

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



---

**Maestría en Ciencias  
en Nanociencias**

---

**Diseño, fabricación y caracterización de guías de onda ópticas  
de óxido de zinc**

Tesis  
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Bibiana Sánchez Luis**

Ensenada, Baja California, México  
2023

Tesis defendida por  
**Bibiana Sánchez Luis**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Eder Germán Lizárraga Medina**  
Codirector de tesis

---

**Dr. Hugo Jesús Tiznado Vázquez**  
Codirector de tesis

**Dr. Heriberto Márquez Becerra**

**Dr. Jonathan Guerrero Sánchez**

**Dr. Erick Romero Sánchez**



---

**Dra. Catalina López Bastidas**  
Coordinadora del Posgrado en Nanociencias

---

**Dra. Ana Denise Re Araujo**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Bibiana Sánchez Luis** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Nanociencias.

### **Diseño, fabricación y caracterización de guías de onda ópticas de óxido de zinc**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Eder Germán Lizárraga Medina  
**Codirector de tesis**

---

Dr. Hugo Jesús Tiznado Vázquez  
**Codirector de tesis**

La óptica integrada considera la incorporación y miniaturización de dispositivos ópticos en sustratos de circuitos compactos, las guías de onda son uno de los componentes ópticos más importantes. El óxido de zinc ha sido investigado como núcleo de guías de onda ópticas debido a su alto índice de refracción, amplia banda prohibida, buena estabilidad físico-química y bajo costo comercial. En este trabajo se presenta un estudio teórico y experimental de guías de onda ópticas de óxido de zinc, sintetizadas por la técnica de depósito por capa atómica (ALD), donde se fabricaron guías de onda de ZnO con 260 nm, 500 nm, 560 nm y 780 nm de espesor de núcleo. Las propiedades fisicoquímicas y ópticas del núcleo se caracterizaron por diversas técnicas, la composición elemental por medio de espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS), la estructura cristalina y tamaño de grano por difracción de rayos X (XRD), la rugosidad por microscopía de fuerza atómica (AFM), las constantes ópticas y espesor por elipsometría, la transmitancia y absorbancia por espectrofotometría. El análisis y simulación de las guías de onda de ZnO se realizó para una longitud de onda de 632.8 nm, en particular, la medición de los índices de refracción efectivos de los modos de propagación de las guías de onda se realizó por la técnica de acoplamiento por prisma, la distribución de intensidad de los modos propagados por la técnica de acoplamiento fibra-guía y finalmente, las pérdidas de propagación de luz se midieron por el método de reducción (cutback). Los resultados indican que las muestras son policristalinas con defectos de oxígeno, también que el tamaño de grano y rugosidad aumentaban con el espesor. El núcleo presenta un índice de refracción de 1.99 y una transmitancia por encima del 80%. Se obtuvieron pérdidas de propagación de 8 dB/cm para la guía de 260 nm y 12 dB/cm para la guía de 560 nm, las guías de 500 y 780 nm solo se midieron cualitativamente. Los valores de las pérdidas de propagación se atribuyen al esparcimiento de la luz ocasionadas por los defectos cristalinos y a la absorción del material.

**Palabras clave:** óxido de zinc, guías de onda ópticas, depósito por capa atómica.

Abstract of the thesis presented by **Bibiana Sánchez Luis** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Nanosciencies.

### **Design, fabrication and characterization of zinc oxide optical waveguides**

Abstract approved by:

---

Dr. Eder Germán Lizárraga Medina  
**Thesis Director**

---

Dr. Hugo Jesús Tiznado Vázquez  
**Thesis Director**

Integrated optics studies the incorporation and miniaturization of optical devices in compact circuit substrates, waveguides are among the most important components. Zinc oxide (ZnO) was studied as a core of optical waveguides, due to its high refractive index, wide band gap, physicochemical stability, and commercial inexpensiveness. In this work, a theoretical and experimental study of planar waveguides based on ZnO films synthesized by the atomic layer deposition (ALD) technique is presented, ZnO waveguides of 260, 500, 560 and 780 nm core thickness were fabricated. The physicochemical and optical properties of the core was characterized, chemical composition was obtained by means of X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), crystalline structure and grain size by X-ray diffraction (XRD), roughness by atomic force microscopy (AFM), optical constants and thickness by ellipsometry, transmittance and absorbance by spectrophotometry. The optical waveguide analysis and simulation were carried for a wavelength of 632.8 nm, effective refractive indices and intensity distribution of the guide modes were obtained by prism coupling and fiber-waveguide techniques, respectively, finally, light propagation losses were measured by the cutback method. The results revealed that the samples were polycrystalline with oxygen vacancies, the grain size and roughness increased with the thickness, refractive index values of 1.99 and transmittances greater than 80% were obtained. Propagation losses of 8 dB/cm were obtained for the 260 nm guide and 12 dB/cm for the 560 nm guide, the 500 and 780 nm guides were only measured qualitatively. Propagation losses were 8 and 12 dB/cm for the 260 and 560 nm waveguides, respectively, 500 and 780 nm waveguides were only measured qualitatively. Propagation losses can be attributed to crystalline defects and absorption.

**Keywords: zinc oxide, optical waveguides, atomic layer deposition.**

## Dedicatoria

A mis padres y hermanos, son una bendición en  
mi vida

A ti, lo estás haciendo bien

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por aceptarme como estudiante para poder realizar mis estudios de maestría y al Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNyN-UNAM) por brindarme sus instalaciones y recursos para poder realizar mi trabajo de investigación.

Al laboratorio de Ingeniería de Superficies bajo la coordinación del Dr. Hugo Jesús Tiznado Vázquez, así como, al laboratorio de Películas Delgadas CICESE bajo la coordinación del Dr. Heriberto Márquez Becerra y apoyo técnico de la M.C. Jessica Ángel, por permitirme el uso de equipos y materiales necesarios para la realización de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico a través de la beca # 20274652, que me permitió dedicarle tiempo completo a mis estudios de maestría.

A mis directores de tesis, el Dr. Eder Germán Lizárraga Medina y el Dr. Hugo Jesús Tiznado Vázquez, por su apoyo, enseñanzas y consejos para la realización del proyecto de tesis. A mis sinodales, el Dr. Heriberto Márquez Becerra, el Dr. Jonathan Guerrero Sánchez y el Dr. Erick Romero Sánchez, por el apoyo y sugerencias para la culminación del proyecto de tesis.

A la M. C. Eloísa Aparicio Ceja de la UNAC-CNyN por su apoyo técnico en el análisis por XRD, Al Dr. Eduardo Murillo de la UNAC-CNyN por su apoyo en el análisis por AFM, al Dr. David Domínguez Vargas de CNyN por su apoyo en el análisis por XPS, al Dr. Javier López Medina de CNyN y a UABC campus Mexicali por su apoyo en las mediciones de elipsometría.

Al M. C. José Daniel Castro y al Ing. Guillermo Acosta por la constante ayuda y amistad que me brindaron en el año experimental de tesis, y por esos días de risas que pasamos en el laboratorio junto al Dr. Heriberto Márquez.

A Dios por permitirme llegar hasta aquí. A mis padres y hermanos por siempre apoyarme y motivarme para seguir cumpliendo mis metas. A Juan Ramón Zazueta por su apoyo incondicional. A mis amigos, en especial a Daniela Frausto y Yulith Altamirano, que estuvieron presentes durante mis estudios de maestría.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas .....	xi
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Justificación .....	5
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Objetivos .....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
<b>Capítulo 2. Marco teórico.....</b>	<b>7</b>
2.1 Guías de onda ópticas .....	7
2.2 Análisis por aproximación electromagnética .....	8
2.2.1 Ecuación de onda .....	8
2.2.2 Relación de dispersión .....	12
2.2.3 Parámetros normalizados .....	15
2.3 Técnica de síntesis: Depósito por capa atómica .....	16
2.4 Técnicas de caracterización del material .....	18
2.4.1 Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X .....	18

2.4.2	Difracción de rayos X.....	19
2.4.3	Microscopía de fuerza atómica .....	20
2.4.4	Espectroscopía elipsométrica de ángulo variable .....	21
2.4.5	Espectrofotometría .....	22
<b>Capítulo 3. Metodología.....</b>		<b>23</b>
3.1	Fabricación .....	24
3.1.1	Obtención de parámetros de fabricación .....	24
3.1.2	Fabricación de guías de onda planas.....	25
3.2	Caracterizaciones de películas delgadas .....	26
3.2.1	Composición elemental por XPS .....	26
3.2.2	Estructura cristalina por XRD .....	26
3.2.3	Rugosidad superficial por AFM .....	26
3.2.4	Espesor e índices de refracción por elipsometría .....	27
3.2.5	Transmitancia y absorbancia por espectrofotometría UV visible .....	27
3.3	Simulación de las propiedades ópticas de las guías de onda.....	27
3.4	Caracterización óptica de las guías de onda .....	28
3.4.1	Índice de refracción efectivo mediante acoplamiento por prisma .....	28
3.4.2	Distribución de intensidad .....	29
3.5	Pérdidas de propagación por el método de reducción.....	30
<b>Capítulo 4. Resultados y discusión .....</b>		<b>32</b>
4.1	Curvas de calibración y parámetros de fabricación .....	32
4.2	Caracterizaciones del material .....	35
4.2.1	Composición elemental.....	35
4.2.2	Estructura cristalina y tamaño de cristal.....	36

4.2.3	Rugosidad superficial .....	37
4.2.4	Espesor e índice de refracción .....	39
4.2.5	Transmitancia y absorbanca.....	40
4.3	Simulación de las propiedades ópticas .....	44
4.3.1	Modos de propagación .....	44
4.3.2	Ancho modal efectivo .....	45
4.3.3	Confinamiento del modo de propagación .....	46
4.3.4	Distribución de intensidad del campo eléctrico.....	47
4.4	Índice de refracción efectivo.....	48
4.5	Pérdidas de propagación.....	50
 <b>Capítulo 5. Conclusiones y trabajo a futuro.....</b>		<b>51</b>
 <b>Literatura citada .....</b>		<b>53</b>

## Lista de figuras

Figura	Página
1. Esquema de guías de onda según su estructura.....	7
2. Esquema del proceso ALD para una película delgada de ZnO.....	17
3. Esquema de la ventana de temperatura ALD.....	17
4. Proceso de emisión XPS para un solo átomo.....	19
5. Esquema de difracción de rayos X en planos atómicos separados por una distancia d.....	20
6. Esquema del funcionamiento de un microscopio de fuerza atómica (AFM).....	20
7. Esquema de medición por elipsometría.....	21
8. Diagrama de flujo que muestra los pasos del diseño de guías de onda ópticas de ZnO.....	23
9. Distribución de muestras en el reactor del equipo Beneq TFS 200.....	25
10. Arreglo óptico para obtener el índice de refracción efectivo.....	28
11. Arreglo óptico para capturar la distribución de intensidad.....	29
12. Acoplamiento fibra - guía de onda, visto con luz blanca.....	30
13. Arreglo óptico para medir la potencia de salida de la guía de onda.....	31
14. Ventana de temperatura ALD de óxido de zinc.....	33
15. Curvas de calibración a) dosis DEZ, b) purga DEZ, c) dosis H <sub>2</sub> O y d) purga H <sub>2</sub> O.....	34
16. Espectro XPS de alta resolución de muestras de ZnO, a) Zn 2p y b) O 1s.....	35
17. Patrones de difracción de rayos X para películas delgadas de ZnO.....	37
18. Imágenes AFM de películas de ZnO depositadas a 250 °C en sustratos de silicio + 4 μm SiO <sub>2</sub> , a) 260 nm, b) 560 nm y c) 780 nm.....	38
19. a) Perfil de rugosidad obtenida de las imágenes AFM, b) Tendencia de la rugosidad y tamaño de cristal respecto al espesor.....	39
20. Curvas de dispersión de las guías de onda de ZnO: a) todas las muestras, b) valores alrededor de $\lambda = 632.8$ nm.....	40
21. Espectro de transmitancia de las guías de onda a) ZnO 260 nm, b) ZnO 560 nm, c) ZnO 780 nm y d) ZnO 500 nm.....	41
22. Espectro de absorción de las guías de onda de ZnO. El recuadro indexado contiene la banda prohibida directa de las diferentes muestras.....	42
23. Relación entre la energía de la banda prohibida e índice de refracción en función del espesor.....	43

24. Relación entre índice de refracción y energía de banda prohibida. Comparación entre valores experimentales y la ecuación de Moss. Adaptada de Gooma et al., 2021. ....	44
25. Curvas de corte modal en función del índice de refracción efectivo y el espesor del núcleo para $\lambda = 632.8$ nm. ....	45
26. Ancho modal normalizado en función del espesor de núcleo. ....	45
27. Confinamiento de la luz a) en el núcleo y b) en la cubierta, en función del espesor de núcleo. ....	46
28. Distribución de intensidad del modo fundamental TE simulada y experimental para las guías de onda con núcleo de a) 260 nm, b) 560 nm, c) 780 nm y 500 nm, a $\lambda=632.8$ nm.....	47
29. Imágenes de distribución de intensidad tomadas con una cámara CCD.....	48
30. Curvas obtenidas a partir del acoplamiento por prisma en polarización a) TE y b) TM. ....	49

## Lista de tablas

Tabla	Página
1. Pérdidas de propagación en guías de onda de ZnO fabricadas por pulverización catódica sobre sustratos de silicio, ( $\lambda = 630$ nm).....	3
2. Espesores de núcleo seleccionados para la fabricación de guías de onda. ....	25
3. Tiempo de dosis y purga para depósitos de ZnO por ALD a 200 y 250 °C. ....	34
4. Tamaño de grano de los nanocristales de las muestras ZnO 260 nm, ZnO 560 nm y ZnO 780 nm. ....	37
5. Espesores, índices de refracción ( $\lambda = 632.8$ nm) y MSE, obtenidos por elipsometría. ....	40
6. Valores de índices efectivos TE y TM simulados y experimentales .....	49
7. Valores de pérdidas de propagación para guías de onda de 260 nm y 560 nm, a $\lambda=632.8$ nm. ....	50

## Capítulo 1. Introducción

---

La alta demanda en las tecnologías de comunicación requiere de nuevos dispositivos que ayuden en el transporte de información. Desde finales de la década de 1960, se ha buscado mejorar las comunicaciones y transferencia de datos, reemplazando las interconexiones de cableado eléctrico por conexiones ópticas. La integración de dispositivos ópticos como la fibra óptica, ofrecieron una solución para mejorar la transferencia de datos, permitiendo la exploración hacia nuevas alternativas ópticas. A partir de 1970 surgió el interés por la óptica integrada, que aplica la tecnología de película delgada para formar circuitos y dispositivos ópticos que coadyuvan en la tecnología de transporte de información y comunicación (Selvaraja & Sethi, 2018; Tien, 1977).

La óptica integrada busca la incorporación de componentes ópticos en sustratos de circuitos compactos a escalas cercanas a nanómetros y micrómetros. El objetivo es la miniaturización de dispositivos ópticos de manera análoga a la microelectrónica. Además, forma parte de las tecnologías de circuitos integrados (ICs, por sus siglas en inglés) y de circuitos fotónicos integrados (PICs, por sus siglas en inglés) (Tien, 1977).

Uno de los componentes ópticos más estudiados en la óptica integrada son las guías de onda. Se aplican en telecomunicaciones durante el procesamiento de información dentro de los dispositivos, para sensores ópticos (Mamtmin et al., 2020), celdas solares y láseres (Selvaraja & Sethi, 2018). En la óptica integrada, las ondas de luz pueden ser confinadas y guiadas utilizando películas delgadas de material transparente, permitiendo la comunicación entre los diferentes componentes que conforman al dispositivo óptico.

La mayoría de las guías de ondas que se estudian en la optoelectrónica están conformadas por materiales dieléctricos (Selvaraja & Sethi, 2018). Específicamente, en esta área existe un gran interés en guías de onda de óxidos metálicos, debido a sus propiedades atractivas como alta estabilidad fisicoquímica y transparencia en la región óptica.

Entre los óxidos metálicos estudiados como núcleos de guías de onda, destacan el óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y el óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ). Siendo este último un material de gran interés en las últimas décadas debido a su amplia disponibilidad, no toxicidad, buena estabilidad química, alta

transparencia óptica en longitudes de onda de 0.4 a 2  $\mu\text{m}$ , amplia banda prohibida directa (3.37 eV a 300 K) y propiedades ópticas no lineales (Jiang et al., 2012; Khodja et al., 2014; Xu & Wang, 2011).

Todas estas propiedades lo convierten en un material ideal para diversas aplicaciones, tales como dispositivos optoelectrónicos que operan en el UV, celdas solares, revestimientos antirreflejantes, láseres y guías de onda lineales y no lineales (Xu & Wang, 2011).

Este material puede ser sintetizado por distintas técnicas de fabricación, tales como depósito de vapor químico (CVD, por sus siglas en inglés), sol-gel (Khodja et al., 2014), pulverización catódica (Jia et al., 2005), evaporación térmica (Jiang et al., 2012) y depósito por capa atómica (ALD, por sus siglas en inglés) (Can-Uc et al., 2019).

En trabajos anteriores se han establecido que las propiedades ópticas de una película delgada (índices de refracción, coeficiente de extinción, transmitancia, etc.) dependen de la estructura del material obtenido como la porosidad, estequiometría y tamaño de grano. Todas estas propiedades deben ser controladas para producir una guía de onda de alta calidad (Ibanga et al., 2003; Jia et al., 2005; Takada, 1993; Urlacher et al., 1997). Sin embargo, existen pocos trabajos que hablen sobre las propiedades estructurales del ZnO para producir guías de onda. Por lo que es importante realizar un estudio profundo sobre las propiedades de este material con el fin de explicar su interacción con la luz y como puede llegar a afectar la eficiencia de la guía de onda.

## 1.1 Antecedentes

Las películas delgadas de ZnO han sido estudiadas para aplicaciones de óptica integrada desde hace más de 50 años. Uno de los primeros estudios fue realizado en 1972 por J.M. Hammer et al. En este trabajo depositaron guías de onda ópticas de ZnO por la técnica de transporte de vapor químico cercano (CSVTE, por sus siglas en inglés). Los resultados mostraron que las guías obtenidas propagaron luz con pérdidas bajas de propagación a  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  (con un coeficiente de atenuación de 5 dB/cm). Los sustratos utilizados fueron de zafiro. Las pérdidas las atribuyen a un exceso de iones de zinc asociados con la concentración de portadores y a la rugosidad de la superficie (Hammer et al., 1972).

En 1981, Subhadra Dutta y Howard E. Jackson, depositaron guías de onda de ZnO por la técnica de pulverización catódica (sputtering) sobre una capa de  $\text{SiO}_2$  amorfo. Encontraron que la atenuación óptica

del modo fundamental de las guías mejoró al someterlas a un tratamiento térmico con láser ( $2.0 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup> de potencia), los resultados se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Pérdidas de propagación en guías de onda de ZnO fabricadas por pulverización catódica sobre sustratos de silicio, ( $\lambda = 630$  nm).

Muestras		Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Coefficiente de atenuación (dB/cm) TE <sub>0</sub>	Potencia de láser (W/cm <sup>2</sup> )
1	Depositada	0.93	4.6	
	Recocida		0.02	$2 \times 10^5$
2	Depositada	0.93	2.5	
	Recocida		0.01	$2 \times 10^5$
3	Depositada	0.71	1	
	Recocida		0.03	$2 \times 10^5$

La reducción de pérdida la atribuyen principalmente a una mejora en la calidad de la película en la región cercana a la interfaz ZnO-SiO<sub>2</sub>. Debido a que, los defectos en la interfaz disminuyen con el tratamiento láser (Dutta et al., 1981). Sin embargo, no reportan caracterizaciones morfológicas o estequiométricas del material, que apoyan para determinar el origen de la pérdida de luz en la guía de onda.

Un resultado similar se reporta en el trabajo de Struk et al., (2014), donde mejoraron la eficiencia de sus guías de onda depositadas en sustratos de cuarzo por la técnica de pulverización catódica con magnetron, las cuales fueron recocidas en una atmósfera de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> a 500°C mediante la técnica RTA, logrando disminuir pérdidas de propagación de 30 a 2.8 dB/cm para  $\lambda = 677$  nm. Esta mejora la atribuyen al cambio estructural que sufrieron las guías debido al tratamiento térmico aplicado.

En películas para aplicaciones de guías de onda, es importante la rugosidad de la superficie. Una superficie de rugosidad baja permite reducir pérdidas de propagación de luz por esparcimiento de Rayleigh. También facilita el acoplamiento por prisma, permitiendo determinar el índice de refracción efectivo. Además, en guías de onda, es común operar en regiones de alta transmitancia para prevenir pérdidas por absorción del material empleado (Lizárraga, 2016).

Se ha reportado que la rugosidad en superficies de películas de ZnO puede disminuir aumentando la temperatura de depósito, o bien, con tratamientos térmicos. Fan et al., (2017) reportan que la rugosidad de la superficie en películas de ZnO de 600 nm de espesor, depositadas por pulverización catódica sobre sustratos de zafiro, disminuyó después de someterlas a un tratamiento térmico a 400 °C en aire. Por ejemplo, muestras depositadas a 200 °C presentaron una rugosidad de aproximadamente 7.1 nm y tamaño de grano de 9.55 nm, mientras que a 400 °C los valores fueron 2.5 nm y 15.67 nm, respectivamente. Mencionan que la rugosidad baja facilitó el acoplamiento de la luz por prisma.

Además, estudiaron los efectos luminiscentes de películas de ZnO dopadas con Er, sin embargo, no reportaron para películas de ZnO puro. Las propiedades luminiscentes están relacionadas a defectos estructurales, los cuales a su vez influyen en el desempeño de la guía de onda. Puchert et al., (1996) también reportaron resultados similares respecto a la rugosidad de películas fabricadas por pulverización catódica.

En los trabajos mencionados anteriormente se han reportado las pérdidas de propagación, sin embargo, no reportan caracterizaciones detalladas de la estructura, morfología o composición química de los materiales empleados. Además, se encontró que la técnica de pulverización catódica ha sido la más utilizada para depositar guías de onda de ZnO, sin embargo, tiene la desventaja de producir películas rugosas que necesitan ser sometidas a tratamientos térmicos para disminuir esa rugosidad.

Por otro lado, la técnica de depósito por capa atómica (ALD) resulta muy atractiva para la fabricación de guías de onda, ya que permite un control en el espesor de las películas en el orden de nanómetros, manteniendo la geometría del sustrato. Además, la técnica ALD es compatible con los procesos industriales para fabricación de microchips (Kim et al., 2008). Películas de ZnO ya han sido fabricadas por ALD, sin embargo, existe poca información de guías de onda fabricadas por esta técnica.

En la fabricación de películas delgadas, se pueden introducir impurezas, una de ellas es la contaminación por carbono, esta impureza se debe evitar lo más posible para obtener una guía de onda con pérdidas bajas de propagación debidas a absorción.

Xia et al., (2021) estudiaron la cantidad de carbono en películas de ZnO fabricadas por ALD en un rango de temperatura de depósito. Reportan que dentro de 150 y 175 °C se encuentra la ventana autolimitante del ZnO (rango de temperatura donde ocurre la reacción completa). Informan que dentro

de esa ventana encontraron la menor cantidad de carbono. Sin embargo, esto puede variar dependiendo de las condiciones de depósito (temperatura, presión, dosis de dietilzinc-DEZ y dosis de agua).

En el trabajo de Nguyen et al., (2020) se evaluó la influencia del oxígeno en las propiedades eléctricas y ópticas de películas de ZnO depositadas por ALD. Encontraron que películas depositadas usando oxígeno gaseoso presentaron mayor resistividad y mayor transmitancia óptica a las películas depositadas sin oxígeno, sus resultados corresponden a una menor concentración de vacancias de oxígeno en sus películas.

Derivado de lo anterior, se ha encontrado que existe información acerca de la fabricación de películas de ZnO por ALD, pero no orientados a su aplicación de guías de onda, por lo que será necesario optimizar los parámetros de fabricación e influencia de las vacancias de oxígeno en el material.

## **1.2 Justificación**

El creciente interés hacia el estudio de los componentes de circuitos fotónicos integrados como son los resonadores de anillo, fotodiodos, moduladores ópticos, guías de ondas, entre otros, se dirige a mejorar la transferencia de datos y procesamiento de señales ópticas para que puedan ser implementados en diversas aplicaciones, tales como sensores, láseres y dispositivos fotónicos, explorando nuevos materiales con propiedades adecuadas de guiado de luz y bajo costo comercial. Por lo que un estudio profundo sobre las propiedades fisicoquímicas del material es importante para diseñar y comprender mejor la eficiencia del guiado de luz en componentes ópticos como son las guías de onda.

Las guías de onda son uno de los componentes más importantes de un dispositivo fotónico, ya que actúan como la base del dispositivo llevando la señal óptica entre componentes. Por lo que en este trabajo se propone el diseño, fabricación y caracterización de guías de onda planas basadas en películas de ZnO sintetizadas por la técnica ALD. Donde se pretende determinar cómo las propiedades ópticas, estructurales, morfológicas y estequiométricas del material se relacionan con la propagación de la luz en la guía de onda.

## 1.3 Hipótesis

Películas delgadas de óxido de zinc de espesor inferior a un micrómetro fabricadas por la técnica de depósito de capa atómica, pueden ser utilizadas como núcleo de guías de onda planas.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

Diseñar, fabricar y caracterizar guías de onda planas de ZnO en el rango espectral visible, obtenidas por la técnica de depósito por capa atómica (ALD).

### 1.4.2 Objetivos específicos

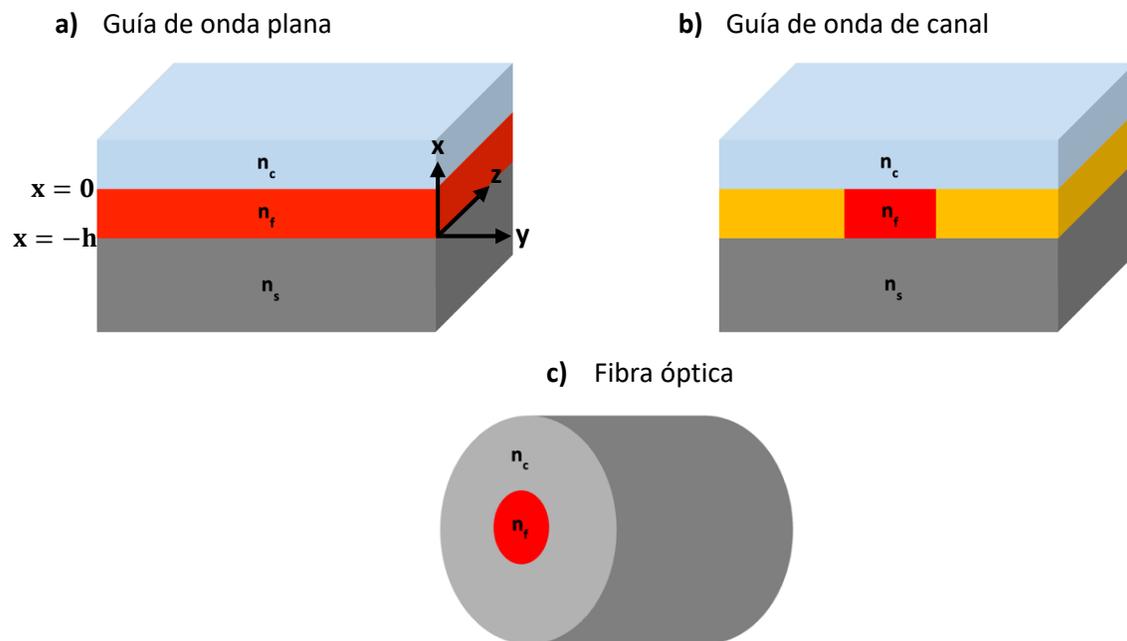
1. Calibración de los parámetros de fabricación ALD de películas de ZnO.
2. Diseñar la guía de onda mediante la simulación de sus propiedades (número de modos, índice efectivo, confinamiento, ancho, etc.).
3. Determinar los espesores del núcleo de la guía que permitan el confinamiento modal en el visible ( $\lambda=632.8$  nm).
4. Fabricar guías de onda de ZnO por ALD sobre sustratos de SiO<sub>2</sub> y sílice fundido.
5. Caracterizar las propiedades ópticas, estructurales, morfológicas y estequiométricas de las guías de onda fabricadas.
6. Determinar el número de modos, las pérdidas de propagación y distribución de intensidad ( $\lambda=632.8$  nm) de la guía de onda, mediante acoplamiento por prisma-guía y fibra-película.

## Capítulo 2. Marco teórico

En este capítulo se describen los fundamentos teóricos en los que se sustenta este trabajo. Se inicia proporcionando la teoría para explicar el principio de funcionamiento de las guías de onda. Se muestra el desarrollo matemático para obtener las ecuaciones que describen el comportamiento de las ondas electromagnéticas que viajan en la guía de onda. Así como los conceptos fundamentales que se requieren para entender los fenómenos electromagnéticos presentes en una guía de onda plana. Finalmente, se describe la técnica de síntesis de las películas delgadas y las principales técnicas de caracterización utilizadas.

### 2.1 Guías de onda ópticas

Las guías de onda ópticas son estructuras que confinan y propagan ondas electromagnéticas en una (1D) o dos (2D) dimensiones, por lo cual se pueden clasificar en guías de onda planas (1D) o de canal (2D), ver Figura 1. Por lo general, la estructura de una guía de onda óptica está compuesta de tres partes donde cada una tiene un índice de refracción asociado ( $n$ ): sustrato ( $n_s$ ), núcleo ( $n_f$ ) y recubrimiento ( $n_c$ ), siendo el índice de refracción del núcleo el de mayor valor ( $n_f > n_s \geq n_c$ ). Además, el núcleo debe ser lo suficientemente grueso para soportar al menos un modo guiado (Ibanga et al., 2003; Lizárraga, 2016).



**Figura 1.** Esquema de guías de onda según su estructura.

Las guías de onda que se emplean en óptica integrada y fotónica tienen dimensiones similares a la longitud de onda de operación, por lo cual, se recurre a la teoría electromagnética para el análisis del guiado de la luz en la guía de onda.

## 2.2 Análisis por aproximación electromagnética

### 2.2.1 Ecuación de onda

Las ecuaciones de Maxwell permiten describir fenómenos electromagnéticos en diferentes medios, en este trabajo la guía de onda de ZnO es un medio dieléctrico  $\rho = 0$ , homogéneo, no magnético (permeabilidad magnética  $\mu = \mu_0$ ) y con permitividad dieléctrica  $\epsilon = \epsilon_0 n_f^2$ . Tomando estas consideraciones las ecuaciones de Maxwell en términos del índice de refracción  $n_f$  quedan como:

$$\nabla \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{H}(\vec{r}, t) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 n_f^2 \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (4)$$

Aplicando el operador vectorial rotacional  $\nabla$  a las ecuaciones (3) y (4):

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t)) \quad (5)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 n_f^2 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t)) \quad (6)$$

Sustituyendo  $\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t)$  de la ecuación (4) en (5),  $\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t)$  de la ecuación (3) en (6) y acomodando:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\mu_0 \epsilon_0 n_f^2 \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} \quad (7)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) = -\mu_0 \epsilon_0 n_f^2 \frac{\partial^2 \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} \quad (8)$$

Usando la identidad vectorial  $\nabla \times (\nabla \times A) = \nabla(\nabla \cdot A) - \nabla^2 A$  en el lado izquierdo de las ecuaciones (7) y (8), y recordando que  $\nabla \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) = 0$  y  $\nabla \cdot \vec{H}(\vec{r}, t) = 0$ , se llega a las ecuaciones de onda que describen la propagación de ondas electromagnéticas en un medio con índice de refracción  $n_f$ :

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, t) = \mu_0 \epsilon_0 n_f^2 \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} \quad (9)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}, t) = \mu_0 \epsilon_0 n_f^2 \frac{\partial^2 \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} \quad (10)$$

Para las soluciones a las ecuaciones de onda se asumen ondas monocromáticas expresadas como:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t) e^{i\omega t} \quad (11)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r}, t) e^{i\omega t} \quad (12)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia angular. Sustituyendo las ecuaciones anteriores en las ecuaciones de onda ((9) y (10)) y desarrollando la derivada parcial, se obtienen:

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, t) + \mu_0 \epsilon_0 n_f^2 \omega^2 \vec{E}(\vec{r}, t) = 0 \quad (13)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}, t) + \mu_0 \varepsilon_0 n_f^2 \omega^2 \vec{H}(\vec{r}, t) = 0 \quad (14)$$

Recordando que el número de onda en el vacío está relacionado con la frecuencia angular ( $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = \omega/c$ ), el número de onda en el medio puede expresarse como  $k = n_f \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ , sustituyendo  $k$  en las ecuaciones anteriores se llega a las ecuaciones de Helmholtz:

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, t) + k^2 \vec{E}(\vec{r}, t) = 0 \quad (15)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}, t) + k^2 \vec{H}(\vec{r}, t) = 0 \quad (16)$$

Para el análisis de la onda en la estructura de una guía de onda plana (ver Figura 1a), se puede asumir una onda plana monocromática que se propaga en la dirección  $z$ , expresada por:

$$\vec{E}(x, y) = E(x, y) e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (17)$$

$$\vec{H}(x, y) = H(x, y) e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (18)$$

Donde  $\beta$  es la constante de propagación. Sustituyendo las ecuaciones (17) y (18) en las ecuaciones (3) y (4) de Maxwell de nuestro material, y desarrollándolas se obtienen las siguientes seis ecuaciones:

$$\frac{\partial}{\partial y} E_z(x, y) + i\beta E_y(x, y) = -i\omega \mu_0 H_x(x, y) \quad (19)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} E_z(x, y) - i\beta E_x(x, y) = -i\omega \mu_0 H_y(x, y) \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} E_y(x, y) - \frac{\partial}{\partial y} E_x(x, y) = -i\omega \mu_0 H_z(x, y) \quad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} H_z(x, y) + i\beta H_y(x, y) = i\omega \epsilon_0 n_f^2 E_x(x, y) \quad (22)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} H_z(x, y) - i\beta H_x(x, y) = i\omega \epsilon_0 n_f^2 E_y(x, y) \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} H_y(x, y) - \frac{\partial}{\partial y} H_x(x, y) = i\omega \epsilon_0 n_f^2 E_z(x, y) \quad (24)$$

La estructura de una guía de onda plana es infinita en la dirección  $y$ , por lo tanto, los campos  $E$  y  $H$  son independientes de  $y$ , así que  $\partial/\partial y = 0$ . Tomando en cuenta esta consideración las ecuaciones anteriores se reducen a:

$$i\beta E_y(x) = -i\omega \mu_0 H_x(x) \quad (25)$$

$$-\frac{d}{dx} E_z(x) - i\beta E_x(x) = -i\omega \mu_0 H_y(x) \quad (26)$$

$$\frac{d}{dx} E_y(x) = -i\omega \mu_0 H_z(x) \quad (27)$$

$$i\beta H_y(x) = i\omega \epsilon_0 n_f^2 E_x(x) \quad (28)$$

$$-\frac{d}{dx} H_z(x) - i\beta H_x(x) = i\omega \epsilon_0 n_f^2 E_y(x) \quad (29)$$

$$\frac{d}{dx} H_y(x) = i\omega \epsilon_0 n_f^2 E_z(x) \quad (30)$$

En las ecuaciones (25), (27) y (29) se puede notar que la intensidad del campo eléctrico solo tiene un componente cartesiano  $E_y(x)$ , esto se puede explicar si se considera que las oscilaciones del campo eléctrico solo se producen en el eje transversal  $E_y(x) \neq 0$  y no en el longitudinal  $E_z(x) = 0$ . Tomando en

cuenta esta consideración, implica que  $E_z(x) = H_y(x) = E_z(x) = 0$ . Así mismo, se puede expresar los dos campos magnéticos restantes  $H_x(x)$  y  $H_z(x)$  en términos de  $E_y(x)$  despejándolas de las ecuaciones (25) y (27) :

$$H_x(x) = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} E_y(x) \quad (31)$$

$$H_z(x) = \frac{i}{\omega\mu_0} \frac{\partial}{\partial x} E_y(x) \quad (32)$$

Sustituyendo las dos ecuaciones anteriores en la ecuación (29) se llega a la ecuación de onda para el campo eléctrico  $E_y(x)$  o modo transversal eléctrico (TE) en la región del núcleo de la guía de onda ( $n_f$ ) (Chen, 2007):

$$\frac{d^2}{dx^2} E_y(x) + (k^2 n_f^2 - \beta^2) E_y(x) = 0 \quad (33)$$

De manera similar se obtiene la ecuación para el campo magnético  $H_y(x)$  o modo transversal magnético (TM):

$$\frac{d}{dx} \left[ \frac{1}{n_f^2} \frac{d}{dx} H_y(x) \right] + \left[ k^2 - \frac{\beta^2}{n_f^2} \right] H_y(x) = 0 \quad (34)$$

Donde un modo es la distribución de campo eléctrico o magnético que se propaga en la guía.

### 2.2.2 Relación de dispersión

Como se vio en el apartado anterior, el campo eléctrico  $E_y(x)$  tiene dos componentes de campo magnético  $H_x(x)$  y  $H_z(x)$ . Estas componentes muestran continuidad en la frontera cubierta-núcleo ( $x = 0$ ) y frontera núcleo-sustrato ( $x = -h$ ), ver Figura 1a. En la ecuación (31) se observa que  $H_x(x)$  es continua

cuando  $E_y(x)$  es continua y de la ecuación (32) se deduce que  $H_z(x)$  es continua si  $\frac{dE_y(x)}{dx}$  es continua. Tomando estas consideraciones de continuidad,  $E_y(x)$  debe ser resuelto de la ecuación (34).

En la región del núcleo ( $-h \leq x \leq 0$ ), se espera que la distribución de  $E_y(x)$  sea la función oscilatoria:

$$E_y(x) = E_f \cos(k_f x + \phi) \quad (35)$$

$$\frac{d}{dx} E_y(x) = -k_f E_f \sin(k_f x + \phi) \quad (36)$$

Donde  $k_f = \sqrt{k^2 n_f^2 - \beta^2}$  con  $(k^2 n_f^2 - \beta^2) > 0$ ,  $E_f$  y  $\phi$  son constantes por determinar.

En la región del sustrato ( $x \leq -h$ ), se espera que  $E_y(x)$  decaiga exponencialmente:

$$E_y(x) = E_s e^{\sigma_s(x+h)} \quad (37)$$

$$\frac{d}{dx} E_y(x) = \sigma_s E_s e^{\sigma_s(x+h)} \quad (38)$$

Donde  $\sigma_s = \sqrt{\beta^2 - k^2 n_s^2}$  con  $(k^2 n_s^2 - \beta^2) < 0$ .

En la región de la cubierta ( $x > 0$ ), también se espera que  $E_y(x)$  decaiga exponencialmente:

$$E_y(x) = E_c e^{-\sigma_c x} \quad (39)$$

$$\frac{d}{dx} E_y(x) = -\sigma_c E_c e^{-\sigma_c x} \quad (40)$$

Donde  $\sigma_c = \sqrt{\beta^2 - k^2 n_c^2}$  con  $(k^2 n_c^2 - \beta^2) < 0$ .

Recordando la continuidad de  $E_y(x)$ ,  $\frac{d}{dx}E_y(x)$  y las condiciones de frontera. Para la frontera cubierta-núcleo ( $x = 0$ ) se igualan las ecuaciones (35) y (39) y las ecuaciones (36) y (40), obteniendo:

$$E_f \cos \phi = E_c \quad (41)$$

$$k_f E_f \sin \phi = \sigma_c E_c \quad (42)$$

De las dos ecuaciones anteriores es posible obtener:

$$\tan \phi = \frac{\sigma_c}{k_f} \quad (43)$$

Similarmente, para la frontera núcleo-sustrato ( $x = -h$ ), se igualan las ecuaciones (35) y (37) y las ecuaciones (36) y (38):

$$E_f \cos(-k_f h + \phi) = E_s \quad (44)$$

$$-k_f E_f \sin(-k_f h + \phi) = \sigma_s E_s \quad (45)$$

De las ecuaciones (44) y (45) es posible obtener:

$$\tan(-k_f h + \phi) = -\frac{\sigma_s}{k_f} \quad (46)$$

Combinando las ecuaciones (43) y (46), se obtiene la relación de dispersión para los modos TE:

$$\mathbf{k}_f \mathbf{h} = \tan^{-1} \frac{\sigma_c}{\mathbf{k}_f} + \tan^{-1} \frac{\sigma_s}{\mathbf{k}_f} + m\pi \quad (47)$$

Donde  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$  es un entero y se conoce como el número de modo.

Para el caso del campo magnético  $H_y(x)$  que cuenta con dos componentes de campo eléctrico  $E_x(x)$  y  $E_z(x)$ , la relación de dispersión para los modos TM se obtiene con un procedimiento similar al del campo eléctrico, la ecuación para los modos TM es:

$$\mathbf{k}_f \mathbf{h} = \tan^{-1} \left( \frac{n_f^2 \sigma_c}{n_c^2 \mathbf{k}_f} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{n_f^2 \sigma_s}{n_s^2 \mathbf{k}_f} \right) + m \pi \quad (48)$$

Las soluciones para las ecuaciones de dispersión TE y TM no se resuelven de forma analítica, sino que se emplean técnicas numéricas.

### 2.2.3 Parámetros normalizados

Para facilitar el proceso de análisis numérico de las ecuaciones de dispersión TE (47) y TM (48); y la obtención de parámetros para el diseño de las guías de onda, Kogelnik y Ramaswamy en 1974 introdujeron los siguientes parámetros generalizados:

$$\gamma = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (49)$$

$$V = kh \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (50)$$

$$b = \frac{n_e^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (51)$$

Donde  $\gamma$  es el factor de asimetría,  $V$  es la frecuencia normalizada o espesor de núcleo normalizado y  $b$  es el índice efectivo normalizado. A partir de estos parámetros se puede expresar la siguiente relación de dispersión **TE** normalizada:

$$V\sqrt{1-b} = \tan^{-1} \sqrt{\frac{\gamma+b}{1-b}} + \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{1-b}} + m\pi \quad (52)$$

Para la relación de dispersión **TM** normalizada se introducen dos parámetros más  $c = \frac{n_s^2}{n_f^2}$  y  $d = \frac{n_c^2}{n_f^2}$ :

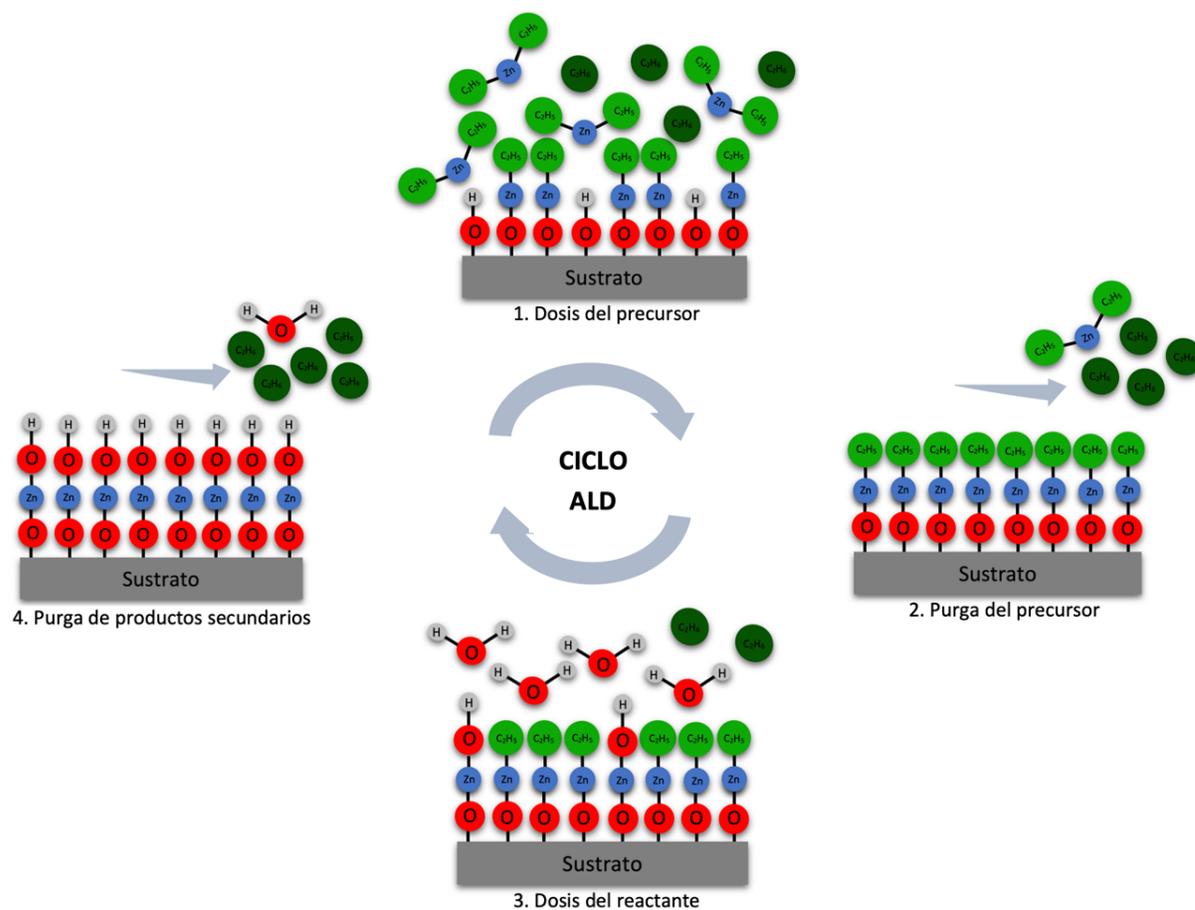
$$V\sqrt{1-b} = \tan^{-1} \left( \frac{1}{d} \sqrt{\frac{\gamma+b}{1-b}} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{1}{c} \sqrt{\frac{b}{1-b}} \right) + m'\pi \quad (53)$$

Estas dos ecuaciones de dispersión son las que se resuelven numéricamente y las soluciones obtenidas permiten calcular los parámetros que se requieren para diseñar una guía de onda.

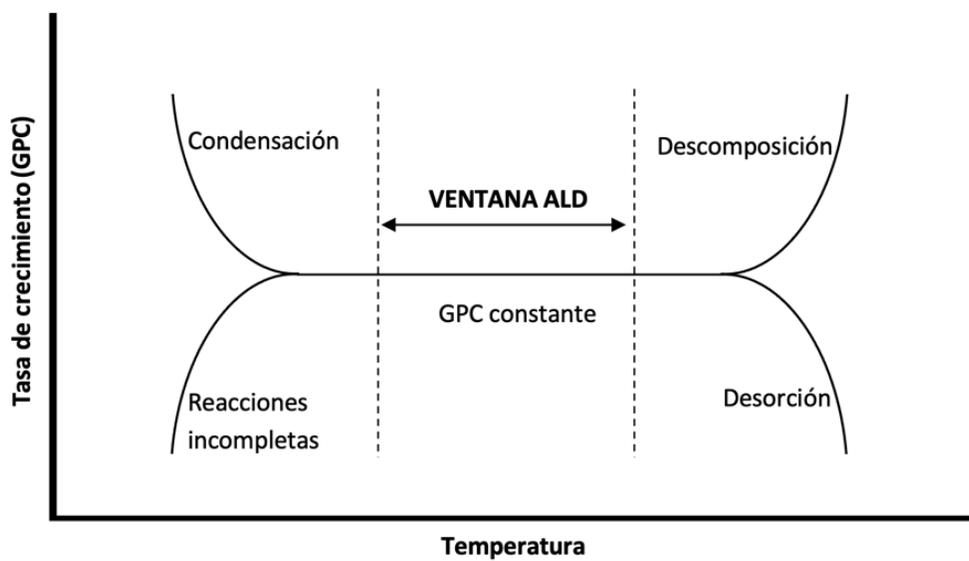
### 2.3 Técnica de síntesis: Depósito por capa atómica

La técnica de depósito de capa atómica se basa en un proceso químico en fase gaseosa para depositar películas delgadas. El proceso consiste en reacciones químicas sobre la superficie de un sustrato, mediante cuatro pasos repetitivos denominados "ciclo ALD" (ver Figura 2), permitiendo el crecimiento autolimitado y capa por capa.

El proceso para obtener la película delgada inicia dosificando el reactor que se encuentra en vacío medio con una cantidad específica de precursor (compuesto químico que contiene el metal a depositar) en estado gaseoso, generando una quimisorción con la superficie del sustrato. La superficie del sustrato debe estar previamente funcionalizada. Los productos secundarios de la reacción y el precursor no adsorbido son purgados del reactor por medio del arrastre con gas inerte. Después se dosifica el reactante para generar la reacción química con el precursor adherido a la superficie del sustrato; nuevamente los productos secundarios son purgados con gas de arrastre inerte.



**Figura 2.** Esquema del proceso ALD para una película delgada de ZnO.



**Figura 3.** Esquema de la ventana de temperatura ALD.

Cada precursor tiene diferentes parámetros de depósito (temperatura, tiempo de dosis y purga) que deben ser identificados para tener un control en el crecimiento de la película. Estos parámetros se obtienen a través de la ventana de temperatura ALD (ver Figura 3), que es el rango de temperatura en la cual la tasa de crecimiento (GPC, por sus siglas en inglés) del material se tiene controlada, temperaturas por debajo de la ventana ALD pueden ocasionar reacciones incompletas o condensación del precursor y temperaturas muy altas pueden ocasionar la descomposición o desorción del precursor.

## 2.4 Técnicas de caracterización del material

### 2.4.1 Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X

La espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS, por sus siglas en inglés) es una técnica sensible a la superficie que permite la identificación química y la estructura electrónica de elementos presentes de un sólido. Los rayos X más utilizados son de Mg K $\alpha$  (1253.6 eV) y Al K $\alpha$  (1486.6); estos fotones tienen una profundidad limitada en la muestra de 1 a 10 nanómetros. El análisis se lleva a cabo irradiando rayos X monoenergéticos sobre la muestra en vacío y analizando la energía cinética de los electrones emitidos. Los fotones interactúan con los átomos que se encuentran en la superficie, provocando la emisión de electrones por el efecto fotoeléctrico (ver Figura 4).

La energía cinética (KE) de los fotoelectrones emitidos está dada por:

$$KE = h\nu - BE - \phi_s, \quad (54)$$

donde  $h\nu$  es la energía del fotón, BE es la energía de enlace del orbital atómico del que se origina el electrón y  $\phi_s$  es la función de trabajo del espectrómetro. La medición es realizada en condiciones de ultra alto vacío para evitar cualquier contaminación que pueda interferir con la velocidad de los electrones emitidos (Briggs, 2005).

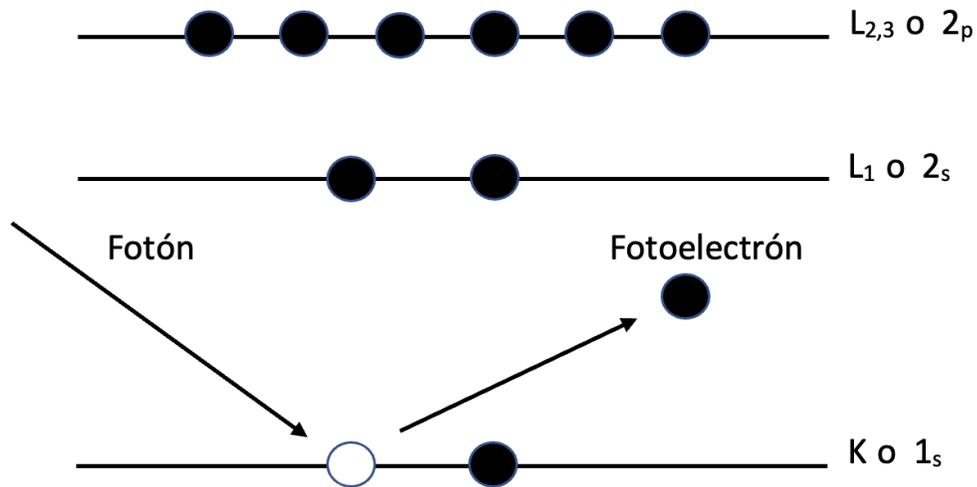


Figura 4. Proceso de emisión XPS para un solo átomo.

#### 2.4.2 Difracción de rayos X

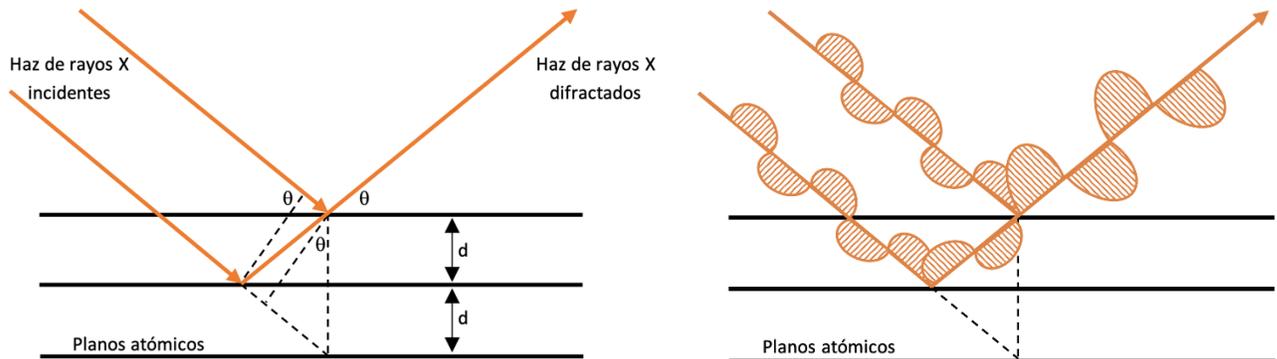
La difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés) es una técnica no destructiva que permite la caracterización de parámetros estructurales de materiales que pueden ser amorfos o cristalinos. En esta técnica un haz incide a diferentes ángulos, para cada ángulo hay un valor medido de intensidad resultado de la interferencia de cada plano atómico (separados por una distancia  $d$ ). Una cantidad de esos rayos X interfieren destructivamente, cancelándose entre sí, por otra parte, en determinados ángulos de incidencia  $\theta$  interfieren constructivamente dando como resultado la suma de las dos ondas (ver Figura 5), la cual se expresa en la ley de Bragg.

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (55)$$

Donde  $n$  es un número entero,  $\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X,  $d$  es la distancia de separación entre planos atómicos y  $\theta$  es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos atómicos.

El haz de rayos X que sale de la muestra contiene información de la posición de los átomos. Los materiales cristalinos al tener átomos periódicamente ordenados amplifican la intensidad de los rayos X porque las ondas reflejadas están en fase, lo que resulta en un patrón de difracción del material (picos de intensidad). En materiales amorfos (sus átomos están desordenados), una mayor cantidad de rayos X

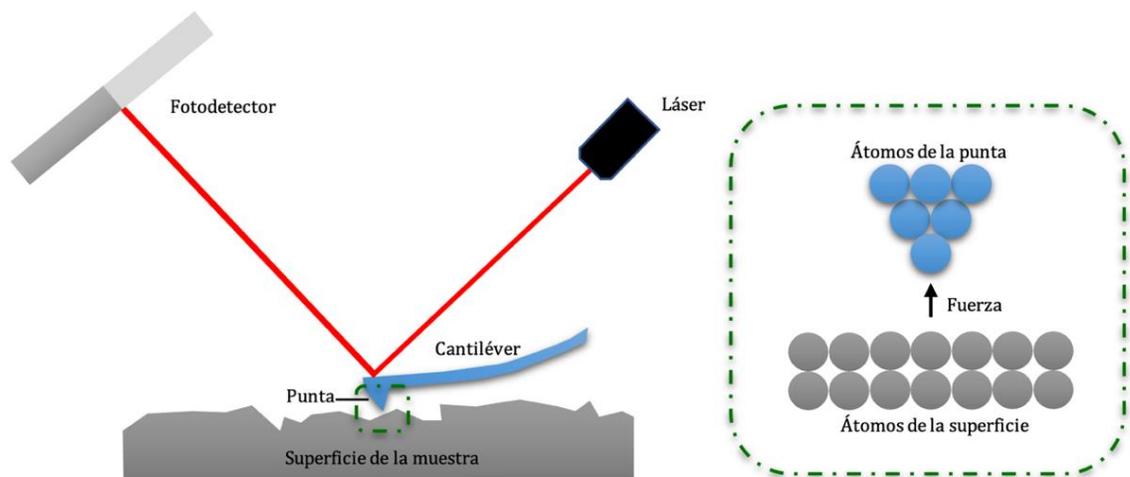
reflejados están desfasados (interferencia destructiva) y la intensidad de rayos X es muy baja para generar un pico.



**Figura 5.** Esquema de difracción de rayos X en planos atómicos separados por una distancia  $d$ .

### 2.4.3 Microscopía de fuerza atómica

La microscopía de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés) es una técnica que permite el análisis superficial de nanomateriales con resolución nanométrica o incluso atómica. Esta técnica emplea un instrumento mecano-óptico que utiliza un cantiléver para formar imágenes de la superficie de las muestras. La medición se realiza incidiendo un láser sobre el cantiléver que contiene la punta de AFM y es reflejado a un fotodetector debido a la interacción de la punta con la superficie como se observa en la Figura 6, para ser interpretado por el software del equipo, generando así una imagen.

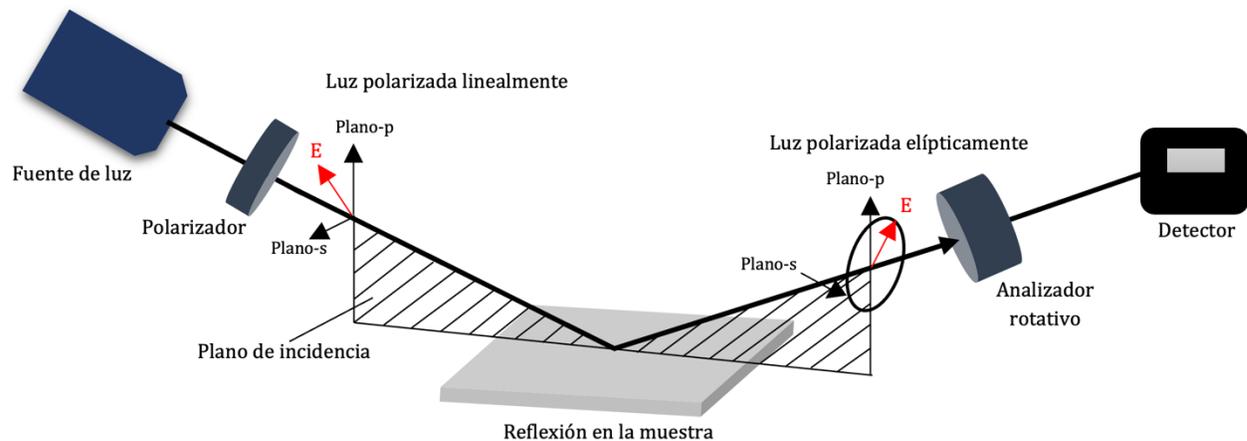


**Figura 6.** Esquema del funcionamiento de un microscopio de fuerza atómica (AFM).

Existen tres modos de operación para el análisis AFM: modo contacto donde la punta está en contacto con la superficie de la muestra durante el análisis; modo no contacto, aquí la punta es distanciada de la superficie y el modo intermitente, donde la punta oscila durante el análisis.

#### 2.4.4 Espectroscopía elipsométrica de ángulo variable

La elipsometría es una técnica utilizada a menudo para medir el espesor de una película delgada. La medición se realiza polarizando un haz de luz incidente, reflejándolo en la superficie de la muestra en un ángulo oblicuo y luego volviendo a polarizar el haz de luz antes de su medición de intensidad (Figura 7). Dado que el proceso consta de incidir luz polarizada linealmente, y en general, la luz reflejada es polarizada elípticamente, la técnica se ha denominado “elipsometría”.



**Figura 7.** Esquema de medición por elipsometría

En este trabajo se utilizó la técnica de espectroscopía elipsométrica de ángulo variable para obtener el espesor y el índice de refracción de las guías de onda; la técnica consiste en incidir a diferentes ángulos luz polarizada en el material y mediante la rotación de un compensador se obtiene la razón entre los coeficientes de reflexión  $r_s$  y  $r_p$ , que corresponden a la polarización s y p, respectivamente. El cambio de amplitud y fase entre la onda polarizada s y la onda polarizada p es expresada en función de los coeficientes de reflexión:

$$\tan \psi e^{i\Delta} = \frac{r_s}{r_p} \quad (56)$$

donde el coeficiente  $\psi$  es la razón de amplitud entre los coeficientes de reflexión y  $\Delta$  es la diferencia de fase de la luz reflejada s y p.

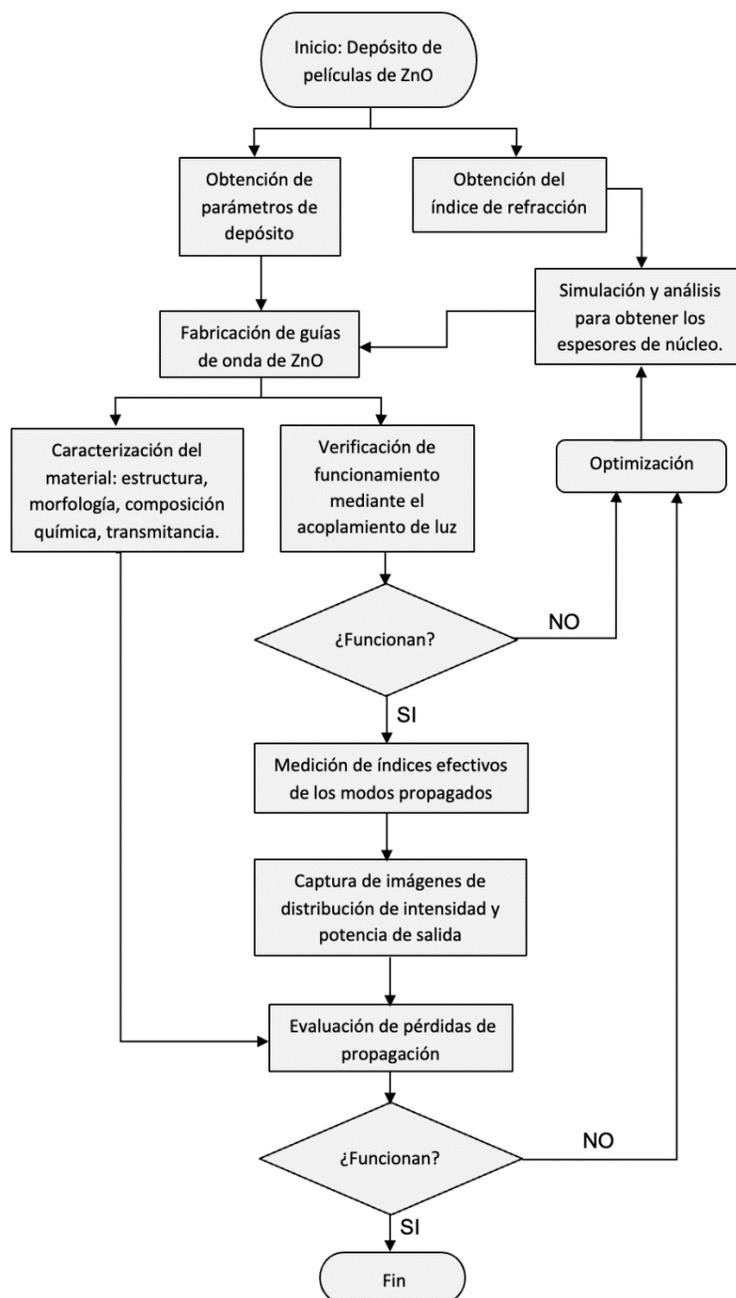
#### 2.4.5 Espectrofotometría

La espectrofotometría UV-Visible es una técnica utilizada para determinar la transmitancia óptica de materiales. El principio de funcionamiento de la técnica se basa en la medición de radiación electromagnética que un material puede absorber, transmitir o reflejar.

Al analizar películas delgadas se pueden presentar oscilaciones en sus espectros, debido a efectos de interferencia por reflexiones múltiples que se dan en las interfases aire – película – sustrato. Esto se debe a que la película delgada tiene medios con diferentes índices de refracción y cuando haces de luz coherentes inciden, parte de ella se refleja parcialmente en la superficie superior de la película y el resto entra y se refleja parcialmente en la parte inferior y emerge. Esta interferencia depende del ángulo de incidencia, del grosor e índices de refracción de la película.

## Capítulo 3. Metodología

La metodología usada en este trabajo consistió en cuatro etapas: 1) la obtención de parámetros para la fabricación de guías de onda planas de ZnO, 2) la caracterización fisicoquímica de películas delgadas de ZnO, 3) la simulación de los parámetros ópticos de las guías de onda y 4) la caracterización óptica de las guías de onda obtenidas. Los pasos que se siguieron para cumplir con los objetivos de este trabajo se muestran en la Figura 8:



**Figura 8.** Diagrama de flujo que muestra los pasos del diseño de guías de onda ópticas de ZnO.

## 3.1 Fabricación

La fabricación en este trabajo de tesis se divide en dos partes, la primera corresponde a las curvas de calibración del sistema ALD, donde se determinan los tiempos ideales de dosis y purga de los precursores empleados para obtener la tasa de crecimiento de las películas delgadas. Cabe mencionar que la información obtenida de las curvas de calibración es específica de cada sistema ALD, esto es, que los tiempos de dosis y purga dependen de las dimensiones del reactor.

Con la receta obtenida de las curvas de calibración, la segunda parte corresponde al depósito de películas delgadas de espesor específico, las cuales van a funcionar como el núcleo de guías de ondas. El proceso experimental se describe a continuación.

### 3.1.1 Obtención de parámetros de fabricación

La técnica ALD permite el depósito de películas delgadas manteniendo un control preciso del espesor, las curvas de calibración se realizan para conocer los parámetros de depósito o fabricación (tiempo de dosis, purga, presión y temperatura) que permitan mantener ese control.

Para obtener los parámetros de fabricación se depositaron películas delgadas de ZnO en un equipo industrial Beneq TFS 200, los precursores empleados fueron dietilzinc ( $(C_2H_5)_2Zn$ , DEZ) y agua desionizada, el sustrato fue de silicio tipo-p. La presión se mantuvo constante durante todo el depósito. Con el fin de conocer la ventana ALD del ZnO, cada muestra fue sometida a 100 ciclos ALD, utilizando nitrógeno ( $N_2$ ) como gas de arrastre/purga. El primer parámetro que se varió fue la temperatura, desde 100 a 300 °C, con pasos de 50 °C.

Una vez determinadas las temperaturas de depósito, lo siguiente fue definir el tiempo adecuado de dosis y purga, en cada depósito el tiempo de dosis del DEZ fue de 30, 40 y 50 milisegundos (ms), del agua fue de 50, 75 y 100 ms; y para la purga fue de 500, 750 y 1000 ms. Una vez obtenidos los parámetros de depósito ideales y con ello la tasa de crecimiento, se pasó a la segunda parte de la fabricación que se describe a continuación.

### 3.1.2 Fabricación de guías de onda planas

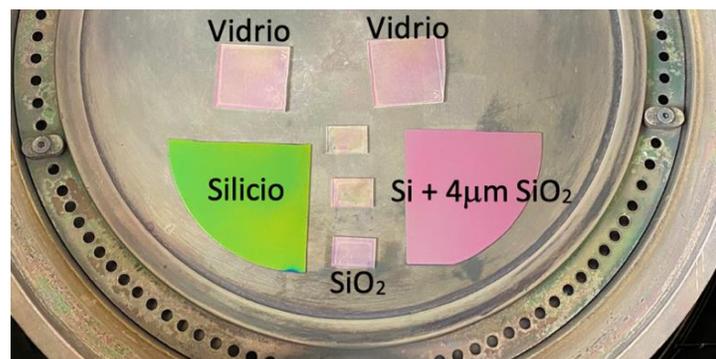
Con los parámetros óptimos de depósito obtenidos se pasó a fabricar las guías de onda, la Tabla 2 muestra el diseño de selección de espesores del núcleo de la guía de onda. La selección de espesores se explicará en la sección de simulación (sección 3.3).

**Tabla 2.** Espesores de núcleo seleccionados para la fabricación de guías de onda.

Muestra	Temperatura de depósito	Tiempo de depósito	Ciclos utilizados	Espesor esperado
ZnO <sub>260</sub>	250 °C	31 min	1389	260 nm
ZnO <sub>560</sub>	250 °C	1 h 15 min	3353	560 nm
ZnO <sub>780</sub>	250 °C	1h 46 min	4518	780 nm
ZnO <sub>500</sub>	200 °C	1h 10 min	2509	500 nm

Los sustratos utilizados para la fabricación de las guías de onda de ZnO fueron: silicio, cuarzo fundido (SiO<sub>2</sub>) y silicio con una capa de 4 μm de SiO<sub>2</sub> (Si + 4 μm de SiO<sub>2</sub>). Los sustratos de silicio y Si + 4 μm de SiO<sub>2</sub> se limpiaron con aire seco minutos antes de ser colocados en el reactor. Por otro lado, los sustratos de SiO<sub>2</sub> se limpiaron inicialmente con acetona y alcohol; después se recubrieron con la crema Umicore substrate cleaner, la cual se dejó actuar por un par de horas y finalmente se retiró con acetona.

Los sustratos se colocaron en el reactor, dentro de la cámara de vacío del equipo ALD; la presión base de la cámara fue de 10 mbar, y la temperatura de depósito de 200 y 250 °C. La Figura 9 muestra la ubicación de los sustratos dentro del reactor.



**Figura 9.** Distribución de muestras en el reactor del equipo Beneq TFS 200.

## 3.2 Caracterizaciones de películas delgadas

Las películas delgadas obtenidas fueron caracterizadas por distintas técnicas, para la composición elemental y determinación de vacancias de oxígeno se utilizó la técnica de XPS, la cristalinidad se obtuvo mediante la técnica de XRD y para la rugosidad se empleó la técnica de AFM. Para determinar el espesor y las constantes ópticas se utilizó la técnica de elipsometría, la transmitancia y absorbancia de las películas se caracterizaron por espectrofotometría.

### 3.2.1 Composición elemental por XPS

Por medio de la espectroscopía fotoelectrónica de rayos X se analizaron las muestras de ZnO, con el fin de determinar la composición elemental y presencia de vacancias de oxígeno, para relacionarlas al valor de pérdidas de propagación de la guía de onda. El equipo utilizado fue un espectrofotómetro marca SPECS.

### 3.2.2 Estructura cristalina por XRD

Por medio de la técnica de difracción de rayos X se obtuvo el patrón de difracción de las películas, a partir de las cuales se identificaron los picos cristalinos correspondientes a los planos cristalinos del ZnO. El equipo utilizado fue un difractómetro marca Phillips X'Pert.

### 3.2.3 Rugosidad superficial por AFM

Por medio de la microscopía de fuerza atómica se analizó la rugosidad de las películas. Las mediciones se realizaron en áreas de  $1 \mu\text{m}^2$ . El microscopio utilizado fue un Park System modelo XE-70. El procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas se realizó mediante el programa Gwyddion.

### 3.2.4 Espesor e índices de refracción por elipsometría

Por medio de la técnica de elipsometría espectroscópica se obtuvo el índice de refracción ( $n$ ), el coeficiente de extinción ( $k$ ) y el espesor de las películas, a partir de las constantes elipsométricas (amplitud, fase) en función de la longitud de onda. El equipo utilizado fue un elipsómetro modelo m-2000 J. A. Woollam. Las mediciones se realizaron a diferentes ángulos de incidencia 45, 55, 65 y 75° en el rango de 390 a 1000 nm.

Los datos de elipsometría obtenidos se modularon para la función dieléctrica del ZnO a partir de la combinación de funciones Psemi-MO y Gauss, en el software CompleteEASE de J.A. Wollam. La función Psemi-MO es usada para modelar la forma de la función del oscilador de semiconductores cristalinos de banda ancha y directa; y el oscilador gaussiano para explicar la absorción de los rayos UV (Panigrahi et al., 2021).

### 3.2.5 Transmitancia y absorbancia por espectrofotometría UV visible

Los espectros de transmitancia y absorbancia de las guías de ondas fueron obtenidos por medio de un espectrofotómetro ultravioleta-visible modelo Cary 60. Las mediciones se realizaron a incidencia normal en un rango de longitudes de onda que va de 190 a 1100 nm.

Además, se utilizó el programa Open Filters con el fin de simular la transmitancia de las películas, a partir de las constantes ópticas obtenidas por elipsometría.

## 3.3 Simulación de las propiedades ópticas de las guías de onda

Se utilizó un programa especializado para la simulación de los parámetros ópticos de las guías de onda variando el espesor de núcleo; estos parámetros son: modos de propagación, índice de refracción efectivo, ancho modal efectivo y distribución de intensidad del campo eléctrico.

El programa calcula los parámetros ópticos de la guía resolviendo las ecuaciones de dispersión, desarrollados en la sección 2.2.2. Los datos de entrada fueron: el índice de refracción del sustrato ( $\text{SiO}_2$ ,

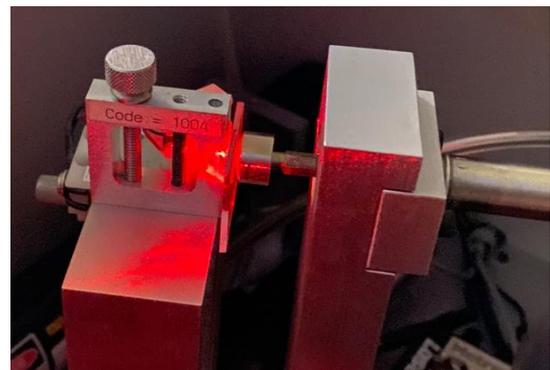
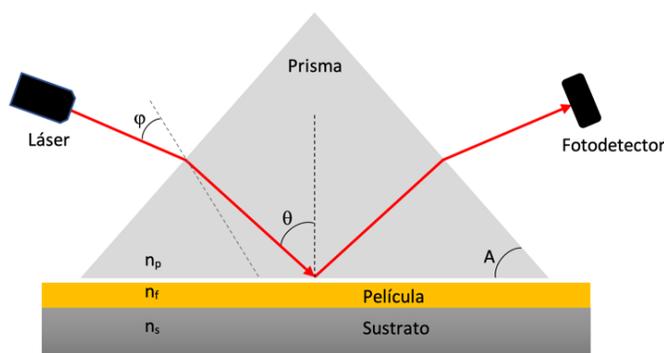
$n=1.457$ ), núcleo (ZnO,  $n=1.99$ ), cubierta (aire,  $n=1$ ) y la longitud de onda (632.8 nm); a partir de estos datos el programa calcula los parámetros ópticos característicos de las guías de onda.

### 3.4 Caracterización óptica de las guías de onda

Las guías de onda fabricadas fueron caracterizadas por distintas técnicas, por medio de la técnica de acoplamiento por prisma se midieron los índices de refracción efectivo de cada guía de onda, por medio de la técnica de acoplamiento fibra-guía se obtuvieron las imágenes de distribución de intensidad de los modos propagados y finalmente, por medio de la técnica de reducción (cutback method) se obtuvieron los datos para calcular las pérdidas de propagación de luz.

#### 3.4.1 Índice de refracción efectivo mediante acoplamiento por prisma

Para obtener el valor del índice de refracción efectivo de los modos propagados de las guías fabricadas, se utilizó la técnica de acoplamiento por prisma de alto índice de refracción. En esta técnica un haz de luz incide en la base de un prisma que está en contacto con la superficie de la guía de onda a diferentes ángulos y la luz reflejada es medida por un fotodetector a la salida del prisma (ver Figura 10). Para ciertos ángulos la luz se acopla a los modos de propagación de la guía por medio del tunelaje óptico, lo que resulta en una disminución en la intensidad de la luz detectada porque la luz ya no es reflejada, sino que viaja como modo a través de la guía de onda.



**Figura 10.** Arreglo óptico para obtener el índice de refracción efectivo.

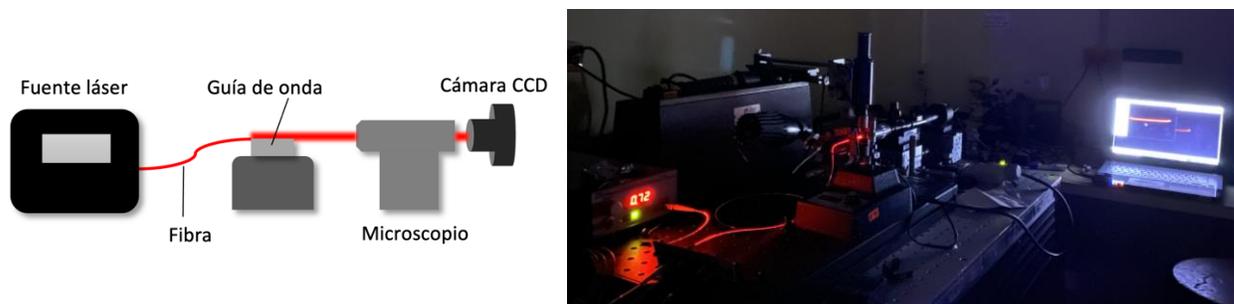
El valor del índice de refracción efectivo del modo propagado ( $n_m$ ) en la guía de onda al ángulo de acoplamiento utilizando la siguiente ecuación:

$$n_m = n_p \operatorname{sen} \left[ \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{\theta}{n_p} \right) + A \right], \quad (57)$$

donde  $n_p$  es el índice de refracción del prisma,  $\theta$  es el ángulo de incidencia en la película y  $A$  el ángulo de la base del prisma. El valor de los índices de refracción efectivos de las guías de onda de ZnO fueron analizados mediante el equipo de acoplamiento por prisma de alto índice Metricon modelo 2010.

### 3.4.2 Distribución de intensidad

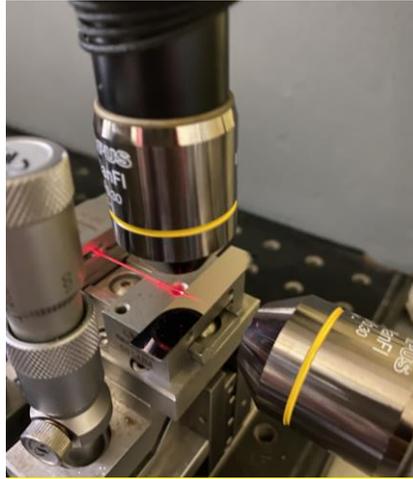
Por medio de la técnica de acoplamiento fibra – película se obtuvo la distribución de intensidad de los modos propagados en las guías de onda fabricadas. El arreglo óptico utilizado se muestra en la Figura 11, el cual consta de una fuente láser ( $\lambda=632.8$  nm) que tiene una fibra óptica con terminación en taper que se alinea a través de un sistema optomecánico de nanoposicionamiento con la entrada de la guía de onda, un microscopio viajero en la salida de la guía de onda que dirige la imagen a cámara CCD.



**Figura 11.** Arreglo óptico para capturar la distribución de intensidad.

La Figura 12 muestra cómo se realizó el acoplamiento de la luz en la guía de onda, se observa la luz que viaja desde la fibra óptica hacia la guía. Si se cumplen las condiciones necesarias de acoplamiento, el modo o la luz en la guía de onda puede propagarse. La luz propagada en la guía de onda sale y viaja a

través de un microscopio viajero colocado en la salida la cámara CCD, esta cámara permite obtener una imagen de distribución del modo de propagación.



**Figura 12.** Acoplamiento fibra - guía de onda, visto con luz blanca.

### 3.5 Pérdidas de propagación por el método de reducción

Las guías de onda pueden presentar pérdidas en la propagación de la luz afectando su eficiencia de propagación, los principales causantes son la absorción del material y esparcimiento por defectos estructurales.

Las pérdidas de propagación de la luz se definen a partir del coeficiente de absorción de la guía de onda  $\alpha_w$  (Márquez et al., 2013):

$$\alpha_w = \ln\left(\frac{P_0}{P_1}\right)/L, \quad (58)$$

y en decibeles  $\alpha_{w\text{dB}}$  (Prajzler et al., 2019):

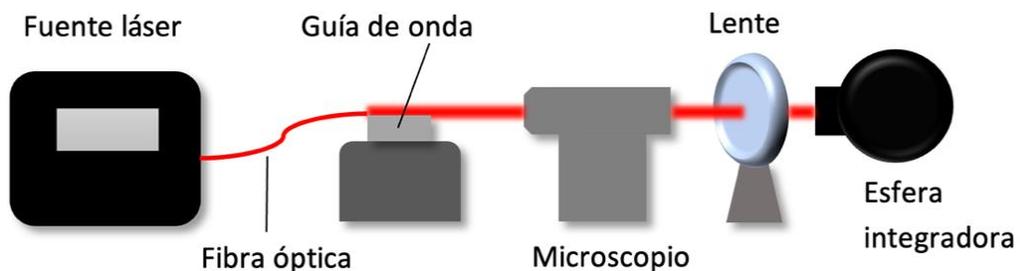
$$\alpha_{w\text{dB}} = -10 \log_{10}\left(\frac{P_0}{P_1}\right)/L, \quad (59)$$

donde  $P_0$  y  $P_1$  son la potencia de entrada y salida, respectivamente; y  $L$  es la longitud de la guía de onda.

Una técnica para medir las pérdidas o atenuación de la guía de onda es por medio del método de reducción (cutback method) usando el arreglo de la Figura 11 y sustituyendo la cámara CCD por una esfera integradora (ver Figura 13). En este método se mide la potencia de salida de diferentes longitudes de propagación de una guía de onda. Con los datos obtenidos se calculan las pérdidas usando la ecuación (60).

$$\alpha_{\text{wdB}} = -10 \frac{\log_{10} \left( \frac{P_0(\text{W})}{P_1(\text{W})} \right)}{L_0 - L_1(\text{cm})} \left( \frac{\text{dB}}{\text{cm}} \right), \quad (60)$$

donde  $P_0$  es la potencia de salida de  $L_0$  (mayor longitud) y  $P_1$  es la potencia de salida de  $L_1$  (menor longitud). Las longitudes de las guías de onda utilizadas en este trabajo fueron de: 1, 0.8, 0.6 y 0.4 cm, respectivamente.



**Figura 13.** Arreglo óptico para medir la potencia de salida de la guía de onda.

## Capítulo 4. Resultados y discusión

---

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las caracterizaciones fisicoquímicas de las guías de onda de ZnO fabricadas por ALD. Así mismo, se presentan y se comparan los resultados del guiado de luz obtenidos de forma experimental con los simulados. Con base en los resultados, se discute la importancia del trabajo realizado y su relevancia en futuras aplicaciones.

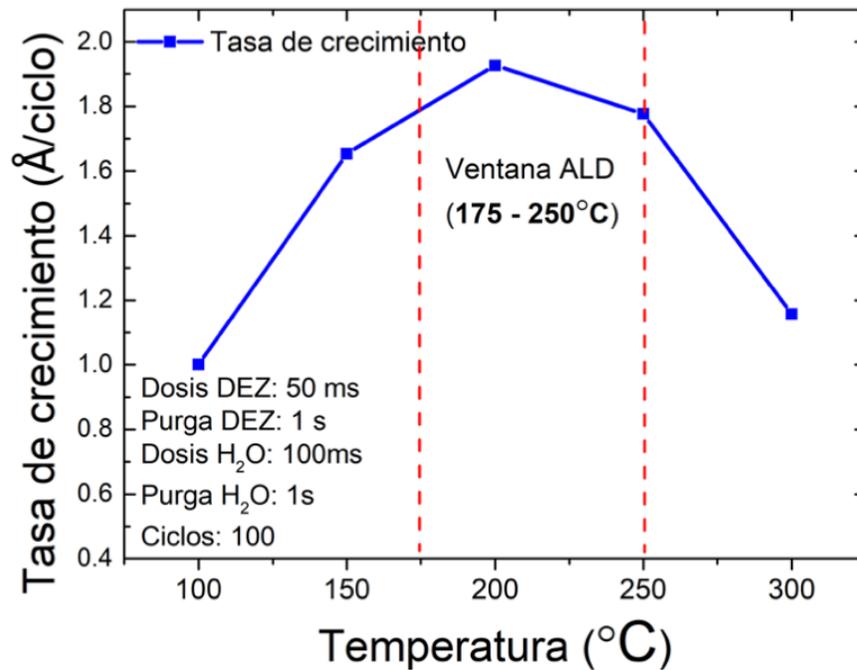
### 4.1 Curvas de calibración y parámetros de fabricación

La primera etapa del proceso experimental (sección 2.3) consistió en realizar un barrido de temperatura de depósito para obtener las curvas de calibración con el objetivo de conocer la tasa de crecimiento de las películas de ZnO. Para indicar dicha tasa de crecimiento en procesos ALD, comúnmente se utiliza el término de crecimiento por ciclo (GPC, por sus siglas en inglés) y este se determina dividiendo el espesor de la película por el número total de ciclos de depósito.

La Figura 14 muestra la dependencia de la tasa de crecimiento de ZnO con la temperatura de depósito ALD, se observa que la tasa de crecimiento aumenta con la temperatura (100 a 200 °C), alcanzando su punto máximo en 200 °C y disminuye a temperaturas muy altas (>250 °C), debido a la descomposición del precursor. La ventana ALD correspondiente a este trabajo se encuentra entre 175 a 250 °C, rango de temperatura donde el crecimiento es autolimitado, con una tasa de crecimiento que va de 1.77 a 1.92 Å/ciclo.

Se ha informado que la tasa de crecimiento máxima para ZnO al utilizar DEZ y agua desionizada en procesos ALD es de  $\sim 2$  Å/ciclo (Panigrahi et al., 2021); en este trabajo la tasa de crecimiento máxima que se obtuvo fue de  $\sim 1.92$  Å/ciclo a 200 °C (ver Figura 14). Este resultado concuerda con el reportado por Can-Uc et al., (2019) al utilizar los precursores DEZ y agua desionizada a 200 °C de depósito.

Para este trabajo se eligieron dos temperaturas de depósito para fabricar las guías de onda, 200 y 250 °C, la primera por presentar la tasa de crecimiento máxima y la segunda porque en trabajos previos se ha reportado que a esa temperatura se obtienen guías de onda con pérdidas bajas de propagación (Lizárraga-Medina et al., 2021).



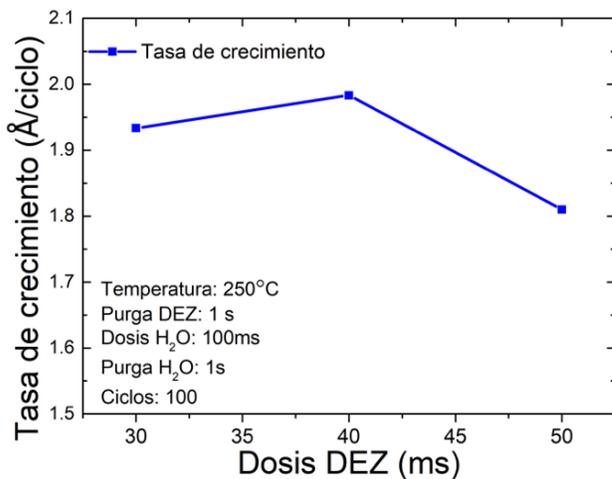
**Figura 14.** Ventana de temperatura ALD de óxido de zinc.

Se realizaron curvas de calibración variando los tiempos de dosis y purga de los precursores con el fin de optimizar el uso de material. La Figura 15 muestra las curvas de calibración para la temperatura de depósito de 250 °C a presión constante. De manera similar, se realizó la calibración para 200 °C. Los tiempos de dosis y purga seleccionados para cada temperatura se presentan en la Tabla 3.

Los tiempos de dosis y purga que se muestran en la Tabla 3 corresponden a la receta empleada para la fabricación de las guías de onda, la tasa de crecimiento utilizada para 200 y 250 °C fue de 1.9 y 1.67 Å/ciclo, respectivamente.

Se observa que la tasa de crecimiento en esta parte experimental disminuyó un poco a la obtenida en la Figura 14, esto puede atribuirse a las condiciones de la cámara de reacción del equipo, ya que en ella se deposita otros materiales. No obstante, la tasa obtenida sigue siendo alta y apta para depósitos de películas de ZnO.

a) Dosis DEZ



b) Purga

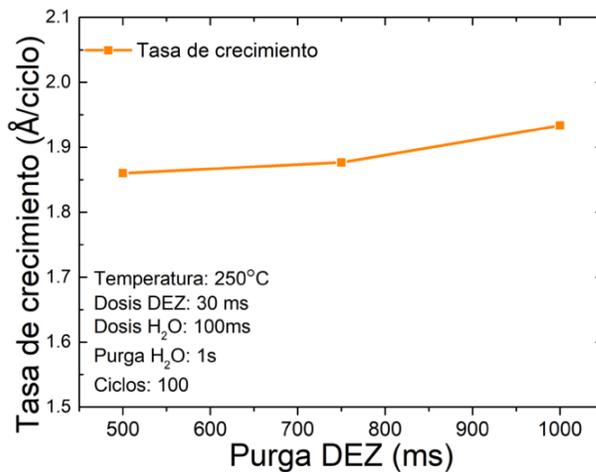
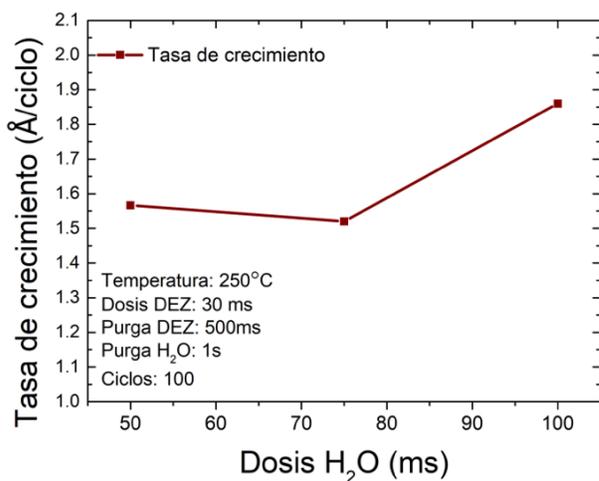
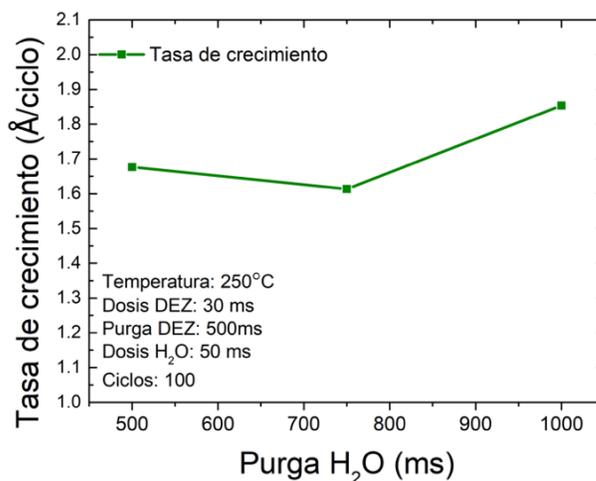
c) Dosis H<sub>2</sub>Od) Purga H<sub>2</sub>O

Figura 15. Curvas de calibración a) dosis DEZ, b) purga DEZ, c) dosis H<sub>2</sub>O y d) purga H<sub>2</sub>O.

Tabla 3. Tiempo de dosis y purga para depósitos de ZnO por ALD a 200 y 250 °C.

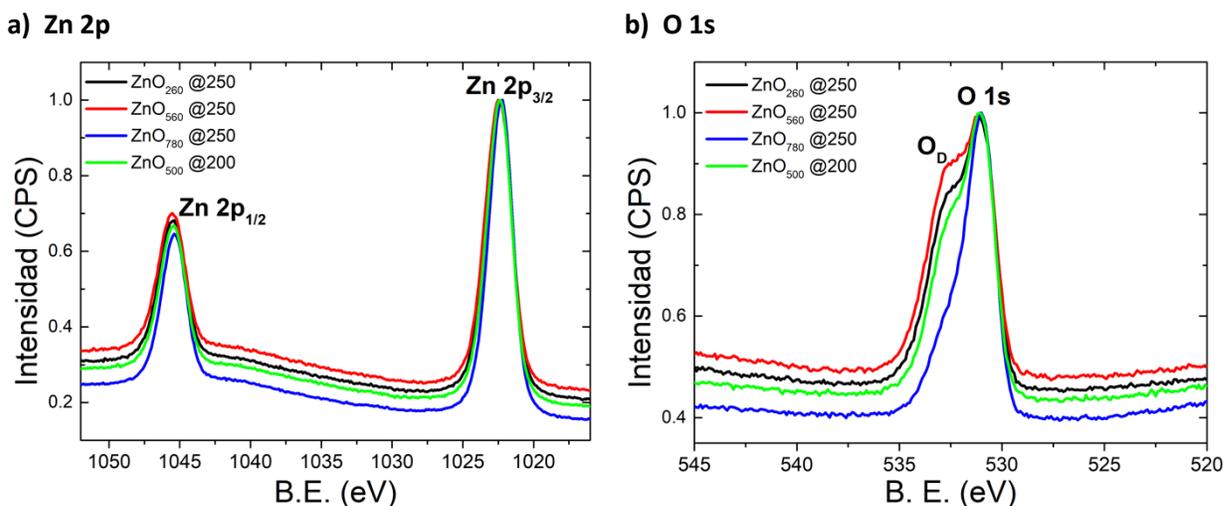
Temperatura de depósito	200 °C	250 °C
Tiempo de dosis (ms): DEZ	40	30
Tiempo de purga (ms): DEZ	750	500
Tiempo de dosis (ms): H <sub>2</sub> O	75	75
Tiempo de purga (ms): H <sub>2</sub> O	750	750
Tasa de crecimiento (Å/ciclo)	1.9	1.67

## 4.2 Caracterizaciones del material

### 4.2.1 Composición elemental

La Figura 16 muestra los espectros XPS de alta resolución de zinc (Zn 2p) y de oxígeno (O 1s) de las muestras de ZnO depositadas a 200 y 250 °C. En la Figura 16a se observa el doblete de Zn 2p a ~1022.5 y ~1045 eV, correspondientes a los estados de unión Zn 2p<sub>3/2</sub> y Zn 2p<sub>1/2</sub> del ZnO, respectivamente (Montiel-González et al., 2017).

La Figura 16b muestra dos señales, una de alta intensidad alrededor de 530 eV correspondiente a O 1s, la cual está relacionado con los iones O<sup>2-</sup> de la red cristalina de Zn-O; y la otra alrededor de 533 eV, que se les atribuye a defectos de oxígeno originado por iones OH<sup>-</sup>, oxígenos intersticiales o vacancias de Zn (Panigrahi et al., 2021).



**Figura 16.** Espectro XPS de alta resolución de muestras de ZnO, a) Zn 2p y b) O 1s.

Se observa que la película de 780 nm (ZnO<sub>780</sub>) solo presenta una señal de intensidad alrededor de 530 eV comparada con las otras de menor espesor y de más baja temperatura, este resultado puede deberse a que una temperatura alta de depósito permitió que el DEZ finalizara su reacción y con ello, los grupos OH se redujeran. No obstante, en la literatura se menciona que las intensidades más altas alrededor

de 533 eV se deben a que los iones OH están en la superficie de las muestras y que el oxígeno o agua del ambiente puede contribuir a esta señal (Montiel-González et al., 2017).

Además, en la Figura 16b se puede observar que la muestra de ZnO<sub>500</sub> (línea verde) que fue depositada con la temperatura más óptima (200 °C) comparada con la muestra de espesor similar ZnO<sub>560</sub> (línea roja) depositada a 250 °C, presentó una señal de intensidad menor correspondiente a vacancias de oxígeno, este resultado es congruente con el obtenido en la Figura 14, donde se esperaba que las muestras depositadas a 200 °C presentaran mayor estequiometría.

Por otro lado, para ver cómo influye las vacancias de oxígeno en la estructura de las películas de ZnO, se puede emplear la técnica de espectroscopía de pérdidas de energía de electrones reflejados (REELS, por sus siglas en inglés) para determinar la densidad de masa, se esperaría que la densidad de masa tenga una tendencia similar a las vacancias de oxígeno, ya que la pérdida de masa de oxígeno puede reducir la densidad de masa total. Así mismo, estas vacancias de oxígeno pueden llegar a modificar la cristalinidad de las películas, como se verá en los resultados de XRD.

#### 4.2.2 Estructura cristalina y tamaño de cristal

Para convalidar la formación de la fase cristalina del ZnO, la Figura 17 muestra el patrón de rayos X de las muestras de 260, 560 y 780 nm de ZnO depositadas a 250 °C en sustratos de silicio. En todas las muestras se observan picos de difracción con mayor intensidad a 31.76° (100), 36.23° (101) y 56.65° (110); y con muy poca intensidad a 34.39° (002), y 67.98° (112); correspondientes a los planos cristalinos de la estructura wurtzita del ZnO (JCPDS no. 36-1451), donde la orientación preferencial corresponde al plano (100).

Se observa que la intensidad de los picos de difracción aumenta con el espesor, esto puede ser un indicador del incremento en la población de cristalitas (granos), pero no necesariamente del tamaño del cristalito (Montiel-González et al., 2017). Por medio de la fórmula de Scherrer, se estimó el tamaño de grano de los planos cristalinos (100), (101) y (110). Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Los resultados mostraron que el tamaño de grano obtenido a partir de cada plano indicado anteriormente, aumenta con el espesor, teniendo un promedio de tamaño de grano de 15.2 nm, 20.8 nm y 23.9 nm para las muestras de 260 nm, 560 nm y 780 nm de espesor, respectivamente. De estos

resultados de XRD, se puede decir que las muestras obtenidas por ALD eran policristalinas con tamaño de cristal entre 15.2 nm y 23.9 nm.

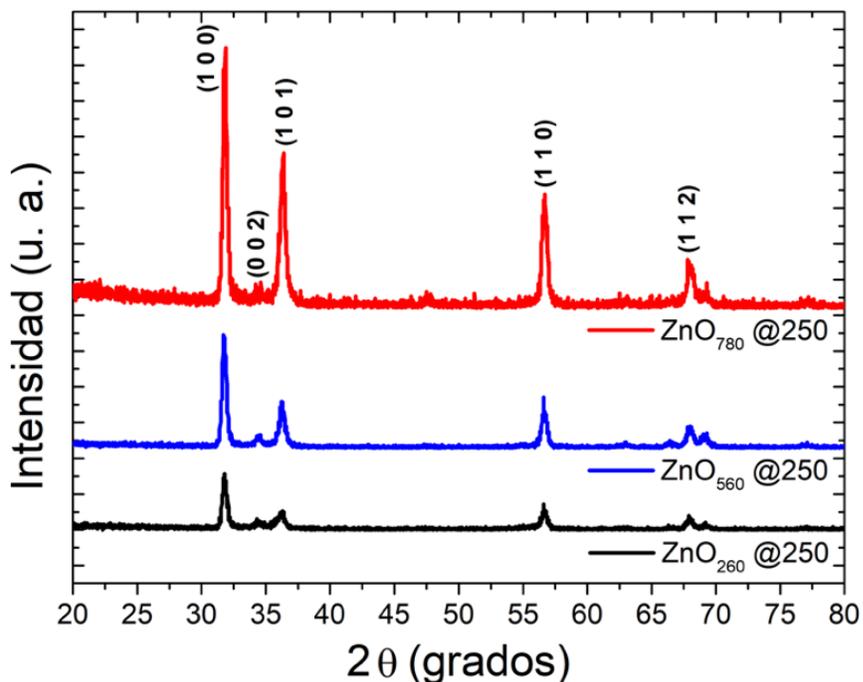


Figura 17. Patrones de difracción de rayos X para películas delgadas de ZnO.

Tabla 4. Tamaño de grano de los nanocristales de las muestras ZnO 260 nm, ZnO 560 nm y ZnO 780 nm.

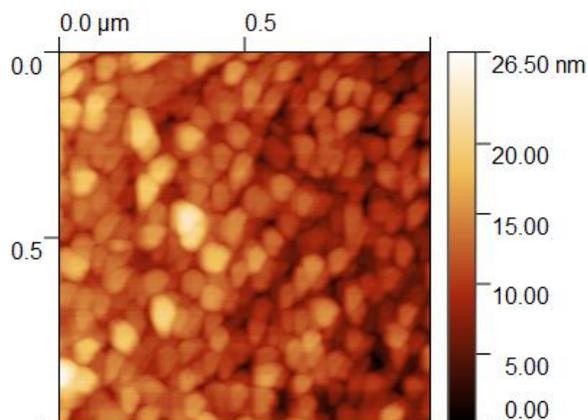
Muestras	Tamaño de cristal (nm)			
	(100)	(101)	(110)	Promedio
ZnO <sub>260</sub> @250	17.8	13.4	14.5	15.2
ZnO <sub>560</sub> @250	21.4	21.7	19.4	20.8
ZnO <sub>780</sub> @250	23.9	21.7	26.1	23.9

#### 4.2.3 Rugosidad superficial

Las películas fueron caracterizadas por AFM para conocer la rugosidad de la superficie, la ventana de medición empleada fue de 1  $\mu\text{m}^2$ . La Figura 18 muestra la morfología de la superficie de las películas de ZnO analizadas por AFM. La rugosidad superficial fue estimada a partir de las imágenes de AFM.

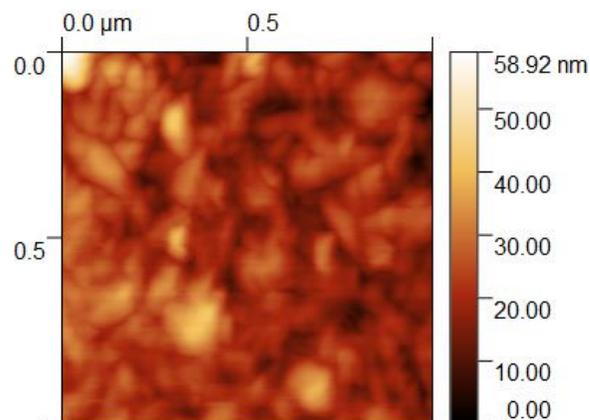
La Figura 18a corresponde, a la muestra  $\text{ZnO}_{260}$ , se observa que los cristalitas se encuentran distribuidos homogéneamente a lo largo del área de análisis, además, el tamaño de cristal es uniforme, la rugosidad superficial estimada fue de 3.4 nm. La Figura 18b corresponde a la muestra  $\text{ZnO}_{560}$ , se observa que los cristales ya no están distribuidos homogéneamente y el tamaño de cristales es más irregular, presentando una rugosidad de 6.2 nm. Finalmente, la Figura 18c corresponde a la muestra  $\text{ZnO}_{780}$ , la distribución de los cristalitas es más aleatoria y el tamaño de cristal es aún mayor, con una rugosidad de 8.4 nm.

a)  $\text{ZnO}_{260}$  @250



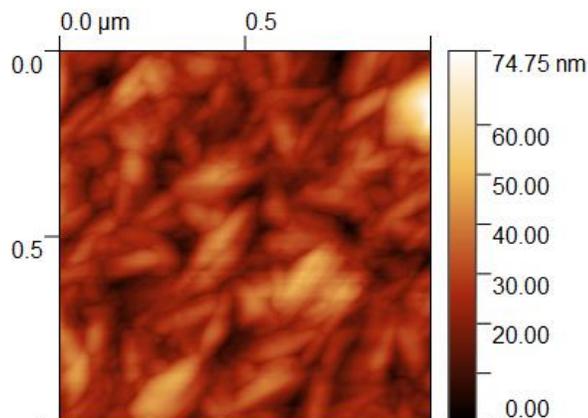
Rugosidad: 3.4 nm

b)  $\text{ZnO}_{560}$  @250



Rugosidad: 6.2 nm

c)  $\text{ZnO}_{780}$  @250

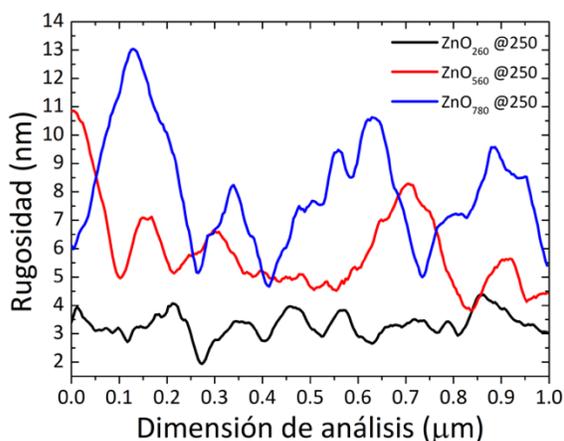


Rugosidad: 8.4 nm

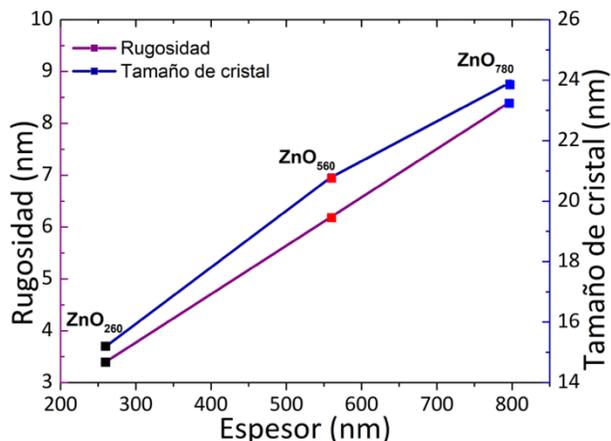
**Figura 18.** Imágenes AFM de películas de ZnO depositadas a 250 °C en sustratos de silicio + 4  $\mu\text{m}$   $\text{SiO}_2$ , a) 260 nm, b) 560 nm y c) 780 nm.

En la Figura 19a se puede apreciar que la rugosidad de las películas fabricadas aumenta con el espesor. Esta misma tendencia se observa en el tamaño de cristal obtenido por XRD (Figura 19b); la muestra  $\text{ZnO}_{260}$  presentó menor rugosidad y tamaño de grano, por lo que se espera que las pérdidas de propagación por esparcimiento sean menores comparadas con las muestras de  $\text{ZnO}_{560}$  y  $\text{ZnO}_{780}$  que presentaron mayor rugosidad y tamaño de grano, como se discutirá más adelante (sección 4.4).

a) Perfil de rugosidad



b) Tendencia de la rugosidad y tamaño de cristal



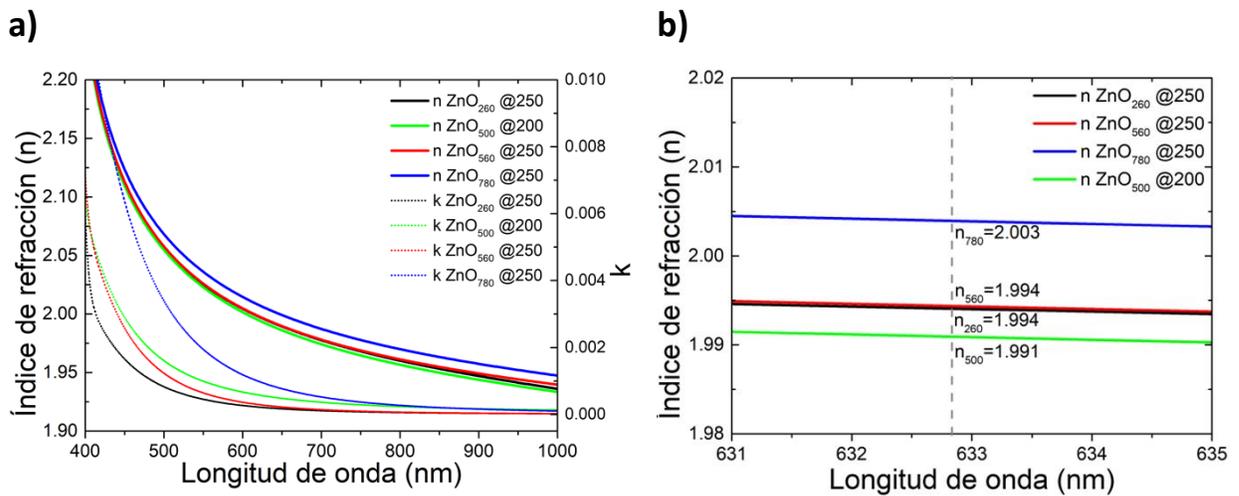
**Figura 19.** a) Perfil de rugosidad obtenida de las imágenes AFM, b) Tendencia de la rugosidad y tamaño de cristal respecto al espesor.

#### 4.2.4 Espesor e índice de refracción

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis elipsométrico de las películas fabricadas. A partir de esas mediciones se logró obtener la dispersión de la parte real e imaginaria ( $n$  y  $k$ ) del índice de refracción de las películas de  $\text{ZnO}$  en una longitud de onda que va de 390 a 1000 nm, como se muestra en la Figura 20a. Se observa que el índice de refracción real de las muestras presenta un valor de  $\sim 1.99$  mientras que el valor del coeficiente de absorción es cercano a cero para  $\lambda = 632.8$  nm. Un análisis más de cerca se da en la Figura 20b, se aprecia que el índice de refracción de las cuatro muestras varía en el tercer decimal, la muestra  $\text{ZnO}_{500}$  (línea verde) depositada a  $200^\circ\text{C}$  presentó un valor de 1.991, siendo la muestra con menor índice de refracción.

Las tres muestras restantes que fueron depositadas a  $250^\circ\text{C}$  presentaron los siguientes valores, para la muestra  $\text{ZnO}_{260}$  un valor de 1.9941, la muestra de  $\text{ZnO}_{560}$  un valor de 1.9944 y finalmente, la muestra de  $\text{ZnO}_{780}$  un valor de 2.003, esta muestra obtuvo el índice de refracción más alto, así también, fue la que no presentó vacancias de oxígeno como se puede apreciar en el espectro XPS (ver Figura 16b). A partir de

estos resultados ópticos, se obtuvo el espesor y la transmitancia de las películas como se verá en la sección 3.2.5. Los espesores obtenidos se muestran en la ..



**Figura 20.** Curvas de dispersión de las guías de onda de ZnO: a) todas las muestras, b) valores alrededor de  $\lambda = 632.8$  nm

El espesor para la muestra ZnO<sub>260</sub> fue de 259.37 nm (Tabla 5), este espesor es apto para una guía de onda monomodal en la longitud de onda propuesta como se verá en la sección 3.3; los espesores de las muestras restantes también siguen siendo aptas para guías de onda, pero en el régimen multimodal.

**Tabla 5.** Espesores, índices de refracción ( $\lambda = 632.8$  nm) y MSE, obtenidos por elipsometría.

Muestra	Espesor (nm)	Índice de refracción	MSE
ZnO <sub>260</sub> @250	259.37	1.994	8.385
ZnO <sub>500</sub> @200	506.71	1.991	23.761
ZnO <sub>560</sub> @250	560.46	1.994	17.878
ZnO <sub>780</sub> @250	796.57	2.003	32.937

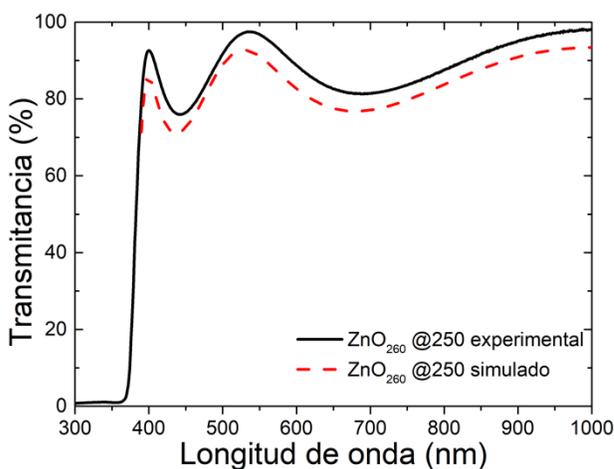
#### 4.2.5 Transmitancia y absorbancia

Los espectros de transmitancia óptica de las guías de onda en sustratos transparentes de sílica fundida, en el rango de longitud de onda de 200 a 1100 nm se muestran en la Figura 21. La línea negra continua es el valor medido experimentalmente, mientras que la línea roja discontinua es el valor simulado a partir del índice de refracción usando el software OpenFilters.

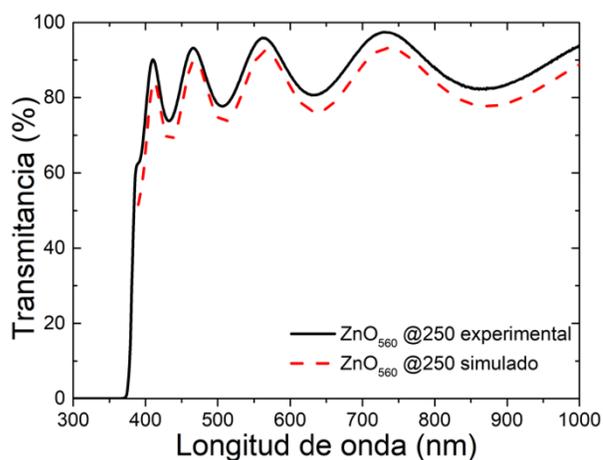
Los espectros muestran que las guías de onda presentan una fuerte absorción en el rango espectral del ultravioleta y son transparentes a partir de  $\sim\lambda=400$  nm con una transmitancia óptica por encima del 80% y aumenta conforme la longitud de onda se hace más grande. Además, se observa que la absorción es menor en la guía de onda de 260 nm (Figura 21a) y aumenta conforme el espesor de la guía de onda se hace más grueso, como es el caso de la guía de onda de 780 nm (Figura 21c).

También se aprecia que las oscilaciones presentes en los espectros se incrementan conforme aumenta el espesor de la guía de onda, esto se debe a la interferencia de la luz al atravesar el sistema aire-película-sustrato y mientras más gruesa sea la película ocurren más reflexiones múltiples.

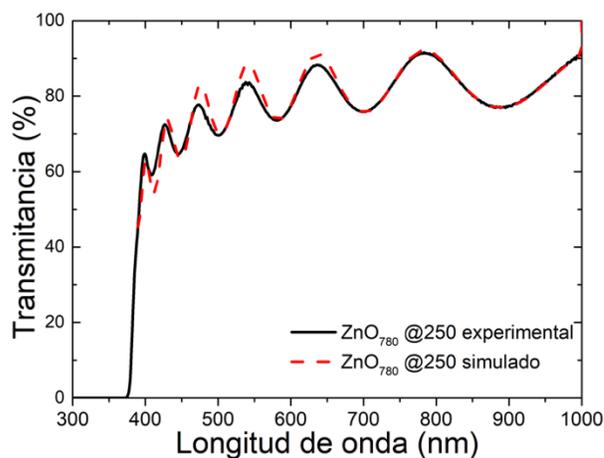
a) ZnO<sub>260</sub> @250



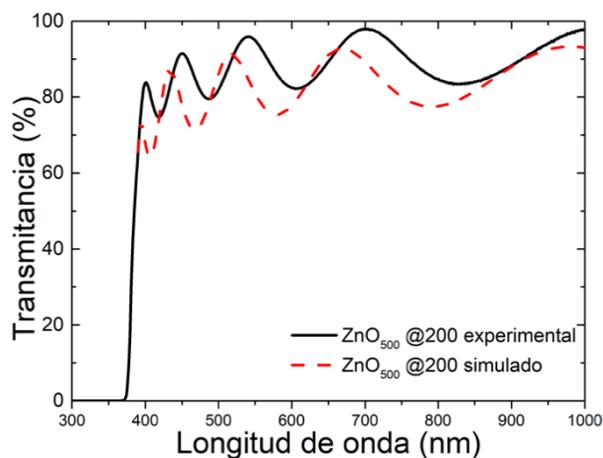
b) ZnO<sub>560</sub> @250



c) ZnO<sub>780</sub> @250

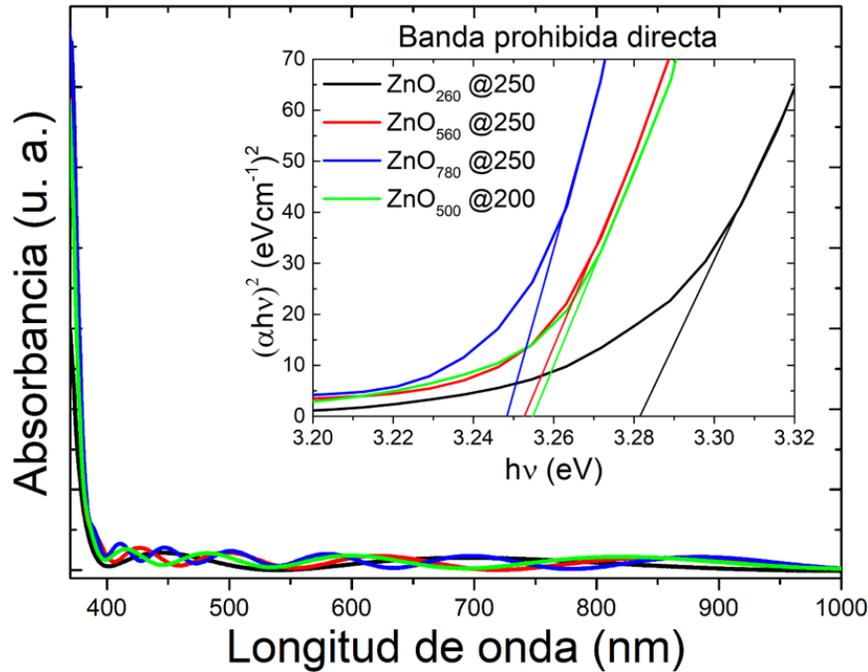


d) ZnO<sub>500</sub> @200



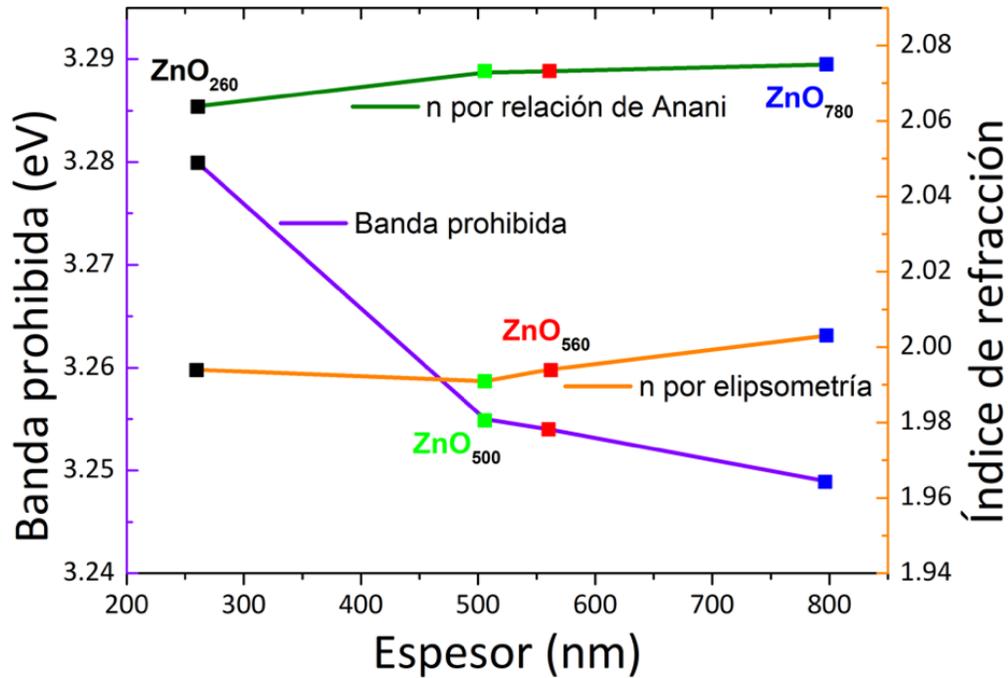
**Figura 21.** Espectro de transmitancia de las guías de onda a) ZnO 260 nm, b) ZnO 560 nm, c) ZnO 780 nm y d) ZnO 500 nm.

La Figura 22 muestra el espectro de absorción de las guías de onda, se observa un borde de absorción en  $\sim\lambda=390\text{nm}$ , que corresponde a la banda prohibida óptica. El valor de la banda prohibida de cada muestra se obtuvo por el método gráfico de Tauc, a partir de los datos del espectro de absorción. El recuadro de la Figura 22 muestra las gráficas de  $(\alpha h\nu)^2$  frente a la energía. La banda prohibida óptica (band gap) para las muestras de ZnO fueron de: 3.28 eV, 3.255, 3.254 y 3.249 eV para 260 nm, 500 nm (200 °C de depósito), 560 nm y 780 nm, respectivamente.



**Figura 22.** Espectro de absorción de las guías de onda de ZnO. El recuadro indexado contiene la banda prohibida directa de las diferentes muestras.

La Figura 23 muestra la dependencia de la banda prohibida y el índice de refracción con respecto al incremento de espesor de película. Se observa que el valor de la banda prohibida disminuye y el índice de refracción aumenta. Esta tendencia es general para la mayoría de los materiales, y se explica por una mayor disponibilidad de los electrones para interactuar con el campo eléctrico de la radiación incidente, resultando en una menor velocidad de la luz en el medio.



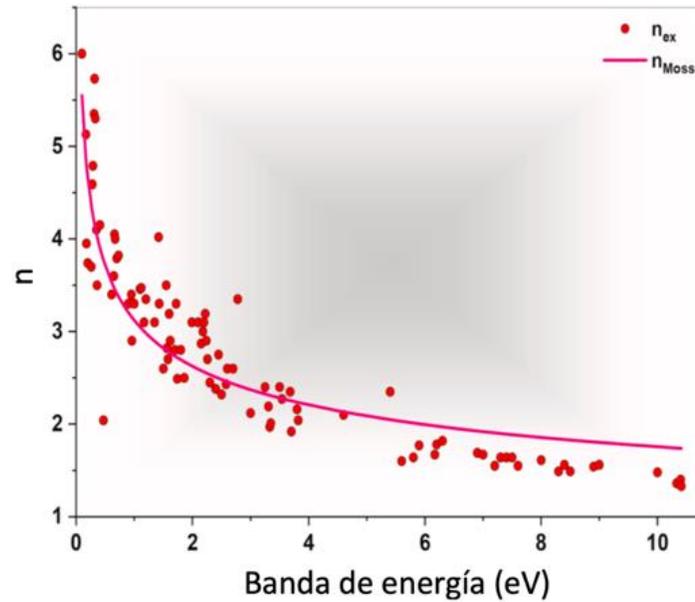
**Figura 23.** Relación entre la energía de la banda prohibida e índice de refracción en función del espesor.

Existen varias ecuaciones empíricas-físicas que relacionan el índice de refracción ( $n$ ) con la energía de banda prohibida ( $E_g$ ), en todas ellas la relación de estas propiedades es inversa. Por ejemplo, la relación de Moss ( $n^4 E_g = 95$ ) se presenta en la Figura 24 para algunos materiales (Gomaa et al., 2021).

En nuestro caso, se empleó la relación propuesta por Anani (Gomaa et al., 2021):

$$n = \sqrt{\frac{12.417}{E_g - 0.365}} \quad (61)$$

La relación matemática indica que el índice de refracción incrementa ligeramente entre la película de menor y mayor espesor ( $ZnO_{260}$  y  $ZnO_{780}$ ). La tendencia observada por elipsometría es similar, aunque desplazados hacia valores menores.



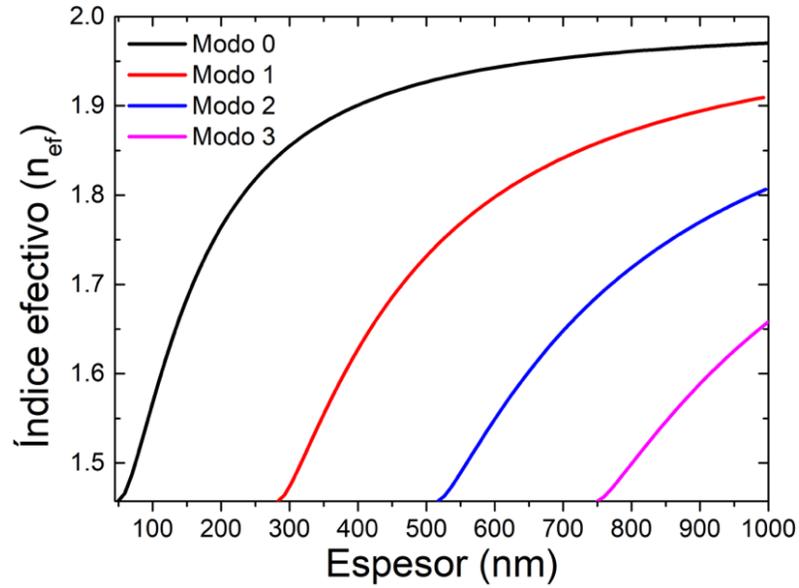
**Figura 24.** Relación entre índice de refracción y energía de banda prohibida. Comparación entre valores experimentales y la ecuación de Moss. Adaptada de Gooma et al., 2021.

### 4.3 Simulación de las propiedades ópticas

Es importante conocer las características de una guía de onda como el espesor del núcleo antes de fabricarse, esto permite optimizar recursos. Por lo cual, se requiere un diseño antes de fabricar una guía de onda. En este trabajo, el diseño consistió en la simulación de las propiedades de la guía de onda, los resultados se muestran a continuación.

#### 4.3.1 Modos de propagación

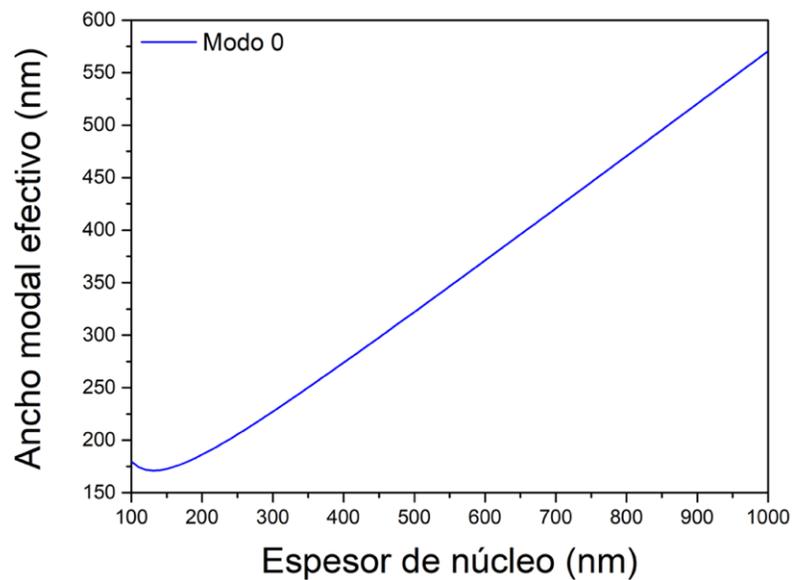
Las curvas de corte modal permiten obtener el número de modos que soportará una guía de onda. La Figura 25 muestra las curvas de corte modal de una guía de onda plana de ZnO ( $n=1.99$ ) en función del índice efectivo y del espesor del núcleo para  $\lambda=632.8$  nm. Se observa que el régimen monomodal de la guía de onda de ZnO está por debajo de  $\sim 270$  nm de espesor y conforme aumenta el espesor del núcleo van apareciendo más modos de propagación.



**Figura 25.** Curvas de corte modal en función del índice de refracción efectivo y el espesor del núcleo para  $\lambda = 632.8$  nm.

#### 4.3.2 Ancho modal efectivo

La Figura 26 muestra el ancho modal efectivo del modo fundamental de la guía de onda de ZnO, usando el criterio de  $1/e^2$ . Se observa que por debajo de  $\sim 150$  nm de espesor, el ancho modal es mayor al ancho del núcleo, lo que indica que solo una parte del modo viaja en el núcleo. También se observa que, por encima de 200 nm de espesor, el ancho modal aumenta linealmente.



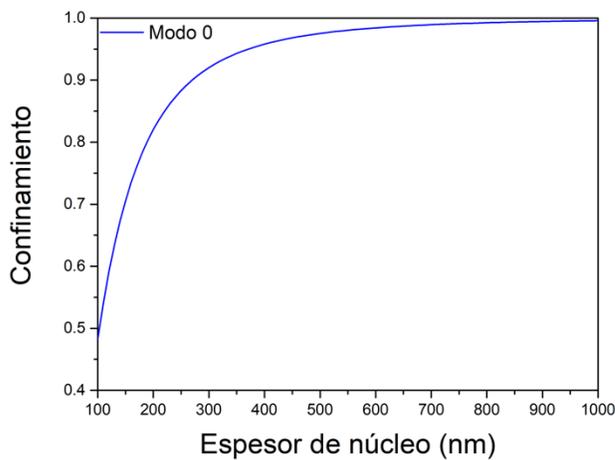
**Figura 26.** Ancho modal normalizado en función del espesor de núcleo.

Estos valores indican que a partir de los 200 nm de espesor la mayor parte del modo viajará en el núcleo de la guía y aumentará su valor conforme el núcleo se vuelva más grueso. Cabe recordar que el modo viaja por toda la estructura (sustrato-núcleo-cubierta) de la guía de onda, por lo cual, es importante el análisis del confinamiento del modo en el núcleo.

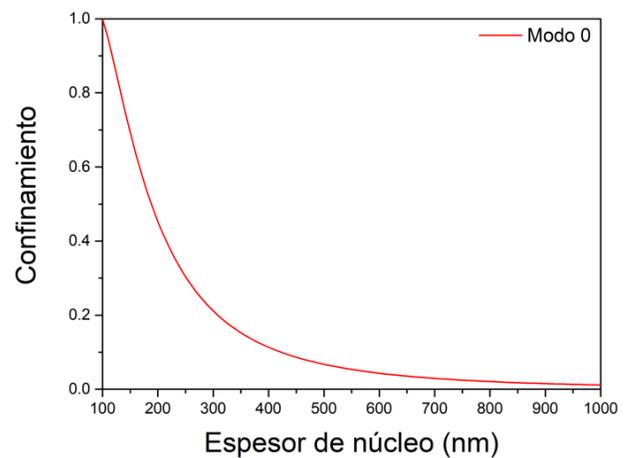
### 4.3.3 Confinamiento del modo de propagación

La Figura 27 muestra el confinamiento de la luz en el núcleo y en la cubierta en función del espesor de núcleo de la guía de onda. Se observa que a partir de 300 nm de espesor el confinamiento del modo fundamental es mayor al 90% para la guía de onda de ZnO e incrementa conforme aumenta el espesor del núcleo.

**a) Confinamiento en el núcleo**



**b) Confinamiento en la cubierta**



**Figura 27.** Confinamiento de la luz a) en el núcleo y b) en la cubierta, en función del espesor de núcleo.

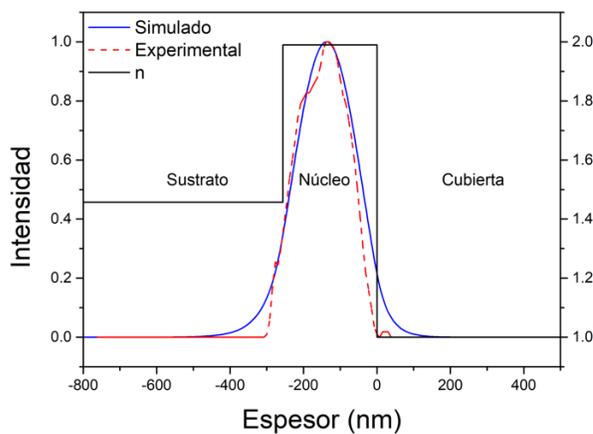
También se puede observar que el confinamiento en la cubierta disminuye conforme aumenta el confinamiento en el núcleo. Estos resultados teóricos indican que el material propuesto es apto para ser empleado como núcleo de una guía de onda, donde se espera que la luz viaje confinado mayormente en el núcleo.

#### 4.3.4 Distribución de intensidad del campo eléctrico

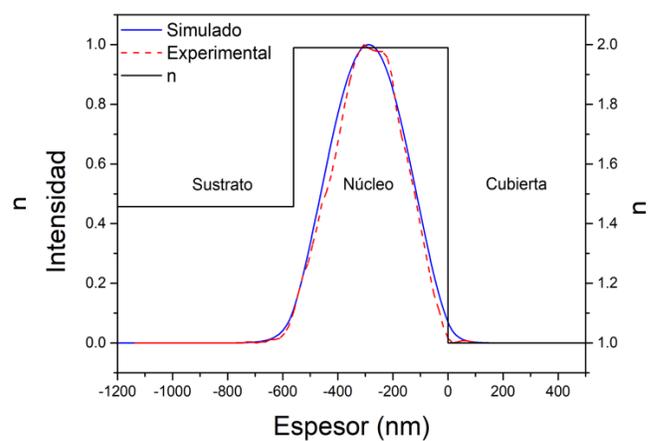
La Figura 28 muestra la distribución de intensidad para el modo fundamental que viaja en el núcleo de la guía de onda de ZnO a una longitud de onda de 632.8 nm. La distribución de intensidad simulada (polarización TE) y experimental (sin polarización) para el campo eléctrico se obtuvieron para cada muestra.

Se observa que la curva de intensidad está distribuida en el núcleo de la guía, esto quiere decir que gran parte del modo viaja confinado en el núcleo de la guía de onda. También se observa que cada muestra presenta diferentes decaimientos en las zonas del sustrato y cubierta debido al espesor del núcleo y a la asimetría de la guía de onda (sustrato y cubierta con diferente índice de refracción).

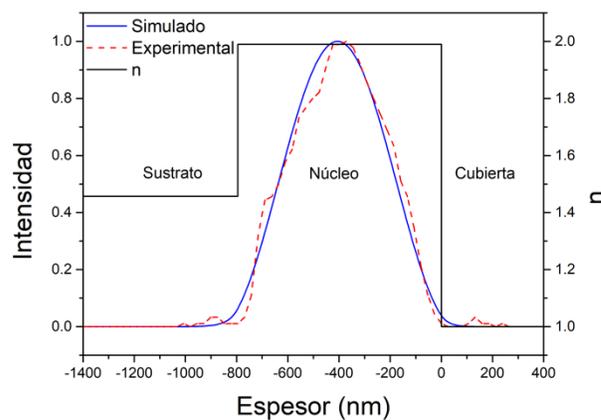
a) ZnO<sub>260</sub> @250



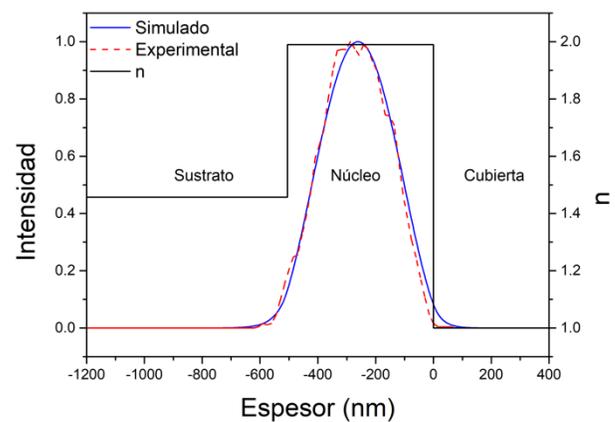
b) ZnO<sub>560</sub> @250



c) ZnO<sub>780</sub> @250



d) ZnO<sub>500</sub> @200



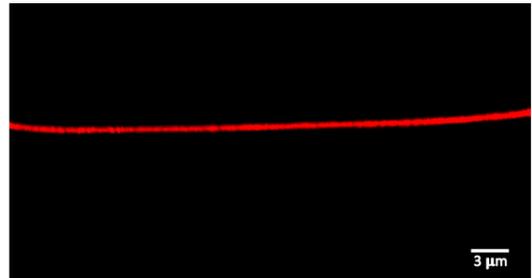
**Figura 28.** Distribución de intensidad del modo fundamental TE simulada y experimental para las guías de onda con núcleo de a) 260 nm, b) 560 nm, c) 780 nm y 500 nm, a  $\lambda=632.8$  nm.

La Figura 29 muestra la imagen de salida de la distribución de la luz ( $\lambda=632.8$  nm) de cada guía de onda. Se observa que las cuatro guías con diferente espesor de núcleo funcionaron confinando la luz. A partir de estas imágenes se obtuvo el perfil experimental de la distribución de intensidad que se presentaron en la Figura 28.

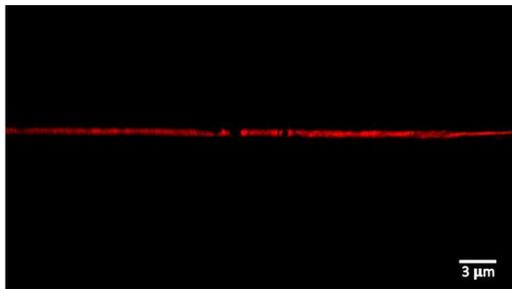
a) ZnO<sub>260</sub> @250



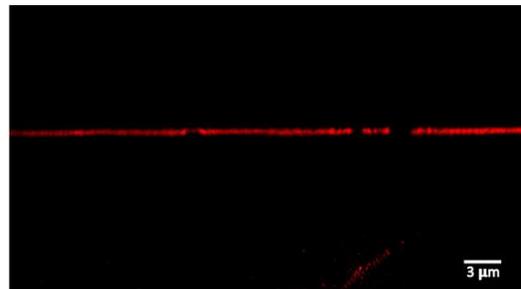
b) ZnO<sub>560</sub> @250



c) ZnO<sub>780</sub> @250



d) ZnO<sub>500</sub> @200



**Figura 29.** Imágenes de distribución de intensidad tomadas con una cámara CCD.

#### 4.4 Índice de refracción efectivo

El índice de refracción efectivo ( $n_e$ ) es un parámetro que indica si el modo de propagación viaja confinado en la guía de onda. El índice efectivo para la luz confinada en el núcleo de la guía de onda de ZnO toma valores entre 1.457 y 1.99, correspondientes al índice de refracción del sustrato ( $n_s$ ) y del núcleo ( $n_f$ ), respectivamente. Usando la técnica de acoplamiento por prisma de alto índice de refracción (ver Figura 10) se obtuvieron los índices efectivos TE y TM de los modos que pueden viajar confinados en la guía de onda.

La Figura 30 muestra las curvas experimentales de la luz reflejada en las guías de onda, cuando la luz incide en el ángulo de acoplamiento y viaja a través de la guía de onda se origina una caída en la intensidad de la luz capturada. Se observa que la guía de 260 nm presentó el modo fundamental (modo

0), las guías de 500 nm y 560 nm presentaron el modo 0 y 1; y la guía de 780 nm presentó el modo 0, modo 1 y modo 2, para la polarización TE y TM con  $\lambda = 632.8$  nm en todos los casos. Estos resultados son congruentes con los obtenidos de la simulación de curvas de corte modal (ver Figura 25).

La Tabla 6 muestra los índices efectivos TE y TM para todas las muestras con  $\lambda = 632.8$  nm. Los valores de índices efectivos para cada modo estuvieron entre 1.457 y 1.99, lo que indica que el modo de propagación viaja confinado en el núcleo de la guía de onda. Además, se observa concordancia en los valores experimentales y simulados.

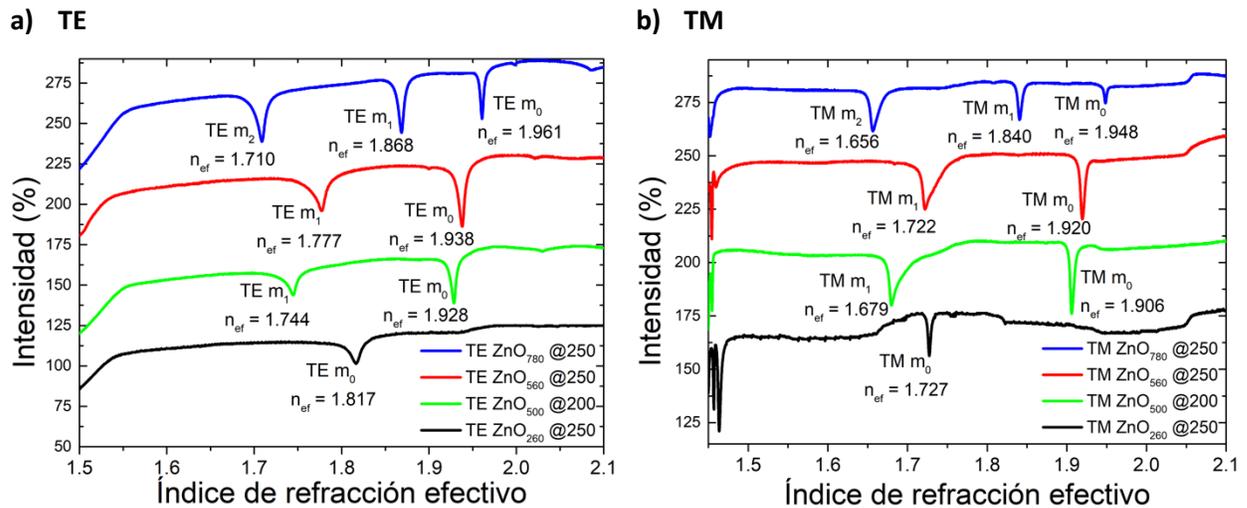


Figura 30. Curvas obtenidas a partir del acoplamiento por prisma en polarización a) TE y b) TM.

Tabla 6. Valores de índices efectivos TE y TM simulados y experimentales

Muestras	Espesor por elipsometría	Modo 0 (TE)		Modo 1 (TE)		Modo 2 (TE)	
		Calculado	Experimental	Calculado	Experimental	Calculado	Experimental
ZnO <sub>260</sub> @250	255.87	1.822	1.816				
ZnO <sub>500</sub> @200	505.17	1.927	1.906	1.735	1.744		
ZnO <sub>560</sub> @250	560.49	1.937	1.938	1.775	1.777		
ZnO <sub>780</sub> @250	795.40	1.960	1.961	1.871	1.868	1.716	1.710
Muestras	Espesor por elipsometría	Modo 0 (TM)		Modo 1 (TM)		Modo 2 (TM)	
		Calculado	Experimental	Calculado	Experimental	Calculado	Experimental
ZnO <sub>260</sub> @250	255.87	1.737	1.730				
ZnO <sub>500</sub> @200	505.17	1.909	1.906	1.666	1.679		
ZnO <sub>560</sub> @250	560.49	1.923	1.920	1.720	1.722		
ZnO <sub>780</sub> @250	795.40	1.955	1.948	1.848	1.840	1.666	1.656

## 4.5 Pérdidas de propagación

Las aplicaciones de las guías de onda van directamente relacionadas con la longitud de operación y con su eficiencia, por lo tanto, es necesario caracterizar muy bien el valor de pérdidas de propagación de luz en la guía de onda, esto es un indicador que nos dice la calidad de nuestras guías de onda. En este trabajo, las pérdidas de propagación se midieron utilizando el método de reducción (cutback method).

Los valores obtenidos de pérdidas de propagación de las muestras de ZnO<sub>260</sub> y ZnO<sub>560</sub> para  $\lambda=632.8$  nm se muestran en la Tabla 7. Los valores indican que la guía más eficiente fue la de 260 nm, con pérdidas de propagación de 8 dB/cm, en cambio, la guía de 560 nm fue menos eficiente, con pérdidas de 12 dB/cm.

**Tabla 7.** Valores de pérdidas de propagación para guías de onda de 260 nm y 560 nm, a  $\lambda=632.8$  nm.

ZnO 260 nm			ZnO 560 nm		
	cm <sup>-1</sup>	dB/cm		cm <sup>-1</sup>	dB/cm
Set 1	2.9	13	Set 1	3.58	16
Set 2	<b>1.96</b>	<b>8</b>	Set 2	3	13.3
Set 3	2.6	11.8	Set 3	<b>2.8</b>	<b>12</b>
Set 4	3.1	12.9			

Recordando los resultados de la caracterización por XPS, la muestra de 560 nm presentó una señal de intensidad un poco más alta que la muestra de 260 nm a 533 eV, que está relacionada a vacancias de oxígeno, que pueden llegar a modificar la cristalinidad; así mismo, los resultados de XRD mostraron que las guías de onda obtenidas eran policristalinas con tamaños de grano que fueron incrementando conforme al espesor, al igual que la rugosidad. Estos cambios o defectos en la estructura del ZnO pueden contribuir al incremento de las pérdidas provocando un esparcimiento de la luz.

Estos resultados indican que las pérdidas por esparcimiento logran afectar mayormente la propagación de la luz en las guías con núcleos más gruesos, como fue el caso de la guía de 560 nm, la cual presentó pérdidas de 12 dB/cm, y a su vez, el tamaño de grano y rugosidad fueron más altos, comparados con la guía de 260 nm.

## Capítulo 5. Conclusiones y trabajo a futuro

---

En el trabajo presentado se estudió la síntesis de óxido de zinc para ser utilizado como núcleo de guías de onda ópticas con aplicaciones optoelectrónicas. El trabajo comprendió el diseño de guías de ondas planas por medio de la simulación de sus parámetros ópticos y estructurales; la síntesis del material por la técnica de depósito de capa atómica y las caracterizaciones fisicoquímicas y ópticas de las guías de ondas obtenidas. Particularmente, se ha encontrado que:

Las condiciones de depósito (temperatura, dosis y purga de precursores) de ZnO obtenidas a partir de las curvas de calibración, permitieron producir películas delgadas viables para ser empleadas como núcleo de guías de onda ópticas. Así mismo, la tasa de crecimiento obtenida permitió controlar el espesor de las guías de onda fabricadas por ALD.

Los resultados de elipsometría arrojaron que se obtuvieron películas delgadas con índice de refracción de  $\sim 1.99$  con una transmitancia arriba del 80% para la longitud de onda de 632.8 nm. La caracterización por XPS demostró que las películas de ZnO obtenidas, presentaron vacancias de oxígeno, lo que puede ocasionar defectos en la estequiometría y estructura del material. Además, la caracterización por XRD arrojó que las películas eran policristalinas con orientación preferencial del plano (100). Por medio de la caracterización por AFM se observó que la rugosidad de las películas aumenta con el espesor, así como el tamaño de grano, estos resultados pueden indicar que los defectos estructurales son mayores en las guías de onda con mayor espesor y pueden ocasionar que la eficiencia de las guías de onda se vea afectada.

Las mediciones del índice efectivo indicaron que existía confinamiento del modo fundamental en el núcleo de las guías fabricadas, donde la guía de 260 nm presentó un comportamiento monomodal y las restantes, multimodal en la longitud de onda de 632.8 nm

Las guías de onda con espesor de núcleo de 260 nm, 560 nm, 780 nm y 500 nm depositadas a 250 °C y 200 °C, respectivamente, presentaron propagación de luz a una longitud de onda de 632.8 nm correspondiente al rango del espectro visible, demostrando su funcionamiento. Sin embargo, presentaron pérdidas altas de propagación de luz y nuestro sistema solo pudo obtener la medición cuantitativa para las primeras dos guías.

La guía de onda de 260 nm presentó un valor de pérdida de propagación de 8 dB/cm y la guía de onda de 560 nm un valor de 12 dB/cm, la diferencia en estas dos guías se presentó en la parte estructural del material, lo cual puede indicar que una guía de onda con diferentes tamaños de cristales o con defectos cristalinos pueden ocasionar pérdidas altas por esparcimiento de luz.

Finalmente, se llega a la conclusión que se lograron obtener por primera vez guías de onda funcionales de ZnO de espesor inferior a un micrómetro sintetizadas por la técnica ALD en los laboratorios de CNyN-CICESE, sin embargo, las pérdidas de propagación en el rango visible fueron altas, lo que sugiere una optimización más detallada del proceso ALD o un tratamiento térmico como se ha realizado en la literatura posterior a otras técnicas de depósito. No obstante, las guías de onda obtenidas sugieren que tienen potencial para ser empleadas en otros dispositivos de óptica integrada.

Como trabajo a futuro se sugiere realizar un estudio sobre el control y disminución del tamaño de cristal de las películas obtenidas por ALD para disminuir las pérdidas por esparcimiento, analizar la densidad de masa por medio de espectroscopía de pérdidas de energía de electrones reflejados (REELS) y por microscopía electrónica de transmisión para observar su estructura interna. También, trabajar en el diseño y caracterización de guías de onda de canal a partir de las guías de onda planas obtenidas en el presente trabajo. Además, del diseño y fabricación de dispositivos optoelectrónicos basadas en películas de ZnO, como son: resonadores de anillo, divisores de haz, entre otros.

## Literatura citada

---

- Briggs, D. (2005). X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). *Handbook of Adhesion: Second Edition*, 621–622. <https://doi.org/10.1002/0470014229.ch22>
- Can-Uc, B., López, J., Lizarraga-Medina, E. G., Borbon-Nuñez, H. A., Rangel-Rojo, R., Marquez, H., Tiznado, H., Jurado-González, J. A., & Hirata-Flores, G. (2019). Third-order nonlinear optical properties of a multi-layer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO for nonlinear optical waveguides. *Optics Express*, 27(12), 17359. <https://doi.org/10.1364/oe.27.017359>
- Chen, C. (2007). *Foundations for Guided-wave Optics*. Wiley-Interscience A John Wiley & Sons, Inc.
- Dutta, S., Jackson, H. E., Boyd, J. T., Hickernell, F. S., & Davis, R. L. (1981). Scattering loss reduction in ZnO optical waveguides by laser annealing. *Applied Physics Letters*, 39(3), 206–208. <https://doi.org/10.1063/1.92680>
- Fan, R., Lu, F., & Li, K. (2017). Single-mode channel waveguide at 1540 nm in Er-doped ZnO thin film. *Journal of Luminescence*, 192(March), 410–413. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.07.003>
- Gomaa, H. M., Yahia, I. S., & Zahran, H. Y. (2021). Correlation between the static refractive index and the optical bandgap: Review and new empirical approach. *Physica B: Condensed Matter*, 620, 413246. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.413246>
- Hammer, J. M., Channin, D. J., Duffy, M. T., & Wittke, J. P. (1972). Low-loss epitaxial ZnO optical waveguides. *Applied Physics Letters*, 21(8), 358–360. <https://doi.org/10.1063/1.1654411>
- Ibanga, E. J., le Luyer, C., & Mugnier, J. (2003). Zinc oxide waveguide produced by thermal oxidation of chemical bath deposited zinc sulphide thin films. *Materials Chemistry and Physics*, 80(2), 490–495. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(02\)00552-7](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(02)00552-7)
- Jia, C.-L., Wang, K.-M., Wang, X.-L., Zhang, X.-J., & Lu, F. (2005). Formation of c-axis oriented ZnO optical waveguides by radio-frequency magnetron sputtering. *Optics Express*, 13(13), 5093. <https://doi.org/10.1364/opex.13.005093>
- Jiang, D. Y., Zhao, J. X., Zhao, M., Liang, Q. C., Gao, S., Qin, J. M., Zhao, Y. J., & Li, A. (2012). Optical waveguide based on ZnO nanowires prepared by a thermal evaporation process. *Journal of Alloys and Compounds*, 532, 31–33. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.03.114>
- Khodja, S., Touam, T., Chelouche, A., Boudjouan, F., Djouadi, D., Hadjoub, Z., Fischer, A., & Boudrioua, A. (2014). Effects of stabilizer ratio on structural, morphological, optical and waveguide properties of ZnO nano-structured thin films by a sol-gel process. *Superlattices and Microstructures*, 75, 485–495. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2014.08.010>
- Kim, H., Lee, H.-B.-R., & Maeng, W.-J. (2008). Applications of atomic layer deposition to nanofabrication and emerging nanodevices. *Thin Solid Films*, 517, 2563–2580. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.09.007>
- Lizarraga, É. G. (2016). *Estudio de guías de onda ópticas de SiO<sub>x</sub>*. 104. <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/457>

- Lizarraga-Medina, E. G., Castillo, G. R., Jurado, J. A., Caballero-Espitia, D. L., Camacho-Lopez, S., Contreras, O., Santillan, R., Marquez, H., & Tiznado, H. (2021). Optical waveguides fabricated in atomic layer deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by ultrafast laser ablation. *Results in Optics*, 2(January), 100060. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100060>
- Mamtmin, G., Abdurahman, R., Yan, Y., Nizamidin, P., & Yimit, A. (2020). A highly sensitive and selective optical waveguide sensor based on a porphyrin-coated ZnO film. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 309, 111918. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111918>
- Márquez, H., Salazar, D., Rangel-Rojo, R., Angel-Valenzuela, J. L., Vázquez, G. v., Flores-Romero, E., Rodríguez-Fernández, L., & Oliver, A. (2013). Synthesis of optical waveguides in SiO<sub>2</sub> by silver ion implantation. *Optical Materials*, 35(5), 927–934. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2012.11.011>
- Montiel-González, Z., Castelo-González, O. A., Aguilar-Gama, M. T., Ramírez-Morales, E., & Hu, H. (2017). Thickness dependent growth of low temperature atomic layer deposited zinc oxide films. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1145–1151. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.005>
- Nguyen, T., Adjeroud, N., Guennou, M., Guillot, J., Fleming, Y., Papon, A. M., Arl, D., Menguelti, K., Joly, R., Gambacorti, N., & Polesel-Maris, J. (2020). Controlling electrical and optical properties of zinc oxide thin films grown by thermal atomic layer deposition with oxygen gas. *Results in Materials*, 6(April). <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100088>
- Panigrahi, J., Singh, P. K., Gupta, G., & Vandana. (2021). Growth and luminescence characteristics of zinc oxide thin films deposited by ALD technique. *Journal of Luminescence*, 233, 117797. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117797>
- Prajzler, V., Neruda, M., & Květoň, M. (2019). Flexible multimode optical elastomer waveguides. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(18), 16983–16990. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02087-1>
- Puchert, M. K., Timbrell, P. Y., & Lamb, R. N. (1996). Postdeposition annealing of radio frequency magnetron sputtered ZnO films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 14(4), 2220–2230. <https://doi.org/10.1116/1.580050>
- Selvaraja, S. K., & Sethi, P. (2018). Review on Optical Waveguides. *Emerging Waveguide Technology*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77150>
- Struk, P., Pustelny, T., Gołaszewska, K., Borysiewicz, M. A., Kamińska, E., Wojciechowski, T., & Piotrowska, A. (2014). ZnO - Wide bandgap semiconductor and possibilities of its application in optical waveguide structures. *Metrology and Measurement Systems*, 21(3), 401–412. <https://doi.org/10.2478/mms-2014-0034>
- Takada, S. (1993). Relation between optical property and crystallinity of ZnO thin films prepared by rf magnetron sputtering. *Journal of Applied Physics*, 73(10), 4739–4742. <https://doi.org/10.1063/1.354091>
- Tien, P. K. (1977). Integrated optics and new wave phenomena in optical waveguides. *Reviews of Modern Physics*, 49(2), 361–420. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.49.361>

- Urlacher, C., Marco De Lucas, C., & Mugnier, J. (1997). Chemical and physical aspects of sol-gel process for planar waveguides elaboration: Application to zirconia waveguides. *Synthetic Metals*, *90*(3), 199–204. [https://doi.org/10.1016/s0379-6779\(98\)80007-6](https://doi.org/10.1016/s0379-6779(98)80007-6)
- Xia, B., Ganem, J. J., Briand, E., Steydli, S., Tancrez, H., & Vickridge, I. (2021). The carbon and hydrogen contents in ALD-grown ZnO films define a narrow ALD temperature window. *Vacuum*, *190*(March), 110289. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110289>
- Xu, S., & Wang, Z. L. (2011). One-dimensional ZnO nanostructures: Solution growth and functional properties. *Nano Research*, *4*(11), 1013–1098. <https://doi.org/10.1007/s12274-011-0160-7>