



Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño



Licenciatura

en Ingeniería en Nanotecnología

Síntesis y caracterización de guías de ondas ópticas a base de un nanolaminado de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ por depósito de capa atómica.

TESIS

Para cubrir los requisitos necesarios para obtener el grado de
Ingeniero en Nanotecnología

Presenta:

Guillermo Itzcualt Acosta Armenta

Codirectores de tesis:

Dr. Eder Germán Lizárraga Medina

Dra. Eunice Vargas Viveros

Ensenada, Baja California, México, a 1 de septiembre de 2022.

Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Síntesis y caracterización de guías de ondas ópticas a base de un nanolaminado de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ por depósito de capa atómica.

Tesis

Para cubrir los requisitos necesarios para obtener el título de
Ingeniero en Nanotecnología

Aprobada por:



Dr. Eder Germán Lizárraga Medina

Director de tesis



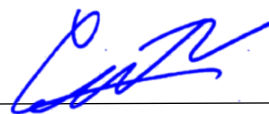
Dra. Eunice Vargas Viveros

Codirectora de tesis



Dr. Heriberto Márquez Becerra

Sinodal



Dr. David Cervantes Vásquez

Sinodal



Dr. Dora Luz Flores Gutiérrez

Sinodal

Resumen de la tesis que presenta **Guillermo Itzcualt Acosta Armenta** como requisito para la obtención del grado de Ingeniero en Nanotecnología.

Síntesis y caracterización de guías de ondas ópticas a base de un nanolaminado de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ por depósito de capa atómica.

Resumen aprobado por:



Dr. Eder Germán Lizárraga Medina

Director de tesis



Dra. Eunice Vargas Viveros

Codirectora de tesis

Resumen

Los sistemas de procesamiento de señales ópticas basados en guías de ondas se han estudiado ampliamente en los últimos años, ya que permiten el desarrollo de nuevos dispositivos para sistemas fotónicos y optoelectrónicos. Actualmente, las características principales que requieren las guías de onda para mejorar sus aplicaciones son una alta no linealidad óptica y transparencia en la región espectral de interés. Los nanolaminados son un tipo de nanoestructuras que han demostrado mejorar la no linealidad respecto a los materiales en bulto. En particular, los nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ han demostrado transparencia y no linealidad. En este trabajo de tesis, se presenta el diseño óptico, fabricación y caracterización de guías de ondas a base de un núcleo nanolaminado de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$, fabricado por medio de la técnica de Depósito de Capas Atómicas (ALD). Se fabricaron tres configuraciones multicapa, aplicando las características individuales de cada material en una sola nanoestructura. Se obtuvo la estructura cristalina de los nanolaminados por Difracción de Rayos X (XRD), transmitancia en el espectro visible por Espectrofotometría (UV-Vis) y espesor e índice de refracción por Elipsometría Espectroscópica de Ángulo Variable (VASE). Finalmente, el acoplamiento fibra-guía y prisma-guía, mostró los resultados de pérdidas de propagación óptica e índices de refracción efectivo para polarización Transversal Eléctrica (TE) y Magnética (TM). El núcleo nanolaminado de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ de las guías de onda es funcional a una longitud de onda de operación de 1550 nm, por lo que puede aplicarse en la transmisión de señales en dispositivos de telecomunicaciones. Sin embargo, se encontró que el núcleo nanolaminado de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$, es parcialmente funcional como guía de onda a una longitud de 632.8 nm, por lo que, para utilizarlo en la transmisión de señales en dispositivos de fotónicos y optoelectrónicos, es necesario mejorar sus propiedades ópticas.

Palabras clave: Guías de onda planas, óptica integrada, nanolaminados, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$, Depósito de Capas Atómicas.

Abstract of the thesis presented by **Guillermo Itzcualt Acosta Armenta** as a requirement to obtain the degree of Engineer in Nanotechnology.

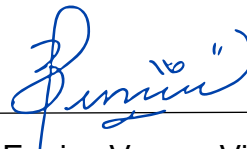
Synthesis and characterization of optical waveguides based on an $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ nanolaminate by atomic layer deposition.

Abstract approved by:



Dr. Eder Germán Lizárraga Medina

Thesis director



Dra. Eunice Vargas Viveros

Thesis director

Summary:

Optical waveguide-based signal processing systems have been extensively studied in recent years, since they allow the development of new devices for photonic and optoelectronic systems. Nowadays, the main features required in optical waveguides to improve their applications are high optical nonlinearity and transparency in the spectral region of interest. Nanolaminates are a type of nanostructures that have shown to an enhancement in optical non-linearity with respect to bulk materials. In particular, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ nanolaminates have shown transparency and non-linearity. This thesis work presents the optical design, fabrication by means of the Atomic Layer Deposition (ALD) and characterization of waveguides based on a nanolaminated core of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$. Three different multilayer configurations were fabricated, applying the individual characteristics of each material in a single nanostructure. Crystalline structure of the nanolaminates were obtained by means of X-Ray Diffraction (XRD), transmittance in the optical spectrum by UV-VIS Spectrophotometry and the refractive index and thickness by Variable Angle Spectrometer Ellipsometry (VASE). Finally, fiber-to-waveguide and prism-to-waveguide coupling, showed optical propagation losses and effective indices for Transversal Electric (TE) and Magnetic (TM) polarization.

The $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ nanolaminated core of the waveguides works properly at an operating wavelength of 1550 nm. Therefore, it can be used in signal transmission in telecommunications devices. However, it was shown that the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ nanolaminated core is needs improvements as a waveguide at a wavelength of 632.8 nm, so to use it for signal transmission in photonic and optoelectronic devices, it is necessary to enhance the optical properties.

Keywords: Slab waveguides, integrated optics, nanolaminates, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$, Atomic Layer Deposition.

Dedicatoria

**A mis padres:
Guillermo y Esthela.**

Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, por permitirme ser parte de ella, por formarme y darme las herramientas necesarias para buscar mi autorrealización.

Al Dr. Eder G. Lizárraga Medina, por su gran apoyo antes y durante de la realización de este trabajo. Por su paciencia y tiempo durante estos años. Por contribuir en mi formación profesional.

A la Dra. Eunice Vargas Viveros, por ser parte de mi proceso de formación académica. Por sus consejos, enseñanzas y tiempo, durante la realización de este trabajo.

A la Ing. Bibiana Sánchez Luis, por su amistad, consejos, enseñanzas y tiempo, durante la realización de este trabajo.

Al Dr. Heriberto Márquez Becerra, por sus consejos, enseñanzas y tiempo, antes y durante de la realización de este trabajo.

Al laboratorio de Películas Delgadas CICESE, bajo la dirección del Dr. Heriberto Márquez Becerra y apoyo técnico de la M.C. Jessica Ángel y al Laboratorio de Ingeniería de Superficies del CNyN-UNAM bajo la coordinación del Dr. Hugo Tiznado Vázquez, por permitirme el uso de los materiales y equipos empleados para el desarrollo de este trabajo.

A mis sinodales David Cervantes Vásquez y Dora Luz Flores Gutiérrez, por aceptar ser parte de este trabajo. Por su tiempo y consejos, los cuales fueron importantes en la realización de este trabajo.

Quisiera agradecer también:

A mis padres y hermanos, que son mi pilar más importante.

A mis amigos y compañeros de la generación XVI de Ing. en Nanotecnología. Por su compañía y amistad en estos 4 largos años de carrera. A mis amigos, Kimberly Pérez, Sebastián Tapia, Alejandra Mena y Alexa Robles, por su apoyo y cariño.

Y en general, a todas las personas que fueron parte de este proceso.

Tabla de Contenido

Resumen	II
Summary	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Tabla de Contenido.....	VI
Listas de Figuras.....	VIII
Lista de tablas.....	XI
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.....	5
1.3. Hipótesis.....	14
1.4. Objetivo general	14
1.4.1. Objetivos específicos	14
Capítulo 2. Fundamentos teóricos	15
2.1. Guías de ondas.....	15
2.2. Principio de operación: Reflexión total interna.....	16
2.3. Aproximación electromagnética	17
2.4. Relación de dispersión: Modos TE y TM	20
2.5. Factor de confinamiento	22
2.6. Espesores de corte y frecuencias de corte	24
2.7. Distribución de Amplitud del campo eléctrico.....	27
2.8. Depósito de Capas Atómicas (ALD)	28
Capítulo 3. Materiales y métodos de fabricación y caracterización.	30
3.1. Óxido de aluminio	30
3.2. Óxido de zinc.....	30
3.3. Fabricación de los nanolaminados para guías de onda.....	30
3.4. Caracterización	34
3.4.1. Medición de la distribución de intensidad.....	34
3.4.2. Pérdidas de propagación: Método CutBack.....	36
3.4.3. Difracción de Rayos X	38
3.4.4. Elipsometría	39
3.4.5. Transmitancia por Espectrofotometría (UV-Vis).....	42
3.4.6. Acoplamiento por prisma: Obtención de índices de refracción efectivos.....	43

Capítulo 4. Resultados y Discusión	45
4.1. Propiedades estructurales mediante XRD.....	45
4.2. Propiedades ópticas del Nanolaminado de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$	47
4.3. Propiedades ópticas por medio de la espectrofotometría UV-Vis	50
4.4. Distribución de intensidad a la salida de la guía.....	52
4.5. Acoplamiento por prisma.....	55
Capítulo 5. Conclusiones y trabajo a futuro	57
Literatura citada.....	59

Listas de Figuras

Figura 1. Esquema del circuito integrado fotónico y sus diferentes componentes ópticos. Tomado de Silicon Photonics: Designing and Prototyping Silicon Waveguides (Uttam Pal, 2017).....	2
Figura 2. Estructura de guía de ondas sobre un sustrato de silicio oxidado. Tomado de M.K Smit et al., 1986.	6
Figura 3. Índices de refracción medidos del ZnO/Al ₂ O ₃ en muestras de nanolaminados y ZnO. Tomado de Karvonen et al., 2014.	8
Figura 4. a) UV–Vis. espectros de transmitancia de películas delgadas de ZnO no dopadas y dopadas con Al y b) dT/d(hv) gráfico de ZnO puro y dopado con Al. Obtenido de Layoul et al., 2021.....	9
Figura 5. Distribución de campos eléctricos y magnéticos dentro de las guías de ondas planas AZO para modos TE ₀ y TM ₀ . Obtenido de Layoul et al., 2021.	10
Figura 6. Espectros de transmitancia de películas AZO con diferentes espesores. El recuadro muestra el desplazamiento del borde de absorción. Tomado de Necib et al., 2018.....	11
Figura 7. Índices de refracción TE y TM y birrefringencia de películas AZO en función del espesor. Tomado de Necib et al., 2018.....	12
Figura 8. Intensidad de luz esparcida en función de la longitud de propagación del modo TE ₀ guiado en la guía de ondas AZO con un espesor de 798 nm. Tomado de Necib et al., 2018.	12
Figura 9. esquemas de las estructuras de las guías de onda según su estructura: a) Plana, b) angosta y c) cilíndrica.	15
Figura 10. Configuración de una guía de onda plana dieléctrica.....	16
Figura 11. Guía de onda plana.....	18
Figura 12. Factor de confinamiento a 632.8 nm.	23
Figura 13. Factor de confinamiento a 1550 nm.	24
Figura 14. Curvas de corte modal TE para una guía de onda excitada a una longitud de onda 632.8 nm.	26
Figura 15. Curvas de corte modal TE para una guía de ondas excitada a una longitud de onda 1550 nm.	27
Figura 16. Esquema de crecimiento de un ciclo ALD.....	29
Figura 17. Equipo de Depósito de Capas Atómicas Beneq TFS200.	31
Figura 18. Crema “Umicore substrate cleaner” utilizada para limpiar los sustratos ópticos.....	32
Figura 19. Distribución de muestras en el reactor.	32
Figura 20. Geometría y ciclos ALD para el nanolaminado de Al ₂ O ₃ /ZnO.....	33

Figura 21. Ilustración del arreglo óptico utilizado para obtener la distribución de intensidad las guías fabricadas.	35
Figura 22. Sistema de acoplamiento fibra-guía.	36
Figura 23. Diagrama del arreglo para la medición de la potencia de salida de cada muestra.	37
Figura 24. Ejemplificación del arreglo para la difracción de rayos X. Modificado de Gumustas et al., 2017.	38
Figura 25. Difractómetro de rayos X D2 PHASER.	39
Figura 26. Diagrama esquemático de elipsometría. Modificado de Airaksinen, 2015.	40
Figura 27. Equipo de Elipsometría J. Woollam M-2000 para Elipsometría de Ángulo Variable (VASE).	42
Figura 28. Espectrofotómetro de UV y Visible, Varian, CARY-60.	43
Figura 29. Principio de medición para una película delgada.	43
Figura 30. (a) Sistema acoplador de prisma modelo 2010/M de Metricon y (b) guía de ondas nanolaminada de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ en el sistema de acoplamiento por prisma.	44
Figura 31. Carta cristalográfica del Oxido de Zinc, recuperada de Datos de estructura cristalina inorgánica (ICSD).	45
Figura 32. Patrones de difracción de rayos X de los nanolaminados $G_{1,5}$ y $G_{1,10}$	46
Figura 33. Curvas ψ Δ y ajuste del modelo de Cauchy para la muestra $G_{1,10}$ utilizando el programa Complete EASE para procesamiento de datos de elipsometría.	48
Figura 34. Curvas de dispersión para las muestras a) $G_{1,10}$, b) $G_{1,5}$ y c) $G_{5,10}$	49
Figura 35. Espectros de transmitancia de los nanolaminados a) $G_{1,5}$, b) $G_{1,10}$ y c) $G_{5,10}$	51
Figura 36. Espectros de absorción de los nanolaminados $G_{1,5}$, $G_{1,10}$ y $G_{5,10}$. El recuadro muestra el método gráfico de Tauc para calcular el valor de la banda prohibida directa.	52
Figura 37. Distribución de intensidad y la amplitud del campo eléctrico simulado para las guías de onda a 632.8 nm.	53
Figura 38. Imágenes de distribución de intensidad a una longitud de onda de 632.8. En (a) y (b) se observa el nanolaminado $G_{1,5}$ a una potencia de 0.27 y 0.65 mW, respectivamente. En (c) y (d) se observa el nanolaminado $G_{5,10}$ a una potencia de 0.10 y 0.15 mW, respectivamente.	54

Figura 39. a) Fotografía de la cámara infrarroja mostrando la salida de la guía y b) Imagen de distribución de intensidad de $G_{1,10}$ a una longitud de onda de 1550 nm.	55
Figura 40. Curvas típicas obtenidas a partir del acoplamiento por prisma para los 3 Nanolaminados.	56

Lista de tablas

Tabla 1. El espesor total esperado, espesor de cada subcapa, y el número de bicapas de las muestras nanolaminadas.	34
Tabla 2. Parámetros utilizados para calcular el tamaño de los nanocristales de los nanolaminados $G_{1,10}$ y $G_{5,10}$	47
Tabla 3. Espesores esperados, índices de refracción ordinarios y extraordinarios y ECM.	48
Tabla 4. Índices de refracción efectivos TE y TM calculados y medidos.	56

Capítulo 1. Introducción

La transmisión y procesamiento de señales ópticas han sido objeto de estudio desde principios de la década de 1860 y grandes avances tecnológicos se han logrado en el área de telecomunicaciones, biomédica, ingeniería, etc. La implementación de láseres capaces de transmitir luz monocromática y coherente, dio un avance en el procesamiento de señales, ya que estos eran capaces de transmitir señales a través del aire. Sin embargo, estos sistemas presentan limitaciones para ser utilizados a grandes distancias y en el procesamiento de señales ópticas, ya que la luz diverge y se pierde potencia, además necesitan componentes ópticos como prismas, lentes, detectores, etc., y alineación de alta precisión. De tal forma que son de gran utilidad en experimentos de laboratorio, pero difíciles de implementar en aplicaciones fuera de un ambiente controlado. Con el paso de los años, surgió el concepto de óptica integrada, en el que las corrientes eléctricas y ondas de radio, utilizadas para la transmisión de información, fueron complementadas por señales ópticas que viajaban confinadas en dispositivos llamados guías de ondas. Finalmente, los circuitos integrados eléctricos fueron complementados y en ocasiones sustituidos por circuitos integrados ópticos miniaturizados (OIC, por sus siglas en Inglés), también conocidos como circuitos integrados fotónicos (PIC, por sus siglas en Inglés) (Debrégeas-Sillard & Kazmierski, 2008; Hunsperger, 2009).

Por lo tanto, los PIC han demostrado su valor en diversas aplicaciones, como sensores químicos, biológicos o espectroscópicos, metrología y procesamiento de información clásica y cuántica (Bogaerts et al., 2020). Existen diferentes tipos de componentes ópticos (Figura 1) que constituyen un PIC, algunos de ellos son los fotodiodos, láseres, resonadores de anillo óptico, acopladores de entrada, moduladores ópticos, acopladores direccionales y guías de onda ópticas. (Saleh, 2019).

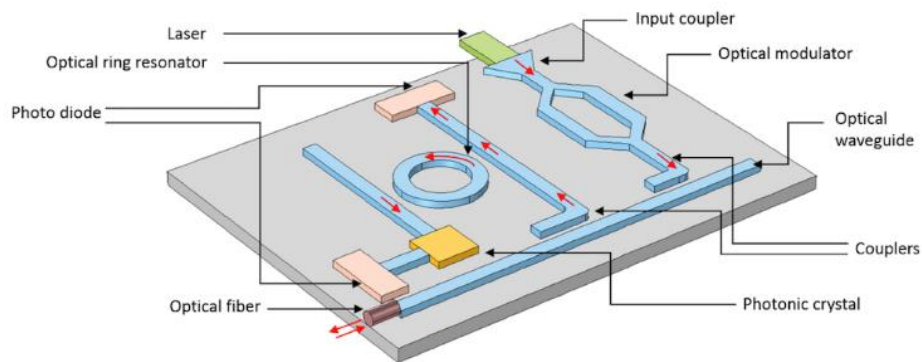


Figura 1. Esquema del circuito integrado fotónico y sus diferentes componentes ópticos. Tomado de *Silicon Photonics: Designing and Prototyping Silicon Waveguides* (Uttam Pal, 2017).

Entre los diferentes componentes, uno de los más importantes es la guía de onda, la cual está presente en todos los dispositivos fotónicos, pues lleva la señal óptica a todos los componentes y actúa como base para distintos dispositivos.

En la óptica integrada, existe una variedad de componentes basados en guías de onda, por ejemplo, láseres (Flores-Romero et al., 2004), moduladores, acopladores bidireccionales, interruptores, etc. (Mackenzie, 2007; Nieweglowski et al., 2018; Pang et al., 2018; Ye et al., 2019). Las propiedades de guiado y fenómenos ópticos no lineales resultan convenientes para el desarrollo de estos dispositivos.

La nanotecnología ha proporcionado una riqueza en la manipulación de las propiedades ópticas lineales y no lineales, a través de nanopartículas, nanolaminados, nanoalambres y otras nanoestructuras. Recientemente, se ha despertado el interés en estudiar los nanolaminados ya que han demostrado propiedades de guiado adecuadas para la óptica integrada y mejoran la no linealidad respecto a los materiales en bulto, que puede derivar en el desarrollo de dispositivos fotónicos. Sin embargo, aún hay pocos estudios referentes a su diseño, fabricación y caracterización como guías de ondas nanolaminadas. Cabe mencionar, que en este trabajo se estudiarán las propiedades de guiado de nanolaminados que han presentado previamente propiedades no lineales interesantes para la óptica integrada.

Los nanolaminados son estructuras de capas de dos o más materiales con grosor individual de nanómetros. Se fabrican al depositar un material con grosor nanométrico sobre otro material con grosor semejante, esta secuencia se repite hasta alcanzar el espesor deseado sobre un sustrato. El grosor de cada material del nanolaminado puede variar desde pocos nanómetros hasta varias decenas de nanómetros (Azadmanjiri et al., 2016). Estas nanoestructuras bidimensionales (2D), presentan propiedades físicas y químicas sobresalientes, las cuales dan como resultado propiedades ópticas, eléctricas, térmicas y mecánicas interesantes, las cuales no existían en bulto (Karvonen et al., 2014; Nasim et al., 2020)

Existen diferentes técnicas para la fabricación de nanolaminados, entre estas destacan los métodos de depósito de vapor físico (PVD), el electrodeposición (ED), el depósito de vapores químicos (CVD), el depósito de capas atómicas (ALD), entre otras (Azadmanjiri et al., 2016; Nasim et al., 2020). Existen diferentes ventajas y limitaciones en la fabricación respecto a cada técnica.

Las ventajas que presenta el método ALD sobre otros métodos, es que permite tener un control de espesor a escala atómica, se pueden depositar una amplia variedad de materiales y permite tener bajos porcentajes de impurezas, incluso trabajando con materiales con densidades ligeramente altas. Estas ventajas derivan del control secuencial, autosaturante y de reacción de la superficie del sustrato con el gas del proceso de depósito (Johnson et al., 2014).

El depósito de capas atómicas (ALD) es un método de depósito químico con la capacidad de producir películas ultradelgadas en grandes superficies y de alta calidad con una precisión de escala atómica. La técnica consiste en pulsos alternos consecutivos de precursores químicos gaseosos que reaccionan sobre un sustrato, uno a la vez, hasta la obtención de una monocapa del material deseado, el proceso es secuencial, hasta obtener el espesor deseado de la película (Laura & Espitia, 2020). Debido a la baja temperatura de depósito ($< 350^{\circ}\text{C}$), ALD puede disminuir los efectos desfavorables sobre sustratos sensibles, permitiendo el depósito de materiales de óxido como aislantes de altas constantes dieléctricas (Nasim et al., 2020).

Entre los óxidos metálicos estudiados como núcleos de guías de onda, destacan el óxido de aluminio (Al_2O_3), dióxido de titanio (TiO_2), dióxido de zirconio (ZrO_2) y el óxido de zinc (ZnO).

El óxido de aluminio (o alúmina, Al_2O_3) es un óxido metálico ampliamente estudiado, principalmente por sus aplicaciones en la electrónica debido a su constante dieléctrica de alto valor k (Caballero-Espitia et al., 2020). Además, es un material importante en dispositivos ópticos, debido a su alta transparencia desde el UV hasta el infrarrojo cercano, utilizado en dispositivos multicapa como filtros y espejos, material matriz para tierras raras para obtener amplificadores ópticos y sensores. Incluso se han utilizado como núcleo de guías de ondas para óptica integrada, operando en el visible (633 nm) y en la ventana de telecomunicaciones (1.5 μm) (Aslan et al., 2010; Caballero-Espitia et al., 2020).

El óxido de zinc (ZnO) es uno de los materiales más prometedores para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos y fotónicos que operan en el rango espectral ultravioleta. El ZnO pertenece a los óxidos conductores transparentes con atractivas características, como banda prohibida directa y amplia (3.37 eV) a temperatura ambiente, alta estabilidad térmica, tiene propiedades eléctricas anisotrópicas debido a su estructura cristalina anisotrópica, altos índices de refracción, con altos coeficientes ópticos no lineales de segundo y tercer orden, lo que lo convierte en un material conveniente para aplicaciones en procesamiento de señales ópticas y telecomunicaciones (Karvonen et al., 2014; Layoul et al., 2021; Wickberg et al., 2016).

En general, Al_2O_3 y ZnO tienen buenas propiedades de adhesión en una amplia selección de materiales. Por ejemplo, el ZnO sin dopar es un aislante, pero cuando se le agregan dopantes metálicos del Grupo III, como Al, B, In y Ga y dopantes del Grupo V, VI y VII, mejoran sus propiedades estructurales, eléctricas y ópticas, resaltando mejoras en conductividad y transparencia (Necib et al., 2018a; Taabouche et al., 2016). Entre los materiales a base de ZnO , las películas delgadas de AZO (películas de óxido de zinc dopadas con aluminio) han tenido gran relevancia en los últimos años, debido a su alta conductividad, alta transparencia

óptica, alta estabilidad térmica y química, no toxicidad y por su rendimiento económico en recubrimientos a gran escala (Layoul et al., 2021). En este trabajo, se abordará el desarrollo de guías de ondas de nanolaminados $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$, que tienen el potencial de ser base para dispositivos de óptica integrada.

1.1. Antecedentes

Las guías de onda ópticas de alúmina (Al_2O_3) se han estudiado desde mediados de la década de 1980, uno de los primeros trabajos fue reportado en 1984 por Este y Westwood, donde exponen la técnica de depósito por pulverización catódica con magnetrón para depositar películas de óxido conductoras transparentes y deficientes en oxígeno. Los resultados fueron guías de onda de alúmina totalmente oxidadas depositadas sobre sustratos de vidrio de borosilicato y silicio oxidados térmicamente, presentaron pérdidas de propagación óptica inferiores a 1 dB/cm con índices de refracción de 1.65 ± 0.005 (Este & Westwood, 1984).

En 1986, M.K. Smit y su equipo de trabajo, depositaron películas delgadas de alúmina para aplicaciones en óptica integrada, utilizaron el método de pulverización catódica por radiofrecuencia (RF) a partir de un blanco de Al_2O_3 sin polarización utilizando un sustrato de óxido de silicio (Figura 2). El índice de refracción de sus películas pulverizadas se encuentra entre 1.56 y 1.70. Ellos redujeron la atenuación desde 25 a 1 dB cm^{-1} de sus guías de onda al aplicar un tratamiento térmico.

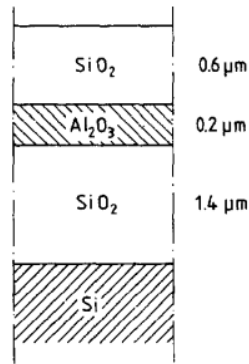


Figura 2. Estructura de guía de ondas sobre un sustrato de silicio oxidado. Tomado de M.K Smit et al., 1986.

Con el avance de las tecnologías, los métodos de síntesis y fabricación de dispositivos de óptica integrada tendieron hacia la miniaturización. Los métodos de nanofabricación han logrado pasar de guías de ondas ópticas con espesores en la escala de los milímetros, a estructuras con espesores de centenas de nanómetros. Uno de los trabajos con estas características es el reportado por Mustafa M. et al, donde se utiliza la técnica de depósito de capa atómica para la obtención de guías de ondas ópticas integradas monomodo de bajas pérdidas de propagación, funcionales en las regiones espectrales del visible y el ultravioleta cercano. Las películas de alúmina se depositaron mediante el proceso ALD sobre sustratos de vidrio y sílice fundida a temperaturas de sustrato/cámara de 200°C y 300°C, obteniendo espesores de película de 210 a 380 nm, las guías de ondas tuvieron pérdidas de 1.1 y 2 dB/cm a una longitud de onda de operación de 543 nm y 633 nm (Aslan et al., 2010).

Al igual que la alúmina, el óxido de zinc (ZnO) se ha utilizado como núcleo de guías de onda, en 1981, Subhadra D. et al. depositaron guías de onda de ZnO por la técnica de pulverización catódica sobre una capa de SiO₂ amorfo. Obtuvieron espesores de aproximadamente 0.93 y 0.71 μm y sus pérdidas de propagación fueron altas, alrededor de 4.6 dB/cm. Pero, después de tratamientos térmicos obtuvieron pérdidas de 0.02 dB/cm (Dutta et al., 1981).

Con base en lo anterior, se muestra que tanto la alúmina (Al_2O_3) como el óxido de Zinc (ZnO) han estado presentes en la fabricación de guías de ondas ópticas. Como se mostró en la sección de introducción, estos dos materiales comparten buenas propiedades de adhesión en una amplia selección de materiales. En los últimos años se han estudiado las características ópticas para estructuras de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ para aplicaciones en dispositivos fotónicos.

Karvonen L. y colaboradores (2016) demostraron un novedoso proceso de depósito de capa atómica (ALD) para controlar la cristalinidad de las capas de óxido de zinc sobre óxido de aluminio ($\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$). Su objetivo era reducir las pérdidas de propagación y mejorar las no linealidades ópticas de tercer orden. Sus experimentos mostraron que la no linealidad óptica de tercer orden puede mejorarse mediante la ingeniería a nanoescala de la estructura de película delgada. El tamaño de grano de la película de ZnO policristalino se controla variando el grosor de las capas de ZnO en el nanolaminado. La ingeniería a nanoescala permite lograr una mejora de la señal generada por el tercer armónico de ~ 13 veces a partir de la estructura nanolaminada optimizada en comparación con una película de referencia de ZnO de espesor comparable. En este trabajo se presentan pérdidas de propagación para guías de $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y se menciona que por la semejanza del material el $\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ tiene pérdidas semejantes, sin embargo, esta aseveración requiere su comprobación experimental. Aún más, realizaron diferentes depósitos variando los ciclos de ALD para obtener estructuras de alrededor de 500 nm de espesor. Se hicieron 5 muestras diferentes, aumentando la cantidad de ZnO en cada una de ellas, la prueba 5 fue una guía únicamente de ZnO . El índice de refracción efectivo y el espesor total (Figura 3) de cada muestra se midieron utilizando la técnica de acoplamiento prisma-guía en las longitudes de onda de 532 nm, 633 nm y 1551 nm.

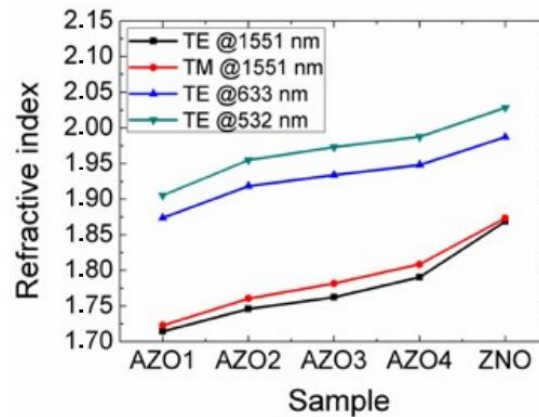


Figura 3. Índices de refracción medidos del ZnO/Al₂O₃ en muestras de nanolaminados y ZnO. Tomado de Karvonen et al., 2014.

Como se puede observar en la gráfica la tendencia muestra que a mayor cantidad de ZnO en el nanolaminado mayor es el índice de refracción del nanolaminado.(Karvonen et al., 2014)

H. Layoul et al. realizaron caracterizaciones estructurales y ópticas de películas de guía de ondas de ZnO puras y dopadas con Al, las cuales fueron fabricadas con el método recubrimiento por rotación Sol-gel, utilizando sustratos de vidrio. El método de fabricación consistió en una síntesis química Sol-gel, en donde el Acetato de zinc dihidrato, metanol y monoetanolamina (MEA) fungieron como material de base, solvente y estabilizador, respectivamente. El dihidrato de acetato de zinc se disolvió primero en metanol y el MEA se agregó lentamente para preparar una solución de 0.6 M. La relación molar de MEA a acetato de zinc se mantuvo en 1:1. Para las películas dopadas, el nanohidrato de nitrato de aluminio se añadió a la mezcla con dos porcentajes atómicos diferentes, 2 % y 4 % en Al. Los soles resultantes se agitaron a 60°C durante 75 min para obtener una solución transparente y homogénea. La solución obtenida se depositó sobre el sustrato de vidrio, que se hizo girar a 3000 rpm durante 25 s. Después del depósito, las películas delgadas de AZO se precalentaron a 250°C durante 5 min para evaporar el solvente y eliminar los residuos orgánicos. El procedimiento se repitió nueve veces para aumentar el

espesor de la capa. Finalmente, todas las películas se recocieron en atmósfera de aire a 500 °C durante 60 min para obtener películas AZO cristalizadas.

Una vez obtenidas las guías de ondas, las caracterizaciones para las propiedades ópticas fueron: transmitancia espectral, banda prohibida de energía y mediciones de líneas m.

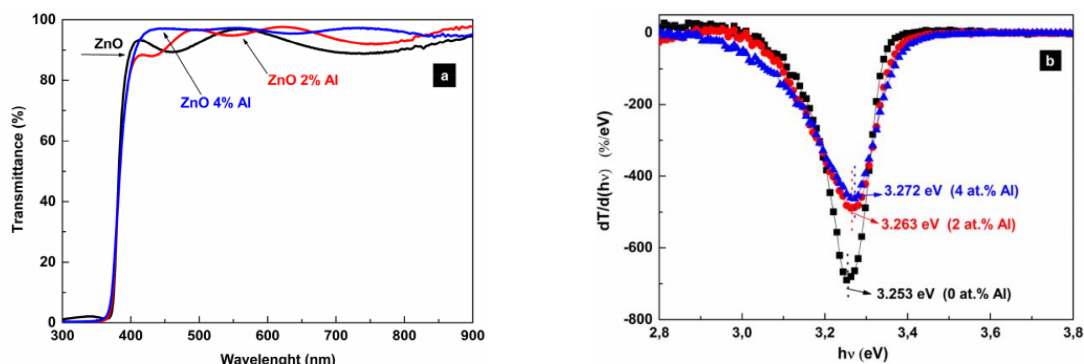


Figura 4. a) UV-Vis. espectros de transmitancia de películas delgadas de ZnO no dopadas y dopadas con Al y b) $dT/d(hv)$ gráfico de ZnO puro y dopado con Al. Obtenido de Layoul et al., 2021.

Para el caso de la transmitancia la Figura 4(a) muestra los espectros de transmitancia óptica en el rango de longitud de onda de 300 a 900 nm de las películas delgadas de ZnO no dopadas y dopadas con Al. Las películas son transparentes en la región visible con una transmitancia óptica superior al 95%. La presencia de franjas de interferencia en los espectros de transmitancia en la región visible está asociada a reflejos múltiples en la interfaz película ZnO/sustrato de vidrio, indicativos de una buena homogeneidad y uniformidad de espesor de nuestras muestras. La fuerte caída de la transmitancia cerca de la absorción borde (~ 350 nm) indica una buena naturaleza cristalina y de banda prohibida directa. En la Figura 4(b) se observan picos anchos centrados en 3.25, 3.26 y 3.27 eV, correspondientes a la banda prohibida de energía, 0 %, 2 % y 4 % de películas de ZnO dopadas con Al, respectivamente. La banda prohibida óptica obtenida para

todas las películas es menor que la del ZnO intrínseco, que es 3.37 eV a temperatura ambiente.

En adición, los autores muestran la distribución de campo calculada para los modos fundamentales para polarizaciones eléctricas transversales (TE) y magnéticas transversales (TM), Figura 5. El modo fundamental o modo 0, es el modo con la frecuencia de corte más baja. Se puede observar que ambos modos tienen su pico de amplitud con tendencia hacia el sustrato, debido a la asimetría de los índices de refracción de la guía de onda.

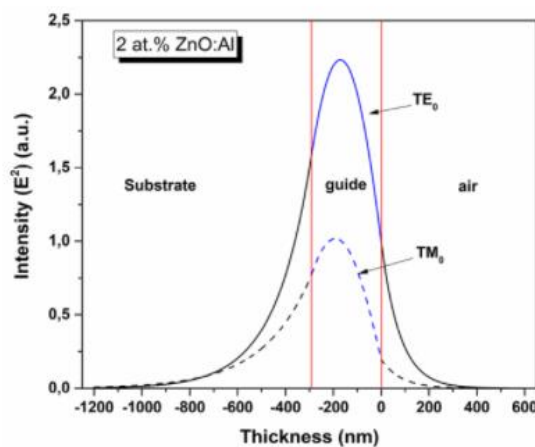


Figura 5. Distribución de campos eléctricos y magnéticos dentro de las guías de ondas planas AZO para modos TE_0 y TM_0 . Obtenido de Layoul et al., 2021.

K. Necib et al. sintetizaron películas de óxido de zinc dopado con aluminio (AZO) sobre sustratos de vidrio mediante la técnica de recubrimiento por rotación Sol-gel e investigaron los efectos del espesor de las nanocapas en propiedades físicas, esto, para aplicaciones en dispositivos fotónicos. Los espectros de transmitancia óptica demuestran que todas las películas exhiben una transmitancia promedio alta (86.8-89,1%) en el rango espectral visible, Figura 6. Además, la energía de la banda prohibida muestra un corrimiento hacia el rojo con el espesor de la película.

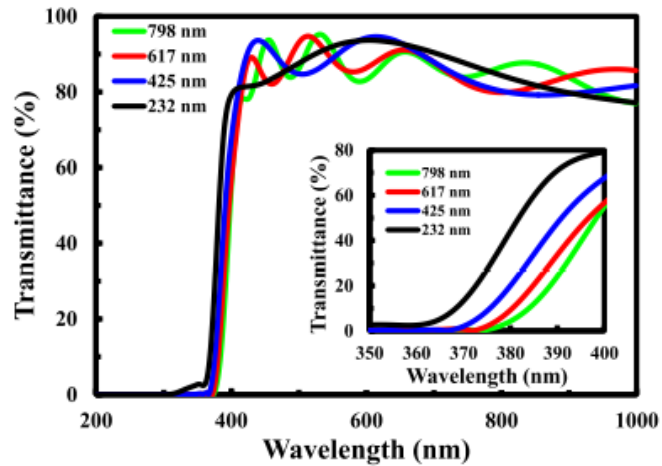


Figura 6. Espectros de transmitancia de películas AZO con diferentes espesores. El recuadro muestra el desplazamiento del borde de absorción. Tomado de Necib et al., 2018.

Las mediciones de espectroscopía de líneas M en la longitud de onda de 632.8 nm, demuestran experimentalmente que las guías de ondas planas AZO admiten modos guiados para polarizaciones eléctricas transversales (TE) y magnéticas transversales (TM). Se encontró que los índices de refracción TE y TM aumentan con el espesor y alcanzan valores de saturación cuando el número de nanocapas es superior a 18. En la Figura 7, se observa que los índices de refracción TE y TM muestran una tendencia similar en función del espesor. Ambos valores de n_{TE} y n_{TM} aumentan con el incremento del espesor de AZO y luego se saturan por encima de un espesor de 617 nm.

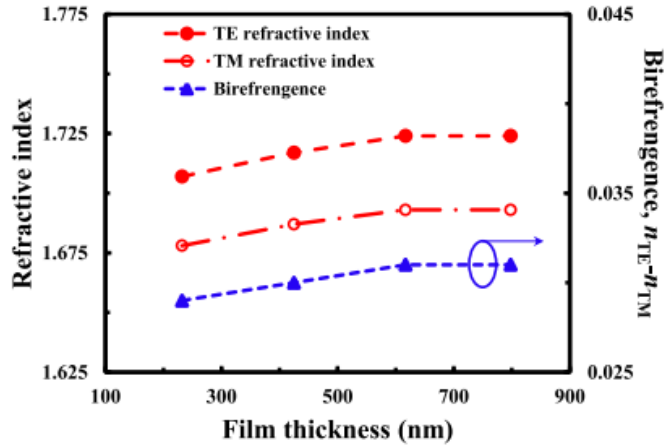


Figura 7. Índices de refracción TE y TM y birrefringencia de películas AZO en función del espesor. Tomado de Necib et al., 2018.

En la Figura 8 se muestra la intensidad de la luz esparcida en función de la longitud de propagación (L) del modo TE_0 en la guía de onda plana AZO con un espesor de 798 nm. Se pudo observar que, para una distancia de propagación de la luz de 1 cm, se obtiene un valor de coeficiente de atenuación de 0.9 ± 0.1 dB/cm a una longitud de onda de 632.8 nm (Necib et al., 2018).

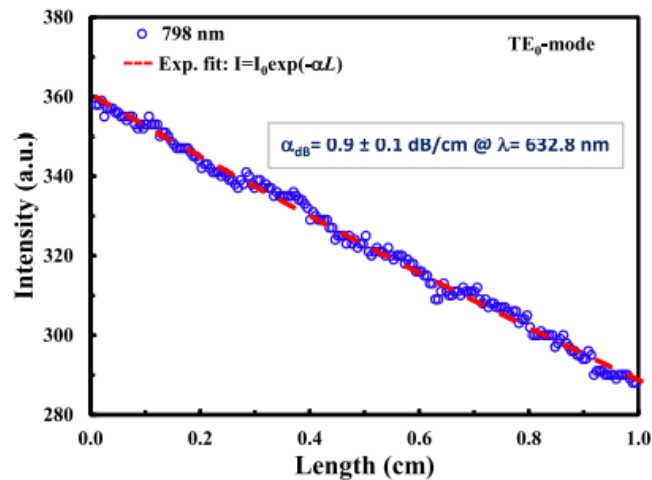


Figura 8. Intensidad de luz esparcida en función de la longitud de propagación del modo TE_0 guiado en la guía de ondas AZO con un espesor de 798 nm. Tomado de Necib et al., 2018.

Además, de ser buenos candidatos para núcleo de guías de onda, los nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ presentan no linealidad óptica, que puede permitir el desarrollo de dispositivos como interruptores o moduladores. Existen varios estudios acerca de la fabricación de nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ con buenas propiedades ópticas no lineales. Can-Uc et al. presentaron resultados iniciales de la fabricación de nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ utilizando el depósito de capa atómica. Los parámetros ópticos no lineales para las muestras con diferencias en el grosor del Al_2O_3 y capas de ZnO presentan valores de índice de refracción no lineal positivo, que puede ser manipulado a través de los parámetros de fabricación. Comparando los resultados obtenidos, observaron que a las muestras con un mayor contenido de ZnO con respecto a la cantidad de Al_2O_3 , muestra una mejora en el índice de refracción no lineal medido. Afirman que los nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ podrían tener un buen potencial para su aplicación en dispositivos de procesamiento de señales totalmente ópticos (Can-Uc et al., 2019).

Derivado de lo anterior, se ha encontrado que existe información acerca de la fabricación de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ utilizando diferentes métodos de depósito en los que resaltan el método de depósito de capas atómicas y método de recubrimiento Sol-gel. Pero son pocos los trabajos registrados hasta hoy, que exponen caracterizaciones para guías de ondas ópticas a base de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$. Los trabajos que existen de guías de ondas utilizando el método de depósito de capa atómica, se centran en la no linealidad del material y no cumplen con las caracterizaciones propias de las guías de ondas para dispositivos fotónicos. En este trabajo se propone un diseño, fabricación y caracterización de guías de ondas basadas en un nanolaminado de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ sintetizadas por la técnica de depósito de capas atómicas. Además, se determinaron las propiedades estructurales, morfológicas y ópticas del material, las cuales se relacionan con la propagación de la luz en la guía de onda.

1.3. Hipótesis

Los nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ fabricados por el método de Depósito de Capa Atómica, pueden ser utilizadas como núcleo de guías de onda y presentar bajas pérdidas de propagación.

1.4. Objetivo general

Fabricar y caracterizar guías de ondas planas a base de un núcleo nanolaminado de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ por depósito de capa atómica.

1.4.1. Objetivos específicos

- Diseñar guías de onda planas con comportamiento monomodal a partir de la simulación de los modos soportados en núcleos nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$, cuyo índice de refracción y espesor varía desde 1.64 a 2 y 1 nm a 1000 nm, respectivamente.
- Fabricar guías de ondas basadas en nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ por medio de la técnica de Depósito de Capas Atómicas (ALD).
- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ mediante las técnicas de Elipsometría Espectroscópica de Ángulo Variable (VASE) y Difractometría de Rayos X (XRD).
- Determinar el número de modos, las pérdidas de propagación y distribución de intensidad de la guía de onda, mediante acoplamiento por prisma-guía y fibra-guía.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos

2.1. Guías de ondas

Las guías de ondas son dispositivos que confinan ondas electromagnéticas que viajan entre dos puntos de interés, son de gran importancia en fotónica y optoelectrónica, ya que permiten el desarrollo de dispositivos para sistemas de procesamiento de señales ópticas de alta eficiencia. Las guías de onda pueden confinar la luz en una (1D) o dos dimensiones (2D), dependiendo cual sea el caso, se clasifican en guías de onda planas (1D) y guías de onda de canal (2D). Las fibras ópticas son un tipo de guías de ondas 2D (Hirschowitz & Hirschowitz, 2000). Las guías de ondas planas y de canal están compuestas de dos o más materiales, como se puede ver en la Figura 9. El índice de refracción de los materiales debe cumplir la siguiente condición, $n_f > n_s \geq n_c$, donde el índice de refracción mayor debe de estar en el núcleo (n_f), el índice de refracción del sustrato (n_s) debe de ser menor al del núcleo y el índice de refracción de la cubierta (n_c) debe de ser menor o igual a la del sustrato.

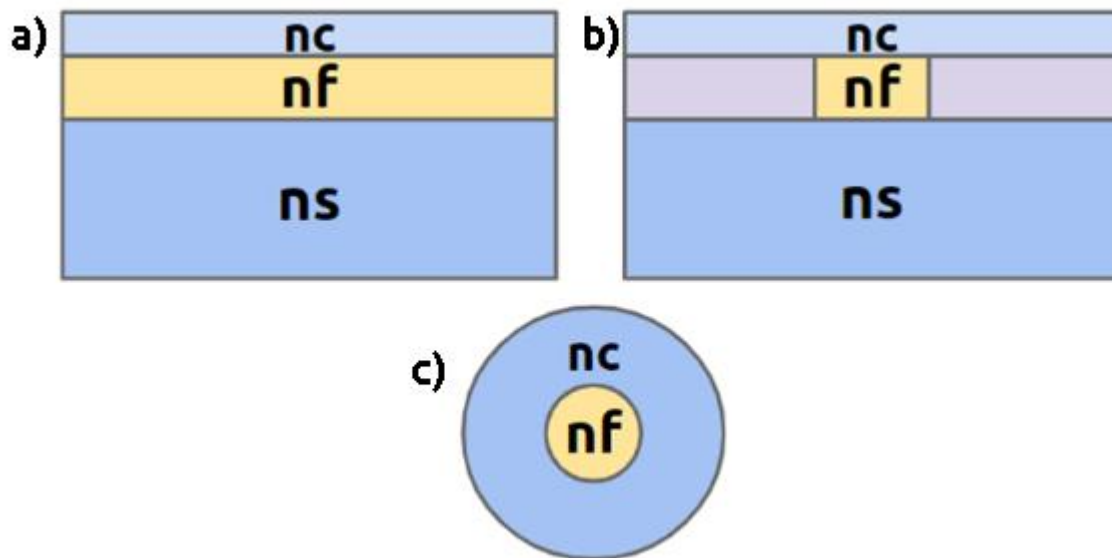


Figura 9. esquemas de las estructuras de las guías de onda según su estructura: a) Plana, b) angosta y c) cilíndrica.

Otro factor importante, es que el espesor de la guía debe de ser lo suficientemente ancho para soportar un modo de la longitud de onda de operación. (Lizárraga Eder., 2016; Okamoto). Este trabajo se centra en el estudio de guías de onda planas de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ depositadas por ALD, que es una estructura que confina la luz en un solo eje.

2.2. Principio de operación: Reflexión total interna

La óptica geométrica o de rayos, nos ayuda a comprender el principio de funcionamiento de una guía de ondas, ésta se basa en la ley de Snell y deriva a la reflexión interna total, las cuales dan como resultado aproximaciones macrométricas del comportamiento de la luz, que si bien, nos da características importantes para describir las guías de ondas donde los espesores oscilan entre los milímetros, no describen los fenómenos que ocurren en estructuras de tamaño similar a las longitudes de onda ópticas

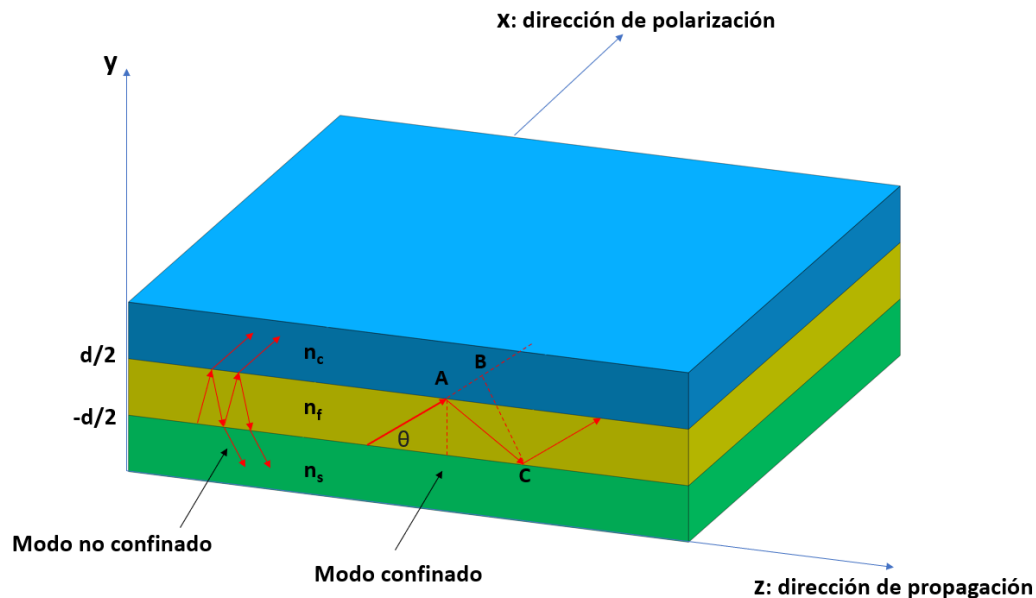


Figura 10. Configuración de una guía de onda plana dieléctrica.

En la Figura 10, se puede observar la configuración de una guía de onda plana. Una película de un material dieléctrico con espesor d , denominada núcleo, que está rodeada por materiales con índices de refracción menores al del núcleo. Con estas

características, un rayo de luz puede ser confinado dentro de núcleo por reflexión total interna, viajando en forma de zigzag a lo largo del eje z, siempre y cuando satisfaga la Ec. 1.

$$\theta < \theta_c = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1)$$

En el caso de que θ sea menor al ángulo crítico θ_c , ángulo mínimo de incidencia en el cual se produce la reflexión, no se cumplirá el principio de reflexión total interna, por lo tanto, los rayos se refractarán y se perderá su intensidad en cada interacción con las interfaces de las superficies.

Las guías de ondas utilizadas en el desarrollo de dispositivos de sistemas de procesamiento de señales ópticas para fotónica y optoelectrónica, tienen dimensiones similares a la longitud de onda de operación (<1550 nm, aproximadamente), por lo que utilizar la teoría geométrica o de rayos para analizar el guiado de la luz, resulta insuficiente, por consecuencia, es necesaria la teoría electromagnética para estudiarlas.

2.3. Aproximación electromagnética

La teoría electromagnética está fundamentada en las ecuaciones de Maxwell, derivado de éstas, a continuación, se describe el análisis de ondas para una guía de onda plana.

Considerando a los nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ dieléctricos por su transparencia en la región óptica, la permitividad y la permeabilidad como $\epsilon = \epsilon_0 \cdot n^2$ y $\mu = \mu_0$, en las ecuaciones de Maxwell (2a) y (2b)

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (2a)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon_0 \cdot n^2 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (2b)$$

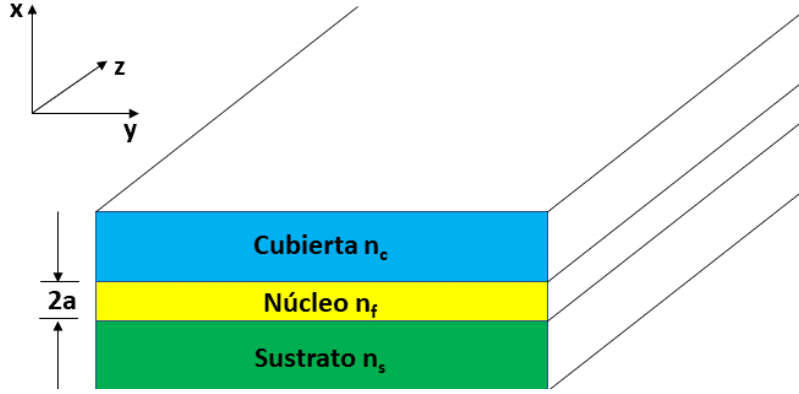


Figura 11. Guía de onda plana

donde n es el índice de refracción. Se propagarán ondas en forma de:

$$\vec{E} = E(x, y)e^{j(\omega t - \beta z)}, \quad (3a)$$

$$\vec{H} = H(x, y)e^{j(\omega t - \beta z)}, \quad (3b)$$

Donde ω es la frecuencia angular y β es la constante de propagación.

Sustituyendo las ecuaciones (3a) y (3b) en las ecuaciones (2a) y (2b), obtenemos el siguiente conjunto de ecuaciones para los componentes del campo electromagnético:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \\ -j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \end{cases} \quad (4a)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = -j\omega\mu_0 n^2 E_x \\ -j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = -j\omega\mu_0 n^2 E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 n^2 E_z \end{cases} \quad (4b)$$

En la guía de onda plana, como se muestra en la Figura 11, los campos electromagnéticos **E** y **H** no tienen dependencia del eje Y, pues se propone una estructura infinitamente ancha. Por lo tanto, establecemos que $\frac{\partial E}{\partial y} = 0$ y $\frac{\partial H}{\partial y} = 0$.

Poniendo estas relaciones en las ecuaciones (4a) y (4b), se obtienen dos conjuntos de ecuaciones independientes, que se asocian a polarización transversal eléctrica y magnética, TE (5a, b y c) y TM (6a, b y c) respectivamente.

donde

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} E_y, \quad (5a)$$

$$H_z = \frac{j}{\omega\mu_0} \frac{dE_y}{dx}, \quad (5b)$$

Y

$$E_x = E_z = H_y = 0, \quad (5c)$$

Los componentes tangenciales **E_y** y **H_z** deben ser continuos en los límites de dos medios diferentes. Como se muestra en la ecuación (5c) el componente del campo eléctrico a lo largo del eje z es cero (**E_z** = 0).

$$E_x = \frac{\beta}{\omega\epsilon_0 n^2} H_y, \quad (6a)$$

$$E_z = -\frac{j}{\omega\epsilon_0 n^2} \frac{dH_y}{dx}, \quad (6b)$$

$$E_y = H_x = H_z = 0, \quad (6c)$$

Como se muestra en la ecuación (6c) el componente del campo magnético a lo largo del eje z es cero ($H_z = 0$).

La ecuación de onda para la polarización TE es:

$$\frac{d^2 E_y}{dx^2} + (k^2 n^2 - \beta^2) E_y = 0, \quad (7)$$

La polarización TM satisface la siguiente ecuación de onda:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{n^2} \frac{dH_y}{dx} \right) + \left(k^2 - \frac{\beta^2}{n^2} \right) H_y = 0, \quad (8)$$

2.4. Relación de dispersión: Modos TE y TM

Una onda electromagnética TE tiene una componente de campo eléctrico, E_y , y dos componentes de campo magnético, H_x y H_z . Debido a que se asume que $d/dy = 0$, las únicas componentes diferentes de 0 para los modos TE son E_y , H_x y H_z . A diferencia del modo TE, el modo TM tiene una componente de campo magnético, H_y , y dos componentes de campo eléctrico, E_x y E_z (Sharma & Banerjee, 1989).

Un método para encontrar los modos de propagación consiste en obtener los eigenvalores de la ecuación característica para los modos TE (Relación de dispersión). Kogelnik y Ramaswamy, propusieron una serie de expresiones que describen las características de las guías de onda. Estos parámetros normalizados permiten calcular de manera sencilla los parámetros implicados en las características de fabricación para una guía de onda.

Analizando el caso TE, se introducen las siguientes ecuaciones:

$$\gamma = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (9a)$$

$$b = \frac{n_{ef}^2 - n_s^2}{n_{ef}^2 - n_s^2} \quad (9b)$$

$$V = k_0 f \sqrt{n_{ef}^2 - n_s^2} \quad (9c)$$

donde

- γ es conocido como el factor de asimetría de la guía.
- b es el índice de refracción efectivo normalizado.
- V es la frecuencia normalizada.

Para una guía simétrica el $\gamma=0$, dado que $n_c = n_s$ (Figura 11) mientras que para una guía asimétrica $\gamma \neq 0$, por lo que los valores de n_c y n_s son diferentes. Con estos parámetros, Kogelnik y Ramaswamy, proponen una ecuación de dispersión normalizada para los modos TE:

$$V\sqrt{1-b} = m\pi + \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{1-b}} + \tan^{-1} \sqrt{\frac{b+\gamma}{1-b}} \quad (10)$$

Para la polarización TM, la frecuencia normalizada (V) es la misma expresión para los modos TE y para los TM ecuación (9c). Para el factor de asimetría y el índice de refracción efectivo normalizado las ecuaciones son:

$$\gamma = \left(\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} \right) \left(\frac{n_f^4}{n_c^4} \right) \quad (11a)$$

$$b = \left(\frac{n_{eff}^2 - n_s^2}{n_{ef}^2 - n_s^2} \right) \left(\frac{n_f^2}{n_s^2 q_s} \right) \quad (11b)$$

donde q_s se conoce como el factor de reducci3n. La relaci3n de dispersi3n normalizada para polarizaci3n TM es:

$$V\sqrt{1-b} = m\pi + \tan^{-1} \frac{n_f^2}{n_c^2} \sqrt{\frac{b}{1-b}} + \tan^{-1} \frac{n_f^2}{n_s^2} \sqrt{\frac{b+\gamma}{1-b}} \quad (12)$$

A partir de resolver estas expresiones normalizadas es posible generar el dise1o para la fabricaci3n de guías de ondas.

2.5. Factor de confinamiento

Como hemos establecido que el objetivo de una guía de onda es transmitir ondas electromagnéticas entre dos puntos de interés. Para que una guía de onda sea considerada eficiente, comúnnmente el campo electromagnético debe localizarse mayormente en el núcleo de la guía. El factor de confinamiento de una guía de onda da raz3n de la proporci3n de la onda electromagnéticas que viaja en el núcleo respecto a la porci3n fuera de él (High Optical Waveguide Confinement Factor Indicates Optical Losses| System Analysis Blog | Cadence).

En este trabajo, se calculó el confinamiento para la zona del núcleo para diferentes espesores haciendo un barrido en el índice de refracci3n de 1.6 a 2, ya que el óxido de aluminio (o alúmina, Al_2O_3) tiene un índice de refracci3n alrededor de 1.6 y en el caso del óxido de zinc (ZnO) tiene un índice de refracci3n alrededor de dos. Por lo que el índice de refracci3n esperado del nanolaminado estar3 en este rango. El factor de confinamiento normalizado para el núcleo, se calcula mediante la siguiente ecuaci3n:

$$\Gamma_f = \frac{V + \sqrt{b} + \frac{\sqrt{\gamma+b}}{1+\gamma}}{V + \frac{1}{\sqrt{b}} + \frac{1}{\sqrt{\gamma+b}}} \quad (13)$$

Con esta ecuación se calculó y graficó el factor de confinamiento para el modo fundamental TE₀ de una guía excitada con una longitud de onda de operación de 632.8 nm, con un índice de refracción para sustrato y cubierta de 1.457 y 1, respectivamente, y usando espesores de núcleo de 200 a 1000 nm, Figura 12.

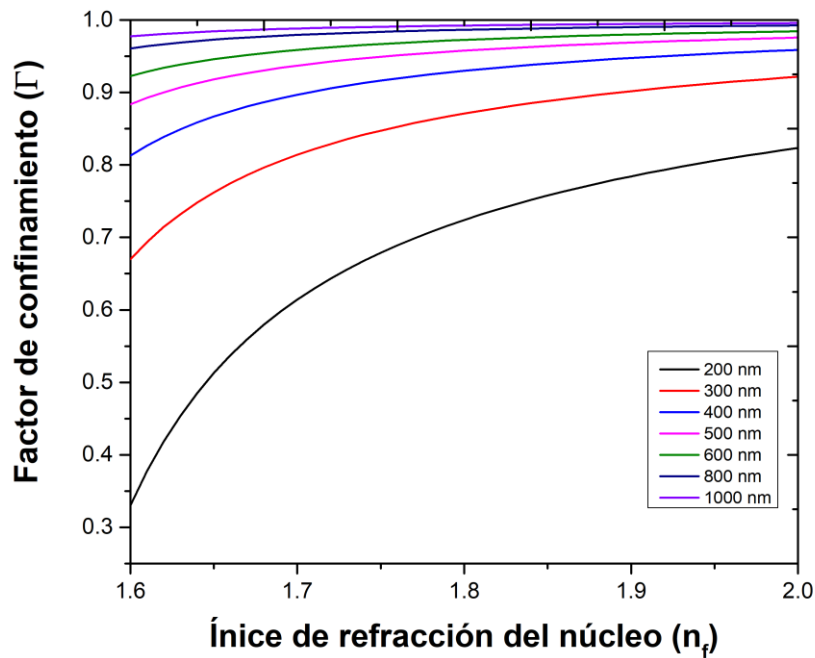


Figura 12. Factor de confinamiento a 632.8 nm.

El confinamiento incrementa su valor conforme aumenta el espesor y el índice de refracción del núcleo, ver la Figura 12.

También, se obtuvo el confinamiento para el modo TE₀ de una guía de onda operando a una longitud de onda de 1550 nm (Figura 13), con un índice de refracción para sustrato y cubierta de 1.44 y 1, respectivamente. Para espesores de 450 a 1000 nm. Se observa que aumentar la longitud de onda disminuye el

confinamiento en la guía de onda. Por ejemplo, para una guía con un núcleo de índice de refracción de 1.8 y 500 nm de espesor, se tiene 95% y 70% de confinamiento para una longitud de onda de 632.8 nm y 1550 nm, respectivamente. Por lo tanto, longitudes de onda más larga generan un menor confinamiento. El factor de confinamiento de la guía depende de la dimensión del espesor del núcleo y del perfil del índice de refracción del núcleo y el revestimiento y a partir de esto, se puede diseñar una guía de onda para aplicaciones específicas, por ejemplo, para sensores es importante tener un bajo valor de confinamiento, para que la luz salga del núcleo e interactúe con el analito.

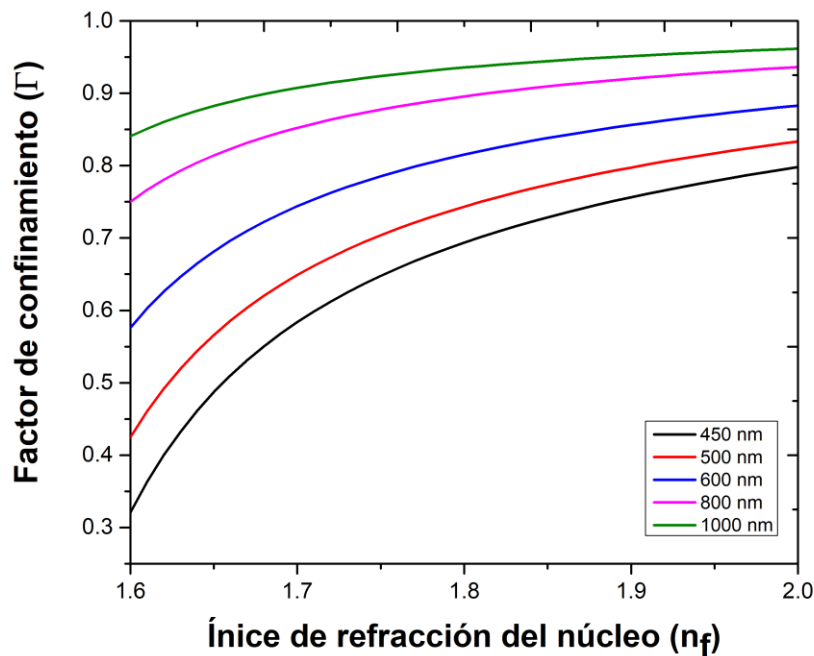


Figura 13. Factor de confinamiento a 1550 nm.

2.6. Espesores de corte y frecuencias de corte

La frecuencia de corte es aquella debajo de la cual ya no existe guiado de luz en la estructura, es decir es la frecuencia mínima necesaria para que se pueda excitar un determinado modo de propagación, ya sea TE o TM. La condición de corte a partir de la relación de dispersión normalizada TE y TM, es cuando $b = 0$. Al establecer b

en cero, tenemos, a partir de la ecuación (10) y (12), el valor de corte V_m para el modo TE y TM, respectivamente

$$V_{mE} = m\pi + \tan^{-1}\sqrt{\gamma}, \quad (14)$$

$$V_{mM} = m\pi + \tan^{-1}\left(\frac{1}{d}\sqrt{\gamma}\right), \quad (15)$$

En otras palabras, un modo TE y TM es confinado en una guía de onda de si el grosor del núcleo es mínimo:

$$f_{TE} = \frac{m\pi + \tan^{-1}\sqrt{\gamma}}{2\pi\sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \cdot \lambda, \quad (16)$$

$$f_{TM} = \frac{m\pi + \tan^{-1}\frac{n_f^2}{n_s^2}\sqrt{\gamma}}{2\pi\sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \cdot \lambda, \quad (17)$$

En la Figura 14, con base en la ecuación (16), se puede observar la tendencia de corte modal TE para guías de ondas de espesores de 0 a 1000 nm, excitadas a una longitud de onda de 632.8 nm, los índices de refracción de sustrato y cubierta son 1.457 y 1, respectivamente.

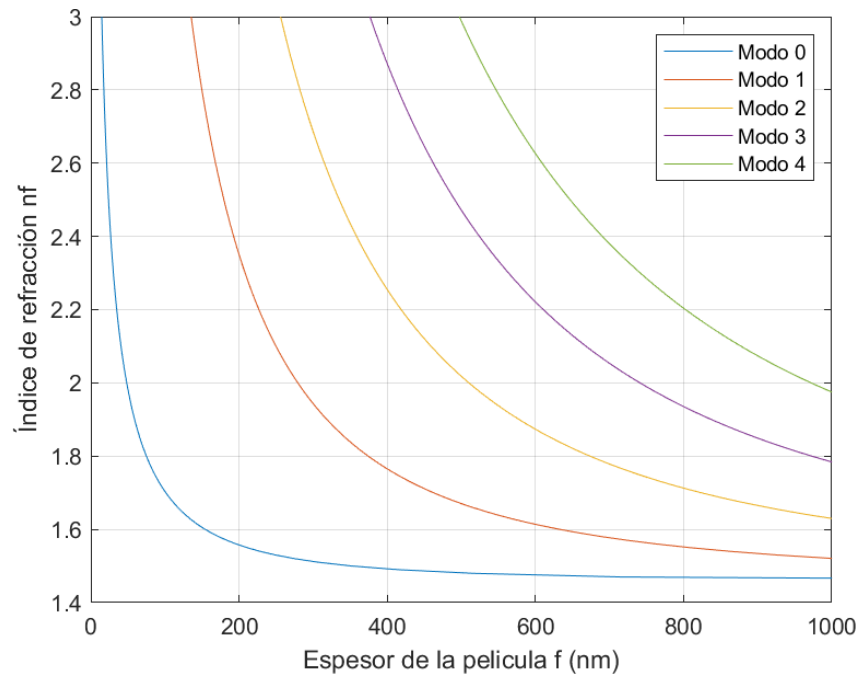


Figura 14. Curvas de corte modal TE para una guía de onda excitada a una longitud de onda 632.8 nm.

En la Figura 14, se pueden observar los cortes modales para guías de ondas excitadas a 632.8 nm con índices de refracción que oscilan entre 1.4 y 3. Esta gráfica nos da una pauta general de las características con las cuales podemos fabricar una guía de ondas, de acuerdo al índice de refracción del núcleo. Con base en el espesor podemos delimitar a la obtención de una guía monomodal, bimodal, etc. Por ejemplo, para un índice de refracción del núcleo de 1.7, el modo fundamental aparece con un grosor de núcleo de ~100 nm y el comportamiento multimodal inicia a ~500 nm. El número de modos es directamente proporcional al espesor e índice de refracción del núcleo.

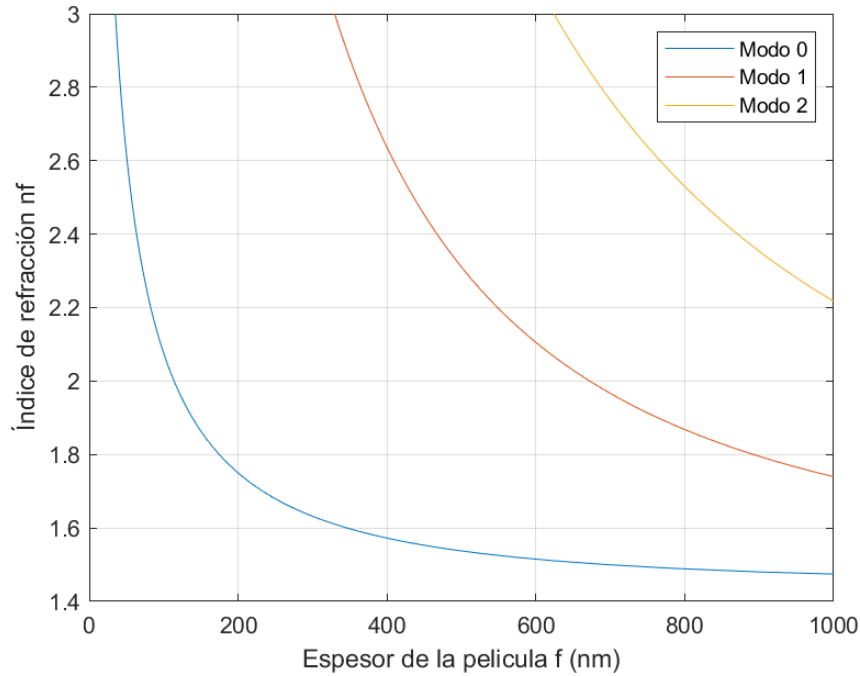


Figura 15. Curvas de corte modal TE para una guía de ondas excitada a una longitud de onda 1550 nm.

De manera semejante la Figura 15. Muestra las curvas de corte modal para una guía de ondas excitada a una longitud de onda de operación de 1550 nm, con un índice de refracción de sustrato y cubierta de 1.44 y 1, respectivamente. Como podemos observar, la longitud de onda es inversamente proporcional al número de modos, o sea, a mayor longitud de onda, la guía soporta menos modos.

2.7. Distribución de Amplitud del campo eléctrico

Es posible calcular la distribución de amplitud del campo eléctrico con ayuda de la relación de dispersión para el modo TE. Tomando en cuenta los parámetros normalizados, las ecuaciones para la distribución de amplitud del campo eléctrico son

$$y = \begin{cases} E_c e^{-V(\sqrt{\gamma+bx})/f} & x \leq 0 \\ E_c \left[\cos\left(\frac{V\sqrt{\gamma-bx}}{f}\right) + \frac{\sqrt{\gamma+b}}{\sqrt{1-b}} \sin\left(\frac{V\sqrt{1-b}x}{f}\right) \right] & 0 \geq x \geq f, \\ E_c [\cos(V\sqrt{1-b}) - \sin(V\sqrt{1-b})] e^{V\sqrt{b}[1+(x/f)]} & -f \geq x \end{cases} \quad (18)$$

Con base en las ecuaciones anteriores, es posible calcular la distribución de amplitud de campo eléctrico y la intensidad para cada configuración en el espesor de núcleo de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$. Cada espesor muestra diferentes valores de onda evanescente (decaimientos en las zonas de sustrato y recubrimiento), como se podrá observar en la sección de resultados.

2.8. Depósito de Capas Atómicas (ALD)

El depósito de capas atómicas (ALD) es un método de depósito químico para producir capas de películas delgadas, de gran superficie y de alta calidad, con una precisión de escala atómica. Con la miniaturización de los nuevos dispositivos, ALD ha demostrado tener grandes ventajas sobre métodos alternativos de depósito debido a que se pueden obtener una amplia variedad de materiales y permite un grado bajo impurezas, incluso trabajando con materiales con densidades ligeramente altas. Estas ventajas derivan del control secuencial, autosaturante y de reacción de la superficie del sustrato con el gas del proceso de depósito (Johnson et al., 2014). Esta técnica de depósito fue introducida en el año 1977, por Suntola y Antson, conocida anteriormente como epitaxia de capa atómica (ALE, por sus siglas en inglés). Con el desarrollo de los procesos ALE para la incorporación de metales y óxidos metálicos, gran cantidad de materiales se depositaban en forma no epitaxial, por lo tanto, el nombre se adaptó a uno más general, dando origen al nombre de Depósito de Capa Atómica.

La técnica consiste en pulsos alternos consecutivos de precursores químicos gaseosos que reaccionan con un sustrato, uno a la vez (Figura 16), a estos pulsos alternos se les conoce como semirreacciones, y constituyen solo una parte de la síntesis del material, hasta la obtención de una monocapa. Durante cada semirreacción, el precursor se libera en una cámara a vacío (<1 Torr) durante un período de tiempo designado para permitir que este se adsorba en la superficie del sustrato a través de un proceso autolimitado que no deja más de una monocapa en la superficie. Posteriormente, la cámara se purga con un gas inerte, por lo general

se utiliza N_2 o Ar, para eliminar cualquier precursor o subproducto que no haya reaccionado. Seguido de esto, se da un pulso un gas oxidante y finalmente una purga para eliminar residuos de la reacción, creando una monocapa de un ciclo ALD.

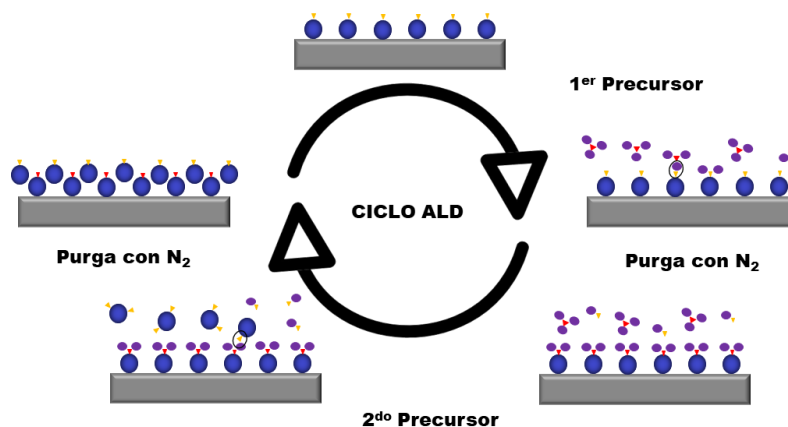


Figura 16. Esquema de crecimiento de un ciclo ALD.

Debido a la baja temperatura de depósito ($< 350\text{ }^{\circ}\text{C}$), ALD puede disminuir los efectos desfavorables sobre sustratos sensibles, permitiendo el depósito de materiales de óxido como aislantes de altas constantes dieléctricas (Nasim et al., 2020).

Capítulo 3. Materiales y métodos de fabricación y caracterización.

3.1. Óxido de aluminio

El óxido de aluminio (o alúmina, Al_2O_3) es un óxido metálico ampliamente estudiado, principalmente por sus aplicaciones en la electrónica debido a su constante dieléctrica, k , de alto valor (Caballero-Espitia et al., 2020). Es un material importante en dispositivos ópticos, debido a su alta transparencia desde el UV hasta el infrarrojo cercano, utilizado en dispositivos multicapa como filtros y espejos, material matriz para tierras raras para obtener amplificadores ópticos y sensores. Incluso se han utilizado como núcleo de guías de ondas para óptica integrada, operando en el visible (633 nm) y en la ventana de telecomunicaciones (1.5 μm) (Aslan et al., 2010; Caballero-Espitia et al., 2020).

3.2. Óxido de zinc

El óxido de zinc (ZnO) es uno de los materiales más prometedores para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos y fotónicos que operan en el rango espectral ultravioleta. El ZnO pertenece a los óxidos conductores transparentes con atractivas características, como banda prohibida directa y amplia (3.37 eV) a temperatura ambiente, alta estabilidad térmica, propiedades eléctricas, altos índices de refracción, altos coeficientes ópticos no lineales de segundo y tercer orden, lo que lo convierte en un material conveniente para aplicaciones en procesamiento de señales ópticas y telecomunicaciones (Karvonen et al., 2014; Layoul et al., 2021; Wickberg et al., 2016).

3.3. Fabricación de los nanolaminados para guías de onda

Se depositaron nanocapas alternadas de Al_2O_3 y ZnO para formar una estructura multicapa de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ sobre sustratos de silicio, silicio con una capa de 4 μm de SiO_2 y Sílice fundida, utilizando el equipo Beneq TFS 200 con sistema ALD (Figura 17). Se utilizaron los precursores Trimetilaluminio ($\text{Al}_2(\text{CH}_3)_6$, TMA) y Dietilzinc ($(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{Zn}$, DEZ) para la obtención de Al_2O_3 y ZnO , respectivamente. Antes del depósito, los precursores se incorporaron a temperatura ambiente, con agua

desionizada como agente oxidante. Finalmente, se utilizó N_2 como gas de arrastre/purga.



Figura 17. Equipo de Depósito de Capas Atómicas Beneq TFS200.

La preparación de los sustratos de Silicio y SiO_2 consistió en una limpieza superficial con alcohol isopropílico. En el caso de los sustratos de Sílice fundida, se limpiaron con acetona, posteriormente se les colocó la crema de limpieza para sustratos ópticos “Umicore substrate cleaner” y se dejaron secar por 60 minutos. Después, la crema se retiró con alcohol isopropílico. Esto se hizo para remover grasa e impurezas de la superficie del sustrato. En la Figura 18, se puede observar los sustratos de sílice fundida con la crema para la limpieza de sustratos ópticos.



Figura 18. Crema “Umicore substrate cleaner” utilizada para limpiar los sustratos ópticos.

Después de la limpieza, se colocaron los sustratos de Silicio, SiO_2 y Sílice fundida en el reactor del equipo ALD, previamente calentado a la temperatura de depósito ($250\text{ }^{\circ}\text{C}$), ver Figura 19.

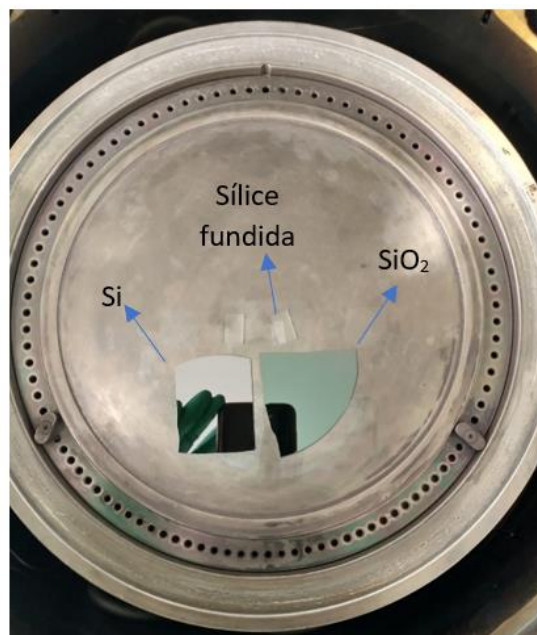


Figura 19. Distribución de muestras en el reactor.

El ciclo de ALD para depositar Al_2O_3 consistió en un pulso de 30 ms de TMA con una purga de 750 ms y un pulso de 100 ms de H_2O con una purga de 750 ms. La

tasa de crecimiento registrada fue de 1.03 Å/ciclo. El ciclo ALD para depositar ZnO consistió en un pulso de 150 ms de H₂O con una purga de 750 ms, y un pulso de 30 ms de DEZ con una purga de 750 ms. La tasa de crecimiento registrada fue de 1.67 Å/ciclo, ver Figura 29.



Figura 20. Geometría y ciclos ALD para el nanolaminado de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$.

Se trabajó con tasas de depósito ALD ($\text{\AA}/\text{ciclo}$) predeterminadas de trabajos previos realizados en el equipo para los parámetros de depósito (temperatura, tiempo de dosis del precursor y oxidante, tiempo de purga y números de ciclos). Se realizaron un total de 3 muestras con diferentes espesores en sus configuraciones multicapa. En la Tabla 1, se muestran los valores de espesor total esperado del nanolaminado, el espesor de cada nanocapa del nanolaminado y el número de bicapas (x_1+x_2 , ver Figura 20).

Tabla 1. El espesor total esperado, espesor de cada subcapa, y el número de bicapas de las muestras nanolaminadas.

Muestra Al₂O₃/ZnO G_{X₁, X₂}	Espesor total esperado (nm)	Al₂O₃ Espesor X₁ (nm)	ZnO Espesor X₂ (nm)	Número de bicapas
G_{1,5}	521	1	5	86
G_{1,10}	495	1	10	45
G_{5,10}	510	5	10	34

3.4. Caracterización

Una vez obtenidas las guías de onda con núcleo nanolaminado de Al₂O₃/ZnO, se realizaron las caracterizaciones ópticas correspondientes para conocer el perfil de intensidad a la salida y finalmente, se realizaron las mediciones para conocer los valores experimentales de los índices de refracción efectivos TE y TM.

Las caracterizaciones fisicoquímicas de la nanoestructura consistieron en las mediciones de Difracción de rayos X, para conocer la estructura cristalina y el tamaño medio de los nanocristales en ella. Se realizaron mediciones de Elipsometría para conocer el espesor e índice de refracción del material a diferentes longitudes de ondas. Finalmente, se utilizó el espectrofotómetro para conocer el porcentaje de transmitancia, absorbancia y reflectancia del nanolaminado de Al₂O₃/ZnO.

3.4.1. Medición de la distribución de intensidad

La medición de la distribución de la intensidad a la salida de una guía de onda permite corroborar la obtención de una guía de onda después de la fabricación y se

logra al acoplar y propagar la luz dentro de ella. Para ello se utilizó el arreglo óptico que se presenta en la Figura 14, el cual consiste de una fuente laser con una longitud de onda de 632.8 nm, conectada a una fibra óptica con punta estrechada, la cual transporta la luz a una guía de onda colocada en un nanoposicionador electrónico. La guía puede ser observada desde una vista lateral y superior por dos microscopios ópticos, a uno de los microscopios está conectada una cámara CCD la cual captura una imagen del perfil de intensidad a la salida de la guía y el otro apoya en la alineación fibra-guía. Como se trata de una guía de onda plana, lo que observamos es la luz confinada solo en el eje vertical, ver pantalla de computadora en la ilustración de la figura 21. Se toman imágenes con la cámara y se realiza un análisis de metrología con ayuda del software ImageJ.

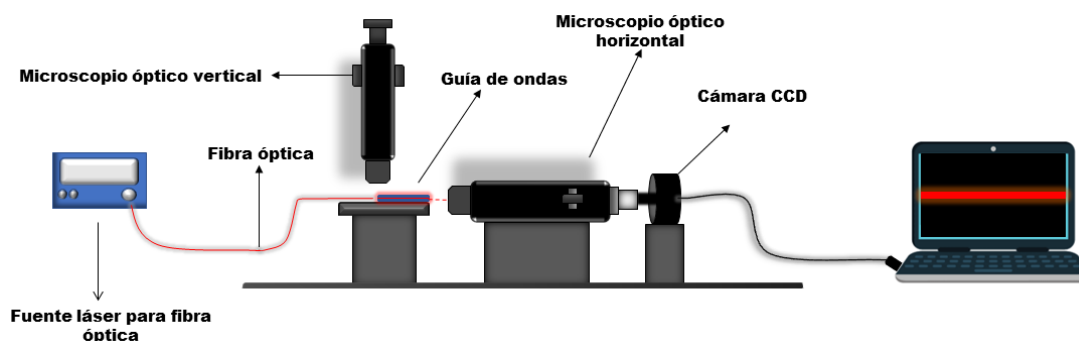


Figura 21. Ilustración del arreglo óptico utilizado para obtener la distribución de intensidad las guías fabricadas.

La Figura 22, muestra el sistema de acoplamiento fibra-guía con los diferentes dispositivos ópticos y electrónicos utilizados, ubicado el Laboratorio de Películas Delgadas del departamento de óptica de CICESE.

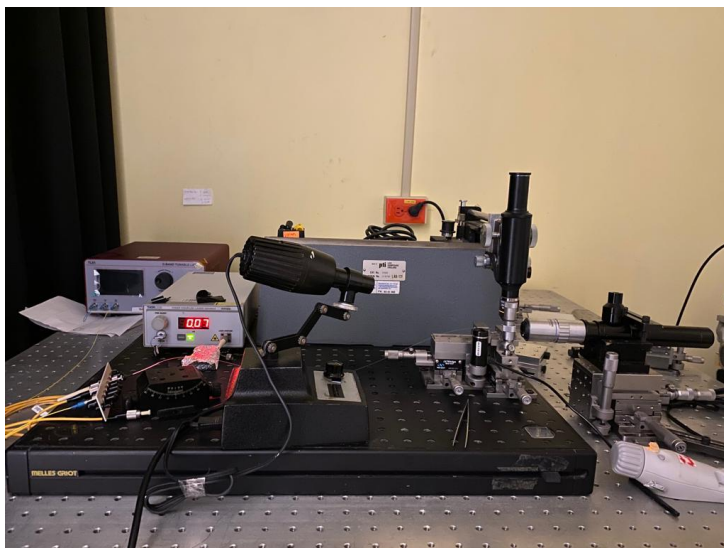


Figura 22. Sistema de acoplamiento fibra-guía.

3.4.2. Pérdidas de propagación: Método CutBack

Una de las características más importantes de las guías de ondas es la atenuación de la luz o pérdidas de propagación que experimenta una onda a medida que viaja a través de la guía. Estas pérdidas se les atribuyen generalmente a tres mecanismos diferentes: esparcimiento, absorción y radiación. Las pérdidas por esparcimiento predominan generalmente en las guías de onda de vidrio o dieléctricas, mientras que la pérdida de absorción es más importante en semiconductores y otros materiales cristalinos. Las pérdidas de radiación se vuelven significativas cuando las guías de onda tienen una curvatura (Hunsperger, 2009b). En este trabajo se espera encontrar pérdidas por esparcimiento y absorción, debido a la cristalinidad del ZnO reportada en la literatura y posible riesgo de contaminación durante la fabricación de los nanolaminados.

La Figura 23 muestra una ilustración del arreglo óptico para medir la potencia de salida de las guías de onda. Una fuente láser proporciona una onda electromagnética monocromática que acoplamos en la guía. Sin embargo, en este caso, la luz no se envía a una cámara CCD, si no llega a una esfera integradora. Para ello, la guía de onda se coloca sobre una base, la cual está centrada entre dos microscopios ópticos, el microscopio perpendicular a la guía, verifica el enfoque

fibra-sustrato, en el caso del microscopio paralelo a la guía, enfoca el eje z de la guía de ondas, donde viaje el modo excitado. Posteriormente un lente enfoca la onda electromagnética a una esfera integradora la cual da como resultado la potencia de salida de la guía de ondas.

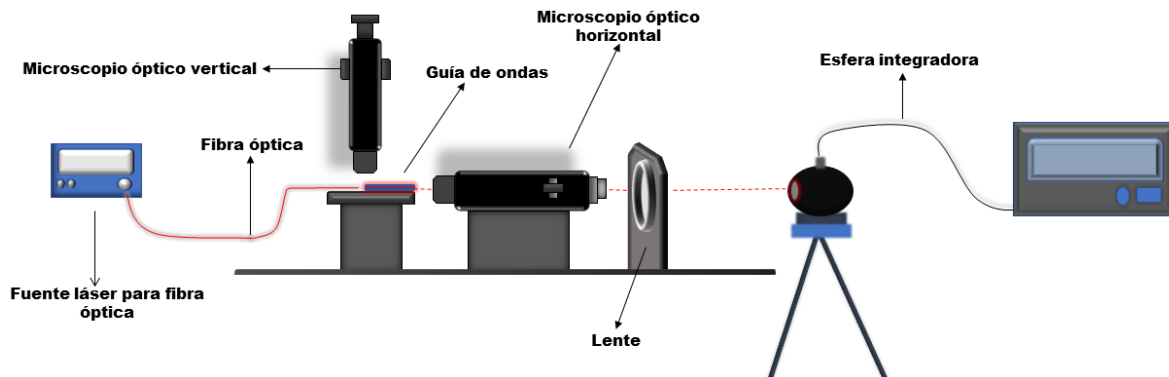


Figura 23. Diagrama del arreglo para la medición de la potencia de salida de cada muestra.

Las mediciones de pérdidas de propagación óptica para las guías de ondas ópticas planas, se tomaron utilizando el método CutBack. Este procedimiento fue uno de los primeros métodos experimentales aplicados para medir la atenuación de la luz en una guía de onda. El principio del método consta de medir las diferencias relativas en la potencia de la señal de salida de la guía al ir disminuyendo la longitud de propagación por cortarla. Las pérdidas de propagación se pueden calcular con la siguiente fórmula

$$Perdidas \left(dB/cm^{-1} \right) = \alpha_{dB} = \frac{10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)}{L_2 - L_1} \quad (19)$$

donde P_1 es la potencia óptica emitida por la fuente que pasa a lo largo de toda la longitud L_1 de la guía de onda plana. P_2 es la potencia de salida de la guía de onda plana después de cortar la guía de onda, donde L_2 es la nueva longitud de la parte resultante de la guía. Se trata de un método destructivo, sin embargo, hoy en día se utiliza ampliamente en óptica integrada para caracterizar las pérdidas de propagación en dispositivos ópticos. CutBack permite restar los coeficientes de acoplamiento, porque cualquiera que sea el factor que aparece en una medición,

también aparece en la otra medición (Kappeler et al., 2011; Prajzler et al., 2018), esto resulta conveniente en guías de onda con núcleo submicrón, pues el factor de acoplamiento es complejo de medir o calcular.

3.4.3. Difracción de Rayos X

Esta es una técnica de caracterización primaria, ampliamente utilizada para determinar las propiedades del material; evalúa la cristalinidad y el tamaño del cristal. El fenómeno de difracción de rayos X, resulta de un proceso en el que los rayos X son dispersados por los electrones de los átomos presentes en la composición de la muestra. Dado que los rayos X tienen una longitud de onda que oscila en los 0.02 y 1 angstrom, los cuales son comparables al espaciamiento interatómico de un sólido cristalino, el haz de rayos X incidente se difracta en direcciones específicas propias de cada material, los rayos X dispersos pueden interferir constructiva o destructivamente entre sí. Esta interferencia se puede observar siguiendo la Ley de Bragg (Raval et al., 2019; Selva et al., 2021).

Básicamente, el equipo de caracterización incluye una fuente, una óptica primaria, una pieza de muestra, una óptica secundaria y un detector, la ejemplificación del arreglo de puede observar en la Figura 24.

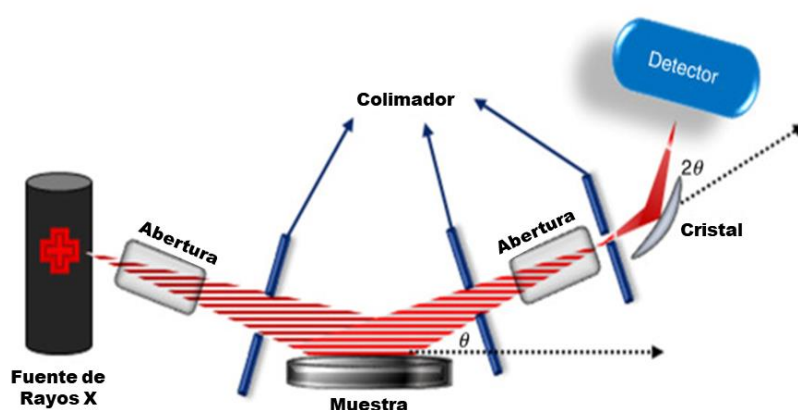


Figura 24. Ejemplificación del arreglo para la difracción de rayos X. Modificado de Gumustas et al., 2017.

El análisis de los resultados de difracción de rayos X proporciona un difractograma, donde en el eje y se presenta la intensidad y en el eje x se ilustra como una función del ángulo de exploración. El resultado de un difractograma nos brinda información sobre: la estructura cristalina, información cualitativa de la fase y simetría del grupo espacial a partir de las posiciones de los picos. Las formas de los picos y el ancho de los picos ilustran el tamaño de los cristales y las fallas de apilamiento (Gumustas et al., 2017).

Para esta caracterización se utilizó el Difractómetro de rayos X D2 PHASER, ubicado en el Laboratorio de Nanotecnología. Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño - UABC, ver Figura 25. El cual es un equipo diseñado para realizar análisis cualitativos y cuantitativos de materiales policristalinos.



Figura 25. Difractómetro de rayos X D2 PHASER.

3.4.4. Elipsometría

La elipsometría es una medida de reflectancia óptica muy sensible con capacidades excepcionales para la metrología de películas delgadas. Es una técnica no destructiva que mide el cambio en la polarización a medida que la luz se refleja en

un material o multicapa. El cambio de polarización se representa como una relación de amplitud en las componentes del campo eléctrico, Ψ , y una diferencia de su fase, Δ . La respuesta medida depende de las propiedades ópticas, las cuales se ven afectadas por la composición, el espesor, la conductividad y la porosidad del material. Por lo tanto, la elipsometría se utiliza principalmente para determinar el grosor de la película y las constantes ópticas, las cuales son los índices de refracción n_E y n_M y los coeficientes de extinción k_E y k_M . Sin embargo, también se aplica a la caracterización de la composición, la cristalinidad, la rugosidad, la concentración de dopaje y otras propiedades del material asociadas con un cambio en la respuesta óptica (Hilfiker & Woollam, 2005; Ohtsuka & Fushimi, 2018).

En esta técnica, una fuente de luz es polarizada linealmente por un polarizador, la luz irradia la muestra a analizar. Posteriormente, se genera un fenómeno de reflexión donde hay un cambio de polarización, la radiación electromagnética pasa un compensador y un segundo polarizador y finalmente, se detecta. En la Figura 26 se puede observar un esquema representativo, donde interactúan los haces incidentes y reflejados con los componentes del elipsómetro.

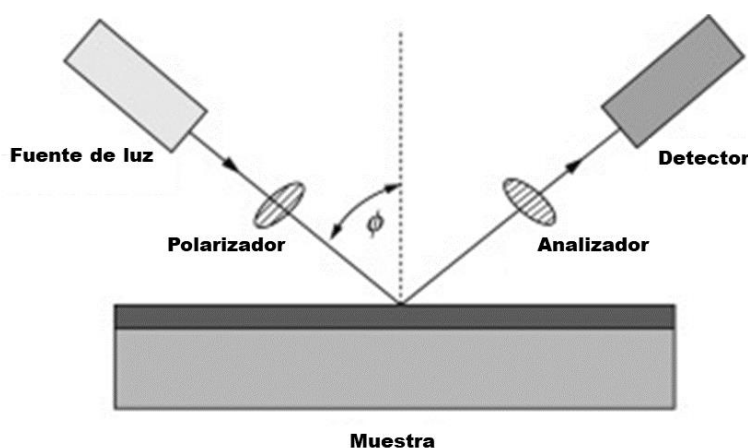


Figura 26. Diagrama esquemático de elipsometría. Modificado de Airaksinen, 2015.

El estado de polarización de la luz incidente sobre la muestra puede descomponerse en los componentes **s** y **p** (el componente **s** oscila perpendicular al plano de incidencia y paralelo a la superficie de la muestra y el componente **p** oscila paralelo

al plano de incidencia). Las amplitudes de los componentes **s** y **p**, después de la reflexión y normalizadas a su valor inicial, se denotan por **r_s** y **r_p**, y se utilizan para calcular la relación de reflectancia compleja (**ρ**) mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\Psi)e^{i\Delta} \quad (17)$$

donde ***tan*(Ψ)** es la relación de amplitud tras la reflexión, y Δ es el cambio de fase. (Jellison, 1999; Wang & Chu, 2013).

En este trabajo se utilizó el elipsómetro espectroscópico de ángulo variable J. A. Woollam M-2000, mostrado en la Figura 27. Ubicado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, campus Mexicali.

Las mediciones se hicieron a los nanolaminados de Al₂O₃/ZnO depositados sobre un sustrato de silicio. Se obtuvieron las constantes elipsométricas incidiendo la luz sobre la muestra con 4 diferentes ángulos de incidencia en 45°, 55°, 65° y 75° desde 400 nm hasta 1000 nm. Posteriormente se propusieron modelos de función dieléctrica basados en osciladores de Cody-Lorentz, y mediante el software CompleteEASE se calcularon las constantes elipsométricas al ajustar por mínimos cuadrados el espesor del nanolaminado y los parámetros de los modelos. Finalmente, una vez que los ajustes arrojaron errores cuadráticos medios adecuados para nuestros propósitos, se calcularon las constantes ópticas a partir de los modelos de función dieléctrica. Sin embargo, el rango de longitudes de onda de operación es insuficiente para obtener información directamente del valor del índice a una λ de 1550 nm, por lo tanto, se realizó la extrapolación para obtener una curva de dispersión con un rango adecuado.



Figura 27. Equipo de Elipsometría J. Woollam M-2000 para Elipsometría de Ángulo Variable (VASE).

3.4.5. Transmitancia por Espectrofotometría (UV-Vis)

La transmitancia por espectrofotometría UV-Vis, es una técnica de caracterización de materiales ampliamente utilizada para determinar la transparencia de los materiales. El principio básico de la técnica consiste en la medición de la intensidad espectral de un haz de luz, el cual se mide antes y después de su transmisión sobre la muestra en estudio. La relación entre la intensidad del haz de luz incidente y el transmitido depende de la absorción de los materiales, la reflectancia y en este caso, por tener espesor de película semejante al espectro UV-Vis, la interferencia por los desfases en las reflexiones de las interfaces película-aire y película-substrato. Los valores espectrales (UV-Vis) pueden ser utilizados para calcular el espesor si se tiene el índice de refracción de la película analizada (Tompkins et al., 2000; Urbánek et al., 2004) o también pueden calcularse los espectros de transmitancia a partir del espesor e índice de refracción de los materiales involucrados. En este trabajo también se consideró la transmitancia simulada usando el software de uso libre OpenFilters.

Por otro lado, la transmitancia fue medida con el Espectrofotómetro de UV y Visible, Varian, CARY-60, Figura 28. Ubicado en el laboratorio de ingeniería de superficies del Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM.



Figura 28. Espectrofotómetro de UV y Visible, Varian, CARY-60.

3.4.6. Acoplamiento por prisma: Obtención de índices de refracción efectivos

Los índices de refracción efectivos de los modos soportados en las guías de onda pueden ser obtenidos a través del sistema acoplador de prisma modelo 2010/M Metricon, Figura 29, ubicado en el Laboratorio de Películas Delgadas del Departamento de óptica en CICESE.

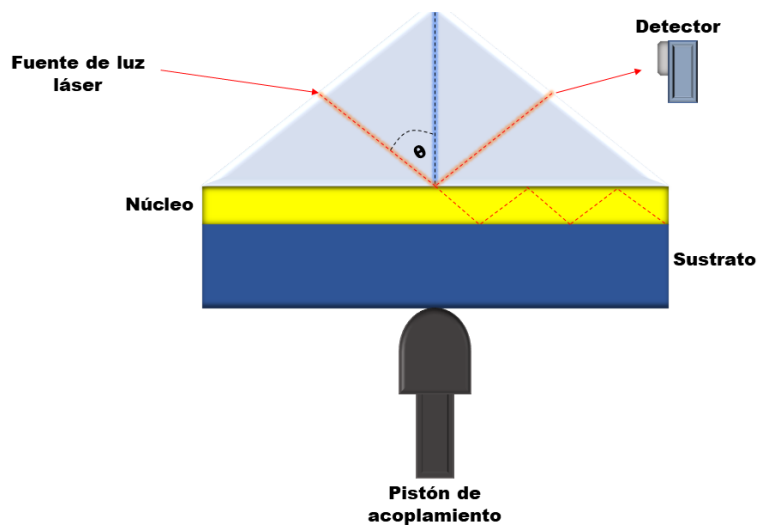


Figura 29. Principio de medición para una película delgada.

La muestra a medir (Figura 30a) se pone en contacto con la base de un prisma por medio de un cabezal de acoplamiento accionado neumáticamente, creando un pequeño espacio de aire entre la película y el prisma. Un rayo láser golpea la base del prisma y, si no hay un modo acoplado, se refleja totalmente en la base del prisma hacia un fotodetector.

En ciertos valores discretos del ángulo de incidencia, llamados ángulos de modo, los fotones pueden hacer tunelaje óptico y acoplarse en un modo de propagación óptico, provocando una fuerte caída en la intensidad de la luz que llega al detector. Las mediciones se realizan utilizando una mesa giratoria controlada por computadora que varía el ángulo de incidencia y ubica cada uno de los modos de propagación de la película automáticamente. (MODEL 2010/ M OVERVIEW Metricon; Torge & Ulrich, 1973).

En la Figura 30b, se puede observar la guía de ondas nanolaminada de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ en el sistema de acoplamiento por prisma, a una longitud de onda de 632.8 nm. Se calcularon los índices de refracción efectivo para los modos TE y TM, los cuales se presentan en la sección de Resultados y Discusión.

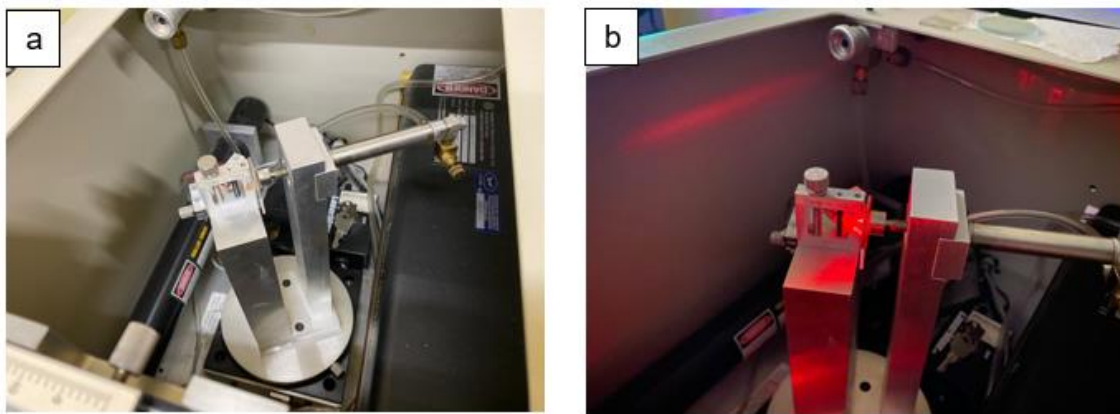


Figura 30. (a) Sistema acoplador de prisma modelo 2010/M de Metricon y (b) guía de ondas nanolaminada de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ en el sistema de acoplamiento por prisma.

Capítulo 4. Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los principales resultados de las caracterizaciones estructurales y ópticas de los nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$.

4.1. Propiedades estructurales mediante XRD

Para la identificación de los ángulos de intensidad y planos de red cristalográfica medidos, se realizó una comparación con la siguiente Carta cristalográfica de Óxido de Zinc, Figura 31.

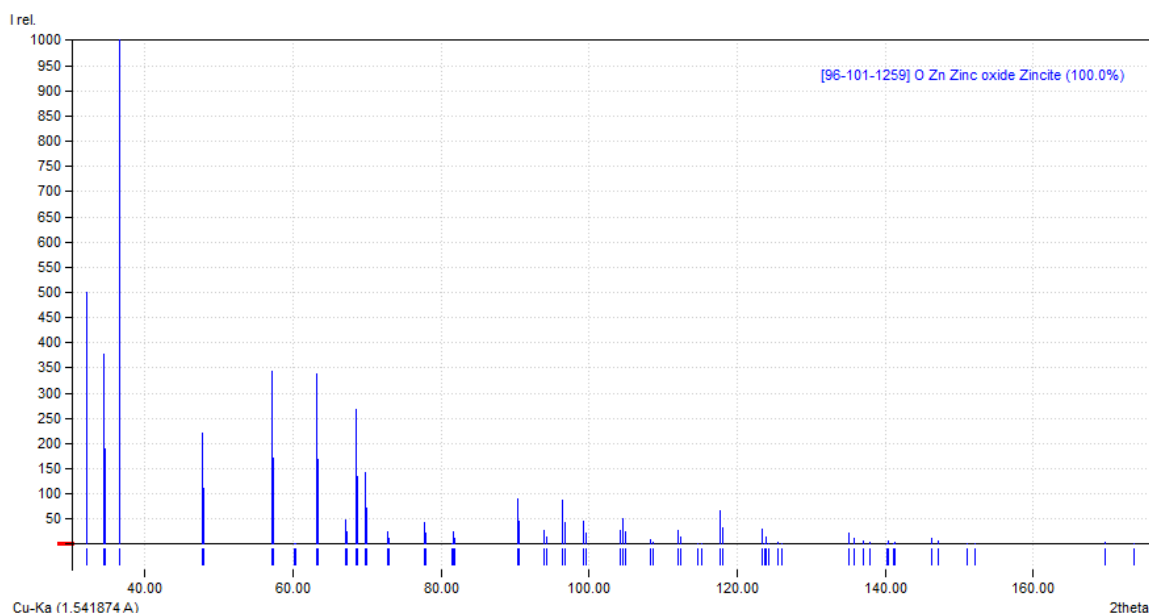


Figura 31. Carta cristalográfica del Óxido de Zinc, recuperada de Datos de estructura cristalina inorgánica (ICSD).

Las mediciones de XRD se realizaron en los nanolaminados con configuración 1 y 5 nm de Al_2O_3 y ZnO , respectivamente, la cual se representa como $\mathbf{G}_{1,5}$ y con configuración 5 y 10 nm de Al_2O_3 y ZnO , respectivamente, en la muestra $\mathbf{G}_{5,10}$, depositados en sustratos de Si. Los difractogramas de rayos X, para las dos muestras analizadas se presentan en la Figura 32. Como podemos observar ambas muestras exhiben un pico intenso en un ángulo de Bragg de 34.8° y un pico más pequeño en 32.9° correspondientes a los planos cristalinos de (002) y (100) de ZnO , respectivamente.

El ángulo 34.8° tiene un aumento considerable de nanocristales de ZnO con planos de red (002) paralelos a la superficie del sustrato, comparado con el del ángulo 32.9° . Andreas Wickberg y colaboradores, reportan que estos nanocristales tienen sus ejes ópticos orientados perpendicularmente al sustrato y son responsables de la susceptibilidad de segundo orden distinta de cero. Al mismo tiempo, la intensidad de la reflexión de Bragg (100), correspondiente a los nanocristales orientados paralelamente al sustrato, disminuye aproximadamente en un tercio. Ellos mencionan, que este cambio estructural también se manifiesta en las medidas no lineales, y que el rendimiento no lineal, se puede aumentar aún más introduciendo mayor cantidad de Al_2O_3 en cada interfaz (Wickberg et al., 2016), por lo tanto, el nanolaminado influye en esta propiedad no lineal. Además, la cristalinidad demostrada en esta prueba, apoya a la propuesta de un modelo anisotrópico de índice de refracción del nanolaminado, donde el ZnO aporta esta propiedad.

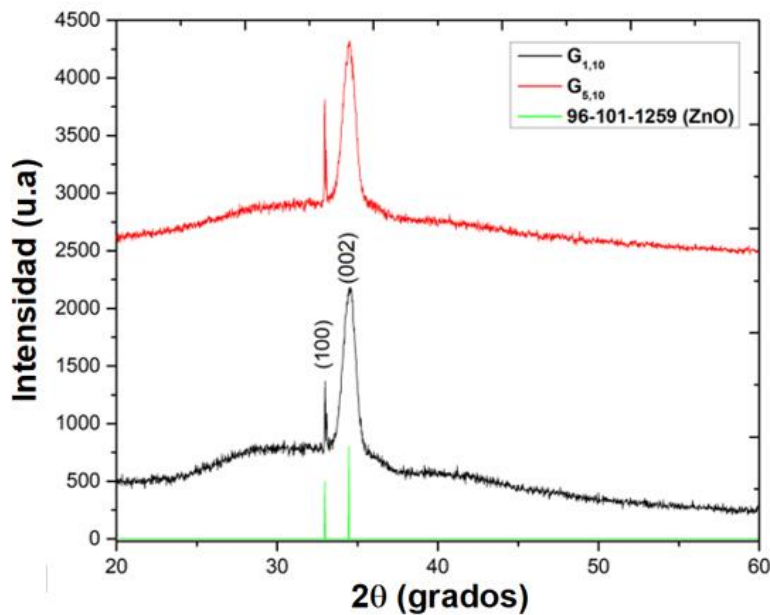


Figura 32. Patrones de difracción de rayos X de los nanolaminados $G_{1.5}$ y $G_{1.10}$.

Se calculó el límite inferior para el tamaño de los nanocristales usando la ecuación de Scherrer:

$$\tau = \frac{K \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (18)$$

donde τ es el tamaño de los nanocristales, K es la constante de Scherrer, es un factor de forma adimensional, con un valor de 0.9. λ es la longitud de onda de los rayos X, con un valor de 1.54184 Å, β es el ancho completo a la mitad del máximo (FWHM) del pico de difracción y θ es el ángulo de difracción. El tamaño calculado de los nanocristales fue de 9.2 y 7.8 nm, para las muestras $G_{1,10}$ y $G_{5,10}$, respectivamente. La Tabla 2 muestra los parámetros utilizados para determinar el tamaño de los nanocristales. Como puede verse, el tamaño de los nanocristales del nanolaminado no se ve estrictamente afectado por las subcapas de Al_2O_3 , ya que solo hubo una diferencia de ~1.4 nm entre los dos nanolaminados. Esto debido a que se mantuvo el mismo espesor de la subcapa de ZnO en el nanolaminado.

Tabla 2. Parámetros utilizados para calcular el tamaño de los nanocristales de los nanolaminados $G_{1,10}$ y $G_{5,10}$.

	β	β (rad)	2θ	θ (rad)	Tamaño (Å)
Muestra $G_{1,10}$	0.818	0.01427679	34.61	0.30202923	92.796
Muestra $G_{5,10}$	0.973	0.01698205	34.49	0.30098203	78.039

4.2. Propiedades ópticas del Nanolaminado de Al_2O_3/ZnO

A continuación, se muestran los parámetros elipsométricos obtenidos y calculados para la muestra $G_{1,10}$ desde 390 a 1000 nm. Se obtuvo un error cuadrático medio de 6.6 durante el ajuste, Figura 33. Se propuso un modelo que incluyera anisotropía en el nanolaminado pues, tal como se verificó en la sección de antecedentes, existen reportes previos donde se presentan diferentes índices de refracción (birrefringencia) para polarización TE (extraordinario) y TM (ordinario).

El espesor esperado y medido de los nanolaminados, su índice de refracción a longitudes de onda de 632.8 nm y 1550 nm, y el error cuadrático medio del ajuste

para cada muestra se presenta en la Tabla 3. La birrefringencia obtenida para los nanolaminados, produce cambios de polarización en las propiedades del modo mientras se propaga en la guía. Aún más, modificará el índice efectivo de los modos de acuerdo a su polarización, cancelando o aumentando la birrefringencia modal que se introduce desde las ecuaciones del eigenvalor TE y TM. A futuro, esto puede ser aprovechado para diseñar dispositivos basados en guías de onda que modifiquen la polarización de la luz en un circuito integrado óptico.

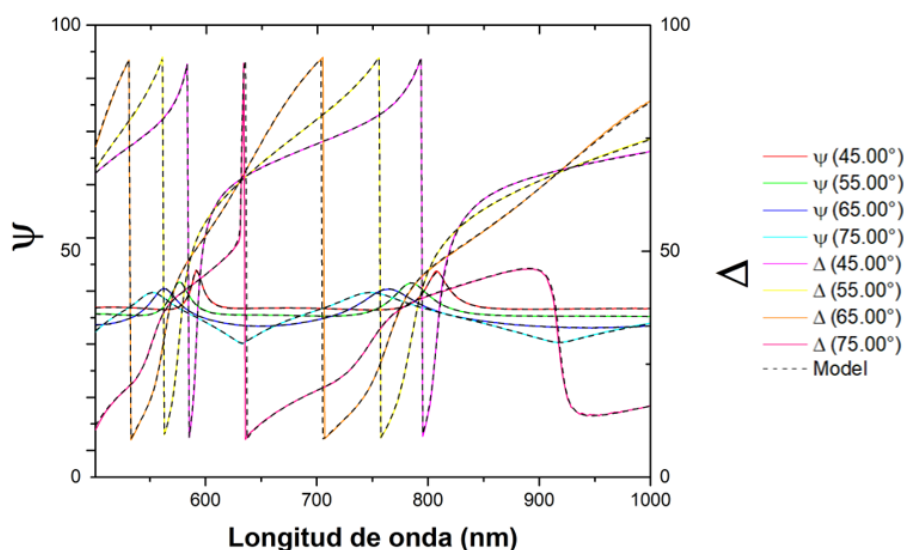


Figura 33. Curvas ψ Δ y ajuste del modelo de Cauchy para la muestra $G_{1,10}$ utilizando el programa Complete EASE para procesamiento de datos de elipsometría.

Tabla 3. Espesores esperados, índices de refracción ordinarios y extraordinarios y ECM.

Muestra	Espesor esperado (nm)	Espesor medido (nm)	Índice de refracción ordinario a 632.8 nm	Índice de refracción extraordinario a 632.8 nm	Índice de refracción ordinario a 1550 nm	Índice de refracción extraordinario a 1550 nm	ECM
$G_{1,5}$	521	620	1.900	1.882	1.783	1.709	14
$G_{1,10}$	495	619	1.858	1.824	1.783	1.715	13
$G_{5,10}$	510	601	1.862	1.827	1.723	1.703	33

Como se puede observar en la Tabla 3, hay un aumento del 20% del espesor esperado del nanolaminado, esto se puede deber a los parámetros del equipo para

el crecimiento de los depósitos, éstos pudieron modificarse debido al cambio de condiciones al crecer otros materiales, ya que el equipo da servicio a diferentes proyectos previamente desarrollados. Sin embargo, según las Figuras 14 y 15, el espesor obtenido continúa siendo apropiado para guías de onda, pues confina los modos en las longitudes de onda propuestas.

El equipo de elipsometría utilizado tiene un límite en la longitud de onda de análisis (~ 1000 nm) por lo que, para obtener los índices de refracción a una longitud de onda de 1550 nm, se tuvo que utilizar un ajuste de extrapolación de los resultados de índices de refracción ordinarios y extraordinarios a una longitud de onda de 1550 nm, como

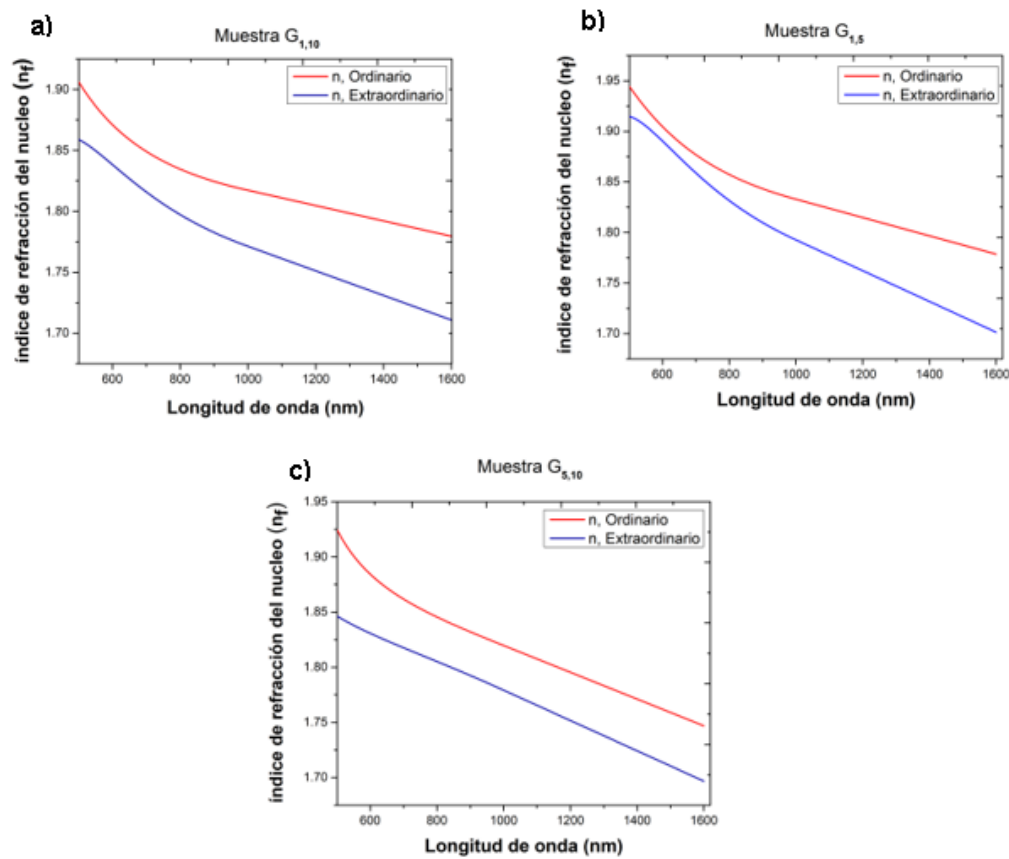


Figura 34. Curvas de dispersión para las muestras a) $G_{1,10}$, b) $G_{1,5}$ y c) $G_{5,10}$.

4.3. Propiedades ópticas por medio de la espectrofotometría UV-Vis

La Figura 35 muestra los espectros de transmitancia óptica medida de los nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ en el rango de longitud de onda de 190 a 1100 nm (línea delgada azul) e incluye los cálculos de transmitancia usando el índice ordinario (línea gruesa negra) y extraordinario (línea punteada roja). Se puede observar que los nanolaminados son transparentes a partir de ~400 nm con una transmitancia óptica superior al 80%. En adición, este valor va incrementándose conforme aumenta la longitud de onda debido a la disminución en la absorción del nanolaminado.

Las oscilaciones en el espectro se deben a la interferencia de la luz en el sistema sustrato-película-aire y los índices y espesores de mayor valor suelen presentar mayor frecuencia. Además, las simulaciones y las mediciones de la transmitancia se ajustan razonablemente cuando se usa el índice ordinario y espesor medido por elipsometría, lo cual apoya los valores que se reportan en la sección anterior. Sin embargo, el ajuste no es total pues la fuente de la luz del espectrofotómetro no es polarizada.

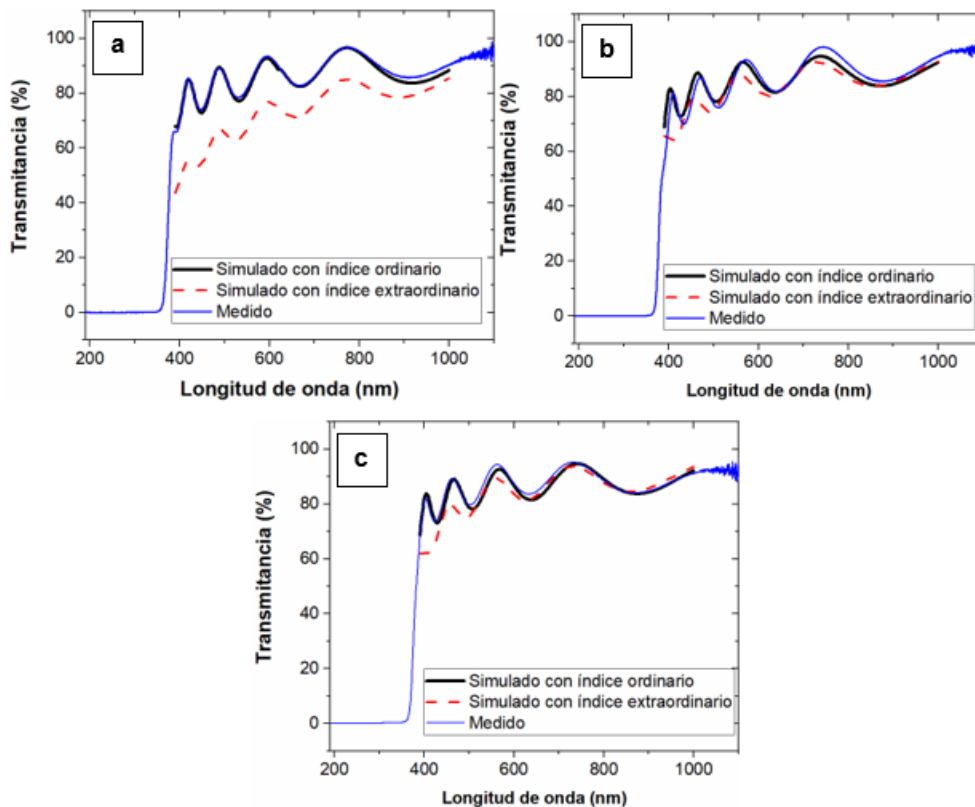


Figura 35. Espectros de transmitancia de los nanolaminados a) $G_{1,5}$, b) $G_{1,10}$ y c) $G_{5,10}$.

Se realizaron las mediciones de absorbancia en los nanolaminados. Los espectros obtenidos se presentan en la Figura 36, se observa un borde de absorción alrededor de ~ 390 nm, correspondiente a la banda prohibida, la cual varía entre los nanolaminados.

Se realizó el cálculo de la banda prohibida directa a partir de los datos de absorción utilizando el método gráfico de Tauc. Las gráficas de $(\alpha h\nu)^2$ frente a la energía (eV), se presenta en el recuadro de la Figura 36. Se pueden observar valores de 3.27, 3.29 y 3.33 eV para las muestras $G_{1,5}$, $G_{1,10}$, y $G_{5,10}$, respectivamente. La banda prohibida óptica obtenida para todos los nanolaminados es menor que la del ZnO intrínseco, 3.37 eV a temperatura ambiente, reportado por Janotti & van de Walle, 2009. Por lo que se puede observar que la banda prohibida aumenta cuando aumenta la cantidad de Al en el nanolaminado.

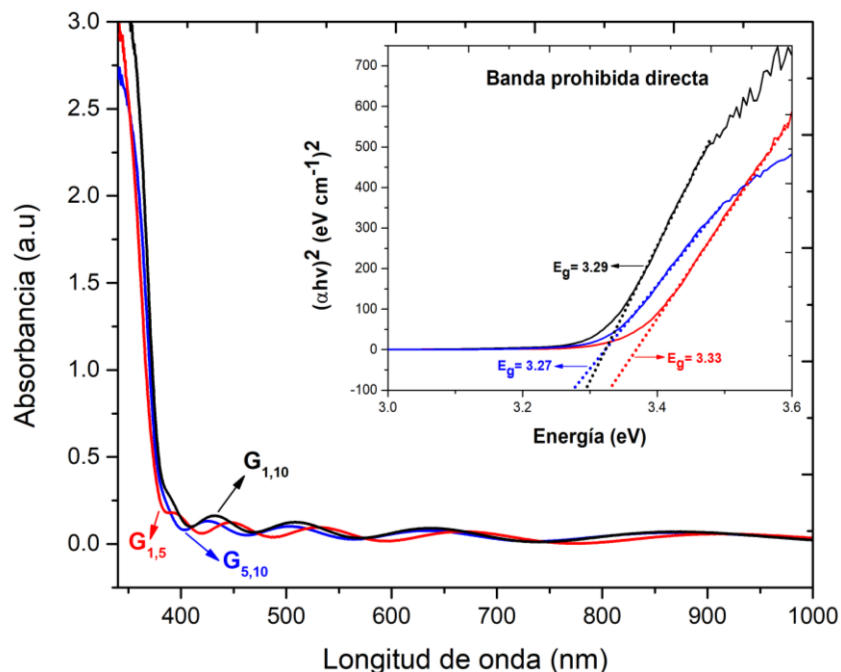


Figura 36. Espectros de absorción de los nanolaminados $G_{1,5}$, $G_{1,10}$ y $G_{5,10}$. El recuadro muestra el método gráfico de Tauc para calcular el valor de la banda prohibida directa.

4.4. Distribución de intensidad a la salida de la guía

La distribución de la intensidad y de la amplitud del campo eléctrico simulado a una longitud de onda de operación de 632.8 nm y usando los datos experimentales medidos por elipsometría se muestra en la Figura 37. Se observa que el pico del máximo de la intensidad (curva roja) y amplitud del campo eléctrico (curva azul punteada) tienden hacia el sustrato debido a la asimetría de la guía, es decir el índice de refracción del sustrato es mayor al de la cubierta.

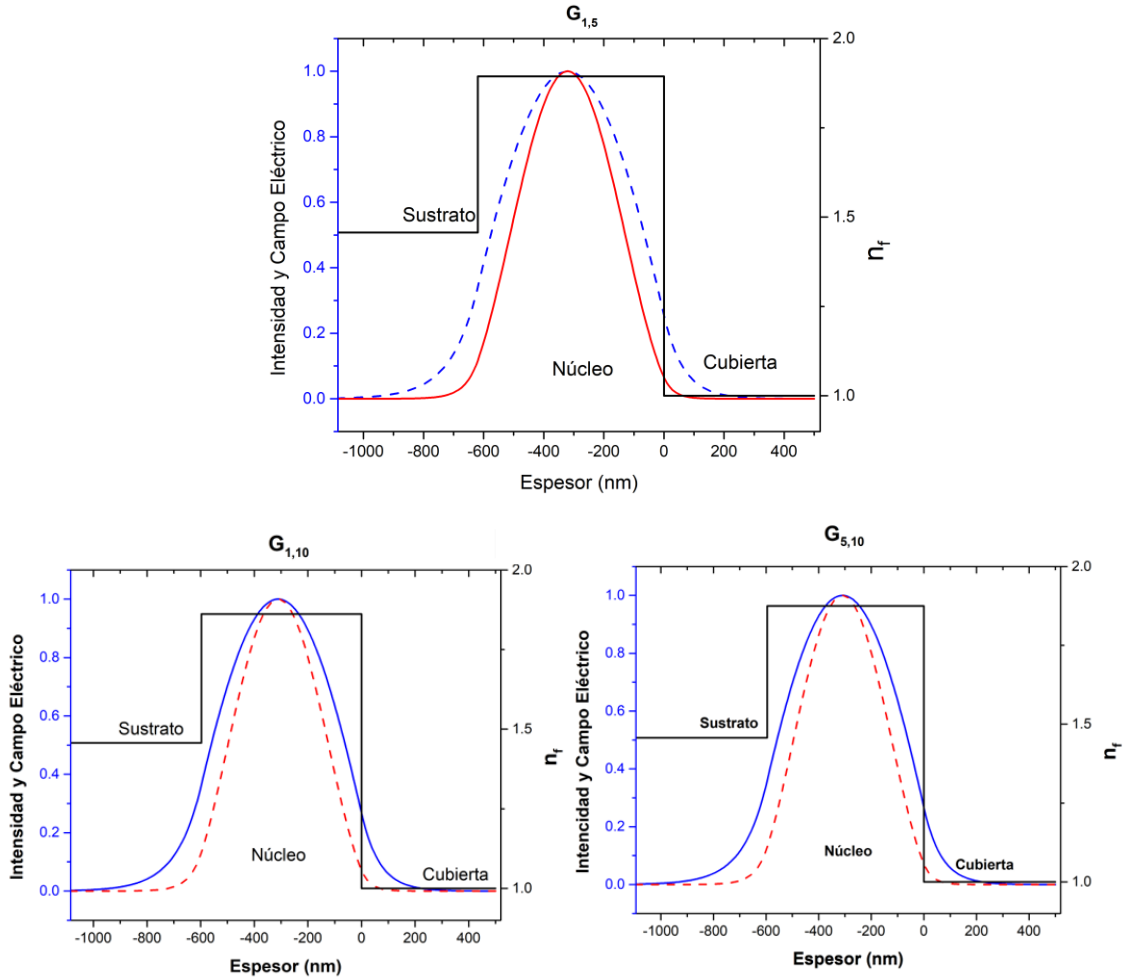


Figura 37. Distribución de intensidad y la amplitud del campo eléctrico simulado para las guías de onda a 632.8 nm.

La Figura 38, muestra la distribución de la luz (632.8 nm) obtenida experimentalmente a la salida de la guía de onda de las muestras $G_{1,5}$ y $G_{5,10}$. Tal como se esperaba, estas guías de onda plana solo presentan confinamiento en el eje vertical. Por otro lado, no fue posible observar la luz (632.8 nm) a la salida de la guía $G_{1,10}$ debido a que ésta presenta una mayor absorción en la región visible, (ver Figura 35). Se sospecha que la absorción es introducida por el ZnO, pues es la muestra con mayor contenido de este compuesto. Por lo tanto, si se desea mejorar las pérdidas de propagación se debe optimizar la fabricación del ZnO por ALD y esto abonará a disminuir también las pérdidas de las guías $G_{1,5}$ y $G_{5,10}$. Otra opción es operar la guía de onda a longitudes de onda más largas, trabajando fuera de la

zona de absorción mostrada en espectrofotometría. En la Figura 39, se muestran imágenes de la luz a la salida de la guía $G_{1,10}$, cuando se propagó la luz de un láser sintonizable ajustado a 1550 nm, presentó cualitativamente una mejor propagación.

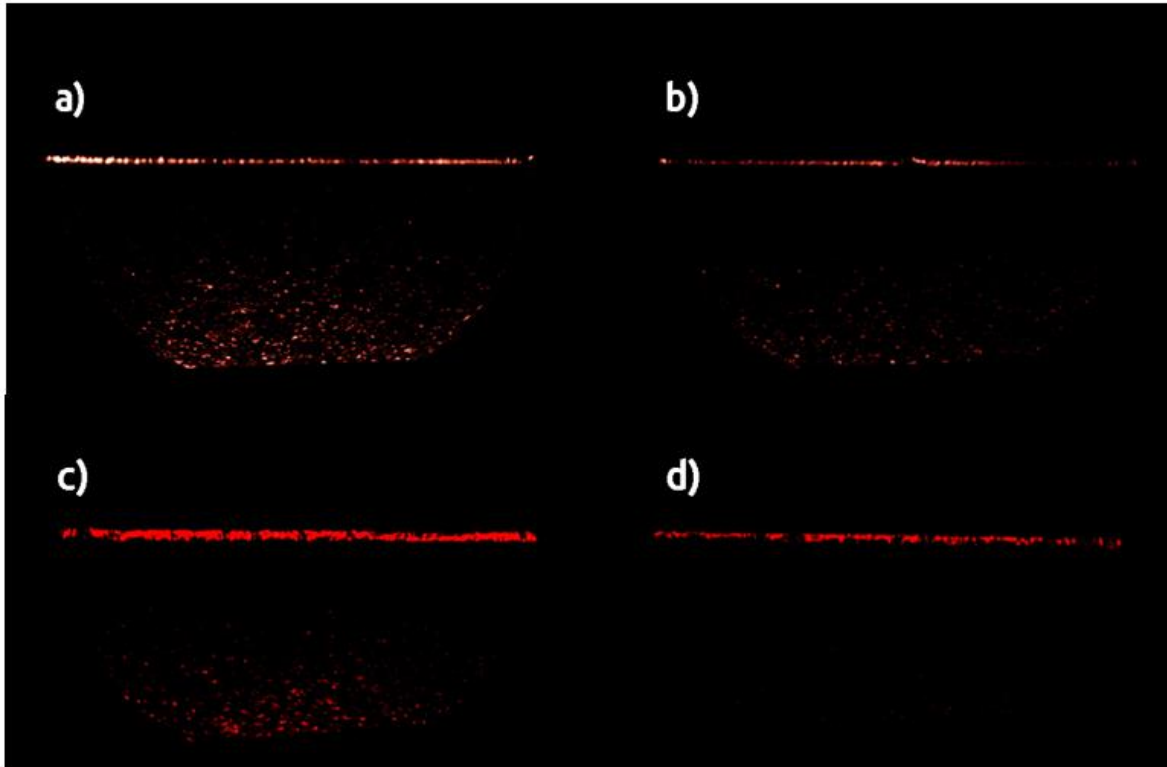


Figura 38. Imágenes de distribución de intensidad a una longitud de onda de 632.8. En (a) y (b) se observa el nanolaminado $G_{1,5}$ a una potencia de 0.27 y 0.65 mW, respectivamente. En (c) y (d) se observa el nanolaminado $G_{5,10}$ a una potencia de 0.10 y 0.15 mW, respectivamente.

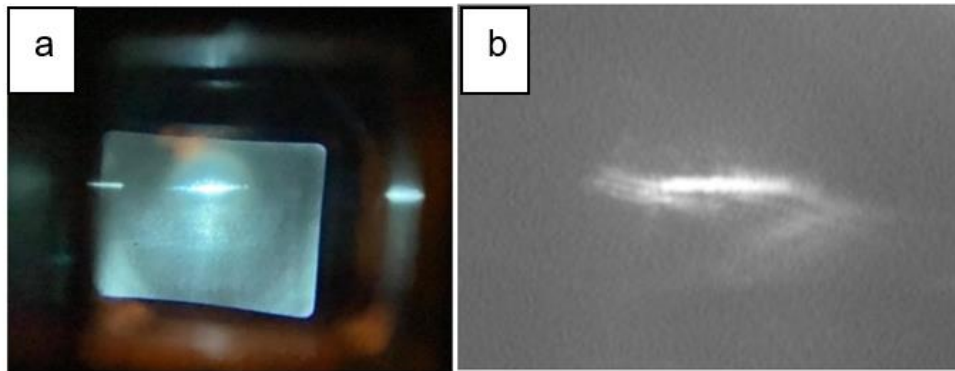


Figura 39. a) Fotografía de la cámara infrarroja mostrando la salida de la guía y b) Imagen de distribución de intensidad de $G_{1,10}$ a una longitud de onda de 1550 nm.

4.5. Acoplamiento por prisma

La medición de acoplamiento por prisma se realizó en todas las guías para una longitud de onda de 632.8 nm. Se midieron los índices efectivos de los modos soportados para polarización TE y TM. La Figura 40, muestra las curvas de la luz reflejada en las guías de onda obtenidas en este trabajo. Las caídas de señal indican la disminución de la reflexión de la luz porque se ha acoplado a la guía. Los detalles del principio de operación se presentan en la sección 3.4.6 de este documento. Todas las guías presentaron la capacidad de soportar 2 modos para polarización TE y TM cuando se acopla luz a 632.8 nm.

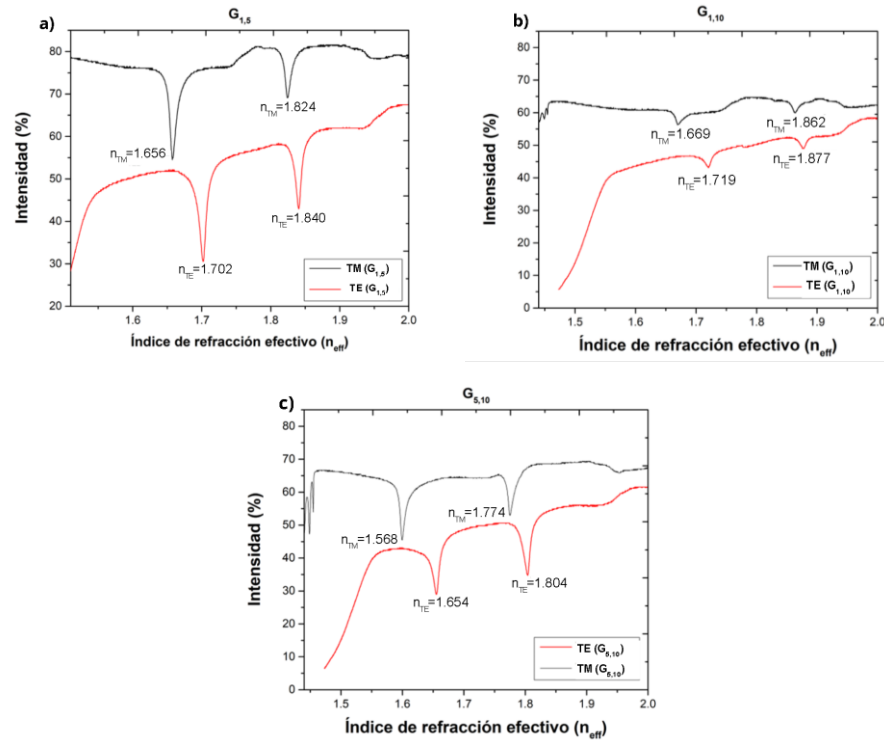


Figura 40. Curvas típicas obtenidas a partir del acoplamiento por prisma en a) $G_{1,5}$, b) $G_{1,10}$, y c) $G_{5,10}$.

La Tabla 4 muestra los valores de los índices efectivos medidos y calculados, se puede ver que existe concordancia tanto para los valores del modo fundamental y el modo 1. En las imágenes de intensidad, Figuras 38 y 39, solo se excitó el modo fundamental en ambos casos, esto lo podemos verificar gracias a la forma de exposición de la luz en el perfil de ambas guías de onda.

Tabla 4. Índices de refracción efectivos TE y TM calculados y medidos.

		Valores medidos (n_{eff})							
		Longitud de onda de 632.8 nm							
		Modo 0				Modo 1			
		Valores calculados		Valores medidos		Valores calculados		Valores medidos	
Muestra	Espesores por elipsometría	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM
$G_{1,5}$	620 nm	1.843	1.834	1.840	1.824	1.688	1.674	1.702	1.656
$G_{1,10}$	619 nm	1.801	1.778	1.877	1.862	1.639	1.632	1.719	1.669
$G_{5,10}$	601 nm	1.802	1.779	1.804	1.774	1.633	1.625	1.654	1.598

Capítulo 5. Conclusiones y trabajo a futuro

En esta tesis se estudió la capacidad de un nanolaminado a base de Al_2O_3 y ZnO , para ser utilizado en la obtención de guías de onda con aplicaciones en fotónica y optoelectrónica. El trabajo comprendió el diseño de guías de onda nanolaminadas, la síntesis y fabricación de la nanoestructura por la técnica de Depósito de Capa Atómica y las caracterizaciones de las propiedades fisicoquímicas y ópticas de las guías de onda. Particularmente se ha encontrado que:

- Los materiales Al_2O_3 y ZnO , tienen buenas propiedades de adherencia mutua, por lo que son materiales viables para ser utilizados como nanolaminados para la fabricación de guías de onda y potencialmente de otros dispositivos de óptica integrada.
- El núcleo nanolaminado de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ de las guías de onda, tiene un rango mínimo de espesor de alrededor de 500 nm, para ser funcional a una longitud de onda de operación de 1550 nm. Por lo que da pauta para poder utilizarse en la transmisión de señales en dispositivos de telecomunicaciones.
- Se demostró que el núcleo nanolaminado de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$, es parcialmente funcional como guía de onda a una longitud de 632.8 nm, por lo que, para utilizarlo en la transmisión de señales en dispositivos de fotónicos y optoelectrónicos, es necesario cambiar la configuración nanolaminada de Al_2O_3 y ZnO , así como optimizar el proceso de ALD.

Como trabajo a futuro se sugiere lo siguiente:

- Realizar un estudio más profundo sobre los efectos de los parámetros de depósito ALD para la fabricación de guías de ondas.
- Utilizar las técnicas de caracterización SEM o TEM, para la observación y caracterización superficial de los materiales, y así tener información morfológica y de composición química.
- Diseño y fabricación de guías de onda de canal basadas en nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$.
- Diseño y fabricación de estructuras de óptica integrada como fotodiodos, resonadores de anillo óptico, acopladores de entrada, moduladores ópticos, acopladores direccionales, etc.

Literatura citada

- Airaksinen, V. M. (2015). Silicon Wafer and Thin Film Measurements. *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies: Second Edition*, 381–390. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-29965-7.00015-4>
- Aslan, M. M., Webster, N. A., Byard, C. L., Pereira, M. B., Hayes, C. M., Wiederkehr, R. S., & Mendes, S. B. (2010). Low-loss optical waveguides for the near ultra-violet and visible spectral regions with Al₂O₃ thin films from atomic layer deposition. *Thin Solid Films*, 518(17), 4935–4940. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.03.011>
- Azadmanjiri, J., Berndt, C. C., Wang, J., Kapoor, A., & Srivastava, V. K. (2016). Nanolaminated composite materials: Structure, interface role and applications. In *RSC Advances* (Vol. 6, Issue 111, pp. 109361–109385). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c6ra20050h>
- Bogaerts, W., Pérez, D., Capmany, J., Miller, D. A. B., Poon, J., Englund, D., Morichetti, F., & Melloni, A. (2020). Programmable photonic circuits. In *Nature* (Vol. 586, Issue 7828, pp. 207–216). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2764-0>
- Caballero-Espitia, D. L., Lizarraga-Medina, E. G., Borbon-Núñez, H. A., Contreras-Lopez, O. E., Tiznado, H., & Marquez, H. (2020). Study of Al₂O₃ thin films by ALD using H₂O and O₃ as oxygen source for waveguide applications. *Optical Materials*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110370>
- Can-Uc, B., López, J., Lizarraga-Medina, E. G., Borbon-Núñez, 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 Al₂O₃/ZnO for nonlinear optical waveguides. *Optics Express*, 27(12), 17359. <https://doi.org/10.1364/oe.27.017359>
- Debrégeas-Sillard, H., & Kazmierski, C. (2008). Challenges and advances of photonic integrated circuits. In *Comptes Rendus Physique* (Vol. 9, Issues 9–10, pp. 1055–1066). <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2008.10.004>
- 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>
- Espitia, D. L. C. (2020). Fabricación de guías de onda ópticas por Depósito de Capas Atómicas (ALD).
- Este, G., & Westwood, W. D. (1984). Reactive deposition of low loss Al₂O₃ optical waveguides by modified dc planar magnetron sputtering. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2(3), 1238–1247. <https://doi.org/10.1116/1.572502>
- Flores-Romero, E., Vazquez, G. v., Marquez, H., Rangel-Rojo, R., Rickards, J., & Trejo-Luna, R. (2004). *Laser emission in proton implanted Nd:YAG waveguides*. 271–275. <https://doi.org/10.1117/12.589276>

- Gumustas, M., Sengel-Turk, C. T., Gumustas, A., Ozkan, S. A., & Uslu, B. (2017). Effect of Polymer-Based Nanoparticles on the Assay of Antimicrobial Drug Delivery Systems. *Multifunctional Systems for Combined Delivery, Biosensing and Diagnostics*, 67–108. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-52725-5.00005-8>
- High Optical Waveguide Confinement Factor Indicates Optical Losses| System Analysis Blog | Cadence. (n.d.). Retrieved June 29, 2022, from <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-a-high-optical-waveguide-confinement-factor-indicates-low-optical-losses>
- Hilfiker, J. N., & Woollam, J. A. (2005). INSTRUMENTATION | Ellipsometry. *Encyclopedia of Modern Optics, Five-Volume Set*, 297–307. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369395-0/00833-2>
- Hirschowitz, B. I., & Hirschowitz, B. I. (2000). Endoscopy-40 Years since Fiber Optics Any Light at the End of the Tunnel? In *Dig Surg* (Vol. 17). www.karger.com/journals/dsu
- Hunsperger, R. G. (2009a). Integrated optics: Theory and technology: Sixth edition. In *Integrated Optics: Theory and Technology: Sixth Edition*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/b98730>
- Hunsperger, R. G. (2009b). Integrated optics: Theory and technology: Sixth edition. In *Integrated Optics: Theory and Technology: Sixth Edition*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/b98730>
- Janotti, A., & van de Walle, C. G. (2009). Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. *Reports on Progress in Physics*, 72(12), 126501. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/72/12/126501>
- Jellison, G. E. (1999). Ellipsometry. *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, 402–411. <https://doi.org/10.1006/RWSP.2000.0070>
- Johnson, R. W., Hultqvist, A., & Bent, S. F. (2014). A brief review of atomic layer deposition: From fundamentals to applications. In *Materials Today* (Vol. 17, Issue 5, pp. 236–246). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.04.026>
- Kappeler, R., Kaspar, P., & Jäckel, H. (2011). Propagation loss computation of W1 photonic crystal waveguides using the cutback technique with the 3D-FDTD method. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 9(3), 235–247. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2011.03.002>
- Karvonen, L., Alasaarela, T., Jussila, H., Mehravar, S., Chen, Y., Säynätjoki, A., Norwood, R. A., Peyghambarian, N., Kieu, K., Honkanen, S., & Lipsanen, H. (2014). Nanolaminate structures fabricated by ALD for reducing propagation losses and enhancing the third-order optical nonlinearities. *Optical Components and Materials XI*, 8982, 89820O. <https://doi.org/10.1117/12.2045006>
- Layoul, H., Meriche, F., Bouznit, Y., & Boukerika, A. (2021). Structural and optical characterization of sol–gel processed Al-doped ZnO waveguide films for integrated optical devices. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 127(8). <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04752-x>

- Mackenzie, J. I. (2007). Dielectric solid-state planar waveguide lasers: A review. In *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics* (Vol. 13, Issue 3, pp. 626–637). <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2007.897184>
- Medina, E. G. L. (2016). Estudio de guías de onda ópticas de SiO_x.
- MODEL 2010/ M OVERVIEW — Metricon. Retrieved June 27, 2022, from <https://www.metricon.com/model-2010-m-overview>
- Nasim, M., Li, Y., Wen, M., & Wen, C. (2020). A review of high-strength nanolaminates and evaluation of their properties. In *Journal of Materials Science and Technology* (Vol. 50, pp. 215–244). Chinese Society of Metals. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.03.011>
- Necib, K., Touam, T., Chelouche, A., Ouarez, L., Djouadi, D., & Boudine, B. (2018a). Investigation of the effects of thickness on physical properties of AZO sol-gel films for photonic device applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 2236–2246. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.361>
- Necib, K., Touam, T., Chelouche, A., Ouarez, L., Djouadi, D., & Boudine, B. (2018b). Investigation of the effects of thickness on physical properties of AZO sol-gel films for photonic device applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 2236–2246. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.361>
- Nieweglowski, K., Lorenz, L., Lungen, S., Tiedje, T., Wolter, K. J., & Bock, K. (2018). Optical coupling with flexible polymer waveguides for chip-to-chip interconnects in electronic systems. *Microelectronics Reliability*, 84, 121–126. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.03.020>
- Ohtsuka, T., & Fushimi, K. (2018). Ellipsometry in Passive Films. *Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface Science and Electrochemistry*, 143–156. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.13878-8>
- Okamoto, K. (n.d.). *Fundamentals of optical waveguides*. (Elsevier.).
- Pang, A. W., Gamlath, C. D., & Cryan, M. J. (2018). An Optically Controlled Coplanar Waveguide Millimeter-Wave Switch. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 28(8), 669–671. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2018.2840966>
- Prajzler, V., Neruda, M., & Nekvindová, P. (2018). Flexible multimode polydimethyl-diphenylsiloxane optical planar waveguides. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(7), 5878–5884. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8560-z>
- Raval, N., Maheshwari, R., Kalyane, D., Youngren-Ortiz, S. R., Chougule, M. B., & Tekade, R. K. (2019). Importance of Physicochemical Characterization of Nanoparticles in Pharmaceutical Product Development. *Basic Fundamentals of Drug Delivery*, 369–400. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817909-3.00010-8>
- Saleh, B. E. , & T. M. C. (2019). *Fundamentals of photonics*. (John Wiley & sons.).
- Selva, T. M. G., Selva, J. S. G., & Prata, R. B. (2021). Sensing Materials: Diamond-Based Materials. *Reference Module in Biomedical Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822548-6.00081-9>

- Sharma, A., & Banerjee, S. (1989). Method for propagation of total fields or beams through optical waveguides. *Optics Letters*, Vol. 14, Issue 1, Pp. 96-98, 14(1), 96–98. <https://doi.org/10.1364/OL.14.000096>
- Taabouche, A., Bouabellou, A., Kermiche, F., Hanini, F., Sedrati, C., Bouachiba, Y., & Benazzouz, C. (2016). Preparation and characterization of Al-doped ZnO piezoelectric thin films grown by pulsed laser deposition. *Ceramics International*, 42(6), 6701–6706. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.01.033>
- Tompkins, H. G., Baker, J. H., Smith, S., & Convey, D. (2000). Spectroscopic ellipsometry and reflectometry: A user's perspective. *LEOS Summer Topical Meeting*, 27–28. <https://doi.org/10.1109/LEOSST.2000.869717>
- Torge, R., & Ulrich, R. (1973). Measurement of Thin Film Parameters with a Prism Coupler. *Applied Optics*, Vol. 12, Issue 12, Pp. 2901-2908, 12(12), 2901–2908. <https://doi.org/10.1364/AO.12.002901>
- Urbánek, M., Spousta, J., Navrátil, K., Sztokowski, R., Chmelík, R., Buček, M., & Šikola, T. (2004). Instrument for thin film diagnostics by UV spectroscopic reflectometry. *Surface and Interface Analysis*, 36(8), 1102–1105. <https://doi.org/10.1002/SIA.1850>
- Uttam Pal. (2017, September 19). *Silicon Photonics: Designing and Prototyping Silicon Waveguides*. <https://www.comsol.com/blogs/silicon-photonics-designing-and-prototyping-silicon-waveguides>.
- Wang, H., & Chu, P. K. (2013). Surface Characterization of Biomaterials. *Characterization of Biomaterials*, 105–174. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415800-9.00004-8>
- Wickberg, A., Kieninger, C., Sürgers, C., Schlabach, S., Mu, X., Koos, C., & Wegener, M. (2016). Second-Harmonic Generation from ZnO/Al₂O₃ Nanolaminate Optical Metamaterials Grown by Atomic-Layer Deposition. *Advanced Optical Materials*, 4(8), 1203–1208. <https://doi.org/10.1002/adom.201600200>
- Ye, L., Sui, K., Zhang, Y., & Liu, Q. H. (2019). Broadband optical waveguide modulators based on strongly coupled hybrid graphene and metal nanoribbons for near-infrared applications. *Nanoscale*, 11(7), 3154–3163. <https://doi.org/10.1039/c8nr09157a>
- Inorganic Crystal Structure*. (n.d.). Retrieved June 29, 2022, from http://icsd.kisti.re.kr/icsd/icsd_view1.jsp?num=19754