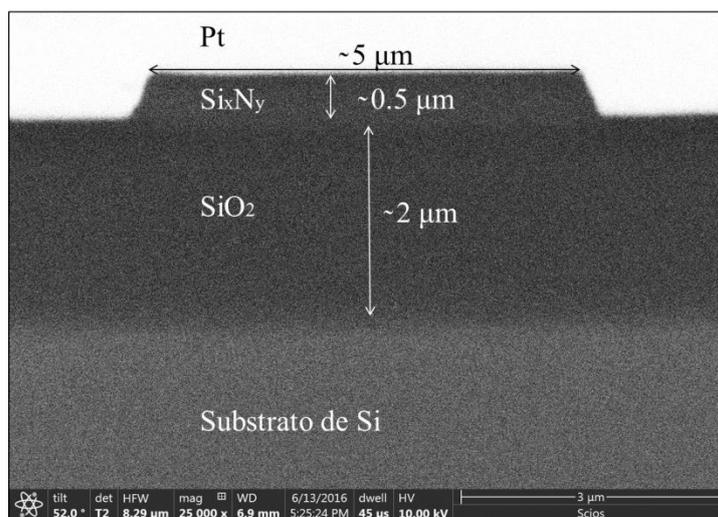
Figura 3.17. Perfil superficial de las muestras con guías de onda para un nitruro de silicio con (a)  $R_N = 100$  y (b)  $R_N = 120$ . Se observa diferente altura de las guías debido al tiempo de grabado. Se obtuvieron dos guías tipo costilla con diferente altura fraccional y una guía tipo bloque.

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

**Tabla 3.4. Resumen de las características (altura externa –  $rh$  –, altura fraccional –  $r$  – y tipo de guía de onda) obtenidas mediante el perfil superficial.**

$\text{Si}_x\text{N}_y$	Muestra	Espesor (h) [nm]	Espesor Grabado [nm]	$rh$ [nm]	$r$	Guía de onda
$R_N = 100$	$W_{100}\text{-TT-1}$	429.4	216.5	212.9	0.5	Costilla
	$W_{100}\text{-TT-2}$		396.3	33.1	0.1	
	$W_{100}\text{-TT-3}$		596.0	---	---	Bloque
$R_N = 120$	$W_{120}\text{-TT-1}$	463.4	203.0	260.4	0.56	Costilla
	$W_{120}\text{-TT-2}$		395.5	67.9	0.15	
	$W_{120}\text{-TT-3}$		570.0	----	----	Bloque

En la Fig. 3.18 se muestra una imagen obtenida mediante SEM. La sección transversal corresponde a la muestra  $W_{120}\text{-TT-2}$ . Se seleccionó una guía con  $W = 5\mu\text{m}$ . Se aprecian tres escalas de grises asociados a cada material (Si,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Si}_x\text{N}_y$ ). Como se puede observar, el núcleo de la guía presenta una forma trapezoidal, concordando con lo analizado por perfilometría.



**Figura 3.18. Imagen de la sección transversal de la muestra  $W_{120}\text{-TT-3}$  obtenida por SEM. Se aprecian tres tonalidades de grises, correspondiendo a diferente material. Las dimensiones se encuentran en el rango de lo obtenido por elipsometría y perfilometría.**

Finalmente, se inspeccionaron los modos de propagación en las guías. Para ellos se utilizaron dos longitudes de onda ( $\lambda$ ): 473 nm (azul) y 633 nm (rojo). Mediante el acoplamiento de luz por el borde se determinó el ancho de la guía de onda, los modos de propagación y el coeficiente de atenuación. En la Fig. 3.19 se presentan algunos modos observados en las muestras  $W_{100}\text{-TT-1}$  y  $W_{120}\text{-TT-1}$ , para diferentes anchos de guía. Los principales modos observados fueron  $\text{TEM}_{00}$ ,  $\text{TEM}_{10}$ ,  $\text{TEM}_{20}$  y  $\text{TEM}_{30}$ . La distribución de potencia se confina por

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

debajo de la costilla tanto para el modo fundamental (1 lóbulo) como modos superiores (2 o más lóbulos), concordando con resultados de simulación [82]. Este resultado es similar para ambas longitudes de onda, sin embargo la muestra  $W_{100}$ -TT-1 presenta un confinamiento más uniforme (lóbulos mejor definidos) con un haz de luz roja ( $\lambda = 633$  nm). Por el contrario, la muestra  $W_{120}$ -TT-1 presenta confinamiento más uniforme para luz azul. Estos resultados concuerdan con el espectro de transmitancia (ver Fig. 3.13) donde se encontró mayor absorción en el azul para un nitruro de silicio con  $R_N = 100$ . En el caso de la muestra  $W_{120}$ -TT-1, la rugosidad de la película de nitruro puede provocar puntos de dispersión, resultado en lóbulos menos definidos debido a las pérdidas ópticas (ver Fig. 3.14).

Para ambas muestras se midieron valores de potencia del orden de nW a la salida de la guía de onda, lo cual dificultó la obtención del coeficiente de atenuación. En la Tabla 3.5 se presenta resultados obtenidos por acoplamiento de luz por los extremos. En ella se puede contrastar entre el ancho de guía esperado y el obtenido a partir del modo fundamental. Además, se resumen los valores del coeficiente de atenuación para cada longitud de onda ( $\lambda = 473$  nm y  $633$  nm) determinado en guías de onda con diferente anchura. Las atenuaciones determinadas en las guías más angostas no son resultados confiables, debido a la baja potencia óptica detectada. Al comparar el ancho de guía y el tamaño del modo se observa que el modo es de mayores dimensiones. Esto es un indicativo del campo evanescente presente fuera de la costilla de la guía de onda. Con base en el ancho efectivo, se estimó que los recubrimientos del núcleo deberán tener un espesor de  $> 1$   $\mu\text{m}$  para evitar la propagación de campos evanescentes, concordando con cálculos obtenidos por simulación [82].

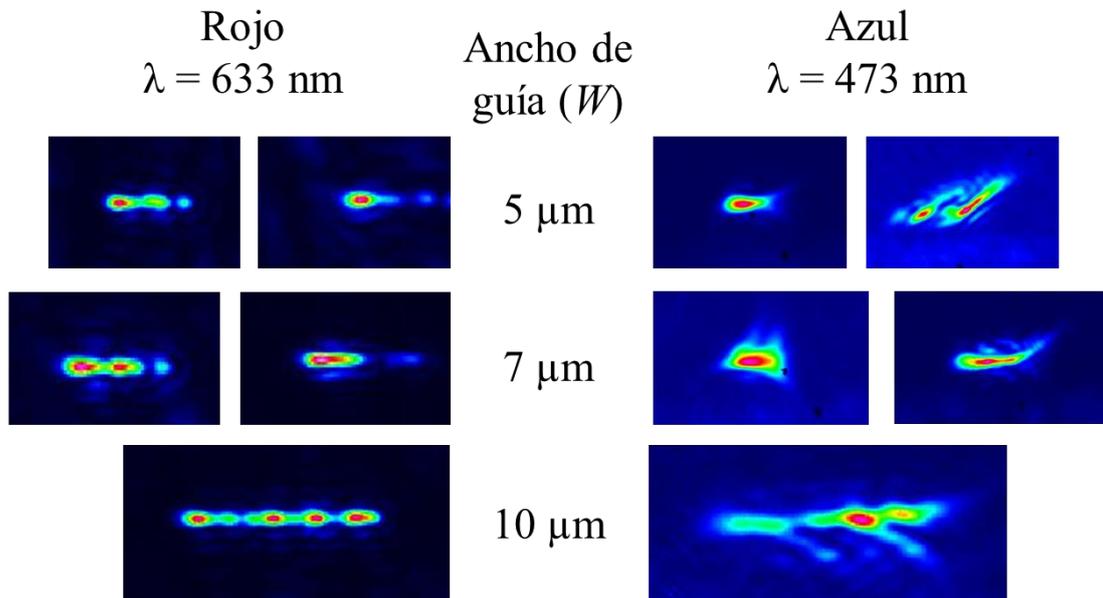
Ambas películas de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  ( $R_N = 100$  y  $120$ ) son adecuadas para la propagación de luz; sin embargo, un  $R_N = 100$  propicia la mejor propagación de luz roja. Por su parte, un  $R_N = 120$  tiene una mejor propagación de luz azul. Al momento de integrar emisor de luz y guía de onda, un nitruro de silicio con  $R_N = 100$  resulta una mejor opción para propagar luz proveniente del M-LEC<sub>1025</sub>; mientras, un  $R_N = 120$  propagará la luz emitida por el dispositivo M-LEC<sub>525</sub> con menos pérdidas.

**Tabla 3.5. Tamaño de la distribución transversal a la salida de las guías y el coeficiente de atenuación para luz en el azul ( $\lambda = 473$  nm) y rojo ( $\lambda = 633$  nm).**

Muestra	Ancho de guía [ $\mu\text{m}$ ]	Tamaño del modo ( $2 \omega_2$ ) [ $\mu\text{m}$ ]	$\alpha$ [dB/cm] $\lambda = 473$ nm	$\alpha$ [dB/cm] $\lambda = 633$ nm
$W_{100}$ -TT-1 ( $r = 0.5$ )	$R_N = 100$			
	1	1.60	---	37.52*
	2	2.25	---	---
	5	5.15	---	11.06
	7	8.00	---	13.26
$W_{120}$ -TT-1 ( $r = 0.56$ )	$R_N = 120$			
	3	3.26	12.84	30.26
	4	4.15	29.31	50.5*
	7	7.42	42.03	53.3*
	9	9.15	23.44	16.54
	15	14.8	34.54	36.11

\* Valores estimados con detección de potencia óptica en el límite de la sensibilidad del sensor.

**a)  $W_{100}$ -TT-1**



**b)  $W_{120}$ -TT-1**

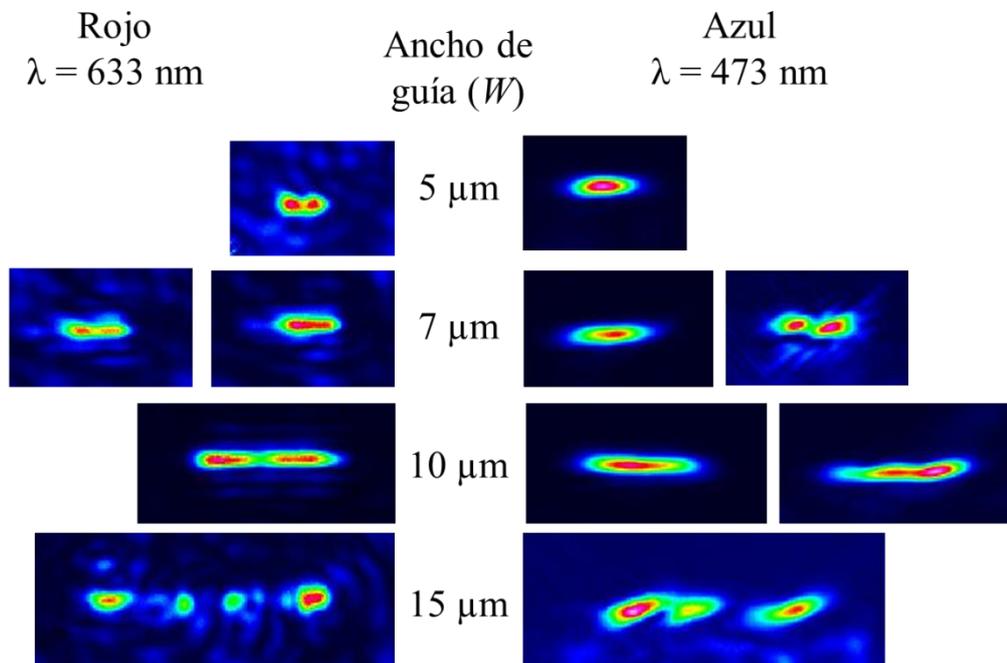


Figura 3.19. Modos transversales típicos para guías de onda tipo costilla ( $r = 0.5$ ) para nitruro de silicio con a)  $R_N = 100$  y b)  $R_N = 120$ . Su distribución de intensidad dentro de la guía se asocian a modos  $TEM_{00}$ ,  $TEM_{10}$ ,  $TEM_{20}$  y  $TEM_{30}$  principalmente, tanto para luz roja ( $\lambda=633 \text{ nm}$ ) como azul ( $\lambda=473 \text{ nm}$ ).

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

En la Fig. 3.20 se muestra la tendencia del coeficiente de atenuación en función del ancho de la guía para  $\lambda = 633$  nm. Debido a que existe propagación de luz azul y roja para cada muestra, se consideraron los resultados de ambas muestras ( $W_{100}$ -TT-1 y  $W_{120}$ -TT-1). Como se puede apreciar existe una tendencia cuadrática de la atenuación con el ancho de la guía, presentando la menor atenuación para un ancho de guía de 5  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ . Para valores por debajo de este rango las pérdidas incrementan debido a las pérdidas por acoplamiento (diferencia en tamaño entre haz de luz y núcleo de la guía). Para anchos de guía mayores a 10  $\mu\text{m}$  el coeficiente de atenuación incrementa debido al traslape de modos entre la luz incidente y el modo de la guía.

Si bien los valores de potencia de salida son superiores en guías más anchas, sus pérdidas incrementan debido al desacoplamiento de modos. La menor pérdida se presenta con un ancho de guía  $W = 5 \mu\text{m}$ , donde  $\alpha = 11.06$  dB/cm. En [95] se fabricó y caracterizó guías de onda tipo costilla, bloque y tira. Se utilizó nitruro de silicio obtenido por LPCVD para el núcleo de la guía y la caracterización de modos de propagación y coeficiente de atenuación se hizo a una  $\lambda = 780$  nm. Al igual que en este trabajo, se reporta un ancho de guía óptimo de 10  $\mu\text{m}$ , sin embargo su espesor del núcleo es de tan sólo 200 nm, menos de la mitad comparado con nuestras muestras. Utilizan espesores delgados en las guías debido al alto estrés generado en películas más gruesas, tal como se demostró en la Fig. 3.15. Finalmente reportan pérdidas de propagación de 2 dB/cm en guías tipo costilla, 5 veces menor al determinado en el mejor de nuestros casos. En guías tipo bloque y tira, las pérdidas por propagación se reducen a valores de 0.1 dB/cm a 0.3 dB/cm, diez veces menores a nuestras guías.

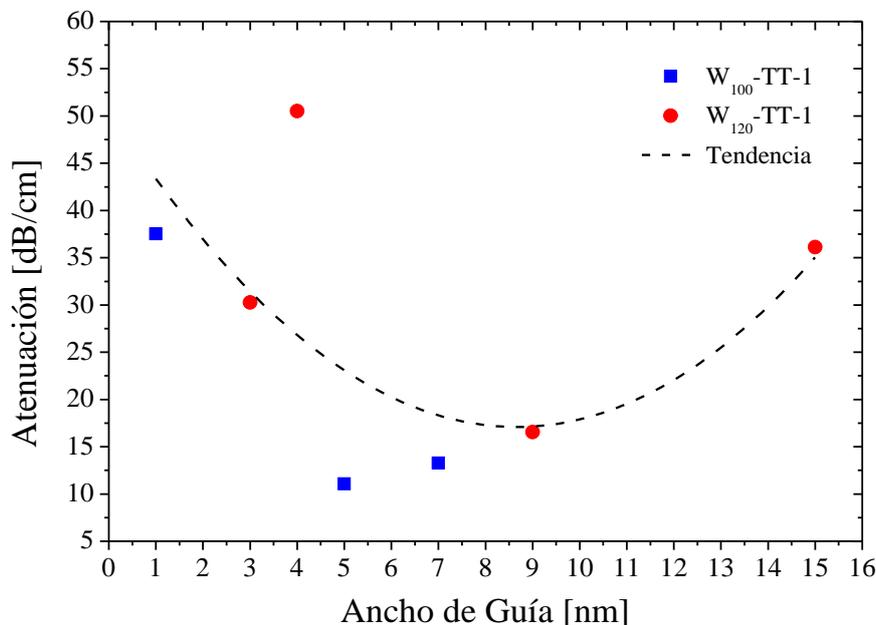


Figura 3.20. Coeficiente de atenuación en función del ancho de la guía de onda para una  $\lambda = 633$  nm. Se consideraron resultados de guías de onda cuyo nitruro fue depositado con  $R_N=100$  (cuadros azules) y  $R_N=120$  (círculos rojos).

#### 3.4. Conclusión

Se estudiaron las características ópticas y morfológicas de películas de nitruro de silicio ( $\text{Si}_x\text{N}_y$ ) obtenido por LPCVD. Se varió el  $R_N$  para obtener diferentes películas y se determinó que capas de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  con  $R_N$  entre 100 y 130 presentaban las mejores características para su uso en guías de onda. Asimismo, se diseñó y fabricó guías de onda tipo costilla con núcleo de nitruro de silicio, utilizando  $R_N = 100$  y 120. Al utilizar películas de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  con diferentes características se encontró ciertas ventajas y desventajas. Las películas de  $R_N = 100$  tienen baja rugosidad, alto estrés residual y absorben luz de 400 nm a 450 nm. Las películas de  $R_N = 120$  tienen alta rugosidad, bajo estrés residual y son transparentes de 400 nm a 850 nm. Con estos resultados se puede considerar por lo menos dos escenarios de integración LEC – guía de onda. Un caso es integrar una fuente de luz M-LEC<sub>1025</sub> con una guía de onda cuyo núcleo haya sido depositado con  $R_N = 100$ . El M-LEC<sub>1025</sub> tiene mejor emisión en el rojo y la guía de onda propagará luz con  $\lambda > 450$  nm, de modo que se reducen las pérdidas ópticas (acoplamiento y propagación). La desventaja en esta integración es el alto estrés residual que puede causar fractura de la estructura. El segundo caso es la integración M-LEC<sub>525</sub> y guía de onda cuyo  $\text{Si}_x\text{N}_y$  se obtuvo con  $R_N = 120$ . El dispositivo emisor tiene gran emisión en el azul y el nitruro tiene una transmitancia  $> 80\%$  de 400 nm a 850 nm. En condiciones ideales la guía debe propagar el espectro del M-LEC<sub>525</sub> con la menor de las pérdidas. Sin embargo, las pérdidas por propagación pueden deberse a los altos valores de rugosidad de la película de nitruro. En conclusión, la integración exitosa LEC-guía de onda tiene el compromiso entre falla estructural (estrés residual) y pérdidas por propagación (películas rugosas); sin embargo, la integración resulta ser factible.

### 3. GUÍA DE ONDA ÓPTICA

## Capítulo 4. Sensor de Luz

En este capítulo se estudiará brevemente la región de carga espacial de un diodo PN y su dependencia con el voltaje de polarización y resistividad del sustrato. Además, se mencionarán las principales figuras de mérito en este tipo de dispositivos. Subsecuentemente, se describirá el proceso de fabricación y caracterización de dos tipos de diodos: discreto e integrado. El diodo discreto es dispositivo individual, mientras el diodo integrado interactúa con una guía de onda. Finalmente se describen los resultados de caracterización eléctrica bajo diferentes condiciones de iluminación y se concluye los parámetros geométricos óptimos para un diodo integrado en el PIC.

### 4.1. Elemento fundamental: Unión PN

La unión *PN* consiste en la unión metalúrgica de un semiconductor dopado tipo *P* con otro dopado tipo *N*. En el caso de la tecnología de silicio se obtienen regiones tipo *P* o *N* al dopar el material con átomos de boro (B) o fósforo (P), respectivamente. Sin embargo, no son los únicos elementos. Para obtener una región tipo *P* se han utilizado elementos de la columna III de la tabla periódica. Por su parte, con el uso de elementos de la columna V se obtienen regiones dopadas tipo *N*. Las técnicas de fabricación más comunes para el dopado de semiconductores son: implantación iónica y difusión térmica. La segunda puede presentar un proceso limitado por la velocidad de reacción o limitado por la concentración de dopantes. El uso de gases reactivos se relaciona a una difusión limitada por la velocidad de reacción. El uso de SOD (del inglés *Spin On Dopant*) corresponde a una difusión limitada por la concentración de dopantes. En [96] se puede encontrar una descripción detallada sobre el proceso de difusión, la física involucrada y las técnicas de fabricación.

El primero en estudiar y establecer una teoría para el comportamiento corriente-voltaje de las uniones *PN* fue Shockley [97] y en el capítulo 2 de [28] puede encontrarse un estudio completo de la unión *PN*. Al poner en contacto ambos semiconductores (*P* y *N*) se produce intercambio de cargas entre ambos materiales. Dependiendo de la relación de concentración de impurezas entre una zona y la otra se puede obtener una unión abrupta o gradual. La unión abrupta se produce cuando una región tiene una concentración de impurezas mucho mayor a la otra ( $N_a \gg N_d$  o  $N_d \gg N_a$ ). En la fabricación de fotodiodos se busca generar uniones abruptas con la capa de mayor concentración muy delgada, disminuyendo la absorción en esta región. En la Fig. 4.1 (a) se esquematiza la unión  $N_+-P$  (abrupta). Tras el contacto entre ambos materiales se difunden electrones de la región *N* a la *P* y huecos en sentido contrario, produciendo una región de iones positivos en el lado *N* y una región de iones negativos en el lado *P*. Debido a la zona ionizada se produce un campo eléctrico que origina una diferencia de

#### 4. SENSOR DE LUZ

potencial. El campo eléctrico tendrá una dirección de la región  $N$  a  $P$ . Debido a esto, si un fotón es absorbido en la región de agotamiento se generará un par electrón-hueco ( $e-h$ ) y el campo eléctrico direccionará el electrón al lado  $N$  y el hueco al lado  $P$ . Esto producirá una variación en la concentración de los portadores mayoritarios, reflejándose en la variación de corriente. Esta corriente es conocida como fotocorriente.

El ancho de la región de agotamiento ( $W_D$ ) es determinado como [28]:

$$W_D = W_{Dn} + W_{Dp} \quad (4.1)$$

Siendo  $W_{Dn}$  y  $W_{Dp}$  los anchos de la región de agotamiento de la región  $N$  y  $P$ , respectivamente. A su vez, ambas dimensiones son calculadas mediante:

$$W_{Dn} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(\psi_{bi} - V)}{q} \left( \frac{N_a}{N_d(N_a + N_d)} \right)} \quad (4.2)$$

$$W_{Dp} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(\psi_{bi} - V)}{q} \left( \frac{N_d}{N_a(N_a + N_d)} \right)}$$

Donde  $\varepsilon_s$  es la permitividad eléctrica del semiconductor,  $q$  es la carga del electrón,  $\psi_{bi}$  es el potencial interconstruido,  $N_a$  es la concentración de impurezas aceptoras,  $N_d$  es la concentración de impurezas donadoras y  $V$  la diferencia de potencial aplicado. Cuando el diodo es polarizado en directa se aplica un  $V$  positivo en la región  $P$  respecto a la región  $N$ . Para polarización inversa,  $V$  será negativo. Como se observa de la Ec. 4.2, el  $W_D$  depende del voltaje aplicado y la concentración de impurezas. Para semiconductores no degenerados,  $\psi_{bi}$  se puede aproximar como:

$$\psi_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (4.3)$$

Donde  $n_i$  es la concentración intrínseca del semiconductor,  $k$  es la constante de Boltzmann y  $T$  es la temperatura en escala absoluta. Al aplicar un campo eléctrico externo a la unión  $PN$  se modula el  $W_D$ . Suponiendo una unión abrupta y campo eléctrico cero fuera de la región de agotamiento, entonces  $W_D$  se puede aproximar a:

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN} (\psi_{bi} - V)} \quad (4.4)$$

Siendo  $N$  la concentración de impurezas donadoras o aceptoras si  $N_d \gg N_a$  o viceversa. Como se mencionó anteriormente, la unión  $PN$  es la base de los fotodiodos. Por su parte, sólo los fotones que generan pares electrón-hueco en la región de agotamiento o

#### 4. SENSOR DE LUZ

en una región muy cercana a ella contribuirán a la fotocorriente. A temperatura ambiente (300 K), el silicio requiere un espesor de 1 a ~20  $\mu\text{m}$  para absorber luz con una longitud de onda de 400 a 850 nm, respectivamente [11] [28]. Para fabricar diodos con una rápida respuesta el tiempo de vida de los portadores debe ser corto. Además, el ancho de la región debe ser disminuido con el objetivo de reducir el tiempo de tránsito. Por su parte, el efecto de la capacitancia debe ser bajo, implicando grandes amplitudes de la región de agotamiento. Para optimizar el funcionamiento del diodo debe considerarse este compromiso [28].

#### 4.2. Figuras de mérito

Existen diversas figuras de mérito para caracterizar un sensor de luz. Algunas de las principales son: densidad de corriente, corriente de oscuridad, eficiencia cuántica, responsividad y potencia equivalente de ruido. La densidad de corriente ( $J$ ) se define como:

$$J = \frac{I}{A} \quad (4.5)$$

Siendo  $I$  la intensidad de corriente eléctrica y  $A$  el área del diodo. De esta forma descartamos los efectos de área que influyan en la corriente eléctrica del diodo. La corriente de oscuridad ( $I_0$ ) es la corriente que circula por un diodo polarizado inversamente y sin iluminación. Esta corriente tiene su origen en los efectos térmicos y es la principal fuente de ruido en un diodo. La eficiencia cuántica ( $\eta$ ) se relaciona a los pares electrón-huevo ( $e-h$ ) generados por cada fotón incidente. La eficiencia cuántica es función de la longitud de onda del fotón incidente y se determina como:

$$\eta(\lambda) = \frac{I_{ph}}{q\Phi(\lambda)} \quad (4.6)$$

Siendo  $I_{ph}$  la foto-corriente,  $q$  la carga del electrón y  $\Phi(\lambda)$  el flujo de fotones con una longitud de onda  $\lambda$ . A su vez  $\Phi = P_{op}/h\nu$ , siendo  $P_{op}$  la potencia óptica y  $h\nu$  la energía del fotón emitido. El valor máximo de eficiencia cuántica es 1; sin embargo fenómenos como recombinación, reflexión y absorción inadecuada alejan la eficiencia de la idealidad.

La responsividad ( $R$ ) es una medida de la sensibilidad del sensor, la cual nos informa del número de amperes generados por cada watt de potencia óptica. La  $R$  también es función de la longitud de onda y se estima mediante la siguiente expresión:

$$R(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_{op}(\lambda)} \quad (4.7)$$

#### 4. SENSOR DE LUZ

Por último, la potencia equivalente de ruido (NEP, del inglés *Noise-Equivalent Power*) indica la potencia óptica requerida para producir una razón señal a ruido de 1 para un ancho de banda de 1 Hz. El NEP está definido como:

$$NEP(\lambda) = \frac{I_n}{R(\lambda)} \quad (4.8)$$

Donde  $I_n$  es la corriente total de ruido asociada a la corriente de oscuridad con un ancho de banda de 1 Hz.

### 4.3. Procedimiento experimental

Se estudiaron 2 tipos de diodos: discreto e integrado. Ambos dispositivos fueron diseñados y fabricados por J. Juvert y A. A. González-Fernández en el Instituto de Microelectrónica de Barcelona (IMB-CNM). El lector puede referirse a [10] para conocer todos los pasos del proceso de fabricación. El diodo discreto no interactuaba eléctrica u ópticamente con otro dispositivo. El diodo integrado está integrado monolíticamente con una guía de onda. En el siguiente apartado se describe el proceso de fabricación y las características geométricas de cada dispositivo.

#### 4.3.1. Fabricación

Para ambos tipos de diodo se utilizó silicio tipo N (100) con resistividad de 1 a 12  $\Omega \times \text{cm}$ . Para formar la región *P* se implantaron iones de boro (B) con una dosis de  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  y energía de 50 KeV en ventanas por la parte frontal de la oblea. Para garantizar contacto óhmico se realizó una implantación de fósforo (P) en la parte posterior de la oblea con una dosis de  $4.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  y energía de 100 KeV. Todas las muestras se sometieron a un tratamiento térmico a 1100 °C en  $\text{N}_2$  por 4 horas para la redifusión de impurezas. En seguida, se depositó óxido de silicio (óxido de campo) con espesor de 1.5  $\mu\text{m}$  para aislamiento eléctrico y se abrieron ventanas para el depósito de Al. Mediante litografía y grabado se definió el área de contacto. Finalmente, se sometieron las muestras a aleación en *forming gas* ( $\text{N}_2/\text{H}_2$ ) a 350 °C durante 2 horas. El diodo discreto ( $\text{D}_\text{D}$ ) consiste en la fabricación antes descrita; mientras, el diodo integrado ( $\text{D}_\text{I}$ ) tiene una capa de nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) con espesor de 30 nm entre región *P* y óxido de campo. La película de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  corresponde a una guía de onda óptica. El diodo discreto fue fabricado con 6 áreas de detección diferentes. Por su parte el diodo integrado tiene 9 áreas diferentes. En la Fig. 4.1 se esquematizan los dos tipos de diodos. Las áreas de detección se obtuvieron variando la longitud ( $L_\text{d}$ ) y ancho del diodo ( $W_\text{d}$ ). El área de detección ( $A_\text{DE}$ ) se determinó restando el área del contacto ( $A_\text{C}$ ) al área total del diodo ( $A_\text{T} = L_\text{d} \times W_\text{d}$ ). En la tabla 4.1 se resumen las características geométricas de los dos tipos de diodos.

#### 4. SENSOR DE LUZ

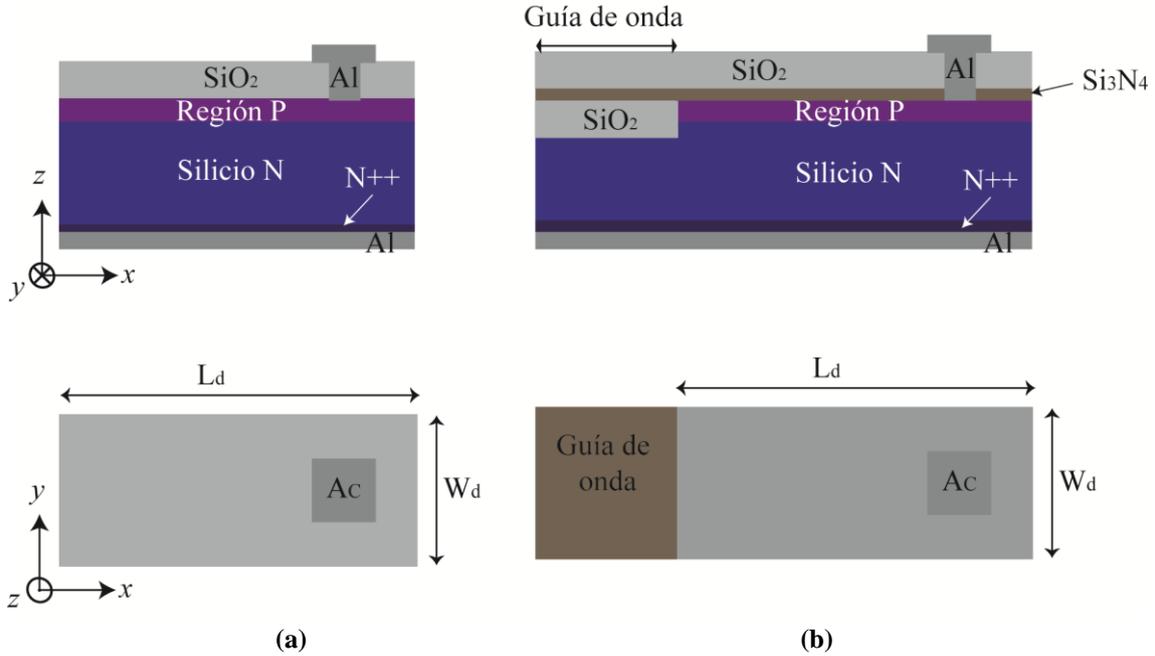


Figura 4.1. Esquema del corte transversal (arriba) y vista superior (abajo) de los diodos (a) discretos e (b) integrados. El corte transversal indica las capas y materiales que componen el dispositivo. La vista superior indica los parámetros geométricos.

Tabla 4.1. Descripción de los parámetros geométricos de diodos discretos ( $D_D$ ) y diodos integrados ( $D_I$ )

Muestra	$L_D$ [mm]	$W_d$ [mm]	Perímetro (P) [mm]	$A_T$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_C$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{DE}$ [mm <sup>2</sup> ]
Diodo discreto, $D_D$						
$D_{D1-1}$	0.55	0.5	2.1	0.275	0.055	0.22
$D_{D1-2}$	1.3		3.6	0.65		0.595
$D_{D2-1}$	0.8	1.0	3.6	0.8	0.23	0.57
$D_{D2-2}$	2.3		6.6	2.3		2.07
$D_{D3-1}$	1.3	2.0	6.6	2.6	0.9	1.7
$D_{D3-2}$	4.3		12.6	8.6		7.7
Diodo integrado, $D_I$						
$D_{I1-1}$	0.55	0.5	2.1	0.275	0.055	0.22
$D_{I1-2}$	0.8		2.6	0.4		0.345
$D_{I1-3}$	1.3		3.6	0.65		0.595
$D_{I2-1}$	0.8	1.0	3.6	0.8	0.23	0.57
$D_{I2-2}$	1.3		4.6	1.3		1.07
$D_{I2-3}$	2.3		6.6	2.3		2.07
$D_{I3-1}$	1.3	2.0	6.6	2.6	0.9	1.7
$D_{I3-2}$	2.3		8.6	4.6		3.7
$D_{I3-3}$	4.3		12.6	8.6		7.7

$L_D$ ; longitud del diodo  
 $W_d$ ; ancho del diodo  
P; perímetro del diodo

$A_T$ ; área total del diodo =  $L_D \times W_d$   
 $A_C$ ; área del contacto de Al  
 $A_{DE}$ ; área de detección =  $A_T - A_C$

## 4. SENSOR DE LUZ

### 4.3.2. Caracterización

Todos los dispositivos se caracterizaron eléctricamente bajo diferentes condiciones de iluminación. La caracterización eléctrica consistió en obtener la curva corriente-voltaje (I-V). Para ello se montó el esquema mostrado en la Fig. 4.2 (a). Se utilizó una fuente medidora Keithley modelo 2436 con resolución de 100 pA ( $10^{-10}$  A). Se usó una lámpara Zeiss modelo CL 1500 ECO con un paquete de guías para llevar la luz dentro de la caja negra e iluminar el diodo. La fuente de luz se colocó sobre el diodo a una distancia de 3 cm y se modificó la intensidad mediante el control manual del equipo. La lámpara es de uso general y no cuenta con retroalimentación para el control de potencia, por lo que los resultados del diodo en iluminación serán de carácter cualitativo. En la Fig. 4.2 (b) se muestra el espectro de emisión de la lámpara para 3 intensidades ópticas. El espectro de emisión se recolectó mediante una fibra óptica conectada a un espectrómetro *Ocean Optics* modelo *QEpro*. El extremo libre de la fibra óptica se colocó a 3 cm de la lámpara, reproduciendo la distancia entre la fuente de luz y el diodo.

La caracterización tuvo como objetivo estudiar la respuesta eléctrica del diodo en función de sus características geométricas y condiciones de iluminación. Con base en los resultados, se establecerá las dimensiones adecuadas para optimizar la respuesta eléctrica del diodo en el circuito integrado.

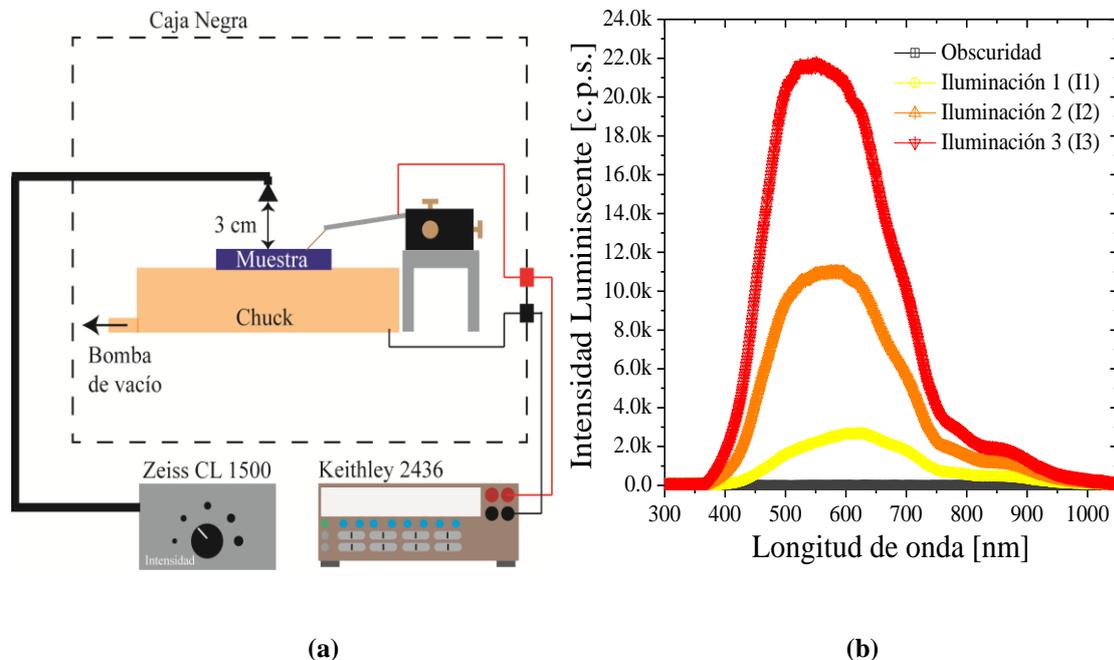
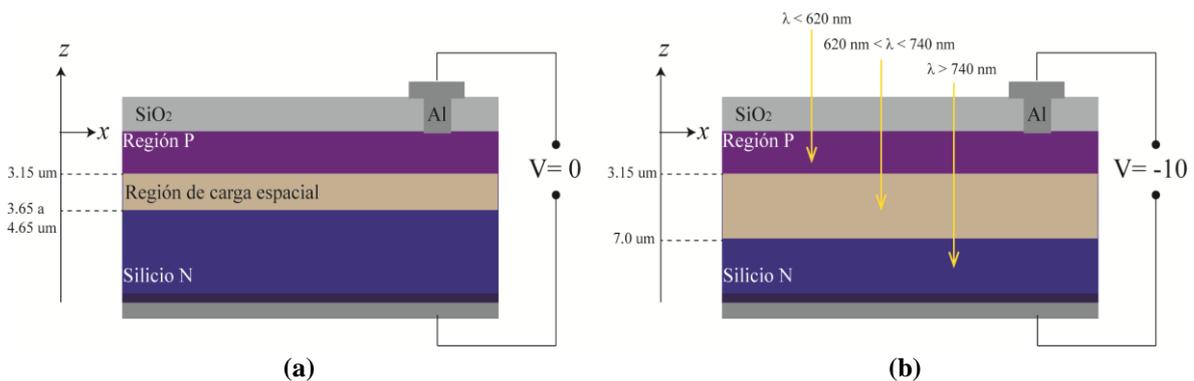


Figura 4.2. (a) Esquema de medición diodo. (b) espectro de emisión de lámpara con diferente potencia óptica.

#### 4.4. Resultados eléctricos del sensor

Antes de analizar las curvas I-V, analicemos la región de agotamiento del diodo. En la Fig. 4.3 se esquematiza el ancho de la región de carga espacial para el equilibrio térmico ( $V = 0 \text{ V}$ ) y una polarización de  $-10 \text{ V}$ . En equilibrio térmico, la región de carga espacial comienza en  $(3.15 \pm 0.25) \mu\text{m}$  de la superficie hacia dentro del silicio y el  $W_D$  varía de  $0.5 \mu\text{m}$  a  $1.5 \mu\text{m}$ , considerando que el substrato tiene una resistividad de 1 a  $12 \Omega \times \text{cm}$  [10]. Al incrementar el voltaje de polarización a  $-10 \text{ V}$ , la región de carga espacial irá de  $\sim 3.1 \mu\text{m}$  a  $\sim 7 \mu\text{m}$  dentro del silicio. Esto implica que los fotones con  $\lambda < 620 \text{ nm}$  serán absorbidos antes de alcanzar la región de carga espacial [98]. En el caso de fotones con  $\lambda = 630 \text{ nm}$  serán absorbidos justo en el límite de la región de agotamiento, siendo más probable que no contribuyan a la fotocorriente. Sin embargo, los fotones cuya  $\lambda$  se encuentre dentro del rango  $(630 \text{ nm}, 740 \text{ nm})$  y lleguen a la superficie de silicio sin ninguna perturbación serán absorbidos dentro de la región de agotamiento [98] y podrán contribuir a la fotocorriente ( $I_{ph}$ ). En conclusión, menos del 50 % de la luz emitida por la lámpara será detectada por el sensor, pero es suficiente para determinar la influencia del área y el perímetro en la corriente de fuga del diodo.



**Figura 4.3.** Esquema de la región de agotamiento en un diodo discreto con polarización (a)  $V = 0 \text{ V}$  y (b)  $V = -10 \text{ V}$ . Con una polarización de  $-10 \text{ V}$  fotones con  $\lambda$  de  $630 \text{ nm}$  a  $740 \text{ nm}$  serán absorbidas dentro de la región de carga espacial, contribuyendo a la fotocorriente.

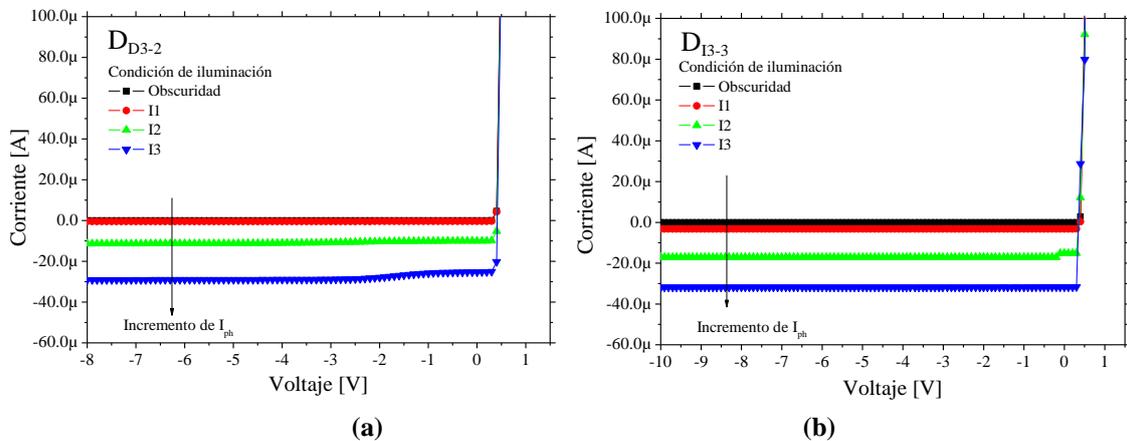
En la Fig. 4.4 se muestra las curvas típicas de corriente-voltaje (I-V) para diodos discretos e integrados bajo diferentes condiciones de iluminación. Como se puede observar existe un aumento en la corriente en polarización inversa debida al cambio en la condición de iluminación.

En polarización inversa y condición de oscuridad, la corriente de fuga ( $I_0$ ) tiene mucha variación en diodos discretos. Es posible que la corriente sea muy pequeña, por debajo de la resolución del equipo, generando valores dispersos. En el caso de los diodos integrados, la variación de  $I_0$  es menor y parece tener una dependencia con el tamaño del sensor. En condición de iluminación, ambos tipos de diodos incrementan la corriente en polarización inversa al aumentar la potencia óptica y se puede observar una

#### 4. SENSOR DE LUZ

dependencia de la corriente con el tamaño del dispositivo. Es decir, la  $I_{ph}$  incrementa tanto con el aumento de potencia óptica como al incrementar el tamaño del diodo. Sin embargo, se debe considerar que los diodos integrados cuentan con una capa delgada de nitruro de silicio (30 nm), la cual puede afectar la corriente generada por unidad de área.

El nitruro de silicio es semi-transparente en el rango visible como se puede corroborar en la Fig. 3.13. En esta figura, el espectro de transmitancia corresponde a una película de ~500 nm, diez veces mayor al espesor de la capa utilizada en el diodo integrado. Por tal motivo, se puede considerar que la absorción por parte de la película de 30 nm es despreciable. Sin embargo, efectos de dispersión, reflexión o recombinación en la interfaz Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> pueden suceder. Para analizar la influencia de los efectos de área y borde en la respuesta del diodo, se estudió la  $I_0$  por unidad de área y por perímetro.



**Figura 4.4.** Curvas típicas de corriente – voltaje para diodos (a) discretos e (b) integrados, bajo diferentes condiciones de iluminación. Se aprecia un incremento en la corriente fotogenerada ( $I_{ph}$ ) debido al cambio en condición de iluminación.

En la Fig. 4.5 se presentan los valores  $I_0$ ,  $I_0$  por área e  $I_0$  por perímetro. Los gráficos de (a), (b) y (c) corresponden a diodos discretos; mientras (d), (e) y (f) son de diodos integrados. En diodos discretos, los valores de  $I_0$  son similares en todos los dispositivos (ver Fig. 4.5 (a)). Sin embargo, al normalizar la  $I_0$  por el área del sensor ( $A_T$ ) o su perímetro ( $P$ ), corrientes de oscuridad más pequeñas son obtenidas en dispositivos más grandes (mayor área o mayor perímetro). Por su parte, los diodos integrados muestran una dependencia exponencial creciente (ver recuadro Fig. 4.5 (d)) de la  $I_0$  con el tamaño del dispositivo, y se conserva al normalizar respecto al área y perímetro. Contrario a los diodos discretos, los diodos integrados registran corrientes de fuga menores en dispositivos más pequeños. Un diodo encargado de detectar luz con baja intensidad debe tener la menor de las corrientes de fuga, con la finalidad de producir una corriente fotogenerada con poca incidencia de fotones.

Al comparar la corriente de oscuridad entre los dos tipos de diodos, se puede observar que los diodos discretos tienen menores valores de  $I_0$  que los diodos integrados; sin embargo, un diodo integrado con un área menor a 1 mm<sup>2</sup> registra valores

#### 4. SENSOR DE LUZ

<10 nA, quedando en el mismo orden que los diodos discretos (Figs. 4.5 (a) y (d)). Esto indicaría que un diodo integrado tiene una sensibilidad similar a un diodo discreto cuando se disminuye su área de detección; lo cual a su vez, disminuye el área de contacto Si-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Es posible que el nitruro de silicio pasiva de otra forma la superficie.

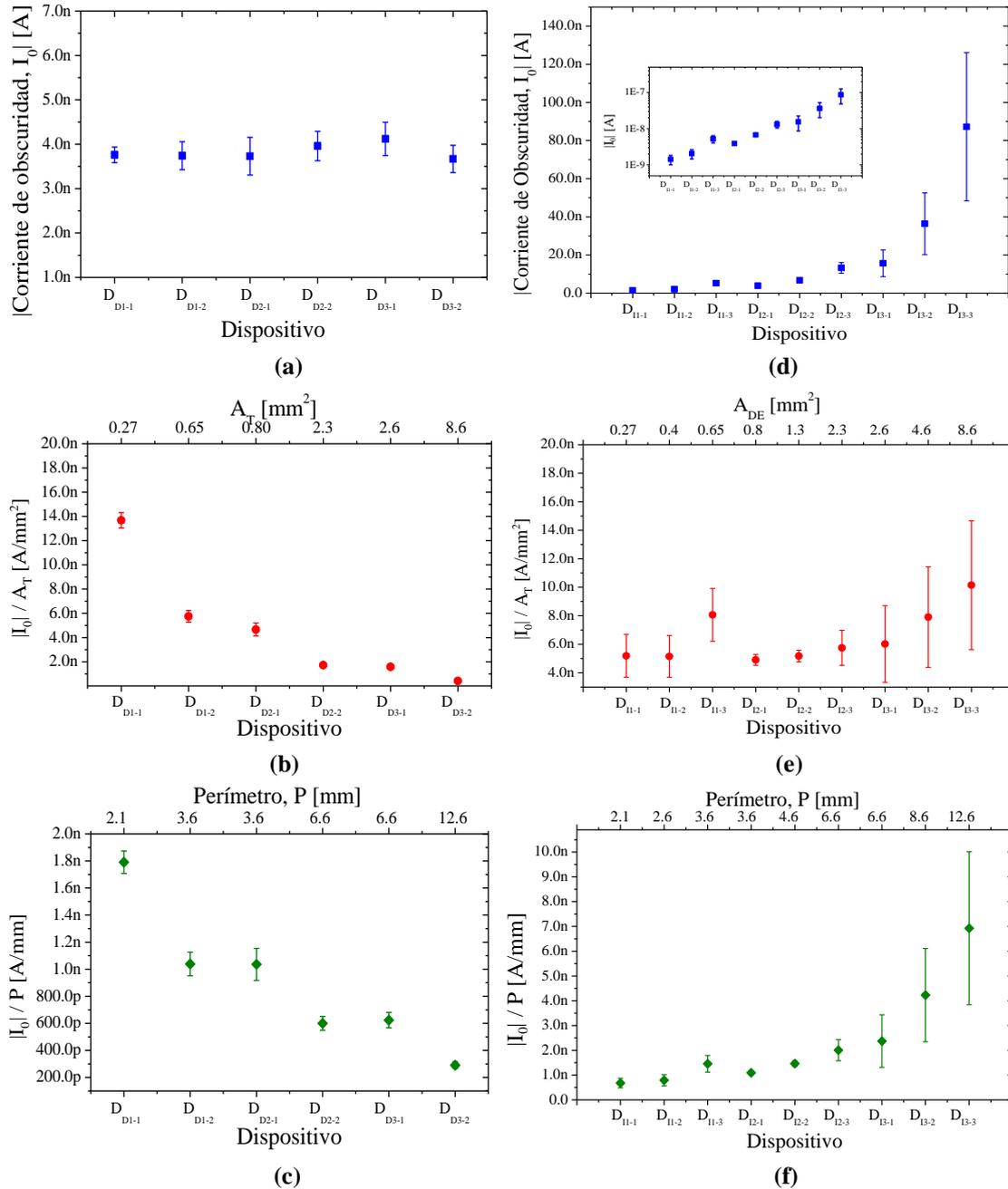


Figura 4.5. Gráficas de corriente de obscuridad ( $I_0$ ),  $I_0$  por área ( $A_T$ ) e  $I_0$  por perímetro ( $P$ ) para diodos discretos (gráficas (a), (b) y (c)) y diodos integrados (gráficas (d), (e) y (f)).

Con base en los resultados de las curvas I-V bajo diferentes condiciones de iluminación se estimó la  $I_{ph}$  como:

#### 4. SENSOR DE LUZ

$$I_{ph} = I_{il} - I_0 \quad (4.9)$$

Donde  $I_{il}$  es la corriente medida a -10 V bajo iluminación.

En la Fig. 4.6 se presentan gráficas de  $I_{ph}$ ,  $I_{ph}$  por área de detección ( $A_{DE}$ ) e  $I_{ph}$  por perímetro (P), todas en función de la condición de iluminación. Los gráficos (a), (b) y (c) corresponden a diodos discretos, mientras los gráficos (d), (e) y (f) pertenecen a diodos integrados. En ambos tipos de diodos, la  $I_{ph}$  muestra una dependencia directa con el tamaño del diodo, es decir, mayor fotocorriente es obtenida en diodos más grandes (ver Fig. 4.6 (a) y (d)). Sin embargo, los diodos discretos tienen una  $I_{ph}$  por lo menos 2 veces mayor a la registrada en diodos integrados. Al normalizar respecto a  $A_{DE}$  (ver Figs. 4.6 (b) y (e)), los dispositivos más pequeños tienen mayor contribución de fotocorriente por unidad de área, tanto en diodos discretos como integrados. Nuevamente, los diodos discretos presentan valores superiores a los diodos integrados. Finalmente, la contribución de  $I_{ph}$  por perímetro (ver Figs. 4.6 (c) y (f)) es mayor en dispositivos de mayor tamaño. Similar a los casos anteriores, mayores corrientes son determinadas para diodos discretos respecto a diodos integrados.

En conclusión, existe un compromiso entre el área y el perímetro del diodo para lograr la mayor fotocorriente. Diodos con un área de  $0.8 \text{ mm}^2$  a  $2.3 \text{ mm}^2$  pueden ser la mejor opción para evitar que alguna contribución domine sobre el otro. Además, se busca la menor área de contacto entre el  $\text{Si}_x\text{N}_y$  y el Si para reducir la influencia de la interfaz  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Si}$  en la generación de fotocorriente. En este momento la pérdida en  $I_{ph}$  en diodos integrados respecto a diodos discretos no se puede asociar a la interfaz  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Si}$  o la interfaz  $\text{SiO}_2/\text{Si}_x\text{N}_y$ , debido a que la luz atraviesa ambas interfaces. Sin embargo, cuando la luz provenga de la guía, dispersión o absorción en la interfaz  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Si}$  puede afectar la potencia óptica de la luz que llega al sensor.

#### 4. SENSOR DE LUZ

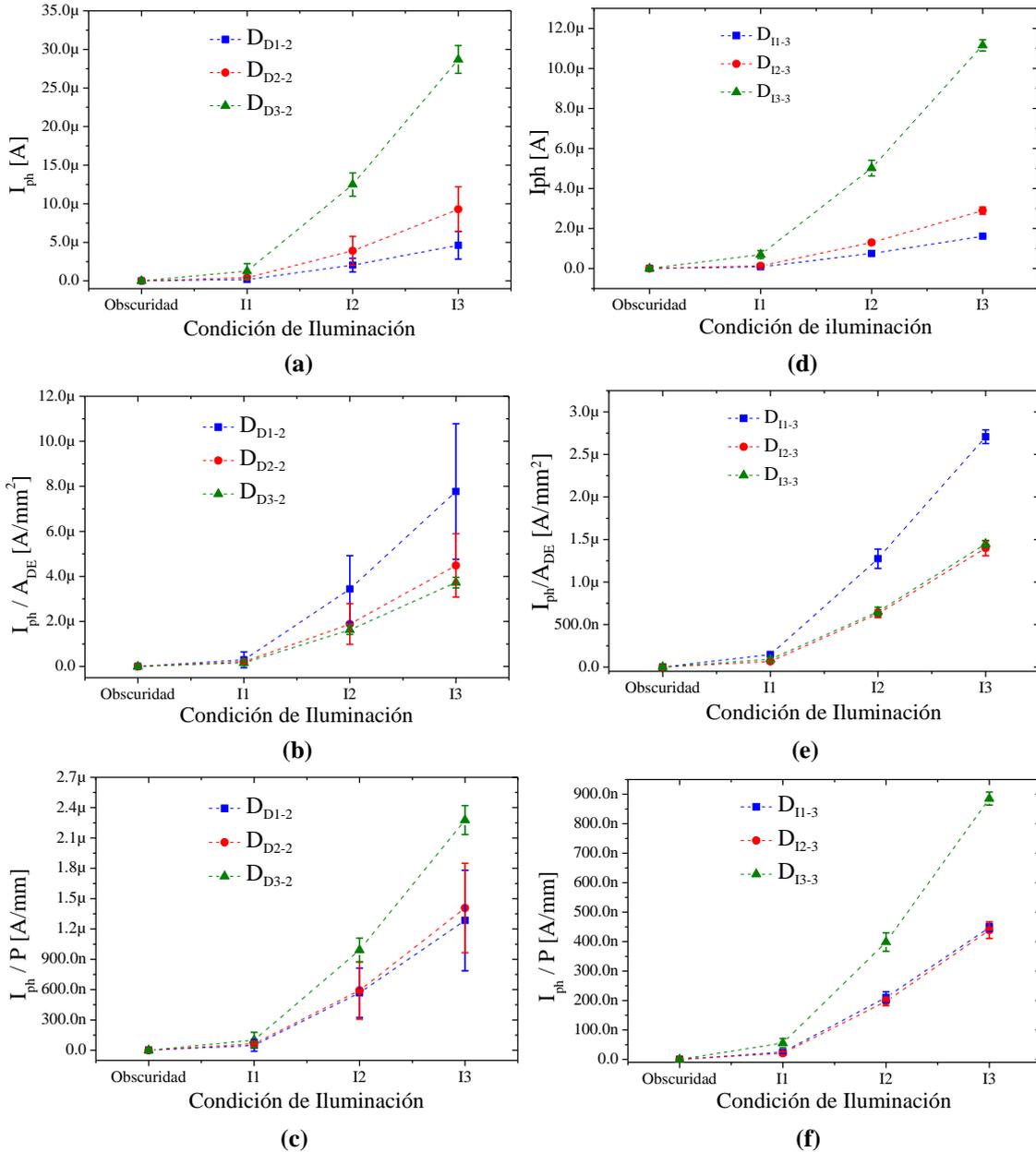


Figura 4.6. Gráficas de fotocorriente ( $I_{ph}$ ),  $I_{ph}$  por área de detección ( $A_{DE}$ ) e  $I_{ph}$  por perímetro (P) para diodos discretos – (a), (b) y (c) respectivamente – y diodos integrados – (d), (e) y (f) respectivamente –.

#### 4.5. Conclusión

Las posibilidades de detección de luz con baja intensidad se incrementan cuando el diodo registra valores pequeños de  $I_0$ . Como se abordó en los resultados, existen dos fuentes que afectan la corriente de fuga: área y perímetro del diodo. El análisis de un diodo integrado representa el caso más relacionado a un fotodetector en un circuito fotónico integrado. Un diodo con  $L_D = 4.3$  mm y  $W_D = 2.0$  mm alcanza valores más

#### 4. SENSOR DE LUZ

altos de fotocorriente; sin embargo, es posible que la mayor contribución a la  $I_{ph}$  se deba a los efectos de borde (ver. Fig. 4.6 (f)). Por su parte un diodo con  $L_D = 1.3$  mm y  $W_D = 0.5$  mm disminuye la influencia de los efectos de borde y alcanza la mayor  $I_{ph}$  por unidad de área (ver Fig. 4.6 (e)). Esta condición es más apropiada cuando la luz proveniente de la guía incide verticalmente en la unión  $PN$ . Al incrementar el área mayor será la corriente fotogenerada. Por tales motivos, diodos con un área  $< 0.8$  mm<sup>2</sup> exhiben las mejores características para acoplarse con la guía. No obstante, se debe valorar la influencia de la interfaz  $Si_xN_y/Si$ , la cual está relacionada con el área. Con base en los resultados obtenidos en el Cap. 3, películas de  $Si_xN_y$  con  $R_N = 100$  o  $120$  no deben afectar la respuesta del sensor debido a su poca absorción.

#### 4. SENSOR DE LUZ

## Capítulo 5. Circuito Fotónico Integrado en Silicio: Simulación y Resultados

La creciente demanda de transferencia de información a una alta velocidad con un menor consumo de potencia ha impulsado el desarrollo de sistemas ópticos utilizando tecnología de silicio. Algunos ejemplos de las áreas que requieren estos avances son comunicaciones ópticas y *Lab On Chip* [1]. La meta es obtener circuitos fotónicos integrados en silicio que manipulen fotones en lugar de electrones [5]. Actualmente se ha demostrado la fabricación de guías de onda [12], sensores [13], y emisores de luz [14] en una línea de fabricación CMOS. Así mismo, se ha reportado el acoplamiento entre un emisor de luz con una guía de onda [8], y una guía de onda con un fotodetector [15]. Sin embargo, en un trabajo más reciente se reportó la fabricación de un circuito compuesto de un emisor de luz, una guía de onda y un sensor, utilizando tecnología CMOS [16].

Como se mencionó en capítulos anteriores, la integración entre el emisor de luz y la guía de onda, como el acoplamiento entre la guía de onda y el sensor de luz son importantes. Debido a la baja intensidad de emisión del LEC, el acoplamiento guía – detector debe optimizarse para que cada fotón contribuya a la fotocorriente. Para optimizar la respuesta del sistema completo (emisor de luz, guía y sensor) es necesario estudiar el diodo bajo diferentes arreglos del acoplamiento y distintas condiciones de excitación eléctrica.

En esta sección se estudiará mediante simulación la distribución de campo eléctrico en la región de carga espacial. Los aspectos que se consideran en el análisis son la topología y la polarización eléctrica del diodo. Las topologías analizadas son: diodo estándar (o no planar) y diodo planar.

### 5.1 Simulación del acoplamiento guía de onda - sensor

En la Fig. 5.1 se esquematiza las topologías estudiadas. En la Fig. 5.1 (a) se esquematiza un diodo estándar donde los electrodos, es decir el ánodo y el cátodo, se encuentran en el frente y en el reverso de la oblea, respectivamente. Para su fabricación se requiere hacer un pozo de tipo contrario al substrato. En la Fig. 5.1 (b) se presenta un diodo planar con ambos electrodos en el mismo plano. En este caso se requieren dos difusiones: una de tipo contrario al tipo de substrato y la segunda del mismo tipo pero con mayor concentración.

## 5. CIRCUITO FOTÓNICO INTEGRADO EN SILICIO

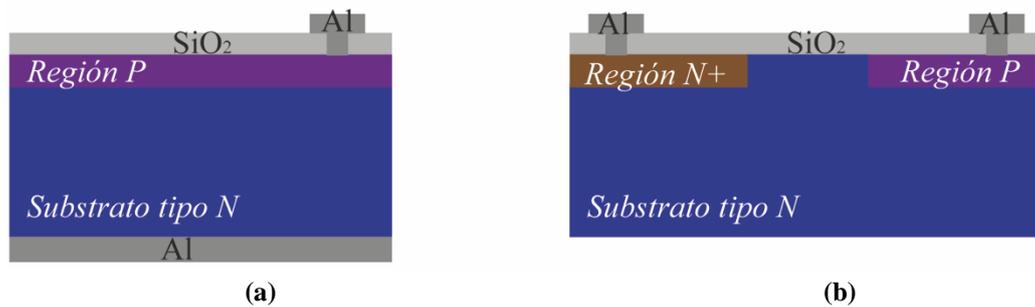


Figura 5.1. Esquema de diodos con configuración (a) estándar y (b) planar.

La estructura simulada consistió en una guía de onda tipo bloque acoplada al diodo. La guía de onda se colocó dentro de una cavidad para garantizar que la luz incida en la región de carga espacial. Se simuló el proceso de fabricación y la estimulación eléctrica del diodo mediante SILVACO®, utilizando los módulos ATENAS y ATLAS. En la simulación de fabricación se consideró un sustrato de silicio tipo N y orientación (100). El uso de un sustrato tipo N permitió fabricar dos pozos P; uno utilizado en el emisor de luz y el otro para el sensor. Las regiones P se formaron por difusión de Boro con una la cinética de difusión controlada por la velocidad de reacción. El pre-depósito se realizó por 20 min a una temperatura de 1000 °C usando fuente sólida. Además, se varió la resistividad del sustrato, la profundidad de la cavidad y el tiempo de redifusión. Respecto al tiempo de difusión, se estudiaron dos casos: 30 min y 120 min a 1000 °C. El primer tiempo se utilizará cuando la emisión de la fuente de luz se haya activado, es decir se haya sometido a un tratamiento térmico a 1100 °C. El según tiempo se usará para activar la emisión y re-difundir las impurezas al mismo tiempo. El voltaje del diodo se varió de 0 V a -40 V. Mediante simulación se obtuvo el campo eléctrico dentro de la región de agotamiento, así como su orientación respecto al puerto de salida de la guía y los contactos del diodo. En [11] se da una descripción detallada del proceso de simulación del acoplamiento guía de onda – sensor, y en el apéndice A.4 se presenta un ejemplo de la rutina de programación.

### 5.2 Resultados del acoplamiento guía de onda - sensor

En la Fig. 5.2 (a) se muestra un diodo con topología estándar. Como se aprecia, la guía de onda se encuentra dentro de una cavidad, donde la altura de la guía y la profundidad de la cavidad ( $M$ ) son iguales. Además, se indica mediante una flecha amarilla la dirección de la luz emitida por el LEC. La unión PN está situada a la salida de la guía de onda, separados por una distancia  $S$ . El valor de  $S$  está limitado por la mínima dimensión de fabricación. En la estructura simulada se consideró una separación  $S = 10 \mu\text{m}$ . En la Fig. 5.2 (b) se observa la concentración de dopado en escala de colores. Rojo corresponde a las zonas con mayor concentración y morado a las

## 5. CIRCUITO FOTÓNICO INTEGRADO EN SILICIO

regiones de menor concentración. Una línea azul indica la profundidad de unión ( $x_j$ ), la cual tiene una profundidad similar a la cavidad.

En la Fig. 5.2 (c) se muestra la distribución de campo eléctrico en escala de colores para la segunda topología: un diodo planar acoplado a la guía de onda. Las regiones en rojo presentan la mayor intensidad de campo eléctrico ( $9 \times 10^5$  V/cm), mientras las regiones en morado corresponden a  $E = 0$  V/cm. Para esta topología, los electrodos del diodo quedan en la superficie del sustrato y la salida de la guía se encuentra frente a la región  $N^+$ . Como se puede ver, el puerto de salida está separado de la región de agotamiento a una distancia  $2S + C$ , siendo  $C$  la longitud del contacto. En la Fig. 5.2 (d) se muestra una gráfica de ancho de la región de agotamiento en función de la resistividad del sustrato y el voltaje de polarización del diodo. Al incrementar el voltaje de polarización se incrementa la región de agotamiento, sin embargo el aumento más pronunciado se observa cuando se utilizan sustratos de alta resistividad, donde anchos superiores a  $10 \mu\text{m}$  son obtenidos con voltajes de polarización menores a  $-10$  V.

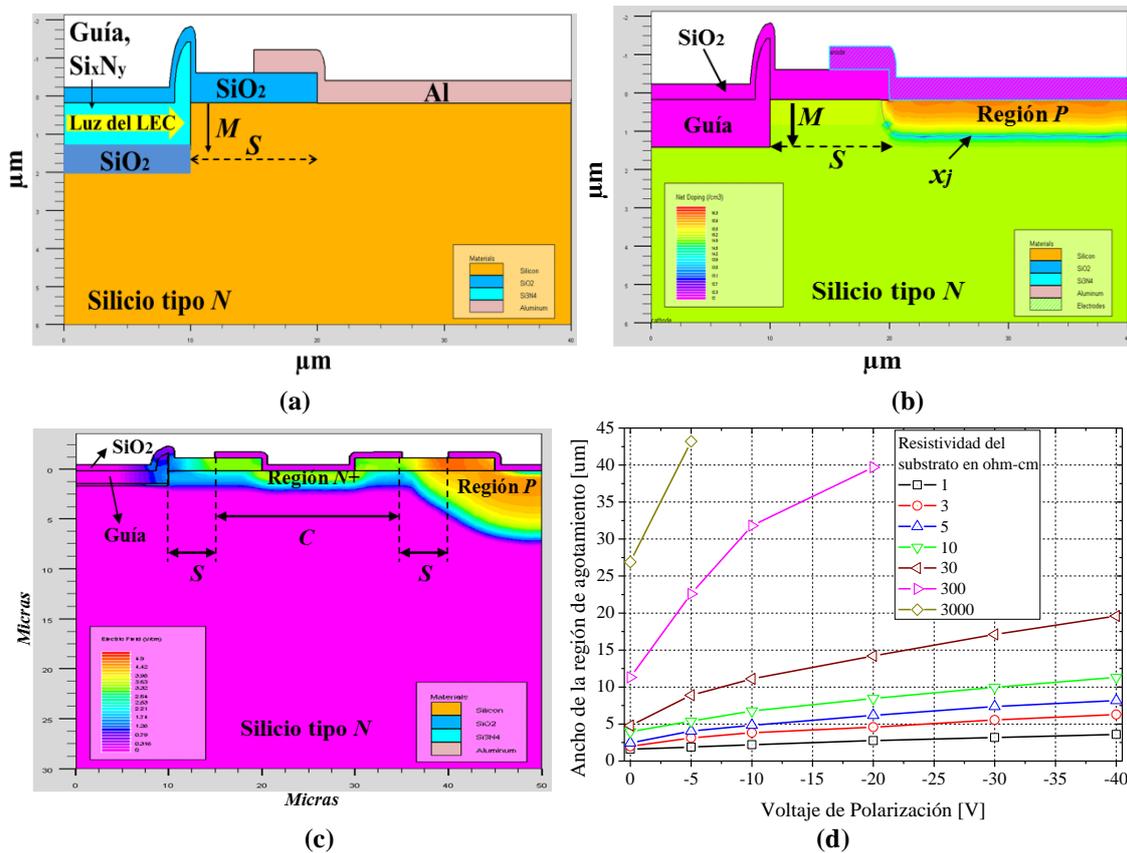
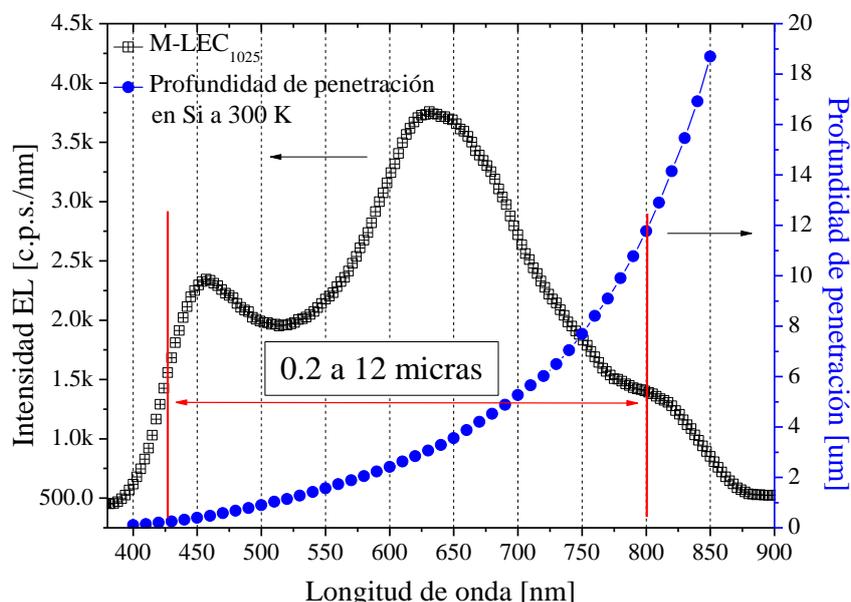


Figura 5.2. Sección transversal del acoplamiento guía de onda – diodo  $PN$ , para diodo con topologías (a) estándar con  $V_g=0$  y (b) planar con  $V_g=-10$ .  $M$ ,  $S$  y  $C$  son la profundidad de cavidad, separación entre la guía de onda y la unión  $PN$ , y la longitud del contacto, respectivamente.  $V_g$  es la polarización eléctrica que se aplica a la compuerta respecto al sustrato. (c) Distribución de campo eléctrico para un diodo planar acoplado a la guía de onda. Las regiones en rojo y morado corresponden a un  $E= 9 \times 10^5$  V/cm y  $E= 0$  V/cm. (d) Ancho de la región de carga espacial en función de la resistividad del sustrato y el voltaje de polarización eléctrica del diodo.

## 5. CIRCUITO FOTÓNICO INTEGRADO EN SILICIO

En la Fig. 5.3 se presenta la profundidad de penetración en silicio intrínseco a 300 K en función de la longitud de onda ( $\lambda$ ), y se superpone la respuesta electroluminiscente del dispositivo M-LEC<sub>1025</sub>. Fotones con una longitud de onda de 400 nm serán absorbidos rápidamente. Se requiere alrededor de 0.1  $\mu\text{m}$  de silicio para absorber estas longitudes. Por su parte, luz con una longitud de onda de 800 nm necesita una profundidad de absorción de 11.8  $\mu\text{m}$  [98]. En función de la luz emitida por el LEC, se requiere una profundidad de penetración de 0.2  $\mu\text{m}$  a 12  $\mu\text{m}$  para absorber fotones desde el azul hasta el infrarrojo cercano. Por tal motivo la región de agotamiento debe estar muy cerca a la salida de la guía de onda y extenderse lo suficiente para que todo el espectro contribuya a la fotocorriente.



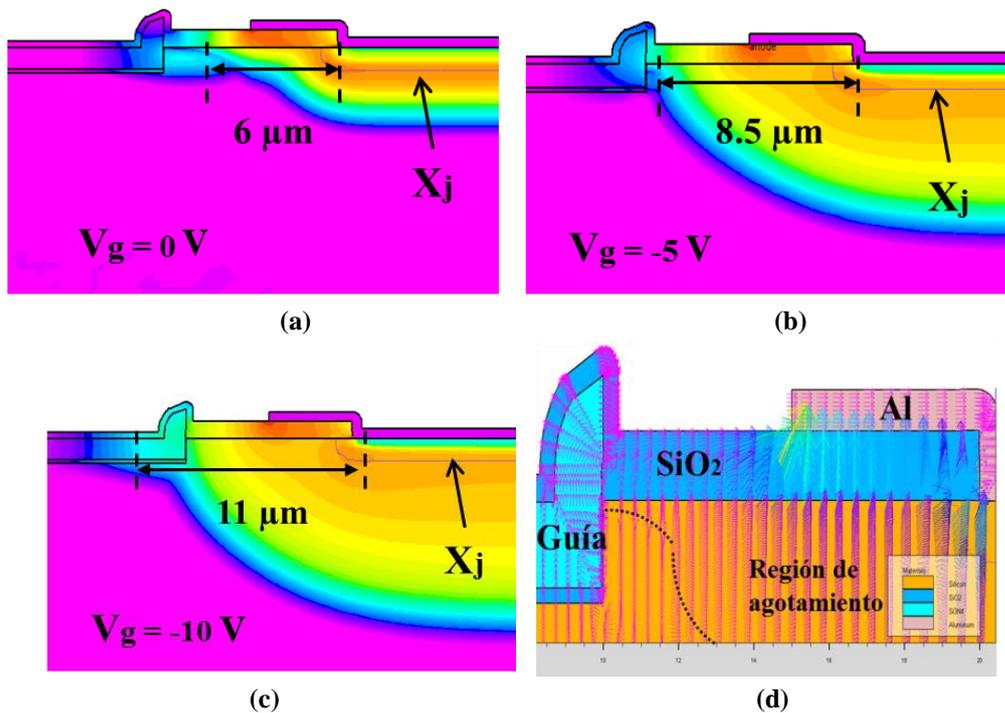
**Figura 5.3.** Gráfica de profundidad de penetración para silicio intrínseco a 300 K en función de la longitud de onda [98] y espectro de electroluminiscencia del dispositivo M-LEC<sub>1025</sub>.

En la Fig. 5.4 (a), (b) y (c) se observa el incremento del ancho de la región de carga espacial al polarizar un diodo planar. En esta simulación se utilizó un sustrato de Si con resistividad de 30  $\Omega \times \text{cm}$  y 120 min para re-difundir impurezas. En equilibrio térmico (Fig. 5.4 (a)) existe una separación de 4  $\mu\text{m}$  entre la salida de la guía de onda y la región sensible del sensor. Luz con  $\lambda > 670$  nm podría contribuir a la fotocorriente. Al polarizar el diodo con -5 V (Fig. 5.4 (b)) la separación entre la guía y la región de agotamiento se disminuye a 1.5  $\mu\text{m}$ , entonces fotones con  $\lambda > 550$  nm pueden contribuir a la fotocorriente. Finalmente, al polarizar el diodo con -10 V (Fig. 5.4 (c)), la región de agotamiento alcanza el puerto de salida de la guía de onda. En este caso, se puede suponer que cualquier fotón contribuirá a la fotocorriente. Con voltajes de polarización menores (-20 V, -30 V, etc.) la región de agotamiento rodeará parte de la guía.

En la Fig. 5.4 (d) se presenta un acercamiento a la región comprendida entre la salida de la guía y la región P. Las flechas y su tamaño indican la dirección y magnitud

## 5. CIRCUITO FOTÓNICO INTEGRADO EN SILICIO

del campo eléctrico. También se aprecia la región de agotamiento delimitada por una línea punteada. En este caso se utilizó un sustrato con resistividad de  $5 \Omega \times \text{cm}$  y una polarización del diodo de  $-40 \text{ V}$ . Si se genera un par electrón-hueco (e-h) dentro de la región de agotamiento, cada partícula será arrastrada en dirección contraria. La dirección del campo eléctrico es casi horizontal cerca de la guía y vertical al aproximarse a la interfaz Si/SiO<sub>2</sub>. Por tal razón, puede existir acumulación de portadores en la salida de la guía y efectos capacitivos entre sustrato y contacto.



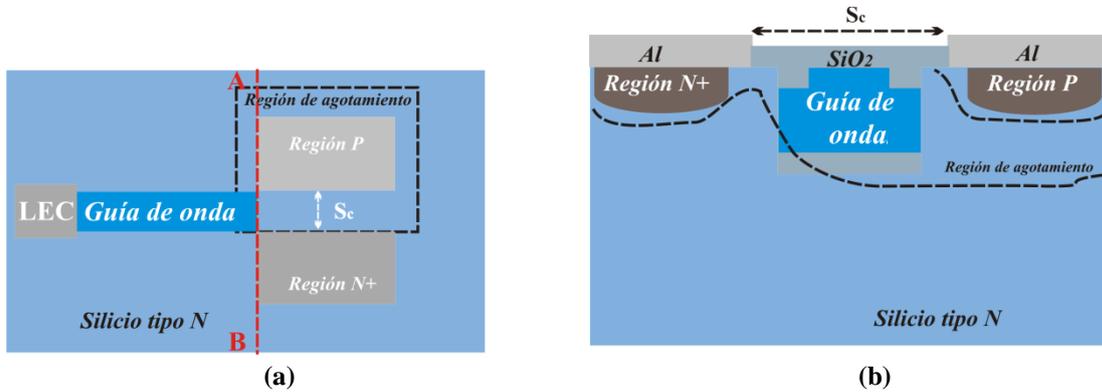
**Figura 5.4.** Escala de colores para el campo eléctrico ( $E$ ) dentro de la región de agotamiento cuando el diodo es polarizado con (a)  $V_g = 0 \text{ V}$ , (b)  $V_g = -5 \text{ V}$  y (c)  $V_g = -10 \text{ V}$ . Las regiones en rojo corresponden a la mayor magnitud, en azul a la menor magnitud y en morado a  $E = 0 \text{ V/m}$ . En estos casos se utilizó un sustrato con resistividad de  $30 \Omega \times \text{cm}$  y  $120 \text{ min}$  para re-difundir impurezas. La dirección y magnitud de  $E$  es representado por flechas para (d) un diodo estándar. En este casos se utilizó un sustrato de  $5 \Omega \times \text{cm}$  y  $V_g = -40 \text{ V}$ .

### 5.3. Topología propuesta

En la Fig. 5.5 (a) se esquematiza la vista superior del sistema emisor de luz, guía de onda y detector, considerando un acoplamiento guía – sensor denominado como topología mixta. Se utiliza un diodo planar y se coloca la guía perpendicular a la separación entre las regiones  $N+$  y  $P$ , definida como  $S_c$ . Además, la guía de onda es embebida dentro de la región de agotamiento. Para lograrlo, en la simulación primero se fabricó el pozo  $P$ , después se grabó la cavidad y finalmente se depositó el nitruro de

## 5. CIRCUITO FOTÓNICO INTEGRADO EN SILICIO

silicio (núcleo de la guía). De esta forma la luz azul podrá ser absorbida dentro de la región de agotamiento y contribuirá a la fotocorriente. En la Fig. 5.5 (b) se ilustra la sección transversal definida por la línea punteada A-B. Como se puede apreciar la guía de onda se fabrica en la separación  $S_c$  y su valor no estará limitado por la mínima dimensión de fabricación pues se podrán utilizar valores mayores a  $10\ \mu\text{m}$ .



**Figura 5.5.** (a) Vista superior del sistema emisor de luz (LEC), guía de onda y detector integrado monolíticamente. La guía de onda se encuentra embebida en la región de agotamiento y es perpendicular a la separación  $S_c$ . (b) Sección transversal de la región definida por la línea punteada A-B. Se observa que la salida de la guía de ondas encara directamente la región de agotamiento. Ambas figuras son de carácter ilustrativo.

Al utilizar la configuración antes descrita se evita la absorción ineficiente de luz, como en el caso mostrado en la Fig. 5.6 (a), donde una guía de onda acoplada con un diodo estándar y embebida en la región de agotamiento presenta una profundidad de cavidad ( $M_a$ ) similar a la profundidad de unión ( $X_j$ ). En consecuencia, toda la luz que salga de la guía incidirá en la región  $P$  y no habrá contribución a la fotocorriente.

Las dos alternativas para solucionar este inconveniente son: incrementar la profundidad de la cavidad en el acoplamiento guía-diodo planar o utilizar la topología mixta (Fig. 5.5). En la Fig. 5.6 (b) se observa el acoplamiento guía-diodo planar con una cavidad de  $3\ \mu\text{m}$  ( $M_b$ ). En este caso, la luz incide directamente en la región de agotamiento, por debajo de la profundidad de unión. Además, la orientación de campo eléctrico es adecuada para orientar los portadores directamente hacia los contactos. La segunda opción es utilizar una topología mixta. En la Fig. 5.6 (c) se observa la distribución de campo eléctrico para un diodo planar en equilibrio térmico. La región definida como  $S_a$  es la separación entre los electrodos. Como se puede observar en la Fig. 5.5 (b), es justo en esa zona donde incidirá la luz que salga de la guía de onda. Dentro de esta región el campo eléctrico es muy bajo. Sin embargo para un  $V_g = -10\ \text{V}$  la región de agotamiento se extiende hacia la región  $N+$ , ocupando la separación de los electrodos. Este efecto se puede observar en la Fig. 5.2 (c) donde la sección  $S$  presenta regiones en color amarillo – rojo ( $6 \times 10^4\ \text{V/cm}$ ). En la Fig. 5.6 (d) se observa la orientación y magnitud del campo eléctrico en la sección  $S_a$ . Las flechas en color blanco esquematizan la orientación del campo eléctrico. Debido a la topología planar, el campo eléctrico se orienta a  $\sim 25^\circ$  respecto a la horizontal. Al incrementar la profundidad (de

## 5. CIRCUITO FOTÓNICO INTEGRADO EN SILICIO

$M_1$  a  $M_3$ ) el campo eléctrico tiende a ser más horizontal. Entonces, los portadores serán dirigidos directamente a los contactos. De esta forma, se puede utilizar substratos de baja resistividad y bajos voltajes de polarización. Con esta configuración se puede pensar en incrementar el valor de  $S_c$  con la finalidad de fabricar más de una guía en la separación. Además, es posible eliminar la cavidad y fabricar la guía sobre la superficie, de tal manera que la detección de luz sea por campo evanescente [15] [16]. Aunado a esto, se puede agregar otro electrodo en la parte posterior de la oblea para modular la región de agotamiento. Con esta topología las opciones de detección se amplían.

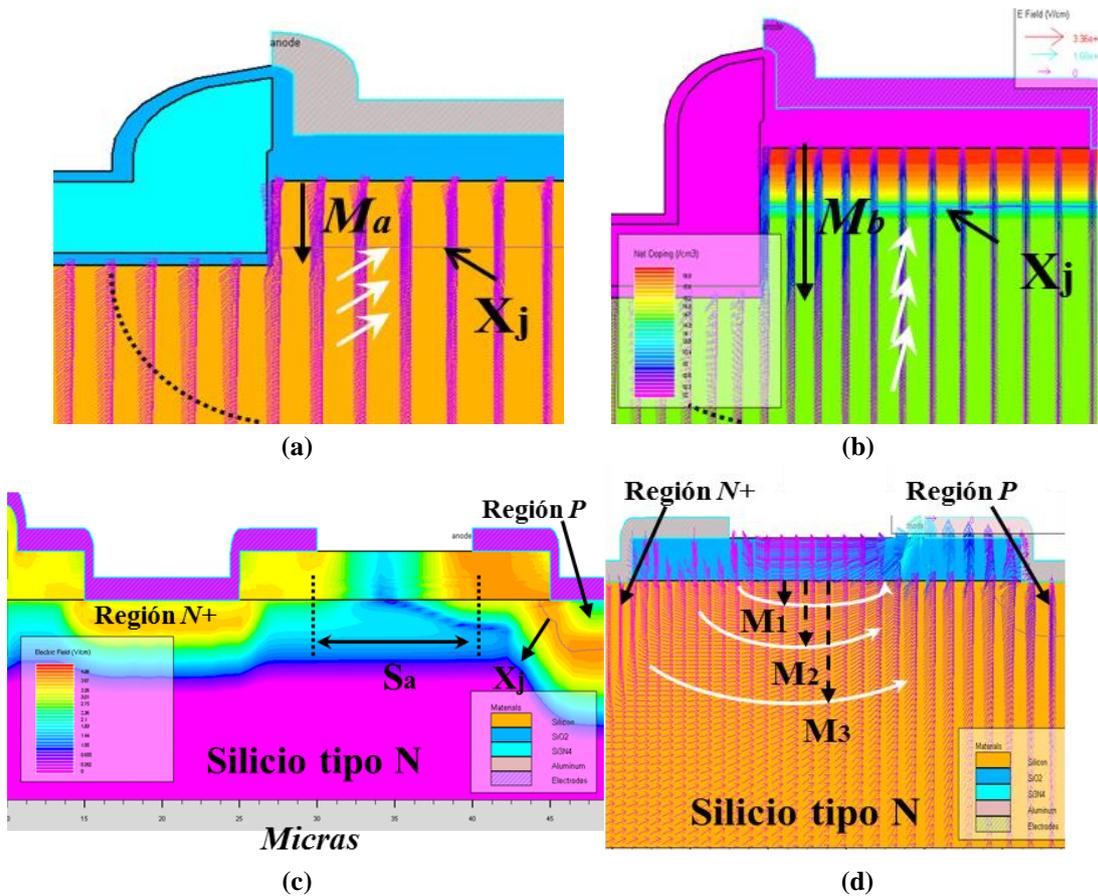
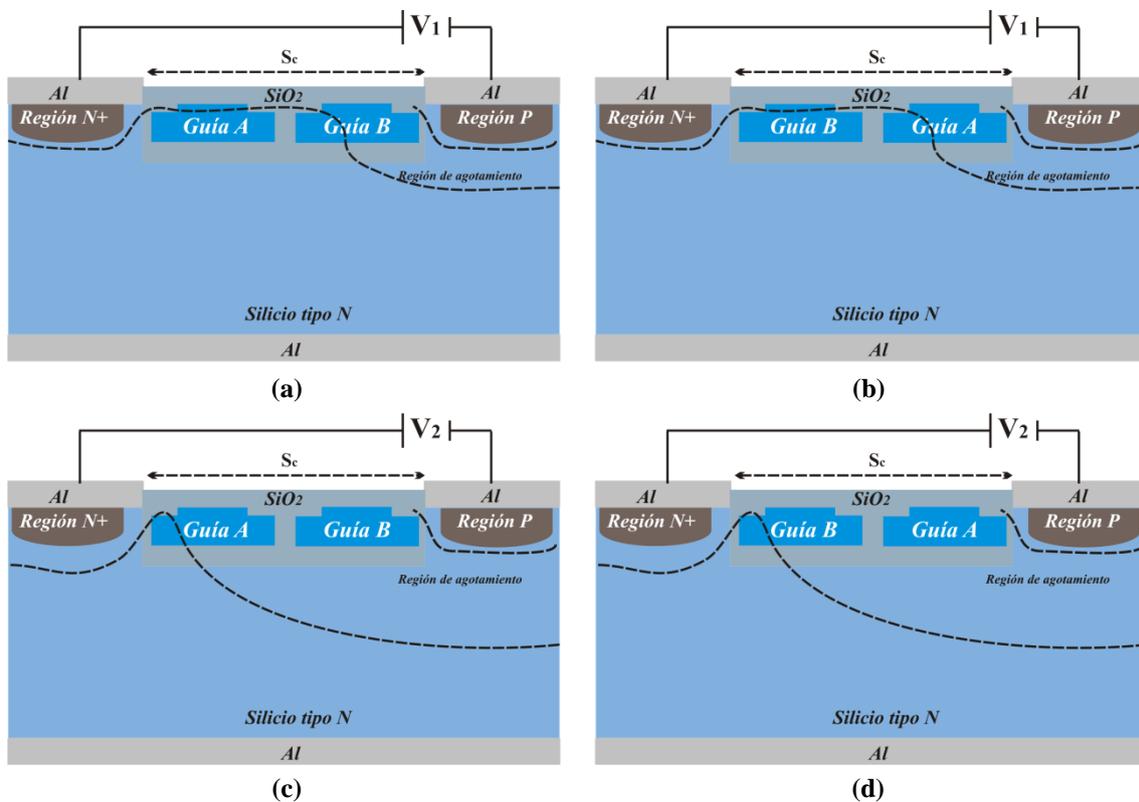


Figura 5.6. (a) un diodo con la guía embebida y cavidad de  $1.5 \mu\text{m}$ , y (b) un diodo con la guía embebida y cavidad de  $3 \mu\text{m}$ . En estos casos se utilizó un substrato de  $5 \Omega \times \text{cm}$  y  $V_g = -40 \text{ V}$ . (c) Sección transversal de un diodo planar con escala de colores para describir la magnitud de campo eléctrico. Las zonas en rojo se asocian con la mayor magnitud de  $E$ , las zonas azules con menor magnitud de  $E$  y las zonas moradas se relacionan con  $E = 0 \text{ V/m}$ . (b) Dirección y magnitud de campo eléctrico en la separación entre las regiones  $N^+$  y  $P$  cuando un diodo planar es polarizado con  $-10 \text{ V}$ . Las flechas blancas son ilustrativas de la orientación de  $E$  en el substrato.

Consideremos el ejemplo esquematizado en la Fig. 5.7. Se fabrica un diodo con una separación  $S_c$  que permita contener 2 guías de onda (A y B). La guía A utilizaría un  $\text{Si}_x\text{N}_y$  con  $R_N = 100$ , mientras la guía B utilizaría un nitruro de silicio con  $R_N = 120$ . La

## 5. CIRCUITO FOTÓNICO INTEGRADO EN SILICIO

guía A propagará mayormente luz roja y la guía B luz azul, como se demostró en la sección 3.3.3. Al polarizar el diodo se podrá modular el ancho de la región de agotamiento para que incluya una o ambas guías. Si además reproducimos esta celda básica alternando la posición de las guías, se podría detectar primero la luz roja o azul, dependiendo de la celda. De esta forma se pueden tener selectividad de la longitud de onda de detección y determinar la contribución de cada rango al espectro completo, sólo con modular el voltaje de polarización. En la Fig. 5.6 el diodo se polariza inversamente, siendo la magnitud de  $V_2$  mayor a  $V_1$ .



**Figura 5.7.** Esquemas de la sección transversal de la topología mixta con 2 guías de onda fabricadas en la separación  $S_c$ . (a) diodo polarizado con voltaje  $V_1$ , provocando la detección de la luz de la guía B. (b) Mismo sistema que en (a) pero alternando la posición de las guías. Con el mismo voltaje se detecta la luz de la guía A. (c) y (d) Polarización del diodo con  $V_2$ , produciendo que ambas guías sean embebidas por la región de agotamiento independiente a su posición. Todos los esquemas muestran una metodología para fabricar sistemas con selectividad de la longitud de onda de detección.

### 5.4. Conclusión

La topología mixta (ver Fig. 5.5) representa la mejor opción para fabricar el circuito fotónico integrado en silicio. Esta configuración permite obtener una región de carga espacial adecuada para la detección utilizando substratos de silicio de baja resistividad y bajos voltajes de polarización inversa. Así mismo, la guía de onda podrá colocarse dentro de una cavidad o sobre la superficie de silicio. La detección de luz puede realizarse por incidencia directa o campo evanescente, respectivamente. Ambos casos demuestran factibilidad en la detección. El uso de un tercer electrodo en la parte posterior del substrato permitiría modular la región de carga espacial para aumentar la detección. La separación entre electrodos ( $S_c$ ) podrá ser  $\geq 10 \mu\text{m}$ . Un  $S_c = 10 \mu\text{m}$  permitiría fabricar una guía onda, pero al incrementar esta separación se podría fabricar 2 o más guías. Esta posibilidad resulta factible al considerar los resultados de caracterización del diodo, donde se demostró que áreas  $< 0.8 \text{ mm}^2$  tienen mejor producción de fotocorriente por unidad de área. El diodo integrado más pequeño ( $A_T = 0.275 \text{ mm}^2$ ) permitiría fabricar fácilmente más de dos guías en el acoplamiento guía-sensor. Con el uso de varias guías se abre la posibilidad de tener un diodo con detección selectiva de  $\lambda$  en función del voltaje de polarización.

## 5. CIRCUITO FOTÓNICO INTEGRADO EN SILICIO

## Capítulo 6. Conclusiones y Trabajo Futuro

Se estudió un sistema emisor de luz – guía de onda – detector para ser integrado en un circuito fotónico en un sustrato de silicio monolítico. Cada elemento fue analizado individualmente para determinar las características más adecuadas en la integración del circuito fotónico.

El material activo del emisor de luz fue óxido de silicio rico en silicio (SRO). Se fabricaron dos tipos de emisores: capa simple y multicapa.

Los emisores de capa simple utilizaron SRO<sub>30</sub> y se optimizó la respuesta electroluminiscente a través del texturizado de la superficie del sustrato. La película de SRO<sub>30</sub> se caracterizó mediante elipsometría, fotoluminiscencia (PL) y espectroscopia infrarroja (FTIR) mostrando características esperadas. El emisor de luz (S-LEC<sub>T1</sub>) con un texturizado mediante RIE (rugosidad de  $(4.0 \pm 0.2)$  nm y densidad de pico  $(3.7 \pm 1.8) \times 10^{10}$  cm<sup>-2</sup>) demostró incrementar al doble la intensidad electroluminiscente (EL) y disminuir el campo eléctrico de encendido de la emisión ( $E_{enc}$ ) de 8.5 MV/cm a 7 MV/cm, respecto a dispositivos con sustrato pulido (S-LEC<sub>P</sub>). Un tercer emisor de luz con texturizado por grabado electroquímico (rugosidad de  $(20.9 \pm 10.3)$  nm y densidad de pico de  $(8.9 \pm 7.3) \times 10^9$  cm<sup>-2</sup>) presentó altas corrientes con bajos voltajes y se descartó su uso en el sistema integrado. El dispositivo S-LEC<sub>T1</sub> tuvo un rango de operación de 3 MV/cm y una eficiencia externa de  $64.1 \times 10^{-6}$  %, ambos valores superiores a los observados en el dispositivo S-LEC<sub>P</sub>.

Los emisores con multicapas utilizaron 3 capas emisoras (SRO<sub>25</sub>) alternadas con 4 capas conductoras (SRO<sub>5</sub> o SRO<sub>10</sub>). Las características morfológicas y ópticas de la multicapa de SRO se estudiaron mediante elipsometría, PL, FTIR y microscopía por transmisión de electrones (TEM). Capas nanométricas bien definidas de SRO se depositaron mediante LPCVD. Las multicapas demostraron preservar las características individuales de cada capa, de modo que la estructura exhibió una alta respuesta de luminiscencia y mejoró la conducción eléctrica a través de la multicapa. Se fabricaron dos emisores de luz: el primero alterno SRO<sub>5</sub> con SRO<sub>25</sub> (M-LEC<sub>525</sub>) y el segundo utilizó SRO<sub>10</sub> y SRO<sub>25</sub> (M-LEC<sub>1025</sub>). Ambos dispositivos tienen un campo eléctrico de encendido de 3 MV/cm, inferior a los 8.5 MV/cm y 7 MV/cm requeridos en los dispositivos S-LEC<sub>P</sub> y S-LEC<sub>T1</sub>. Además los M-LECs incrementaron la respuesta EL más de 10 veces respecto a dispositivos S-LECs. Asimismo, se mejoró el rango de operación a 6 MV/cm respecto a los 3 MV/cm presente en los dispositivos de capa simple. Sin embargo, su alto consumo eléctrico produjo que su eficiencia externa fuera de  $\sim 1 \times 10^{-6}$  %, menor al dispositivo S-LEC<sub>T1</sub>.

Todos los dispositivos exhibieron un espectro de EL de 400 nm a 850 nm. No obstante, los emisores con estructuras multicapa presentaron mayor intensidad de emisión en el azul ( $\sim 450$  nm) y, dependiendo de la capa conductora es posible modular

## 6. CONCLUSIONES

la emisión en el rojo (~700 nm). Debido a la mejor respuesta EL, se eligió el emisor de luz con estructura multicapa para la futura integración en el circuito fotónico.

La guía de onda se estudió mediante simulación y experimentalmente. En la simulación se utilizó nitruro de silicio (núcleo) y una geometría tipo costilla. Dicha estructura logró propagar luz confinada debajo de la costilla, demostrando condición multimodal con sólo variar la altura fraccional. Además probó propagar luz desde los 450 nm hasta los 750 nm, espectro similar el emitido por la fuente de luz.

Previo a la fabricación se caracterizaron películas de nitruro de silicio obtenidas por LPCVD. Las películas de nitruro de silicio ( $\text{Si}_x\text{N}_y$ ) se depositaron mediante LPCVD sobre sustrato de silicio modificando el  $R_N$  de 45 a 180. La caracterización del material se realizó a través de elipsometría, PL, FTIR, espectroscopia de rayos X (XPS), microscopia de fuerza atómica (AFM) y perfilometría. Películas con  $R_N$  entre 100 y 120 tuvieron las mejores características para su uso como núcleo de la guía. Ambos  $R_N$ 's producen películas estables con el tratamiento térmico, es decir, sin cambio substancial en la composición del material. Un  $\text{Si}_x\text{N}_y$  con  $R_N = 100$  produce películas con baja rugosidad (< 2 nm), transmitancia > 70 % en  $\lambda > 450$  nm y alto estrés residual. Películas con  $R_N = 120$  presentan mayor rugosidad (> 2 nm), transmitancia > 80 % en  $\lambda > 400$  nm y menor estrés residual. Con base en los resultados de simulación y caracterización del material se fabricaron guías de onda tipo costilla con diferente anchura y altura fraccional.

Se fabricaron tres tipos de guías de onda: dos tipos costilla y una tipo bloque, con anchos de guía de 3  $\mu\text{m}$  a 15  $\mu\text{m}$ . Las guías de onda se fabricaron utilizando películas de  $\text{Si}_x\text{N}_y$  con  $R_N = 100$  y 120, con espesor aproximado de 500 nm. Para evitar la propagación de luz hacia el sustrato se depositó un óxido grueso (1.5  $\mu\text{m}$ ) sobre el silicio, previo al depósito del nitruro de silicio. La sección transversal de la geometría y el tipo de guía se evidenció mediante imágenes de microscopia por barrido de electrones (SEM).

La propagación de luz dentro de la guía se estudió por acoplamiento en los extremos, utilizando luz azul (473 nm) y roja (633 nm). Con ambas longitudes de onda se propaga más de un modo, y todos confinados debajo de la costilla. Con el modo fundamental, se determinó el ancho de la costilla, obteniendo valores similares a los determinados por perfilometría. La guía de onda con  $R_N = 100$  propaga luz azul y roja, sin embargo con una  $\lambda = 473$  nm se obtuvieron valores de potencia óptica a la salida de algunos nW y no fue posible obtener las pérdidas por propagación. Con luz roja se determinó un coeficiente de atenuación de 11.06 dB/cm para un ancho de 5  $\mu\text{m}$ . La guía de onda con  $R_N = 120$  propaga luz azul y roja. En ambos casos, se pudo determinar el coeficiente de atenuación. La guía con menos pérdidas (ancho de 5  $\mu\text{m}$ ) obtuvo un coeficiente de atenuación de 11.06 dB/cm. El coeficiente de atenuación en función del ancho de guía sugirió que guías de onda con anchos de 5 a 10  $\mu\text{m}$  son las más adecuadas para integrarse en el circuito fotónico debido a la menor pérdida de propagación. Guías de onda con  $R_N = 100$  propagaran preferentemente luz roja,

## 6. CONCLUSIONES

mientras guías con  $R_N = 120$  transmitirá luz azul ( $R_N = 120$ ), favoreciendo el acoplamiento con los dispositivos M-LEC<sub>525</sub> o M-LEC<sub>1025</sub>, respectivamente.

Se estudiaron diodos *PN* con diferentes dimensiones (longitud y ancho) y se caracterizaron eléctricamente (caracterización corriente-voltaje). Se analizaron dos tipos de diodos: discretos e integrados. El diodo discreto era un elemento sin interacción con otro dispositivo. El diodo integrado está acoplado con una guía de onda. Se estudió la corriente de fuga en oscuridad y bajo iluminación. Menores magnitudes de corriente de fuga se midieron en diodos discretos, duplicando su valor en diodos integrados. Debido a esto la corriente fotogenerada es mayor en diodos discretos.

Se encontró que la fotocorriente es influenciada por efectos de borde y área. Los diodos integrados con menores dimensiones presentaron menor contribución por los efectos de borde y la fotocorriente tuvo la mayor aportación por unidad de área. Se estableció que diodos con área  $< 0.8 \text{ mm}^2$  tienen mejores características para ser utilizado en el circuito fotónico.

Por último, se analizó el acoplamiento guía – detector mediante simulación del proceso de fabricación y estimulación eléctrica del diodo. Se consideraron dos topologías para el diodo: estándar (no planar) y planar. Para determinar el mejor acoplamiento se estudió el campo eléctrico dentro de la región de carga espacial bajo diferentes condiciones de polarización. El mejor acoplamiento se obtuvo con el uso de un diodo planar y la guía ubicada entre los electrodos. Este acoplamiento se denominó topología mixta.

Una topología mixta permite el uso de sustratos de silicio de baja resistividad y bajos voltajes de polarización (aproximadamente -10 V) para la detección de luz. Esta configuración tiene la versatilidad de poder colocar la guía en una cavidad de silicio o sobre el sustrato para la detección por incidencia directa o campo evanescente, respectivamente. Además, permite colocar un tercer electrodo en la parte posterior de la oblea para modular la región de agotamiento y modular la detección al controlar el tamaño de la región de carga espacial mediante el voltaje aplicado.

### Trabajo Futuro

Diseñar las mascarillas para la fabricación del circuito fotónico integrado, considerando los resultados obtenidos en elementos discretos. En el diseño de la mascarilla se deberá incluir elementos discretos, acoplamiento entre dos dispositivos y el circuito fotónico integrado. Además se debe considerar la elaboración de circuitos fotónicos con varias guías de onda para estudiar la influencia en la detección. Finalmente, fabricar y caracterizar el circuito integrado y, con base en los resultados, proponer posibles aplicaciones.

## Referencias

- [1] Sasan Fathpour and Baharam Jalali, *Silicon Photonics for Telecommunications and Biomedicine*, Boca Raton FL: Taylor and Francis Group, 2012.
- [2] M. Aceves-Mijares, J.M. Ramírez, J. Pedraza, S. Román-López, C. Chávez, «Determination of heavy metals contamination using a silicon sensor with extended responsive to the UV,» *J. Phys.: Conf. Ser.* , vol. 421, p. 012016, 2013.
- [3] C. M. Estevez, M. Alvarez and L. M. Lechuga, «Integrated optical devices for lab-on-a-chip biosensing applications,» *Laser & Photon. Rev.*, vol. 6, pp. 463-487, 2012.
- [4] M. Carmen Estevez, A. Otte Marinus, B. Sepulveda and Laura M. Lechuga, «Trends and challenges of refractometric nanoplasmonic biosensors: A review,» *Anal. Chim. Acta*, vol. 806, nº 2, pp. 55-73, 2014.
- [5] R. A. Soref, «Silicon-Based Optoelectronics,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, nº 12, pp. 1687 - 1703, 1993.
- [6] L. Pavesi and D. J. Lockwood , «Silicon Photonics,» *Topics Appl. Phys.*, vol. 94, pp. 1-52, 2004.
- [7] D. J. Lockwood and J. Pavesi, «Silicon Photonics II,» *Topics Appl. Phys.*, vol. 119, pp. 1-29, 2011.
- [8] K. A. Ogudo, D. Schmieder, D. Foty and L. W. Snyman, «Optical propagation and refraction in silicon complementary metal–oxide–semiconductor structures at 750 nm: toward on-chip optical links and microphotonic systems,» *J. Micro/Nanolith MEMS MOEMS*, vol. 12, nº 1, p. 013015, 2013.
- [9] J. M. Ramírez, F. Ferrarese Lupi, Y. Berencén, A. Anopchenko, J. P. Colonna, O. Jambois, J. M. Fedeli, L. Pavesi, N. Prtljaga, P. Rivallin, A. Tengattini, D. Navarro-Urrios and B. Garrido, «Er-doped light emitting slot waveguides monolithically integrated in a silicon photonic chip,» *Nanotechnology*, vol. 24, p. 115202, 2013.
- [10] A. A. G. Fernández, «Studies and integration of Silicon-based light emitting systems,» Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain, 2014.
- [11] J. Alarcón-Salazar, I. E. Zaldívar-Huerta and M. Aceves-Mijares, «An optoelectronic circuit with a light source, an optical waveguide and a sensor all on silicon: Results and analysis of a novel system,» *Optics & Laser Technology*, vol. 84, pp. 40-47, 2016.
- [12] A. Z. Subramanian, P. Neutens, A. Dhakal, et al., «Low-Loss singlemode PECVD silicon nitride photonic wire waveguide for 532-900 nm wavelength window fabricated within a CMOS pilot line,» *Photonics J. IEEE*, vol. 5, nº 6, p. 2202809, 2013.
- [13] M. Aceves-Mijares, E. Gómez, A. Díaz-Méndez, J. M. Rocha, J. Pedraza, J. Alarcón-Salazar, S. Román-López, et al., «Conservation of the optical properties of the SRO after CMOS IC processing,» *Procedia Technol.*, vol. 17, pp. 587-594, 2014.

- [14] Marius E. Goosen, P. J. Venter, Monuko du Plessis, Ilse J. Nell, A. W. Bogalecki and P. Rademeyer, «High-speed CMOS optical communication using silicon light emitters,» *Proc. of SPIE*, vol. 7944, p. 79440X, 2011.
- [15] Donghwan Ahn, Ching.-yin. Hong, Lionel C. Kimerling, Jurgen Michel, «Coupling efficiency of monolithic waveguide-integrated Si photodetector,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, p. 081108, 2009.
- [16] A. A. González-Fernández, J. Juvert, M. Aceves-Mijares, C. Domínguez, «Monolithic Integration of a Silicon-Based Photonic Transceiver in a CMOS Process,» *Photonics J. IEEE*, vol. 8, n° 1, pp. 1-13, 2016.
- [17] L. T. Canham, «Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, p. 1046, 1990.
- [18] A. Morales, J. Barreto, C. Domínguez, M. Riera, M. Aceves and J. Carrillo, «Comparative study between silicon-rich oxide films obtained by LPCVD and PECVD,» *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 38, vol. 38, n° 1, pp. 54-58, 2007.
- [19] J. Barreto, M. Perálvarez, A. Morales, B. Garrido, J. Montserrat and C. Domínguez, «Broad range adjustable emission of stacked SiNx/SiOy layers,» *J. Mater. Res.*, vol. 23, n° 6, pp. 1513-1516, 2008.
- [20] A. A. González-Fernández, J. Juvert, A. Morales-Sánchez, J. Barreto, M. Aceves-Mijares and C. Domínguez, «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.*, vol. 111, p. 053109, 2012.
- [21] J. López-Vidrier, Y. Berencén, S. Hernández, O. Blázquez, S. Gutsch, J. Laube, D. Hiller, P. Loper, M. Schnabel, S. Janz, M. Zacharias and B. Garrido, «Charge transport and electroluminescence of silicon nanocrystals/SiO<sub>2</sub> superlattices,» *J. Appl. Phys.*, vol. 114, p. 163701, 2013.
- [22] E. Quiroga-González, W. Bensch, M. Aceves-Mijares, Z.Yu, R. López-Estopier and K. Monfil-Leyva, «On the photoluminescence of multilayer arrays of silicon rich oxide with high silicon content prepared by low pressure chemical vapor deposition,» *Thin Solid Films*, vol. 519, n° 22, pp. 8030-8036, 2011.
- [23] J M Ramírez, F Ferrarese Lupi, O Jambois, Y Berencén, D Navarro-Urrios, A Anopchenko, A Marconi, N Prljaga, A Tenggattini, L Pavesi, J P Colonna, J M Fedeli and B Garrido, «Erbium emission in MOS light emitting devices: From energy transfer to direct impact excitation,» *Nanotechnology*, vol. 23, p. 125203, 2012.
- [24] A. G. Rickman, G. T. Reed and F. Namavar, «Silicon-on-Insulator optical rib waveguide loss and mode,» *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, n° 10, pp. 1771-1776, 2010.
- [25] Adolfo C. Reyes, Samir M. El-Gjazaly, Steve J. Dorn, Michael Dydyk, Dieter, «Coplanar waveguides and microwave inductors on silicon substrates,» *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 43, n° 9, 1995.
- [26] N. Daldosso, M. Melchiorri, F. Riboli, F. Sbrana, L. Pavesi, G. Pucker, C. Kompocholis, M. Crivellari, P. Bellutti, A. Lui, «Fabrication and optical characterization of thin two-dimensional

- Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> waveguides,» *Mater. Sci. Semicon. Proc.*, vol. 7, p. 453 – 458, 2004.
- [27] T. Tamir, «Integrated Optics,» *Topics Appl. Phys.*, vol. 7, 1985.
- [28] S. M. Sze and Kwok K. Ng, *Physics of semiconductor devices*, New Jersey: John Wiley and Sons, 2007.
- [29] Shih-Hsiang Hsu, «Reflectively coupled waveguide photodetector for high speed optical interconnection,» *Sensor*, vol. 10, pp. 10863-10875, 2010.
- [30] Martijn J. R. Heck, Jared F. Bauters, Michael L. Davenport, Jonathan K. Doylend, Siddharth Jain, Geza Kurczveil, Sudharsanan Srinivasan, Yongbo Tang, and John E. Bowers, «Hybrid Silicon Photonic Integrated Circuit Technology,» *IEEE J. of selected topics in quantum electronics*, vol. 19, n° 4, 2013.
- [31] V. Craciun, C. Boulmer-Leborgne, E. J. Nicholls and I. W. Boyd, «Light emission from germanium nanoparticles formed by ultraviolet assisted oxidation of silicon-germanium,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, p. 1506, 1996.
- [32] J. Alarcón-Salazar, M. Aceves-Mijares, S. Román-López, C. Falcony, «Characterization and fabrication of SiO<sub>x</sub> nano-metric films, obtained by reactive sputtering,» de *9th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, México D.F., 2012.
- [33] J. Antonio Rodríguez, M. Antonio Vásquez-Agustín, A. Morales-Sánchez and M. Aceves-Mijares, «Emission mechanisms of Si nanocrystals and defects in SiO<sub>2</sub> materials,» *J. Nanomater.*, vol. 2014, p. 409482, 2014.
- [34] V. Vinciguerra, G. Franzò, F. Priolo, F. Iacona, and C. Spinella, «Quantum confinement and recombination dynamics in silicon nanocrystals embedded in Si/SiO<sub>2</sub> superlattices,» *J. Appl. Phys.*, vol. 87, p. 8165, 2000.
- [35] A. Irrera, D. Pacifici, M. Miritello, G. Franzò, F. Priolo, F. Iacona, D. Sanfilippo, G. Di Stefano, and P. G. Fallica, «Excitation and de-excitation properties of silicon quantum dots under electrical pumping,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, n° 10, p. 1866, 2002.
- [36] M. L. Brongersma, P. G. Kik, A. Polman, K. S. Min, and Harry A. Atwater, «Size-dependent electron-hole exchange interaction in Si nanocrystals,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, n° 3, p. 351, 2000.
- [37] P. F. Trwoga, A. J. Kenyon, and C. W. Pitt, «Modeling the contribution of quantum confinement to luminescence from silicon nanoclusters,» *J. Appl. Phys.*, vol. 83, n° 7, pp. 3789 - 3794, 1998.
- [38] J. Juvert, A. A. González-Fernández, A. Morales-Sánchez, J. Barreto, M. Aceves, A. Llobera and C. Domínguez, «DC electroluminescence efficiency of silicon rich silicon oxide light emitting capacitors,» *J. of Lightwave Tech.*, vol. 31, n° 17, pp. 2913-2918, 2013.
- [39] M. Sopinsky and V. Khomchenko, «Electroluminescence in SiO<sub>x</sub> films and SiO<sub>x</sub>-film-based system,» *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 7, pp. 97-109, 2003.
- [40] A Morales-Sánchez, K Monfil-Leyva, AA González, M Aceves-Mijares, J Carrillo, JA Luna-

- López, C Domínguez, J Barreto, FJ Flores-Gracia, «Strong blue and red luminescence in silicon nanoparticles based light emitting capacitors,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, nº 17, p. 171102, 2011.
- [41] A. Anopchenko, A. Marconi, E. Moser, S. Prezioso, M. Wang, L. Pavesi, G. Pucker and P. Bellutti, «Low-voltage onset of electroluminescence in nanocrystalline-Si/SiO<sub>2</sub>/Si/SiO<sub>2</sub> multilayers,» *J. Appl. Phys.*, vol. 106, p. 033104, 2009.
- [42] Gong-Ru Lin, Chun-Jung Lin, and Chi-Kuan Lin, «Enhanced Fowler-Nordheim tunneling effect in nanocrystallite Si based LED with interfacial Si nano-pyramids,» *Optics Express*, vol. 15, nº 5, pp. 2555-2563, 2007.
- [43] M. Aceves-Mijares, A. A. González-Fernández, R. López-Estopier, A. Luna-López, D. Berman-Mendoza, A. Morales, C. Falcony, C. Domínguez and R. Murphy-Arteaga, «On the Origin of Light Emission in Silicon Rich Oxide Obtained by Low-Pressure Chemical Vapor Deposition,» *J. Nanomater.*, vol. 2012, p. 890701, 2012.
- [44] J. Alarcón-Salazar, R. López-Estopier, E. Quiroga-González, A. Morales-Sánchez, J. Pedraza-Chávez, I. E. Zaldívar-Huerta and M. Aceves-Mijares, «Silicon-Rich Oxide Obtained by Low-Pressure Chemical Vapor Deposition to Develop Silicon Light Sources,» de *Chemical Vapor Deposition - Recent Advances and Applications in Optical, Solar Cells and Solid State Devices*, North Carolina A&T State University, USA, InTech, 2016.
- [45] P. G. Pai, S. S. Chao, Y. Takagi and G. Lucovsky, «Infrared spectroscopy study of SiO<sub>x</sub> films produced by plasma enhanced chemical vapor deposition,» *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 4, nº 3, pp. 689-694, 1986.
- [46] N. Tomozeiu, «Silicon Oxide (SiO<sub>x</sub>, 0<x<2): a Challenging Material for Optoelectronics,» de *Optoelectronics - Materials and Techniques*, InTech, 2011, pp. 55-98.
- [47] F. Ay and A. Aydinli, «Comparative investigation of hydrogen bonding in silicon based PECVD grown dielectrics for optical waveguides,» *Opt. Mater.*, vol. 26, nº 1, pp. 33-46, 2004.
- [48] J. Alarcón-Salazar, I. E. Zaldívar-Huerta and M. Aceves-Mijares, «Electrical and electroluminescent characterization of nanometric multilayers of SiO<sub>x</sub>/SiO<sub>y</sub> obtained by LPCVD including non-normal emission,» *J. Apply. Phys.*, vol. 119, nº 21, p. 215101, 2016.
- [49] Y.-P. Zhao, J. T. Drotar, G.-C. Wang, and T.-M. Lu, «Morphology transition during low-pressure chemical vapor deposition,» *Phys. Rev. Lett.*, vol. 87, nº 13, 2001.
- [50] H. O. Pierson, *Handbook of chemical vapor deposition (CVD): Principles, technology, and applications*, New Jersey, USA: Noyes Publications, 1999.
- [51] F.-C. Chiu, «A Review on Conduction Mechanisms in Dielectric Films,» *Adv. in Mat. Sci. and Engineering*, vol. 2014, nº 578168, p. 18, 2014.
- [52] Y. Berencén, J. M. Ramírez, O. Jambois, C. Domínguez, J. A. Rodríguez and B. Garrido, «Correlation between charge transport and electroluminescence properties of Si-rich oxide/nitride/oxide-based light emitting capacitors,» *J. Appl. Phys.*, vol. 112, p. 033114, 2012.
- [53] H. Fujiwara, *Spectroscopy Ellipsometry: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, 2003.

- [54] D. K. Schroder, *Semiconductor material and device characterization*, John Wiley & Sons, 1998.
- [55] TEK.COM, «Datasheet,» [En línea]. Available: <http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/media/resources/1KW-60780-0-4200A-SCS-ParameterAnalyzer-Datasheet.pdf>. [Último acceso: 24 Agosto 2016].
- [56] Photoconduction in silicon rich oxide films obtained by low pressure chemical vapor, «Photoconduction in silicon rich oxide films obtained by low pressure chemical vapor,» *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 28, n° 2, pp. 170-174, 2010.
- [57] R. López-Estopier, M. Aceves-Mijares and C. Falcony, «Cathodo- and Photo- Luminescence of Silicon Rich Oxide Films Obtained by LPCVD,» de *Cathodoluminescence*, InTech, 2012, pp. 253 - 272.
- [58] G. Hollinger and F. J. Himpsel, «Probing the transition layer at the SiO<sub>2</sub>-Si interface using core level photoemission,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 44, n° 1, pp. 93-95, 1984.
- [59] Ragnar Kiebach, Mariano Aceves-Mijares, Zhenrui Yu, Karim Monfil, Jacobus Willibrordus Swart and Guilherme Osvaldo Dias, «Self Assembly of Silicon Nanoislands on Crystalline Silicon Under a Photoactive Layer,» *Smart Nanocomposites*, vol. 1, n° 1, pp. 31-39, 2010.
- [60] E. Quiroga, W. Bensch, Z. Yu, M. Aceves, R. A. De Souza, M. Martin, V. Zaporojtchenko and F. Faupel, «Structural characteristics of a multilayer of silicon rich oxide (SRO) with high Si content prepared by LPCVD,» *Phys. Status Solidi A*, vol. 206, n° 2, pp. 263-269, 2009.
- [61] J. A. Luna-López, A. Morales-Sánchez, M. Aceves-Mijares, Z. Yu and C. Domínguez, «Analysis of surface roughness and its relationship with photoluminescence properties of silicon-rich oxide films,» *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 27, n° 1, pp. 57-62, 2009.
- [62] M. Zacharias, J. Heitmann, R. Scholz, U. Kahler, M. Schmidt, and J. Blasing, «Size-controlled highly luminescent silicon nanocrystals: A SiO/SiO<sub>2</sub> superlattice approach,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, p. 661, 2002.
- [63] L. Pavesi, L. Dal Negro, Ca. Mazzoleni, G. Franzo, F. Priolo, «Optical gain in silicon nanocrystals,» *Nature*, vol. 408, n° 6811, pp. 440-444, 2000.
- [64] Z. Yu, M. Aceves, and J. Carrillo, « New experimental observations of single electron trapping properties of Si nanoclusters in SRO obtained by LPCVD,» *Sci. Semicon. Proc*, vol. 7, pp. 45 - 50, 2004.
- [65] I. Crupi, S. Lombardo, C. Spinella, C. Bongiorno, Y. Liao, C. Gerardi, B. Fazio, M. Vulpio, and S. Privitera, «Electrical and structural characterization of metal-oxide-semiconductor capacitors with silicon rich oxide,» *J. Appl. Phys.*, vol. 89, p. 5552, 2001.
- [66] C. Y. Ng, T. P. Chen, L. Ding, Y. Liu, M. S. Tse, S. Fung, and Z. L. Dong, «Static dielectric constant of isolated silicon nanocrystals embedded in a SiO<sub>2</sub> thin film,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, p. 063103, 2006.
- [67] D. N. Kouvatso, V. Ioannou-Sougliridis, and A. G. Nassiopoulou, «Charging effects in silicon nanocrystals within SiO<sub>2</sub> layers, fabricated by chemical vapor deposition, oxidation, and

- annealing,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, p. 397, 2003.
- [68] A. A. González Fernández, M. Aceves Mijares, A. Morales Sánchez and K. M. Leyva, «Intense whole area electroluminescence from low pressure chemical vapor deposition-silicon-rich oxide based light emitting capacitors,» *J. Appl. Phys.*, vol. 108, p. 043105, 2010.
- [69] A. Morales-Sánchez, J. Barreto, C. Domínguez, M. Aceves and J. A. Luna-López, «The mechanism of electrical annihilation of conductive paths and charge trapping in silicon-rich oxides,» *Nanotechnology*, vol. 20, p. 045201, 2009.
- [70] A. Morales-Sánchez, J. Barreto, C. Domínguez, M. Aceves-Mijares, M. Perálvarez, B. Garrido and J. A. Luna-López, «DC and AC electroluminescence in silicon nanoparticles embedded in silicon-rich oxide films,» *Nanotechnology*, vol. 21, p. 085710, 2010.
- [71] J. Yao, L. Zhong, D. Natelson, and J. M. Tour, «In situ imaging of the conducting filament in a silicon oxide resistive switch,» *Sci. Rep.*, vol. 2, p. 242, 2012.
- [72] S.-W. Fu, H.-J. Chen, H.-T. Wu, and C.-F. Shih, «Effect of SiO<sub>2</sub> layers on electroluminescence from Si nanocrystal/SiO<sub>2</sub> superlattices prepared using argon ion beam assisted sputtering,» *Vacuum*, vol. 126, pp. 59-62, 2016.
- [73] Roushdey Salh, «Defect Related Luminescence in Silicon Dioxide Network: A Review,» de *Crystalline Silicon - Properties and Uses*, InTech, 2011, pp. 135-172.
- [74] J. Alarcón-Salazar, M. A. Vásquez-Agustín, E. Quiroga-González, I. E. Zaldívar-Huerta and M. Aceves-Mijares, «Poly-Si/SiO<sub>x</sub>/p-Si MOS-like devices with enhanced light emission through ionic roughening of the substrate's surface,» *submitted to Optics Express*, 2017.
- [75] Cheng C. H., Wu C. L., Chen C. C., Tsai L. H., Lin Y. H. and Lin G. R., «Si-Rich SixC1-x Light-Emitting Diodes With Buried Si Quantum Dots,» *IEEE Photonics J.*, vol. 4, n° 5, p. 1761, 2012.
- [76] R. A. Soref and J. P. Lorenzo, «Single-crystal silicon: a new material for 1.3 and 1.6 μm integrated-optical components,» *Electronics Letters*, vol. 21, n° 21, pp. 953 - 954, 1985.
- [77] F. Prieto, A. Llobera, D. Jimenez, C. Domenguez, A. Calle and L.M. Lechuga, «Design and analysis of silicon antiresonant reflecting optical waveguides for evanescent field sensor,» *J. of lightwave Tech.*, vol. 18, n° 7, 2000.
- [78] D. Peters and J. Muller, «Integrated optical devices with silicon oxynitride prepared by PECVD on Si and GaAs substrates,» *Proc. SPIE*, vol. 1362, p. 338 – 349, 1990.
- [79] M. Modreanu, N. Tomozeiu, P. Cosmin, M. Gartner, «Physical-optical properties of LPCVD amorphous silicon rich-nitride and oxynitride,» *Proc. of International Semiconductor Conference CAS*, 1998.
- [80] P. Temple-Boyer, C. Rossi, E. Saint-Etienne and E. Scheid, «Residual stress in low pressure chemical vapor deposition SiN<sub>x</sub> films deposited from silane and ammonia,» *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 16, n° 4, 1998.
- [81] J. Alarcón-Salazar, I. E. Zaldívar-Huerta and M. Aceves-Mijares, «Influence of residual stress on

- optical waveguides applied to biosensors,» de *X congreso Iberoamericano de Sensores*, Valparaiso Chile, 2016.
- [82] J. Alarcón-Salazar, I. E. Zaldívar-Huerta, M. Aceves-Mijares, «Design and simulation of an optical waveguide for its integration with a light source based on SRO,» *Proc. of SPIE*, vol. 8980, 2014.
- [83] L. Novotny and B. Hecht, *Principles of Nano-Optics*, New York: Cambridge University Press, 2006.
- [84] R. N. Vela, *Líneas de Transmisión*, México, D.F.: McGRAW - HILL, 1999.
- [85] H. Kogelnik and V. Ramaswamy, «Scaling Rules for Thin-Film Optical Waveguides,» *Appl. Opt.*, vol. 13, n° 8, pp. 1857 - 1862, 1974.
- [86] R. A. Soref, J. Schmidtchen and K. Petermann, «Large single-mode rib waveguide in GeSi-Si and Si-on-SiO<sub>2</sub>,» *J. Quantum Electron.*, vol. 27, n° 8, pp. 1971-1974, 1991.
- [87] William Wenceslao Hernández Montero, *Diseño y Fabricación de Guías de Onda Ópticas con Películas de Silicio-Germanio Amorfo*, Tesis de Maestría, Tonantzintla, Puebla: INAOE, 2011.
- [88] P. K. Tien and R. Ulrich, «Theory of Prism-Film Coupler and Thin-Film Light Guides,» *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 60, p. 1325, 1970.
- [89] P. D. Townsend, P. J. Chandler and L. Zhang, *Optical effects of ion implantation*, Cambridge University Press, 1994.
- [90] S. A. Cabañas-Tay, L. Palacios-Huerta, J. A. Luna-López, M. Aceves-Mijares, S. Alcántara-Iniesta, S. A. Pérez-García and A. Morales-Sánchez, «Analysis of the luminescent centers in silicon rich silicon nitride light-emitting capacitors,» *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 30, n° 6, 2015.
- [91] Yuzhen Liu, Yuqin Zhou, Wanquan Shi, Lingli Zhao, Baoyin Sun, Tianchun Ye, «Study of photoluminescence spectra of Si-rich SiN<sub>x</sub> films,» *Materials Letters*, vol. 58, pp. 2397-2400, 2004.
- [92] L. V. Mercaldo, E. M. Esposito, P. Delli Veneri, G. Fameli, S. Mirabella and G. Nicotra, «First and second order Raman scattering in Si nanostructures within silicon nitride,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, p. 153112, 2010.
- [93] Paihing Pan and Wayne Berry, «The composition and physical properties of LPCVD silicon nitride deposited with different NH<sub>3</sub>/SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> gas ratios,» *J. Electrochem. Soc.: Solid-State Science and Technology*, 1985.
- [94] F. Flores-García, J. Carrillo-López and M. Aceves-Mijares, «Study of stress-related vacancy generation in silicon due to silicon nitride films,» *Rev. Mex. Fís.*, vol. 45, n° 2, pp. 156-162, 1999.
- [95] N. Daldosso, M. Melchiorri, F. Riboli, F. Sbrana, L. Pavesi, G. Pucker, C. Kompocholis, M. Crivellari, P. Bellutti, A. Lui, «Fabrication and optical characterization of thin two-dimensional Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> waveguides,» *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 7, pp. 453-458, 2004.
- [96] Stanley Wolf and Richard N. Tauber, *Silicon Processing for the VLSI Era*, Volumen 1, Sunsent Beach, California: Lattice Press, 1986.

- [97] W. Shockley, «The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors,» *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 28, p. 435, 1949.
- [98] M. A. Green, «Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients,» *Sol. Energ. Mat. Sol. Cells*, vol. 92, pp. 1305-1310, 2008.
- [99] L. Spallino, L. Vaccaro, L. Sciortino, S. Agnello, G. Buscarino, M. Cannas and F. Mario Gelardi, «Visible-ultraviolet vibronic emission of silica nanoparticles,» *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 16, pp. 22028-22034, 2014.
- [100] Michel OS Dantas, Elisabete Galeazzo, Henrique EM Peres, Maycon M Kopelvski, Francisco J Ramirez-Fernandez, «Silicon Field-Emission Devices Fabricated Using the Hydrogen Implantation–Porous Silicon (HI–PS) Micromachining Technique,» *J. of Microelectromechanical Systems*, vol. 17, n° 5, pp. 1263-1269, 2008.
- [101] Chung-Lun Wu and Gong-Ru Lin, «Power Gain Modeling of Si Quantum Dots Embedded in a SiO<sub>x</sub> Waveguide Amplifier With Inhomogeneous Broadened Spontaneous Emission,» *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 19, n° 5, 2013.

## Lista de Publicaciones

### A. Capítulo de libro

1. **J. Alarcón-Salazar**, R. López-Estopier, E. Quiroga-González, A. Morales-Sánchez, J. Pedraza-Chávez, I. E. Zaldívar-Huerta and M. Aceves-Mijares, “*Silicon-Rich Oxide Obtained by Low-Pressure Chemical Vapor Deposition to Develop Silicon Light Sources*”, Book: Chemical Vapor Deposition - Recent Advances and Applications in Optical, Solar Cells and Solid State Devices (2016), Dr. Sudheer Neralla (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/63012.

### B. Artículos en revista

1. **J. Alarcón-Salazar**, I. E. Zaldívar-Huerta, M. Aceves-Mijares, “*An optoelectronic circuit with a light source, an optical waveguide and a sensor all on silicon: Results and analysis of a novel system*”, Optics & Laser Technology 86, 40-47 (2016). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.04.013>
2. **J. Alarcón-Salazar**, I. E. Zaldívar-Huerta and M. Aceves-Mijares, “*Electrical and Electroluminescent characterization of nanometric multilayers of SiO<sub>x</sub>/SiO<sub>y</sub> obtained by LPCVD including non-normal emission*”, J. Appl. Phys. 119, 215101 (2016). DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4952730>
3. **J. Alarcón-Salazar**, I. E. Zaldívar-Huerta, A. Morales-Sánchez, C. Domínguez and M. Aceves-Mijares, “*Impact of the structural characteristics on the performance of light emitting capacitors using nanometric SRO multilayers fabricated by LPCVD*”, Procedia Technology 168 (2016), 1098 –1101. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.352>
4. **J. Alarcón-Salazar**, M. A. Vásquez-Agustin, E. Quiroga-González, I. E. Zaldívar-Huerta and M. Aceves-Mijares, “*Poly-Si/SiO<sub>x</sub>/p-Si MOS-like devices with enhanced light emission through ionic roughening of the substrate’s surface*”, Submitted to Optical Express.

### C. Extenso en congreso internacional

1. **J. Alarcón-Salazar**, I. E. Zaldívar-Huerta, M. Aceves-Mijares, “*Design and simulation of an optical waveguide for its integration with a light source based on SRO*”, Proc. SPIE 8980, Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXII, 89801T (March 7, 2014); DOI: [10.1117/12.2037153](https://doi.org/10.1117/12.2037153)

2. **J. Alarcón-Salazar**, M. Aceves-Mijares, I. E. Zaldívar-Huerta and Jorge Pedraza, “*Design and simulation of an integrated waveguide and sensor: towards a complete optoelectronic circuit on silicon*”, Proceedings of IBERSENSOR 2014, IEEE data base. DOI: [10.1109/IBERSENSOR.2014.6995545](https://doi.org/10.1109/IBERSENSOR.2014.6995545)
3. **J. Alarcón-Salazar**, M. A. Vázquez-A., E. Quiroga-González, I. E. Zaldívar-Huerta and M. Aceves-Mijares, “*Analysis of light emitters SRO-based to be integrated on all-silicon optoelectronic circuits*”, 12th Conference on Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), 2016, IEEE data base. DOI [10.1109/PRIME.2016.7519496](https://doi.org/10.1109/PRIME.2016.7519496)

#### **D. Poster en congreso internacional**

1. **J. Alarcón-Salazar**, I. E. Zaldívar-Huerta and M. Aceves-Mijares, “*Influence of residual stress on optical waveguides applied to biosensors*”, X Congreso Iberoamericano de Sensores (IBERSENSOR) 2016, Valparaiso, Chile.

#### **E. Presentación oral congreso nacional**

1. **J. Alarcón-Salazar**, I. E. Zaldívar-Huerta and M. Aceves-Mijares, “*Electrical and Electroluminescent characterization of non-normal emission of multilayers SiO<sub>x</sub>/SiO<sub>y</sub> obtained by LPCVD*”, XXIV International Material Research Congress (IMRS) 2015, Cancún, México.

## Apéndices

### A.1. Proceso de fabricación para LEC de capa simple

1. Selección de muestras  $S_p, S_{T1}, S_{T2}, S_{p-TT}, S_{T1-TT}, S_{T2-TT}, S-LEC_p, S-LEC_{T1}, S-LEC_{T2}$ 
  - a. Substrato de Si, tipo P, (100) y  $\rho = 2 - 4 \Omega\text{-cm}$
2. Limpieza estándar
  - a. 10 min en TCE sobre vibrador
  - b. 10 min en Acetona sobre vibrador
  - c. 3 enjuagues en agua DI.
  - d. 10 s en sol. 7:1
  - e. 3 enjuagues en agua DI.
  - f. Secado en centrifuga
3. Texturizado 1 – RIE  $S_{T1}, S_{T1-TT}, S-LEC_{T1}$ 
  - a. Proporción 7 a 3 de Ar/SF<sub>6</sub>
  - b. Potencia: 300 W
  - c. Tiempo: 1 min
4. Texturizado 2 – Grabado electroquímico  $S_{T2}, S_{T2-TT}, S-LEC_{T2}$ 
  - a. Rampa de 3 a 23 mA en 30s
5. Limpieza estándar *Todas*
  - a. Mismo procedimiento al punto 2
6. Depósito de SRO<sub>30</sub> – LPCVD
  - a.  $P_{\text{base}} < 6 \times 10^{-2}$  torr
  - b. Temperatura: 736 °C      Diales: 750 / 625 / 720
  - c.  $P_{\text{SiH}_4} = 0.95$  torr       $F_{\text{SiH}_4} = 2.65$  slpm (5.2)<sup>1</sup>
  - d.  $P_{\text{N}_2\text{O}} = 0.84$  torr       $F_{\text{SiH}_4} = 5.1$  slpm
  - e. Tiempo: 22 min      ~ 70 nm
7. Tratamiento térmico – Horno de silisuros  $S_{p-TT}, S_{T1-TT}, S_{T2-TT}, S-LEC_p, S-LEC_{T1}, S-LEC_{T2}$ 
  - a. Temperatura: 1100 °C      Diales: 1100 / 1100 / 1100
  - b.  $F_{\text{N}_2} = 150$  s. s.<sup>2</sup>
  - c. Tiempo: 120 min
8. Depósito de Poly – LPCVD  $S-LEC_p, S-LEC_{T1}, S-LEC_{T2}$ 
  - a.  $P_{\text{base}} < 6 \times 10^{-2}$  torr
  - b. Temperatura: 650 °C      Diales: 730 / 515 / 700
  - c.  $P_{\text{SiH}_4} = 1.5$  torr       $F_{\text{SiH}_4} = 3.45$  slpm
  - d. Tiempo: 20 min
9. Dopado de Poly – SOD  $S-LEC_p, S-LEC_{T1}, S-LEC_{T2}$ 
  - a. Aplicar 1 ml de SOD - #509 a 2000 RPM por 60 s
  - b. Recocido a 110 °C por 15 min       $F_{\text{N}_2} = 30$  s.s.
  - c. Redifusión a 1000 °C por 15 min
    - i. Horno de difusión      Diales: 991 / 1005 / 1011
    - ii.  $F_{\text{N}_2} = 30$  s.s. +  $F_{\text{O}_2} = 15$  s.s.
10. Remoción de vidrio de fósforo  $S-LEC_p, S-LEC_{T1}, S-LEC_{T2}$ 
  - a. Sumergir en Sol. 7:1 hasta observar hidrofobia
  - b. 3 enjuagues en agua DI.
  - c. Secado en centrifuga

<sup>1</sup> Valor en slpm (del inglés, *Standard Litre Per Minute*) corresponde a esfera de metal y valor entre paréntesis a esfera de vidrio.

<sup>2</sup>S. S. del inglés *Steel Sphere*

11. Oxidación de Poly – Horno de silisuros *S-LEC<sub>p</sub>, S-LEC<sub>T1</sub>, S-LEC<sub>T2</sub>*
  - a. Temperatura: 1100 °C    Diales: 1100 / 1100 / 1100
  - b.  $F_{O_2} = 44$  s.s.
  - c. Tiempo: 20 min
12. Litografía de compuerta *S-LEC<sub>p</sub>, S-LEC<sub>T1</sub>, S-LEC<sub>T2</sub>*
  - a. Aplicación resina +AZ 1512
    - i. 0 a 4000 RPM (5 s), 4000 RPM (30 s) y 4000 a 0 RPM (5 s)
    - ii. Pre-cocido 95 °C en parrilla por 50 s
  - b. Exposición      15 seg                      Mascarilla de compuerta
  - c. Revelado
    - i. Revelador AZ 326 miF
    - ii. 10 s + 2 Agua DI. 15 s cada una
    - iii. Secado en flujo laminar
  - d. Recocido            110 °C en parrilla por 3 min
13. Grabado de óxido enmascarante *S-LEC<sub>p</sub>, S-LEC<sub>T1</sub>, S-LEC<sub>T2</sub>*
  - a. Sumergir en sol. 7:1 hasta observar hidrofobia
  - b. 3 enjuagues en agua DI.
14. Decapado de resina – compuerta *S-LEC<sub>p</sub>, S-LEC<sub>T1</sub>, S-LEC<sub>T2</sub>*
  - a. 2 limpiezas en acetona 5 min sobre vibrador
  - b. 3 enjuagues en agua DI.
15. Grabado de Poly – calles *S-LEC<sub>p</sub>, S-LEC<sub>T1</sub>, S-LEC<sub>T2</sub>*
  - a. Sumergir en KOH a Temperatura ambiente
  - b. Periodos de 15 s hasta observar hidrofilia
  - c. 3 enjuagues en agua DI.
16. Grabado de óxido de compuerta *S-LEC<sub>p</sub>, S-LEC<sub>T1</sub>, S-LEC<sub>T2</sub>*
  - a. Sumergir en sol. 7:1 hasta observar hidrofobia
  - b. 3 enjuagues en agua DI.
  - c. Secado en centrifuga
17. Contacto posterior de aluminio *S-LEC<sub>p</sub>, S-LEC<sub>T1</sub>, S-LEC<sub>T2</sub>*
  - a. Grabado de óxido nativo con cotonete cara no pulida
  - b. Depósito de Al                      ~0.6  $\mu\text{m}$
18. Aleación en *forming gas* *S-LEC<sub>p</sub>, S-LEC<sub>T1</sub>, S-LEC<sub>T2</sub>*
  - a.  $F_{N_2} = 60$  s.s.      +       $F_{H_2} = 40$  s.s.
  - b. Temperatura 460 °C
  - c. Tiempo: 20 min

FIN

## A.2. Proceso de fabricación para LEC con multicapas de SRO

1. Selección de muestras *S<sub>25</sub>-TT, M<sub>525</sub>, M<sub>1025</sub>, M<sub>525</sub>-TT, M<sub>1025</sub>-TT, M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>*
  - a. Substrato de Si, tipo P, (100) y  $\rho = 2 - 4 \Omega\text{-cm}$
2. Limpieza estándar *Todas*
  - a. 10 min en TCE sobre vibrador
  - b. 10 min en Acetona sobre vibrador
  - c. 3 enjuagues en agua DI.
  - d. 10 s en sol. 7:1
  - e. 3 enjuagues en agua DI.
  - f. Secado en centrifuga
3. Depósito multicapa 5/25 – LPCVD *M<sub>525</sub>, M<sub>525</sub>-TT, M-LEC<sub>525</sub>*
  - a.  $P_{\text{base}} < 6 \times 10^{-2}$  torr
  - b. Temperatura: 736 °C      Diales: 750 / 625 / 720
  - c. Establecer condiciones
    - i. SRO 5
      1.  $P_{\text{SiH}_4} = 0.97$  torr       $F_{\text{SiH}_4} = 2.6$  slpm (5.1)
      2.  $P_{\text{N}_2\text{O}} = 0.2$  torr       $F_{\text{N}_2\text{O}} = 1.5$  slpm (3.1)      ROTAMETRO 1
    - ii. SRO 25
      1.  $P_{\text{SiH}_4} = 0.97$  torr       $F_{\text{SiH}_4} = 2.6$  slpm (5.1)
      2.  $P_{\text{N}_2\text{O}} = 0.74$  torr       $F_{\text{N}_2\text{O}} = 4.5$  slpm      ROTAMETRO 2
  - d. Procedimiento de depósito
    - i. 5 min extracción y estabilización térmica
    - ii. SRO 5      2 min
    - iii. 5 min extracción y estabilización térmica
    - iv. SRO 25      8 min
    - v. 5 min extracción y estabilización térmica
    - vi. SRO 5      2 min
    - vii. 5 min extracción y estabilización térmica
    - viii. SRO 25      8 min
    - ix. 5 min extracción y estabilización térmica
    - x. SRO 5      2 min
    - xi. 5 min extracción y estabilización térmica
    - xii. SRO 25      8 min
    - xiii. 5 min extracción y estabilización térmica
    - xiv. SRO 5      2 min.
4. Depósito multicapa 10/25 – LPCVD *M<sub>1025</sub>, M<sub>1025</sub>-TT, M-LEC<sub>1025</sub>*
  - a.  $P_{\text{base}} < 6 \times 10^{-2}$  torr
  - b. Temperatura: 736 °C      Diales: 750 / 625 / 720
  - c. Establecer condiciones
    - i. SRO 10
      1.  $P_{\text{SiH}_4} = 0.97$  torr       $F_{\text{SiH}_4} = 2.6$  slpm (5.1)
      2.  $P_{\text{N}_2\text{O}} = 0.3$  torr       $F_{\text{N}_2\text{O}} = 2$  slpm (3.9)      ROTAMETRO 1
    - ii. SRO 25
      1.  $P_{\text{SiH}_4} = 0.97$  torr       $F_{\text{SiH}_4} = 2.6$  slpm (5.1)
      2.  $P_{\text{N}_2\text{O}} = 0.74$  torr       $F_{\text{N}_2\text{O}} = 4.5$  slpm      ROTAMETRO 2
  - d. Procedimiento de depósito
    - i. 5 min extracción y estabilización térmica
    - ii. SRO 10      2 min
    - iii. 5 min extracción y estabilización térmica

- iv. SRO 25            8 min
  - v. 5 min extracción y estabilización térmica
  - vi. SRO 10            2 min
  - vii. 5 min extracción y estabilización térmica
  - viii. SRO 25           8 min
  - ix. 5 min extracción y estabilización térmica
  - x. SRO 10            2 min
  - xi. 5 min extracción y estabilización térmica
  - xii. SRO 25           8 min
  - xiii. 5 min extracción y estabilización térmica
  - xiv. SRO 10           2 min
5. Depósito capa SRO 25 – LPCVD *S<sub>25</sub>-TT*
- a.  $P_{\text{base}} < 6 \times 10^{-2}$  torr
  - b. Temperatura: 736 °C      Diales: 750 / 625 / 720
  - c.  $P_{\text{SiH}_4} = 0.97$  torr       $F_{\text{SiH}_4} = 2.6$  slpm (5.1)
  - d.  $P_{\text{N}_2\text{O}} = 0.74$  torr       $F_{\text{SiH}_4} = 4.5$  slpm
  - e. Tiempo: 8 min
6. Tratamiento térmico – Horno de silisuros *S<sub>25</sub>-TT, M<sub>525</sub>-TT, M<sub>1025</sub>-TT, M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>*
- a. Temperatura: 1100 °C      Diales: 1100 / 1100 / 1100
  - b.  $F_{\text{N}_2} = 150$  s. s.
  - c. Tiempo: 120 min
7. Depósito de Poly – LPCVD *M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>*
- a.  $P_{\text{base}} < 6 \times 10^{-2}$  torr
  - b. Temperatura: 650 °C      Diales: 730 / 515 / 700
  - c.  $P_{\text{SiH}_4} = 1.5$  torr       $F_{\text{SiH}_4} = 3.45$  slpm
  - d. Tiempo: 20 min
8. Dopado de Poly – SOD *M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>*
- a. Aplicar 1 ml de SOD - #509 a 2000 RPM por 60 s
  - b. Recocido a 110 °C por 15 min       $F_{\text{N}_2} = 30$  s.s.
  - c. Redifusión a 1000 °C por 15 min
    - i. Horno de difusión      Diales: 991 / 1005 / 1011
    - ii.  $F_{\text{N}_2} = 30$  s.s.      +       $F_{\text{O}_2} = 15$  s.s.
9. Remoción de vidrio de fósforo *M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>*
- a. Sumergir en Sol. 7:1 hasta observar hidrofobia
  - b. 3 enjuagues en agua DI.
  - c. Secado en centrifuga
10. Oxidación de Poly – Horno de silisuros *M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>*
- a.  $P_{\text{base}} < 6 \times 10^{-2}$  torr
  - b. Temperatura: 1100 °C      Diales: 1100 / 1100 / 1100
  - c.  $F_{\text{O}_2} = 44$  s.s.
  - d. Tiempo: 20 min
11. Litografía de compuerta *M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>*
- a. Aplicación resina +AZ 1512
    - i. 0 a 4000 RPM (5 s), 4000 RPM (30 s) y 4000 a 0 RPM (5 s)
    - ii. Pre-cocido 95 °C en parrilla por 50 s
  - b. Exposición      15 seg      Mascarilla de compuerta
  - c. Revelado
    - i. Revelador AZ 326 miF
    - ii. 10 s + 2 Agua DI. 15 s cada una
    - iii. Secado en flujo laminar

- d. Recocido 110 °C en parrilla por 3 min
12. Grabado de óxido enmascarante *M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>*
- a. Sumergir en sol. 7:1 hasta observar hidrofobia
- b. 3 enjuagues en agua DI.
13. Decapado de resina – compuerta *M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>*
- a. 2 limpiezas en acetona 5 min sobre vibrador
- b. 3 enjuagues en agua DI.
14. Grabado de Poly – calles *M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>*
- a. Sumergir en KOH a Temperatura ambiente
- b. Periodos de 15 s hasta observar hidrofilia
- c. 3 enjuagues en agua DI.
15. Grabado de óxido de compuerta *M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>*
- a. Sumergir en sol. 7:1 hasta observar hidrofobia
- b. 3 enjuagues en agua DI.
- c. Secado en centrifuga
16. Contacto posterior de aluminio *M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>*
- a. Grabado de óxido nativo con cotonete cara no pulida
- b. Depósito de Al ~0.6 μm
17. Aleación en forming gas *M-LEC<sub>525</sub>, M-LEC<sub>1025</sub>*
- a.  $F_{N_2} = 60$  s.s. +  $F_{H_2} = 40$  s.s.
- b. Temperatura 460 °C
- c. Tiempo: 20 min

FIN

### A.3. Guía de onda óptica

1. Selección de muestras  $N_{100}, NQ_{100}, N_{120}, NQ_{120}, B_{100}, B_{100-TT}, BP_{100}, BP_{100-TT}, B_{120}, B_{120-TT}, BP_{120}, BP_{120-TT}, W_{100-TT-1}, W_{100-TT-2}, W_{100-TT-3}, W_{120-TT-1}, W_{120-TT-2}, W_{120-TT-3}$ 
  - a. Substrato de Si, tipo P, (100) y resistividad media
  - b. Dos cuarzos  $NQ_{100}$  y  $NQ_{120}$
2. Limpieza estándar *Todas*
  - a. 10 min en TCE sobre vibrador
  - b. 10 min en Acetona sobre vibrador
  - c. 3 enjuagues en agua DI.
  - d. 10 s en sol. 7:1
  - e. 3 enjuagues en agua DI.
  - f. Secado en centrifuga
3. RCAs  $B_{100}, B_{100-TT}, BP_{100}, BP_{100-TT}, B_{120}, B_{120-TT}, BP_{120}, BP_{120-TT}$ 
  - a. RCA 1 Agua DI.+  $NH_4OH + H_2O_2$
  - b. 3 enjuagues en agua DI.
  - c. RCA 2 Agua DI. +  $H_2O_2 + HCl$
  - d. 3 enjuagues en agua DI.
  - e. Super Q hasta superar 17  $M\Omega$
  - f. Centrifuga
4. Crecimiento de óxido  $B_{100}, B_{100-TT}, BP_{100}, BP_{100-TT}, B_{120}, B_{120-TT}, BP_{120}, BP_{120-TT}$ 
  - a. Oxidación Húmeda
  - b. Temperatura: 1050 °C Diales: 1032 / 1045 / 1031
  - c. Tiempo: 180 min  $\sim 1 \mu m$
5. Depósito de óxido  $W_{100-TT-1}, W_{100-TT-2}, W_{100-TT-3}, W_{120-TT-1}, W_{120-TT-2}, W_{120-TT-3}$ 
  - a. Silox (APCVD)
  - b. Condiciones estándar (consultar al técnico Pablo Alarcón)
  - c. Tiempo: 26 min  $\sim 1.5 \mu m$
6. Densificado  $W_{100-TT-1}, W_{100-TT-2}, W_{100-TT-3}, W_{120-TT-1}, W_{120-TT-2}, W_{120-TT-3}$ 
  - a. Horno de silisuros
  - b. Temperatura: 1050 °C Diales: 1050 / 1050 / 1050
  - c. Tiempo: 30 min  $F_{N_2} = 80$  s.s.
7. Depósito SRN con  $R_N = 100$  – LPCVD  $N_{100}, NQ_{100}, B_{100}, B_{100-TT}, BP_{100}, BP_{100-TT}, W_{100-TT-1}, W_{100-TT-2}, W_{100-TT-3}$ 
  - a.  $P_{base} < 6 \times 10^{-2}$  torr
  - b. Temperatura: 760 °C Diales: 780 / 655 / 750
  - c.  $P_{SiH_4} = 0.97$  torr  $F_{SiH_4} = 2.6$  slpm (5.1)
  - d.  $P_{N_2O} = 2.9$  torr  $F_{N_2O} = 3.05$  slpm
  - e. Tiempo = 145 min
8. Depósito SRN con  $R_N = 120$  – LPCVD  $N_{120}, NQ_{120}, B_{120}, B_{120-TT}, BP_{120}, BP_{120-TT}, W_{120-TT-1}, W_{120-TT-2}, W_{120-TT-3}$ 
  - a.  $P_{base} < 6 \times 10^{-2}$  torr
  - b. Temperatura: 760 °C Diales: 780 / 655 / 750
  - c.  $P_{SiH_4} = 0.71$  torr  $F_{SiH_4} = 2.3$  slpm (4.4)
  - d.  $P_{N_2O} = 2.5$  torr  $F_{N_2O} = 2.85$  slpm
  - e. Tiempo = 84 min
9. Litografía  $W_{100-TT-1}, W_{100-TT-2}, W_{100-TT-3}, W_{120-TT-1}, W_{120-TT-2}, W_{120-TT-3}$ 
  - a. Mascarilla de William
  - b. Promotor de adherencia
    - i. 15 min en horno de convección a 110 °C

- ii. Aplicar PRIME 0 a 3000 RPM (5 s), 3000 RPM (30 s), 3000 a 0 RPM (5 s)
  - c. Aplicar resina + 1225
    - i. 0 a 3000 RPM (12 s), 3000 RPM (30 s), 3000 a 0 RPM (5 s)
    - ii. Pre-cocido 10 min en horno de convección a 85 °C
  - d. Exposición 5 s
  - e. Revelado
    - i. 30 s (15 s en 2 etapas) + 2 aguas DI. 15 s cada una
    - ii. Secado en flujo laminar
  - f. Recocido 10 min en horno de convección a 85 °C
- 10. Grabado de SRN con  $R_N = 100$  – Micro RIE  $W_{100-TT-1}$ ,  $W_{100-TT-2}$ ,  $W_{100-TT-3}$ 
  - a. Gas:  $CF_4$  Potencia: 200 W Presión: 300 mT
  - b. Tiempo 1: 4.5 min  $W_{100-TT-1}$
  - c. Tiempo 2: 11 min  $W_{100-TT-2}$
  - d. Tiempo 3: 17.5 min  $W_{100-TT-3}$
- 11. Grabado de SRN con  $R_N = 120$  – Micro RIE  $W_{120-TT-1}$ ,  $W_{120-TT-2}$ ,  $W_{120-TT-3}$ 
  - a. Gas:  $CF_4$  Potencia: 200 W Presión: 300 mT
  - b. Tiempo 1: 3.5 min  $W_{120-TT-1}$
  - c. Tiempo 2: 9 min  $W_{120-TT-2}$
  - d. Tiempo 3: 14.5 min  $W_{120-TT-3}$
- 12. Decapado de resina  $W_{100-TT-1}$ ,  $W_{100-TT-2}$ ,  $W_{100-TT-3}$ ,  $W_{120-TT-1}$ ,  $W_{120-TT-2}$ ,  $W_{120-TT-3}$ 
  - a. 2 limpiezas en acetona 5 min sobre vibrador
  - b. 3 enjuagues en agua DI.
  - c. Secado en flujo laminar
- 13. Tratamiento térmico – Horno de silisuros  $NQ_{100}$ ,  $NQ_{120}$ ,  $B_{100-TT}$ ,  $BP_{100-TT}$ ,  $B_{120-TT}$ ,  $BP_{120-TT}$ ,  $W_{100-TT-1}$ ,  $W_{100-TT-2}$ ,  $W_{100-TT-3}$ ,  $W_{120-TT-1}$ ,  $W_{120-TT-2}$ ,  $W_{120-TT-3}$ 
  - a. Temperatura: 1100 °C Diales: 1100 / 1100 / 1100
  - b.  $F_{N_2} = 150$  s. s.
  - c. Tiempo: 120 min

FIN

#### A.4. Rutina de programación: acoplamiento guía de onda - sensor

Este programa es una rutina para la simulación de fabricación del acoplamiento guía de onda – sensor, así como la simulación de estimulación eléctrica al sensor. En la simulación se considera un sustrato tipo N con concentración de  $1 \times 10^{15}$  [ $\text{cm}^{-2}$ ], una cavidad de silicio de  $1.25 \mu\text{m}$ , un pre-depósito de 20 min a  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  en la etapa de difusión, una redifusión a  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  por 30 min, análisis del diodo en equilibrio térmico y análisis del diodo con una polarización de  $-10 \text{ V}$ .

```
go athena

#Simulación acoplamiento WG -PD

line x loc=0.0 spacing=1
line x loc=15.0 spacing=0.5
line x loc=40.0 spacing=1

line y loc=0.0 spacing=0.04
line y loc=1.0 spacing=0.05
line y loc=3.0 spacing=0.1
line y loc=6.0 spacing=0.5

#Definimos material a utilizar
init silicon c.phosphor=1e15 orientation=100 two.d

#Crecimiento de óxido enmascarante para cavidad de silicio
diffuse time=40 temp=1050 weto2 press=0.78
extract name="Tox" thickness oxide mat.ocno=1 x.val=0

#Apertura cavidad
etch oxide left p1.x=10

#Grabado de silicio
etch silicon thick=1.25

#Depósito de Nitruro de silicio – núcleo de la guía
deposit nitride thick=1.25 divisions=15

#Grabado de nitruro de silicio
etch nitride right p1.x=10

#Óxido de campo y recubrimiento
deposit oxide thick=0.4 temp=760

#Apertura ventana de óxido
etch oxide right p1.x=20

#pre depósito - difusión térmica
#Fabricación de pozo P (Unión PN)
method fermi
diffuse time=20 temp=1000 dryo2 press=0.78 c.boron=3e21
extract name="xj" xj material="Silicon" mat.ocno=1 x.val=30 junc.ocno=1
extract name="Tox" thickness oxide mat.ocno=1 x.val=30

#redifusión
method fermi
diffuse time=30 temp=1100 f.n2=1.68 f.o2=0.18 press=0.78
extract name="xj" xj material="Silicon" mat.ocno=1 x.val=30 junc.ocno=1

#Remoción de óxido dopado
etch oxide right p1.x=20
```

```
#Depósito de aluminio
deposit alumin thick=0.6 divisions=10

#Grabado de aluminio
etch alumin left p1.x=15

#Etiquetado de electrodos
electrode name=anode x=30
electrode name=cathode backside
struct outfile=fotod1.str
tonyplot fotod1.str

go atlas

#inicializamos estructura
init infile=fotod1.str

#Análisis para equilibrio térmico
solve init
log outfile=PNequi.log master
output e.field flowlines jx.el jy.el jx.ho jy.ho j.disp
output con.band val.band

save outfile=fotod2.str
tonyplot fotod2.str

#Análisis para polarización de -10 V
solve Vanode=-10
log outfile=pnpoldir.log
output e.field flowlines jx.el jy.el jx.ho jy.ho j.disp
output con.band val.band

save outfile=fotod3.str
tonyplot fotod3.str
```