

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



**Maestría en Ciencias
en Nanociencias**

**Fabricación de guías de onda ópticas por Depósito de Capas
Atómicas (ALD)**

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

Presenta:

Diana Laura Caballero Espitia

Ensenada, Baja California, México.
2020

Tesis defendida por
Diana Laura Caballero Espitia

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Heriberto Márquez Becerra
Codirector de tesis

Dr. Hugo Jesús Tiznado Vázquez
Codirector de tesis

Miembros del comité

Dr. Eder Germán Lizárraga Medina

Dr. Javier Alonso López Medina

Dr. Roberto Machorro Mejía

Dr. Francisco Javier Esparza Hernández



Dr. Sergio Fuentes Moyado
Coordinador del Posgrado en Nanociencias

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Diana Laura Caballero Espitia © 2020

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Diana Laura Caballero Espitia** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Nanociencias.

Fabricación de guías de onda ópticas por Depósito de Capas Atómicas (ALD)

Resumen aprobado por:

Dr. Heriberto Márquez Becerra
Codirector de tesis

Dr. Hugo Jesús Tiznado Vázquez
Codirector de tesis

La óptica integrada es un área que al unir las propiedades de guiado de la luz a la estructura de microdispositivos electrónicos busca obtener mejoras en transmisión de datos, sensores de sustancias biológicas y multiplexado de señales. Para desarrollar tecnologías de óptica integrada es necesario remontarse a sus componentes básicos: las guías de onda, estructuras que permiten el transporte de ondas electromagnéticas de un punto a otro. En este trabajo de tesis, se presenta el diseño óptico, fabricación y caracterización de dos grupos de guías de onda planas basadas en películas delgadas de Al_2O_3 por medio de la técnica de Depósito de Capas Atómicas (ALD). Un grupo se fabricó utilizando H_2O como reactante y el otro utilizando O_3 , dentro de un rango de espesores de 500 nm a 1000 nm. Se muestran resultados de caracterización óptica realizados a ambos grupos de fabricación, los cuales incluyen acoplamiento de luz a 633 nm, índice de refracción efectivos asociados a los modos de cada espesor y medición de pérdidas de propagación. De igual forma, se presentan resultados obtenidos de elipsometría, microscopía electrónica de barrido (SEM), Espectrometría fotoelectrónica (XPS) y espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) como caracterización del material. Las pruebas de XPS y FTIR no logran detectar la presencia de carbono en las películas fabricadas, por lo que la presencia de carbono es $< 1\%$, difícil de detectar en ambas técnicas, como se ha reportado previamente en la literatura. Se observa un cambio en las propiedades ópticas de las guías de onda fabricadas con ozono con respecto a lo previamente reportado en las guías fabricadas con agua. Las películas de ozono muestran un índice de refracción más alto en comparación con las de agua, el cual es de 1.642 para H_2O y de 1.651 para O_3 . Así mismo, se muestran cambios en el índice de refracción efectivo de los modos de propagación y pérdidas de propagación de la luz menores en las guías fabricadas por O_3 , siendo 0.51 dB/cm el valor más bajo para O_3 y 3.03 dB/cm el valor más bajo para H_2O . Se encontró que las guías de onda de Al_2O_3 fabricadas por O_3 presentan una mejora en la propagación de la luz en comparación de las guías de onda fabricadas por H_2O . Esto puede deberse a diferencias en la densidad en las películas, porosidad en las películas fabricadas con agua y a una mayor estabilidad del material obtenido por ozono. Se sugieren caracterizaciones para cuantificar la densidad de película y porosidad. De acuerdo a los resultados de este trabajo, se puede mejorar el funcionamiento de dispositivos basados en guías de onda como resonadores de anillo y divisores de haz basados en películas ALD con el uso de ozono como agente reactante.

Palabras clave: Guías de onda planas, óptica integrada, películas delgadas, Al_2O_3 , Depósito de Capas Atómicas.

Abstract of the thesis presented by **Diana Laura Caballero Espitia** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Nanosciences.

Optical waveguides fabricated by Atomic Layer Deposition (ALD)

Abstract approved by:

Dr. Heriberto Márquez Becerra

Thesis Director

Dr. Hugo Jesús Tiznado Vázquez

Thesis Director

In the pursuit for integrated optics technologies required by functional scale-reduced systems, development of waveguiding structures in micro and nanoscale is critical. This work presents the design and fabrication of Al_2O_3 thin film-based waveguides grown by Atomic Layer Deposition (ALD). Two fabrication groups with a thickness between 500 nm and 1000 nm are shown: the first one using H_2O as reactant and the second one using O_3 . Physical properties were obtained by means of Scanning Electron Microscopy, X-Ray photoelectron spectrometry, Fourier-transform infrared spectroscopy and Variable Angle Ellipsometry. Optical waveguide characterization at 632.8nm is based on measurement of the effective refractive index by a prism coupling technique and propagation loss coefficient by fiber to waveguide couple. The same characterizations were made for both fabrication groups in order to make a comparison between optical and structural properties obtained in each reactant variation. Both fabricated groups show propagation of light at 632.8 nm and low carbon presence due to XPS and FTIR analysis, which both show no peaks of binding energy and vibrational modes respectively that could be associated with carbon presence, indicating that if there are indeed traces of carbon in the fabricated films, they are lower than 1%. Ozone thin films show a higher refractive index in comparison to thin films fabricated with water, 1.642 for H_2O and 1.651 for O_3 . Also, changes in effective refractive index and propagation losses lower for the ozone case where obtained with 0.51 dB/cm being the lowest value for O_3 and 3.03 dB/cm the lowest value for H_2O . In conclusion, Al_2O_3 optical waveguides fabricated using ozone as oxygen source show an improvement in light propagation in comparison to Al_2O_3 optical waveguides using H_2O . This could be related to differences in film density, vacancies in ALD with H_2O fabricated films and a higher material stability due to near stoichiometric characteristics of the ozone films. Further thin film density and porosity characterizations are recommended.

Keywords: Planar optical waveguides, integrated optics, thin films, Al_2O_3 , Atomic Layer Deposition.

Dedicatoria

*A mi madre
y a mi hermano.*

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y al Centro de Nanociencias y Nanotecnología CNyN-UNAM por permitirme formar parte del programa de posgrado en Nanociencias, nivel maestría. Al Laboratorio de Ingeniería de Superficies del CNyN-UNAM bajo la coordinación del Dr. Hugo Tiznado Vázquez, así como al laboratorio de Películas Delgadas CICESE bajo la dirección del Dr. Heriberto Márquez Becerra por permitirme el uso de los equipos pertinentes para el desarrollo de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado a través de la beca número 488364. A los proyectos UNAM-DGAPA-PAPIIT (IN-110018, IN-112117, IN-113219 y IA-101018), UNAM-DGAPA-PAPIME (Becas No. PE-100318, PE101317 y PE210219), FORDECyT (No. 272894), CONACyT (No. 632147) y Proyecto interno 632160 CICESE.

A mis codirectores de tesis el Dr. Heriberto Márquez Becerra y el Dr. Hugo Tiznado Vázquez por su gran apoyo durante el desarrollo de este proyecto. Sus consejos, sugerencias y enseñanzas han marcado de manera decisiva mi formación tanto profesional como personal y siempre llevaré conmigo una parte de sus perspectivas académicas. A mi comité de tesis conformado por el Dr. Eder Lizárraga Medina, Dr. Javier López Medina, Dr. Roberto Machorro Mejía y Dr. Francisco Esparza Hernández por sus atinados comentarios, muy importantes para culminación exitosa de esta tesis; de manera especial al Dr. Eder Lizárraga por enseñarme tantas cosas con tanta paciencia y por contribuir a que formara mi propia visión.

De igual forma, al Ing. Israel Gradilla Martínez de la UNAC-CNyN por su apoyo técnico en la obtención de imágenes de SEM, al Dr. David Domínguez del CNyN por su apoyo técnico en la obtención de datos de XPS y al Dr. Hugo Borbón por su apoyo técnico para la obtención de datos de FTIR. Así mismo, al Dr. Nicola Nedeu y al Dr. Oscar Pérez Landeros de UABC Campus Mexicali por su asistencia en las mediciones de elipsometría. Al Ing. Fernando Solorio por su asistencia técnica en el laboratorio de Ing. de Superficies. Al Dr. Eduardo Murillo, Francisco Ruiz, Dra Eloisa Aparicio, Jaime Mendoza y Jesús Díaz. A la M. C. Jessica Ángel Valenzuela por su asistencia en el laboratorio de películas delgadas y a la Dr. Georgina Navarrete del Departamento de Óptica de CICESE. En particular a mis compañeros M. C. Jorge Jurado por empezar a enseñarme el uso del equipo del laboratorio de Ing. de superficies, M. C. José Ruiz Marizcal y M. C. Aaron Mendoza por ayudarme a comprender mejor la parte concerniente a XPS. Gracias por ser tan buenos

compañeros, su solidaridad me conmovió. Mencionando en especial a José, por ser tan atento al respecto y pasarme buenos podcasts para escuchar durante las noches de trabajo.

A mis amigos y compañeros de los posgrados de óptica y nanociencias. Su compañía y amistad ayudaron a hacer de este proceso algo más ameno y sencillo de sobrellevar. A mis amigos del posgrado de óptica, en especial a Joe, Pariente (David, gracias por ayudarme a rescatar mis fibras ópticas), Chewie y Emilio por hacerme reír tanto y permitirme ser parte de sus equipos. A Joe por su gran amistad, por su nobleza, buen corazón y rareza, ayudándome a desahogar el dolor en los momentos difíciles, siendo siempre un amigo leal ofreciendo su hombro para llorar y comentarios raros para reír. A mi buen amigo Emiliano, por su compañía y hacerme sentir como en casa, deseándole siempre lo mejor en sus aventuras en España. A Kora Lucía, Janz, Lily, Germán, José y Pedro (y los que se me pasaron) por siempre ser tan alegres y compartir risas y buenos momentos conmigo. A Carlos Lavalle y Ma. Andrea Caracciolo que aún a la distancia, me daban palabras de amor y aliento todos los días. A todos ellos por ser los buenos amigos que son.

A Fernando Solorio Soto, por su completo apoyo incondicional y su infinito cariño, en los mejores y en los peores momentos. Su amor y bondad quedan conmigo para siempre, siendo un compañero, un amigo y una pareja mejor de lo que pude haber imaginado tener hasta ahora. Por ayudarme a juntar las piezas y por enseñarme lo maravillosa que es la vida, de hoy en adelante.

A mi padre, por mostrarme cómo ser fuerte hasta el último aliento. Por enseñarme en vida a siempre hacer mi trabajo y en su muerte a perdonar todos los días.

A mi hermano Roberto por ser la alegría de mi vida, mi cómplice y mi consuelo. A mi hermosa madre Elvia, por ser el más grande ejemplo de lo que el amor incondicional de una madre es, por su amor eterno y la paz que siempre lucha por brindarme. A ellos y a todos, por ser parte de mi fuerza para vivir.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Hipótesis.....	3
1.2 Objetivo.....	3
1.2.1 Objetivos específicos.....	3
Capítulo 2. Fundamento teórico.....	5
2.1 Guías de onda.....	5
2.1.1 Principio de funcionamiento: Reflexión total interna.....	7
2.1.2 Teoría modal e índice de refracción efectivo.....	8
2.1.3 Aproximación electromagnética: Ecuaciones de Maxwell para materiales dieléctricos	10
2.1.4 Relación de dispersión	12
2.1.5 Escalamiento de parámetros de fabricación.....	16
2.1.5.1 Frecuencia de corte.....	18
2.1.5.2 Ancho modal efectivo.....	20
2.1.5.3 Factor de confinamiento.....	21
2.1.5.4 Distribución de amplitud de campo eléctrico.....	22
2.1.5.5 Índice de refracción efectivo.....	25
2.2 Depósito de capas atómicas.....	25
Capítulo 3. Metodología y materiales.....	29
3.1 Características del Al ₂ O ₃	30
3.2 Fabricación de guías de onda planas.....	31
3.3 Caracterización.....	34
3.3.1 Propagación: Distribución de intensidad de la luz.....	35

3.3.2 Pérdidas de propagación.....	37
3.3.3 Elipsometría.....	39
3.3.4 SEM.....	40
3.3.5 FTIR y XPS.....	41
3.3.6 Acoplamiento por prisma.....	42
Capítulo 4 . Resultados y discusión.....	45
4.1 SEM.....	45
4.2 FTIR y XPS.....	46
4.3 Propiedades ópticas de la película de Al ₂ O ₃	49
4.4 Distribución del campo eléctrico.....	53
4.5 Acoplamiento por prisma.....	55
4.6 Pérdidas de propagación.....	58
Capítulo 5 . Conclusiones y Trabajo a futuro.....	59
Literatura citada.....	60

Lista de figuras

Figura		Página
1	Diversos tipos de guías de onda: a) Plana, donde se tienen 3 materiales diferentes para sustrato, núcleo y cubierta respectivamente. b) Canal (también conocida como angosta) donde la cubierta es aire ($n_c=1$) c) Cilíndrica, comúnmente conocida como fibra óptica.....	6
2	Reflexión total interna en el núcleo de una guía de onda.....	7
3	3 diferentes casos en la teoría de rayos para la propagación de luz entre dos medios diferentes.....	8
4	Número de modos calculados para cada espesor de núcleo. La región circulada en azul corresponde a los modos soportados teóricamente por las estructuras propuestas.....	19
5	Curvas de corte modal para diferentes índices de refracción del núcleo y espesores en a) visible ($\lambda=632.8$) b) NIR ($\lambda=1550$) . Tomado de (Lizárraga, 2016).....	19
6	Ancho modal efectivo normalizado contra frecuencia normalizada para diferentes modos y diferentes asimetrías. Modificada de Chin-lin Chen, Foundations for guided- wave photonics.....	20
7	Ancho modal efectivo normalizado contra espesor de núcleo de alúmina.....	21
8	Confinamiento de luz para la zona del núcleo para diferentes espesores de película para el régimen monomodal.....	22
9	Distribuciones de campo para modos TE ₀ , TE ₁ y TE ₂ . Modificada de Chin-lin Chen, Foundations for guided-wave photonics.....	23
10	Distribución de intensidad para núcleo de tres diferentes espesores: 500 nm, 750 nm y 1000 nm, régimen monomodal.....	24
11	Etapas de un ciclo ALD.....	26
12	Ventana de temperatura ALD.....	27
13	Ciclo ALD para Al ₂ O ₃ utilizando H ₂ O como reactante.....	28
14	Metodología para la fabricación de guías de onda.....	29
15	Diagrama e imagen del sustrato de sílice para fabricación.....	31
16	a) Sustrato con bordes dañados. b) Sustrato con bordes uniformes.....	31

17	Acomodo de muestras en el reactor. Los sustratos de sílice se muestran transparentes y los testigos de silicio azules.....	32
18	Equipo de Depósito de Capas Atómicas Beneq TFS200.....	33
19	Distribución de muestras en el reactor. Los sustratos de sílice se muestran transparentes y los testigos de silicio azules.....	34
20	Diagrama del arreglo utilizado para obtener la distribución de intensidad las guías fabricadas.....	35
21	Sistema de acoplamiento fibra-guía, Laboratorio de películas delgadas, CICESE.....	35
22	Acoplamiento Fibra-Guía a) Visto con Luz Blanca b) Visto con láser de 632.8 nm.....	36
23	Luz acoplada obtenida por medio de una cámara CCD a diferentes potencias de entrada: a) Luz blanca y 0.10 mW y b) 0.10 mW.....	37
24	Diagrama del arreglo para la medición de la potencia de salida de cada muestra.....	37
25	Equipo de Elipsometría J. Woollam M-2000 para Elipsometría de Ángulo Variable (VASE). Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California campus Mexicali.....	39
26	Diagrama de funcionamiento de una medición de elipsometría.....	40
27	Equipo JEOL JSM-5300 (SEM) de la Unidad de Nanocaracterización UNaC del CNyN UNAM.....	40
28	De izquierda a derecha: Equipo de espectroscopía de fotoelectrones de rayos X de alta resolución (XPS-HR) SPECS y Equipo de Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier con Reflexión Total Atenuada (FTIR: ATR). Ambos pertenecientes a CNyN UNAM.....	41
29	Sistema de acoplamiento por prisma de alto índice Metricon Modelo 2010. Laboratorio de Películas Delgadas, CICESE.....	42
30	A) Diagrama de funcionamiento del Metricon 2010 y B) Guía de onda de Al ₂ O ₃ en el sistema de acoplamiento por prisma.....	43
31	Láser de 633 nm incidiendo en una guía de onda de Al ₂ O ₃ , acoplamiento por prisma..	44
32	Vista transversal de testigos de SiO ₂ , pertenecientes a cada fabricación con H ₂ O (a, b y c) y con O ₃ (d, e, f).....	45
33	Espectros de absorción obtenidos por FTIR para guías de onda de Al ₂ O ₃ . A) Comparación de espectros de absorción de una guía fabricada con H ₂ O y otra fabricada con O ₃	46
34	Espectros de XPS para testigos de silicio de Al ₂ O ₃ . A) Utilizando H ₂ O como reactante y B) Utilizando O ₃ como reactante.....	47

35	Espectros de XPS para testigos de silicio de Al_2O_3 de 500 nm de espesor, con 200 nm de erosión.....	48
36	Curvas ψ Δ y ajuste del modelo de Tauc Lorentz para una muestra de H_2O desde el programa CompleteEASE para procesamiento de datos de elipsometría.....	50
37	Curvas de dispersión de Al_2O_3 utilizando H_2O y O_3 como reactantes por ALD, dispersión de Al_2O_3 fabricada por ALD usando H_2O por Kumar et. al, 2009 y dispersión de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Safiro) reportada por Malitson y Dodge, 1972.	51
38	Curvas de dispersión de Al_2O_3 utilizando H_2O y O_3 como reactantes.....	52
39	De izquierda a derecha: Imágenes de distribución de intensidad de la luz para 500 nm, 750 nm y 1000 nm. Luz acoplada obtenida por medio de una cámara CCD a diferentes potencias de entrada: a) Luz blanca b) 0.05 mW y c) 0.08 mW.....	53
40	Distribución de intensidad de la luz en guía de onda de 500 nm de espesor fabricada con O_3	53
41	a) Distribución de intensidad del campo eléctrico esperada para guías con 500 nm de espesor de núcleo. b) Distribución del campo eléctrico experimental obtenida para guías del mismo espesor, H_2O y O_3	54
42	Curvas obtenidas a partir del acoplamiento por prisma para muestra fabricada con a) H_2O y con b) O_3	55

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Índices de refracción efectivos calculados para los valores de espesor propuestos, polarizaciones TE y TM	25
2	Tabla de espesores, índices de refracción y MSE obtenidos en las mediciones de elipsometría.....	50
3	Índices de refracción efectivos calculados para TE y TM con los espesores obtenidos mediante la técnica de elipsometría.....	56
4	Índices de refracción efectivos medidos para TE y TM.....	57
5	Pérdidas de propagación para ambos grupos de fabricación.....	58

Capítulo 1. Introducción

En la actualidad con la digitalización de las comunicaciones a nivel mundial, el transporte de información es uno de los temas más importantes en la época actual. La creciente demanda de métodos que transporten datos de forma cada vez más eficiente apremia a desarrollar tecnologías y técnicas que puedan llevar cabo esta labor. Desde el inicio de la década de 60's se ha buscado la mejora de las tecnologías de transporte y procesado de señales, basadas en ese entonces en corrientes eléctricas u ondas de radio (Hunspenger, 1995). Eventualmente debido al desarrollo del láser como fuente fija de luz se reemplazaron las líneas de cables eléctricos por guías de luz, las fibras ópticas.

Entre estas opciones, destaca la implementación de dispositivos y sistemas que han integrado elementos ópticos a su funcionamiento mediante la óptica integrada. La óptica integrada es un campo de estudio que busca la integración de propiedades ópticas sobre un sustrato físico único (Hiltunen, 2017). Ésta se dedica a la producción de sistemas fotónicos basados en circuitos de guías de onda ópticas que incorporan distintos elementos usando técnicas de fabricación similares a las de la microelectrónica. Bajo el principio de que la luz puede ser guiada y transmitida a través de capas de materiales que lo permitan, la óptica integrada ha permitido el diseño y fabricación de dispositivos que permiten operaciones pasivas y activas (Sánchez et al., 2004). En los sistemas electrónicos, las frecuencias de conmutación son del orden de 10^9 Hz mientras que en los sistemas ópticos es de 10^{15} Hz, lo que permite que la modulación óptica, al ser mayor, permita manejar una mayor cantidad de información (Sánchez et al., 2004).

La óptica integrada forma parte de las tecnologías de circuitos integrados (Integrated Circuits, ICs por sus siglas en inglés) y circuitos fotónicos (Photonic Integrated Circuits, PICs por sus siglas en inglés) buscando unir las propiedades de la luz a la estructura y funcionamiento de los circuitos electrónicos a escalas cercanas a los micrómetros y nanómetros, donde se exhiben propiedades de transmisión de información diferentes a las encontradas en una macroescala (Hiltunen, 2017). Varias empresas y centros de investigación se dedican al desarrollo de estos dispositivos. Un ejemplo de ello es IBM, quienes en 2012 presentaron la integración de componentes eléctricos y ópticos en un mismo chip utilizando un proceso para semiconductores a 90nm. Este tipo de chips permitirán interconectores chip-a-chip que sean más rápidos que aquellos hechos de cobre y exhiben velocidades de penta a exabits (ExtremeTech, 2012). De igual forma, la compañía Intel ha incursionado en la investigación y desarrollo de la fotónica del silicio, una combinación del circuito integrado de silicio y el láser semiconductor que permite una transferencia de datos más rápida en distancias más extensas en comparación con la mostrada en la electrónica tradicional (Intel Latinoamérica, 2014). La fotónica del silicio “reduce el costo total (...) y mejora el desempeño de las

arquitecturas de centros de datos, al eliminar los cuellos de botella que pueden dar lugar a un desperdicio de la capacidad informática” (Intel Latinoamérica, 2014).

Las tecnologías de óptica integrada y fotónica han generado un gran interés tanto en el sector académico, como en la industria de las comunicaciones y sectores gubernamentales. Actualmente, a nivel mundial existen 45 “clústers” empresariales dedicados a la investigación, desarrollo e implementación de la fotónica y la óptica integrada al mercado y el sector empresarial (Sánchez, 2018). Estos conglomerados tecnológicos se encuentran distribuidos entre Asia, Europa y los Estados Unidos, encontrándose la mayor concentración de ellos en la unión americana. En 2014, la administración del presidente Barack Obama anunció la inversión pública y privada de 200 millones de USD para la creación del Integrated Photonics Manufacturing Institute (Instituto de Manufactura de Fotónica Integrada) que es uno de los proyectos estratégicos de la Iniciativa Nacional de Fotónica, la cual busca potenciar la investigación y el desarrollo de esta área para su uso en mejoramiento de la protección y transmisión de datos.

De igual forma, México busca unirse al gremio de los países con investigación y desarrollo en este campo, mediante la Iniciativa Mexicana de Fotónica (IMF) que busca el desarrollo de infraestructura que permita impulsar la industria en óptica y fotónica en el país. Con ello, en 2018 la Comisión Internacional de Óptica y ProMéxico anunciaron la construcción de un clúster de fotónica en la ciudad de Querétaro, Querétaro del cual se espera el inicio de su construcción en el año 2020 (Sánchez, 2018). Con una inversión esperada de cinco mil millones de USD, el llamado Clúster Mexicano de Fotónica sería el primero en Latinoamérica y se enfocaría en el desarrollo de fuentes de luz LED (diodo emisor de luz), fibras ópticas, celdas solares y sensores basados en circuitos fotónicos, los cuales se busca implementar al sector automotriz y aeroespacial, dominantes en el área metropolitana de la ciudad de Querétaro (Sánchez, 2018).

Ahora, si bien la óptica integrada ha tenido un gran impacto en el área de comunicación, almacenamiento y transmisión de datos operando en el régimen cercano infrarrojo (Near Infrared, NIR), esta rama de la óptica también ha incursionado en aplicaciones que operan en longitud de onda visible. Entre ellas se encuentran el desarrollo de sensores bioquímicos basados en diferentes configuraciones de guías de onda. Siendo que por lo general las muestras usadas en biosensores se encuentran en forma de soluciones acuosas, la operación de sensores en longitudes de onda en el visible se ve mucho menos comprometida por la absorción de agua que en el NIR, representando una enorme ventaja contra los sensores en NIR (Milvich et al., 2018). De manera similar, también se han desarrollado en los últimos años tecnologías PIC en el visible, entre las que destacan dispositivos como generadores de patrones de

interferencia, atenuadores ópticos variables (VOAs), Combinadores de haces de láseres integrados entre otros (Geuzebroek et al., 2016).

En vista a lo anteriormente expuesto, es crucial el diseño y fabricación de dispositivos de óptica integrada que muestren la capacidad de adaptarse a circuitos integrados y mejorar su funcionamiento. Para ello, es necesario analizar la estructura más básica de la óptica integrada que son las guías de onda; en particular si se pretende explorar el diseño de guías de onda submicrón. Por lo que, en este trabajo se propone el diseño, fabricación y caracterización de guías de onda planas basadas en **películas de Al_2O_3 , de diferentes espesores, fabricadas por la técnica de Depósito de Capas Atómicas.**

1.1 Hipótesis

Películas de Al_2O_3 fabricadas por el método de Depósito de Capa Atómica fabricadas con H_2O y O_3 como reactantes pueden ser utilizadas como núcleo de guías de onda planas de espesor igual e inferior a una micra.

1.2 Objetivo

Fabricación y caracterización de guías de onda ópticas planas de Al_2O_3 por medio del método de Depósito de Capas Atómicas (ALD).

1.2.1 Objetivos específicos

- Simular la propagación de luz en guías de onda planas con parámetros iniciales.
- Diseñar y fabricar películas de Al_2O_3 que puedan ser usadas como núcleo de guías de onda planas por medio de la técnica de Depósito de Capas Atómicas (ALD).

- Realizar un barrido de espesores de núcleo (500, 750, y 1000 nm) utilizando H_2O y O_3 , comparando las propiedades ópticas obtenidas en cada caso.
- Caracterizar las propiedades de guiado óptico y propagación en VIS.
- Caracterizar composición química y rugosidad de la superficie: SEM, XPS y FTIR.

En el Capítulo 2 se presentará la teoría de guías de onda óptica planas, así como las simulaciones correspondientes a la parte de diseño. De manera similar, se expondrá la teoría correspondiente a la técnica de Depósito de Capas Atómicas.

En el Capítulo 3 se expone la metodología de fabricación de dos grupos de muestras, unas fabricadas con H_2O y otras con O_3 , así como las caracterizaciones realizadas para estas guías.

El Capítulo 4 se detallan los resultados y la discusión derivados de las caracterizaciones realizadas a las guías de onda, y se comparan los datos obtenidos por cada reactante.

Finalmente, el capítulo 5 muestra las conclusiones y trabajo a futuro de este proyecto.

Capítulo 2. Fundamento teórico

Para el desarrollo de dispositivos de óptica integrada, es necesario desarrollar primeramente sus estructuras más básicas: las guías de onda. En las siguientes secciones se desarrollará la teoría correspondiente al funcionamiento y características principales de las guías de onda ópticas, haciendo énfasis en el caso de las guías de onda planas. De igual forma, se presenta el diseño óptico de guías de onda planas con núcleo de Al_2O_3 , propuestas para este trabajo. Los parámetros analizados son: índice de refracción efectivo, espesor de corte, número de modos de propagación, ancho modal y distribución de amplitud del campo eléctrico.

2.1 Guías de Onda

Las guías de onda son aquellas estructuras que transmiten ondas de un punto a otro, confinadas en su estructura. Existen guías de onda acústicas, que confinan y guían ondas de sonido y guías de onda ópticas, que se dedican a confinar ondas electromagnéticas en la región espectral del UV-VIS-NIR. Estas últimas son las estructuras base de varios dispositivos de óptica integrada. Por ende, se define una guía de onda óptica como una estructura que trasmite ondas electromagnéticas de un punto a otro de forma confinada.

La estructura de una guía de onda óptica se basa en 3 partes: Sustrato, núcleo y recubrimiento, donde cada uno tiene un índice de refracción asociado (hay casos donde al sustrato también se le llama recubrimiento). El valor del índice de refracción del núcleo n_f es el más alto, mientras que el índice de refracción del sustrato n_s y el de la cubierta n_c son menores al del núcleo. Gracias a esta condición de índices de refracción y al principio de reflexión total interna, la onda electromagnética viaja confinada en el núcleo desde un punto de entrada hasta el punto de salida de la guía. Las guías de onda utilizadas en el área de óptica integrada suelen estar constituidas de materiales dieléctricos. Existen estructuras de guías de onda que confinan ondas electromagnéticas en 1 o 2 dimensiones, donde dependiendo de la simetría de la estructura, es determinado el confinamiento de la luz. Este trabajo se centra en el estudio de guías de onda plana de Al_2O_3 por ALD, que es la estructura que confina la luz en un solo eje.

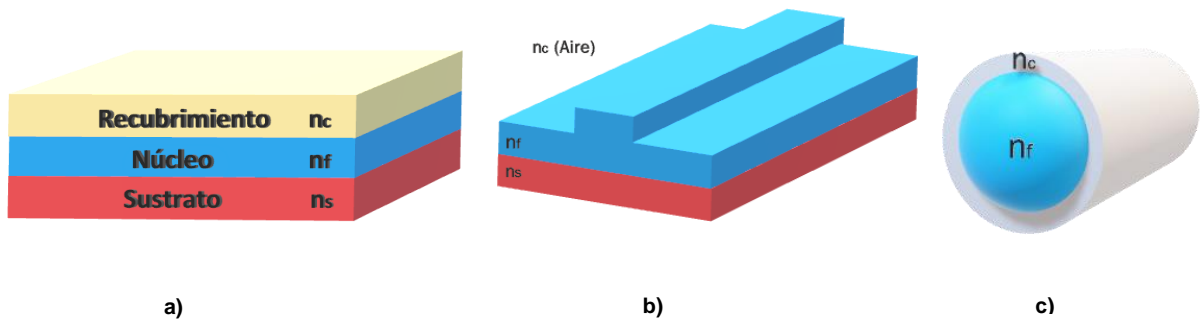


Figura 1. Diversos tipos de guías de onda: a) Plana, donde se tienen 3 materiales diferentes para sustrato, núcleo y cubierta respectivamente. b) Canal (también conocida como angosta) donde la cubierta es aire ($n_c=1$) c) Cilíndrica, comúnmente conocida como fibra óptica.

En la figura 1a y 1b se pueden apreciar casos en los que una guía de onda tiene una cubierta y un sustrato de dos materiales diferentes, con dos índices de refracción diferentes. Este tipo de guía se conoce como guía asimétrica, donde el índice de refracción del sustrato es mayor al del recubrimiento, es decir, $n_s > n_c$. Así mismo, existe el caso donde ambos índices de refracción son iguales ($n_s = n_c$). Este tipo de guía es conocida como guía simétrica, por ejemplo, figura 1c (Hunspenger, 1995).

Cada guía puede tener diferentes características que influyen en su funcionamiento. Una de ellas es el perfil del índice de refracción, que es la distribución del índice de refracción a lo largo de la sección transversal de una guía. El perfil del índice de refracción depende del diseño de la guía, el proceso de fabricación y los materiales de los que esté formada. Las propiedades de guiado dependen de la forma del perfil del índice de refracción. Existen principalmente dos tipos de perfiles de índices de refracción, escalonado y gradiente. Un perfil de índice de refracción escalonado es aquel que mantiene su valor constante en el núcleo de la guía (Hunspenger, 1995, mientras que en las fronteras con los demás medios de la estructura cambia su valor abruptamente. En cambio, un perfil de índice de refracción gradiente cambia su valor de forma gradual, disminuyendo en las fronteras del núcleo y recubrimientos.

En general, las guías de onda planas fabricadas por depósito de películas tienen índices de refracción de tipo escalonado (Hunspenger, 1995), aunque es posible crear diseños y materiales que cambien el perfil de acuerdo con el modo operación necesario. El estudio de materiales cuyas propiedades ayuden a obtener una propagación de la luz óptima es indispensable para la miniaturización de guías de onda, pues seleccionando los materiales adecuados para sustrato, núcleo y cubierta se puede obtener una guía de

onda acorde a cualquier necesidad. En particular, en este trabajo de tesis se está realizando una investigación orientada al desarrollo de guías de onda submicrón con operación en el UV, VIS, y NIR que permitan el diseño de dispositivos de óptica integrada.

Por otro lado, antes de diseñar y fabricar una guía es necesario conocer los principios de funcionamiento que tiene. Se presenta en la siguiente sección el principio fundamental de una guía de onda: la reflexión total interna.

2.1.1 Principio de funcionamiento: Reflexión total interna.

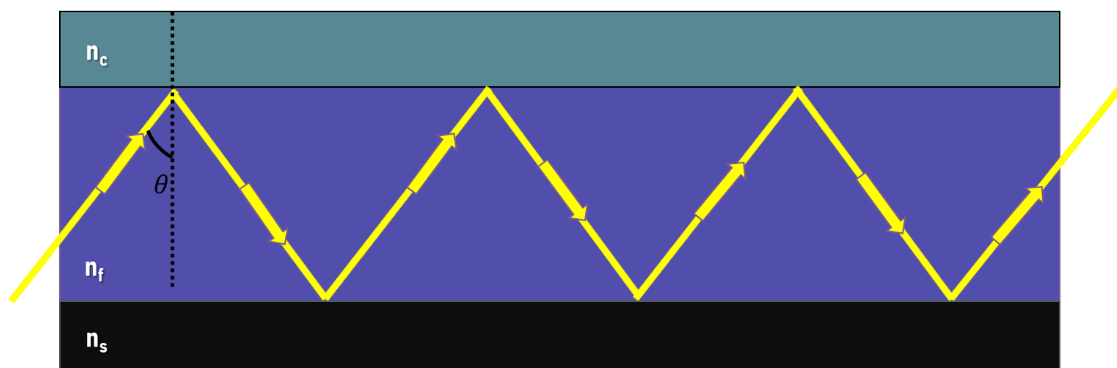


Figura 2. Reflexión total interna en el núcleo de una guía de onda.

Se conoce como reflexión total interna al fenómeno en el cual un haz de luz viaja a través de un medio delimitado, reflejándose a lo largo del eje de propagación y sin refractarse. Esta condición se debe a que el ángulo con el que incide la luz a la entrada de la guía, θ_{inc} , es mayor al ángulo crítico θ_c . El ángulo de incidencia es el ángulo formado entre un rayo de luz que incide en un medio y la recta normal a la superficie del medio, mientras que el ángulo crítico es el ángulo más grande al que un rayo de luz puede incidir sin reflejarse totalmente.

A determinados valores de θ_{inc} , parte del rayo de luz se refleja y parte se transmite hacia el otro medio. Conforme el valor de θ_{inc} incrementa y se acerca al valor de θ_c , el ángulo del rayo de luz transmitido (también llamado rayo refractado) tiende a 90° , haciendo que el rayo llegue a viajar tangencialmente a la frontera entre medios. Entre más se acerca a la frontera, la intensidad del haz refractado disminuye,

mientras que la del haz reflejado aumenta. Cuando se cumple la condición $\theta_{inc} > \theta_c$, el rayo de luz se refleja completamente en vez de transmitirse, por lo que toda la energía del haz de luz se refleja totalmente a lo largo de un solo medio.

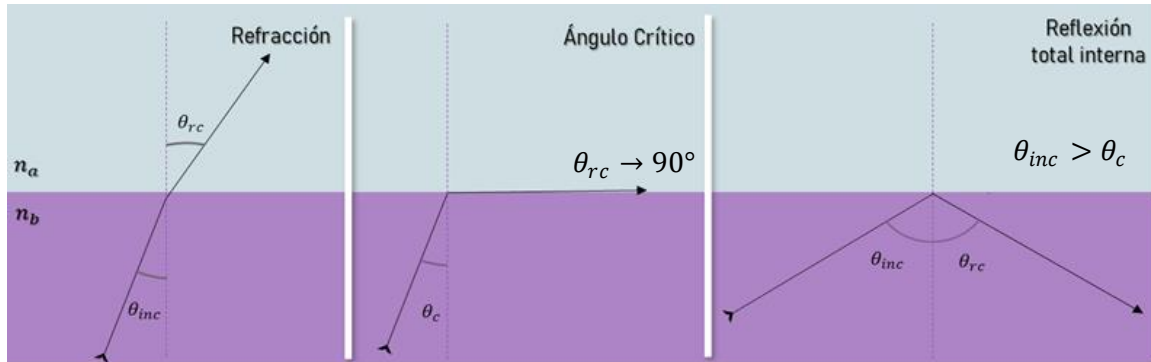


Figura 3. 3 diferentes casos en la teoría de rayos para la propagación de luz entre dos medios diferentes.

La condición de índices de refracción, donde el índice de refracción del núcleo de una guía es mayor al de los recubrimientos en conjunto con el principio de reflexión total interna permiten el confinamiento y la propagación de la luz en una guía de onda. Se puede decir que para que haya propagación en una guía de onda se debe cumplir la siguiente condición:

$$\theta_{inc} > \theta_c = \sin^{-1} \frac{n_c}{n_f} \quad (1)$$

Sin embargo, la teoría de rayos resulta insuficiente para analizar el guiado de luz en estructuras de óptica integrada. Esto se debe a que es una aproximación macrométrica del comportamiento de la luz, incompatible con las dimensiones en las que trabajan estas guías de onda, así como la longitud de onda empleada. Por lo tanto, es necesario hacer un tratamiento electromagnético al problema. En las siguientes secciones se muestra una aproximación electromagnética para el análisis de la propagación de la luz en guía de onda.

2.1.2 Teoría modal e índice de refracción efectivo

La teoría electromagnética permite explicar diversos fenómenos y calcular algunas características en las guías de onda que la teoría de rayos no puede detallar. Considera la naturaleza electromagnética de la luz

incidente en el sistema, donde las propiedades ópticas de la guía se derivan de las soluciones de las ecuaciones de Maxwell para medios dieléctricos (para el caso de las guías de onda dieléctricas). Antes de presentar la aproximación electromagnética para el estudio de guías de onda, es oportuno introducir algunos términos que ayudan a describir una guía de onda.

Para describir los campos electromagnéticos propagados dentro de una guía de onda, se han introducido dos términos importantes. Uno de ellos es el concepto de modo de propagación. Un modo es un campo electromagnético que mantiene la misma distribución de amplitud de campo eléctrico y polarización a lo largo de todo el eje transversal de la guía de onda (Saleh y Teich, 2019). Aquellos campos electromagnéticos que cumplan esta condición podrán ser confinados y propagados a lo largo de la estructura de una guía de onda. A estos campos dentro del estudio de las guías de onda se les refiere como modos TE o TM, dependiendo de su polarización y cada uno es excitado bajo diferentes condiciones de acoplamiento. Cada modo tiene diferentes características asociadas que son únicas de cada distribución de campo propagado, por lo que cada modo puede dar diferentes funciones a una estructura, tomando como ejemplo las fibras ópticas monomodales que tienen determinadas características para transmisión de datos, derivadas del modo fundamental con el que trabajan. Se conoce como estructuras o guías de onda monomodales a aquellas en las que sólo se puede excitar y propagar el modo fundamental m_0 . Aquellas estructuras que pueden soportar más de un modo se les conoce como multimodo.

Lo que permite distinguir un modo de otro es el llamado índice de refracción efectivo, n_{eff} . Es un valor asociado a cada modo en sus diferentes polarizaciones, que cuantifica el desfase por unidad de longitud en una guía de onda, en comparación con el desfase en el vacío. El índice de refracción efectivo puede definirse como:

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k} = n_f \sin \theta \quad (2)$$

Donde β es la constante de propagación, k el número de onda. Este valor de índice de refracción no debe confundirse con un promedio de los índices de refracción del sustrato, núcleo y cubierta de la guía de onda, sino como una contribución de todos estos. El índice de refracción efectivo toma valores menores al valor del índice de refracción del núcleo. Si el valor de n_{eff} se encuentra entre el valor del índice de refracción del núcleo y el sustrato, corresponde al índice de refracción efectivo de un modo que viaja confinado al núcleo principalmente. Si su valor es igual o menor al índice de refracción del sustrato,

corresponde al de un modo radiado, que viaja fuera del núcleo. Existen diferentes estructuras de guías de onda que soportan diferentes modos de propagación en diferentes polarizaciones; en estas estructuras pueden distinguirse los modos entre sí de acuerdo con la medición del índice de refracción efectivo por medio de diversas técnicas, entre ellas la técnica de acoplamiento por prisma. La teoría de guías de onda se desarrolla en base a los modos de propagación y sus índices de refracción efectivos. En la siguiente sección se hará una aproximación electromagnética del comportamiento de la luz en una guía de onda, que al final arrojará las expresiones matemáticas correspondientes a los modos de propagación para polarizaciones TE y TM de luz en una guía de onda plana.

2.1.3 Aproximación electromagnética.

Las ecuaciones de Maxwell describen fenómenos electromagnéticos en diferentes medios o el vacío. Para este caso en particular, se tomarán las ecuaciones de Maxwell que describen la propagación de ondas electromagnéticas en medios dieléctricos. Aplicando las condiciones de frontera pertinentes, se logrará llegar a las expresiones que describen el comportamiento de la luz en una guía de onda dieléctrica, así como sus características fundamentales. A continuación, se describen las ecuaciones de Maxwell para un medio dieléctrico ($\rho = 0$), homogéneo y con la permeabilidad del espacio libre μ_0 . De igual forma, se encuentran en términos del índice de refracción n_j (donde j representa el índice de refracción del medio).

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = n_j^2 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.4)$$

Donde $j = 1,2,3$, son los valores asociados a los índices de refracción del núcleo, sustrato y cubierta respectivamente. Aplicando la identidad vectorial $\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$ a la ecuación (3.3) se obtiene:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu_0 \nabla \times \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}) \quad (4.1)$$

Recordando que $\nabla \times \vec{H} = n_j^2 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} n_j^2 \varepsilon_0 \quad (4.2)$$

Quedando todo en términos del campo eléctrico. Al igualar a $\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$:

$$-\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} n_j^2 \varepsilon_0 = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \quad (4.3)$$

Se tomará la divergencia del campo eléctrico con el fin de obtener una expresión que este en términos del campo eléctrico únicamente. Recordando que $\nabla \cdot \vec{E} = 0$

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} n_j^2 \varepsilon_0 \quad (4.4)$$

Igualando a 0:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} n_j^2 \varepsilon_0 = 0 \quad (4.5)$$

Asumiendo que el campo eléctrico $\vec{E} \propto e^{-i\omega t}$

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 n_j^2 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (5.1)$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 n_j^2 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} (e^{-i\omega t}) = 0 \quad (5.2)$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 n_j^2 \varepsilon_0 \omega^2 (e^{-i\omega t}) = 0 \quad (5.3)$$

Introduciendo $k^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0$ donde k es el número de onda en el medio y ω la frecuencia angular y se llega a la siguiente expresión:

$$\nabla^2 \vec{E} - n_j^2 k^2 \vec{E} = 0 \quad (6)$$

que es la ecuación de onda para un medio dieléctrico de índice de refracción n_j . Debido a que se considera un sistema bidimensional (o una estructura de guía de onda unidimensional) la derivada parcial con respecto a \mathbf{y} es 0. Esto indica que la guía de onda se extiende al infinito en la dirección de $\pm \mathbf{y}$, haciendo que la distribución de campo de los modos en la dirección de \mathbf{y} sea uniforme. Asumiendo una dependencia en \mathbf{z} de la forma $e^{i\beta z}$ la ecuación (6) puede describir el comportamiento del campo eléctrico en las 3 regiones (cubierta, núcleo y sustrato) de una guía de onda:

Cubierta

$$\frac{d^2 E_c(x)}{dx^2} - (\beta^2 - n_c^2 k^2) E_c(x) = 0 \quad (7.1)$$

Núcleo

$$\frac{d^2 E_n(x)}{dx^2} - (n_f^2 k^2 - \beta^2) E_n(x) = 0 \quad (7.2)$$

Sustrato

$$\frac{d^2 E_s(x)}{dx^2} - (\beta^2 - n_s^2 k^2) E_s(x) = 0 \quad (7.3)$$

De manera similar se pueden desarrollar las ecuaciones para el campo magnético de cada sección de una guía de onda a partir de las ecuaciones de Maxwell. Para efectos de simplicidad, se utilizarán las siguientes notaciones para el índice de refracción de cada zona de la guía: n_c como índice de la cubierta, n_f como índice del núcleo y n_s como índice del sustrato.

2.1.4 Relación de dispersión.

Uno modo TE tiene una componente de campo eléctrico y dos componentes de campo magnético (Chen, 2016). Debido a que se asume que $\frac{d}{dy} = 0$, las únicas componentes diferentes de 0 para los modos TE son E_y, H_x y H_z (Adams, 1981). En particular, la componente del campo eléctrico está en paralelo con la superficie de la guía, y perpendicular a la dirección de propagación. Las dos componentes del campo magnético H_x y H_z pueden ser expresadas en términos de la componente del campo eléctrico de la siguiente manera.

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega \mu_0} E_y(x) \quad (8.1)$$

$$H_y = \frac{i}{\omega \mu_0} \frac{dE_y(x)}{dx} \quad (8.2)$$

Al sustituir ambas expresiones en la expresión (7.2) la ecuación de onda correspondiente a $E_y(x)$ en la zona del núcleo se define como:

$$\frac{d^2 E_{ny}(x)}{dx^2} - (n_f^2 k^2 - \beta^2) E_{ny}(x) = 0 \quad (9)$$

La notación para la componente del campo eléctrico $E_y(x)$ pasa a ser $E_{ny}(x)$ para enfatizar que es la componente E_y del campo eléctrico en la zona del núcleo, de tal forma que $E_{sy}(x)$ es la componente E_y campo eléctrico en la parte del sustrato y $E_{cy}(x)$ en la parte del recubrimiento. Las ecuaciones de H_x y H_z muestran continuidad en $x = 0$ y en $x = -f$, condición que es debida a que $E_y(x)$ y $\frac{dE_y(x)}{dx}$ también son continuos en las interfaces sustrato-núcleo y núcleo-recubrimiento. Con base en esta condición de continuidad en las interfaces, se resolverá la ecuación anterior (9) considerando cada región y sus condiciones de frontera correspondientes. De igual forma, se aplicará la misma metodología para las expresiones ecuación (7.1) y ecuación (7.3) que son las zonas de la cubierta y el sustrato.

En la región del núcleo donde ($x \leq -f$), se espera una solución oscilatoria que sea función de x (Chen, 2016). de tal forma que la condición se cumpla $n_f^2 k^2 - \beta^2 > 0$. Introduciendo $\kappa_f =$

$k \sqrt{n_f^2 - n_{eff}^2}$ se define $E_{ny}(x)$ como

$$E_{ny}(x) = E_f \cos(\kappa_f x + \phi) \quad (10.1)$$

Donde E_f es la amplitud del modo propagado y ϕ es un cambio de fase asociado a la reflexión total interna de la luz de la interfaz núcleo-sustrato o núcleo-cubierta (Kogelnik & Ramaswamy, 1974), dependiendo de las condiciones de frontera. La derivada de la ecuación (10.1) es:

$$\frac{dE_{ny}(x)}{dx} = -\kappa_f E_f \sin(\kappa_f x + \phi) \quad (10.2)$$

Para la región del sustrato, donde ($x \leq -f$), $E_y(x)$ decae conforme x es negativo, lo que se cumple si $n_s^2 k^2 - \beta^2 < 0$. Introduciendo el término $\delta_s = k \sqrt{n_{eff}^2 - n_s^2}$ y $E_{sy}(x)$ queda de la forma

$$E_{sy}(x) = E_s e^{\delta_s(x+f)} \quad (11.1)$$

Y su derivada:

$$\frac{dE_{sy}(x)}{dx} = \delta_s E_s e^{\delta_s(x+f)} \quad (11.2)$$

Finalmente, para la región de la cubierta se espera que $\beta^2 - n_c^2 k^2 < 0$, donde definiendo $\delta_c = k \sqrt{n_{eff}^2 - n_c^2}$

$$E_{cy}(x) = E_c e^{-\delta_c x} \quad (12.1)$$

Y su derivada:

$$\frac{dE_{cy}(x)}{dx} = -\delta_c E_c e^{-\delta_c x} \quad (12.2)$$

Debido a la condición de continuidad de $E_{ny}(x)$, $E_{sy}(x)$, y $E_{cy}(x)$ y sus derivadas en $x = 0$ puede llegarse a:

$$E_f \cos(\phi) = E_c \quad (13.1)$$

$$\kappa_f E_f \sin(\phi) = \delta_c E_c \quad (13.2)$$

De donde se obtiene la siguiente expresión:

$$\tan(\phi) = \frac{\delta_c}{\kappa_f} \quad (14)$$

Que es la expresión de ϕ asociada a las condiciones de frontera en $x = 0$ (interfaz núcleo-recubrimiento). A continuación, se buscará una expresión también para ϕ pero asociada a la interfaz núcleo-sustrato. De forma similar al caso anterior, se tiene para las condiciones de frontera en $x = -f$ lo siguiente:

$$E_f \cos(-\kappa_f f + \phi) = E_s \quad (15.1)$$

$$-\kappa_f E_f \sin(-\kappa_f f + \phi) = \delta_s E_s \quad (15.2)$$

Combinando ambas ecuaciones se obtiene la segunda expresión para ϕ para la interfaz núcleo-sustrato:

$$\tan(-\kappa_f f + \phi) = -\frac{\delta_s}{\kappa_f} \quad (15.3)$$

Al eliminar ϕ de las ecuaciones (14) y (15.3) y combinarlas, se obtiene finalmente la relación de dispersión para los modos TE:

$$\kappa_f f = \tan^{-1} \frac{\delta_s}{\kappa_f} + \tan^{-1} \frac{\delta_c}{\kappa_f} + m\pi \quad (16)$$

Donde m es el número de modo y es entero ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$). La relación de dispersión también es conocida como condición de autoconsistencia, que para interferencia constructiva ocurre cuando el desplazamiento total de fase de la onda es 0 o un múltiplo entero de 2π .

La ecuación de dispersión para modos TM puede ser obtenida de manera similar a como se obtuvo la ecuación de dispersión para los modos TE. Ahora, es necesario considerar que un modo TM tiene una componente magnética y dos componentes eléctricas, donde estas últimas pueden ser expresadas en términos de la componente magnética de la siguiente manera:

$$E_x = \frac{\beta}{\omega n_i^2 \varepsilon_0} H_y(x) \quad (17.1)$$

$$E_y = -\frac{i}{\omega n_i^2 \varepsilon_0} \frac{dH_y(x)}{dx} \quad (17.2)$$

Para el caso TM, las condiciones de frontera para las componentes se cumplen si $H_y(x)$ y $\frac{1}{n_i^2} \frac{dH_y(x)}{dx}$ son continuas en las interfaces sustrato-núcleo y núcleo-cubierta (al igual que en el caso para los modos TE) de tal forma que la componente del campo magnético $H_y(x)$ para las tres zonas de la guía queda de la siguiente manera:

Recubrimiento

$$H_{cy}(x) = H_c e^{-\delta_c x} \quad (18.1)$$

Núcleo

$$H_{ny}(x) = H_f \cos(\kappa_f x + \phi') \quad (18.2)$$

Sustrato

$$H_{sy}(x) = H_s e^{-\delta_s(x+f)} \quad (18.3)$$

Al igual que para el caso de los modos TE, aplicando las condiciones de cada interfaz y su ecuación correspondiente, se obtiene la relación de dispersión para los modos TM:

$$\kappa_f f = \tan^{-1} \frac{\delta_s n_f^2}{\kappa_f n_c^2} + \tan^{-1} \frac{\delta_c n_f^2}{\kappa_f n_s^2} + m' \pi \quad (19)$$

Donde $m' \pi$ es el número de modo TM. Las ecuaciones anteriores son ecuaciones de eigenvalores, por lo que a partir de ellas se obtienen las definiciones de varios parámetros asociados a las guías de onda, como lo son el índice de refracción efectivo, ancho modal, espesor/frecuencia de corte, confinamiento de la luz, distribución del campo eléctrico, entre otras. Sin embargo, ambas expresiones son ecuaciones trascendentales y no tienen solución analítica. Si bien pueden hacerse aproximaciones numéricas, esto resulta complicado debido a la relación que tienen los índices de refracción de sustrato, película y cubierta con el índice de refracción efectivo, por lo que determinar un valor preciso para el índice de refracción efectivo resulta complicado. En la siguiente sección se describe una estrategia a través de la cual calcular los parámetros asociados a las características de la guía de onda resulta más sencillo que realizar una aproximación numérica.

2.1.5 Escalamiento de parámetros de fabricación

Debido a que las ecuaciones de dispersión TE y TM no pueden ser resueltas analíticamente, Kogelnik y Ramaswamy 1974 propusieron una serie de expresiones generalizadas que describen las características de las guías de onda. Estos parámetros normalizados permiten calcular de manera sencilla los parámetros de fabricación necesarios para una guía de onda. En algunos casos, las expresiones de un mismo parámetro son diferentes según el caso (TE o TM).

Analizando el caso transversal eléctrico, se introducen las siguientes definiciones básicas:

$$\gamma = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (20)$$

$$b = \frac{n_{eff}^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (21)$$

$$V = k_0 f \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (22)$$

Donde γ es conocido como el factor de asimetría de la guía, b es el índice de refracción efectivo normalizado y V es la frecuencia normalizada (también espesor de corte) la cual usa la misma expresión para los modos TE y para los TM. El factor de asimetría es una proporción que indica que tan cercanos o lejanos son entre si los valores de los índices de refracción de la cubierta y del sustrato, siendo una guía simétrica aquella donde los valores de n_c y n_s son iguales y una asimétrica donde son diferentes. Para una guía simétrica, $\gamma = 0$, mientras que para una guía asimétrica $\gamma \neq 0$. Con estos parámetros, Kogelnik y Ramaswamy, 1974 proponen la siguiente expresión como la ecuación de dispersión normalizada para modos TE:

$$V\sqrt{1-b} = m\pi + \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{1-b}} + \tan^{-1} \sqrt{\frac{b+\gamma}{1-b}} \quad (23)$$

Para la polarización TM, el factor de asimetría y el índice de refracción efectivo normalizado son:

$$\gamma = \left(\frac{n_f^4}{n_c^4} \right) \left(\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} \right) \quad (24)$$

$$b = \left(\frac{n_f^2}{n_s^2 q_s} \right) \left(\frac{n_{eff}^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_s^2} \right) \quad (25)$$

Donde q_s es el factor de reducción dado por:

$$q_s = \frac{n_{eff}^2}{n_f} + \frac{n_{eff}^2}{n_s^2} - 1 \quad (26)$$

Con base en las expresiones anteriores la ecuación de dispersión normalizada para modos TM definida por Kogelnik y Ramaswamy es:

$$V\sqrt{1-b} = m\pi + \tan^{-1} \frac{n_f^2}{n_c^2} \sqrt{\frac{b}{1-b}} + \tan^{-1} \frac{n_f^2}{n_s^2} \sqrt{\frac{b+\gamma}{1-b}} \quad (27)$$

A partir de las expresiones normalizadas tanto de las relaciones de dispersión como del índice de refracción efectivo, factor de simetría y frecuencia normalizada pueden calcularse los valores aproximados de algunas características propias de las guías de onda. El conocer estos valores ayuda a agilizar el proceso de fabricación de las estructuras, así como a analizar el cambio que pueden tener bajo ciertas condiciones. En este trabajo se propone la variación de espesores del núcleo de una guía basada en una película de Al_2O_3 , por lo que se obtuvo la frecuencia de corte, el ancho de modo, el confinamiento en la película y la distribución de amplitud del campo eléctrico para espesores de núcleo de 500 nm, 750 nm y 1000 nm. En las siguientes secciones se muestran los datos obtenidos para el régimen monomodal en polarización TE, donde se utilizará $n_f = 1.64$, valor estimado para el índice de refracción del Al_2O_3 fabricado por ALD (López et al., 2017).

2.1.5.1 Frecuencia de corte

La frecuencia de corte es aquella debajo de la cual ya no hay guiado de luz en la estructura (Hunsperger, 1995), es decir es la frecuencia mínima necesaria para que exista un determinado modo de propagación. A partir de la ecuación (23) que es la relación de dispersión TE y la definición de la frecuencia normalizada (ecuación (22)) puede obtenerse el valor para la frecuencia de corte para cualquier modo. Es importante destacar que la frecuencia de corte más baja es aquella que pertenece al modo fundamental de propagación m_0 , la cual se denominará frecuencia fundamental de corte V_0 que se define como:

$$V_0 = \tan^{-1} \sqrt{\gamma} \quad (28)$$

Se puede observar de la expresión anterior que para una guía simétrica $V_0 = 0$, pues $\gamma = 0$. Por lo tanto, el modo fundamental de una guía simétrica carece de frecuencia de corte (Chen, 2016). Con el fin de que este valor pueda ser calculado de una manera más ilustrativa, la frecuencia fundamental de corte también se puede expresar a manera de espesor de corte. A partir de la ecuación de dispersión y la frecuencia normalizada, utilizando las condiciones de que $b = 0$ y $m = 0$, se puede llegar a la expresión del espesor de corte fundamental:

$$f_0 = \left[\frac{\tan^{-1}(\gamma)}{2\pi \sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \right] \lambda \quad (29)$$

De manera similar al caso anterior, se puede obtener también la ecuación para la frecuencia de corte de cualquier modo, la cual se expresa como:

$$V_m = V_0 + m\pi \quad (30)$$

Para el presente trabajo, donde se propone una variación de espesores del núcleo basado en una película de Al_2O_3 , se estimó que el espesor de corte fundamental es de 117.4 nm, por lo que éste es el espesor mínimo que debería tener una película para poder propagar el modo fundamental al menos. De igual

forma, se calculó el espesor de corte para cada modo. En la siguiente gráfica se muestran la cantidad de modos que se esperan por espesor, separados por regiones modales.

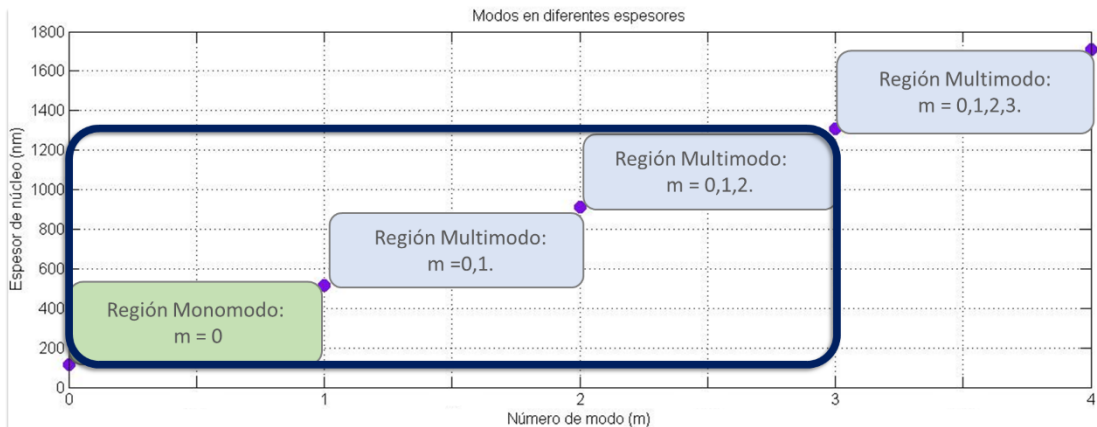


Figura 4. Número de modos calculados para cada espesor de núcleo. La región circulada en azul corresponde a los modos soportados teóricamente por las estructuras propuestas

La gráfica anterior indica que para espesores de núcleo \sim a 550 nm o menores, se espera que la guía sea estrictamente monomodal, para espesores de entre 600 nm y \sim 900 nm sea multimodal soportando el modo fundamental y primer modo y finalmente para espesores superiores a 900 nm, multimodal soportando el modo fundamental, primer modo y segundo. También se observa que más allá de 1200 nm se encuentran guías multimodales que soportan hasta 4 modos de propagación. Los índices de refracción efectivos asociados calculados para estos modos se mostrarán en la sección 2.1.5.3. A continuación, se muestran las curvas de corte modal para una longitud de onda en el visible ($\lambda = 632.8$ nm) y cercano infrarrojo ($\lambda = 1550$ nm).

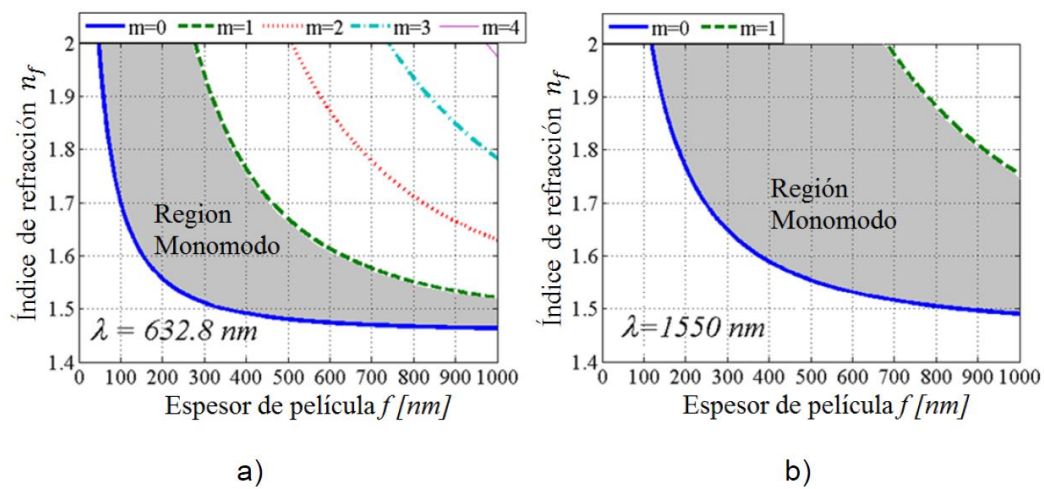


Figura 5. Curvas de corte modal para diferentes índices de refracción del núcleo y espesores en a) visible ($\lambda=632.8$) b) NIR ($\lambda=1550$). Tomado de (Lizárraga, 2016).

Se puede observar a partir de la figura anterior que las guías de onda propuestas para este trabajo, así como los espesores propuestos, muestran propagación para el régimen visible ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) y cercano infrarrojo ($\lambda = 1550 \text{ nm}$). Los espesores de 750 nm y 1000 nm presentan un comportamiento multimodal para el visible, mientras que para NIR son monomodales.

2.1.5.2 Ancho modal efectivo

Otra de las características a conocer con respecto a un modo de propagación es su ancho modal efectivo, que indica el tamaño del modo que se propagará a lo largo de la estructura. El ancho modal efectivo cambia dependiendo de varios factores como la frecuencia normalizada y el factor de simetría. A continuación, se muestra una gráfica en la que se aprecia el comportamiento del ancho efectivo normalizado con respecto a diferentes factores de simetría y frecuencias normalizadas.

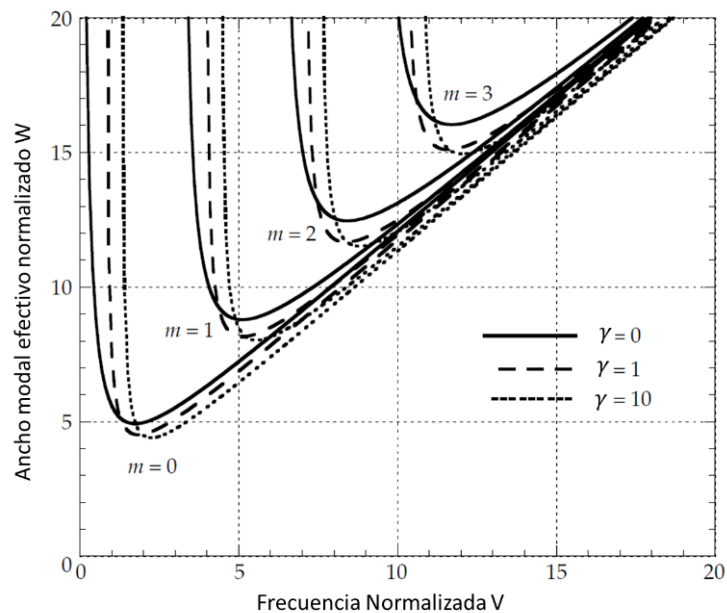


Figura 6. Ancho modal efectivo normalizado contra frecuencia normalizada para diferentes modos y diferentes asimetrías. Modificada de Chen Chin lin, Foundations for guided wave photonics.

En la gráfica anterior se puede apreciar que el ancho modal efectivo es mayor para guías totalmente simétricas, y va disminuyendo conforme va incrementando el grado de asimetría. El ancho modal decrece

de forma exponencial al alejarse de la frecuencia de corte. Cuando el ancho modal es mayor al ancho del núcleo, sólo una parte de la potencia viaja en el núcleo (Lizárraga, 2016). Tomando los parámetros normalizados anteriormente definidos, Kolegnik y Ramaswamy define el ancho modal efectivo normalizado como:

$$W = V + \frac{1}{\sqrt{\gamma + b}} + \frac{1}{\sqrt{b}} \quad (31)$$

Recordando que la frecuencia normalizada también se puede expresar como espesor de película, se calculó para este trabajo el ancho modal efectivo y cómo este cambia conforme se incrementa el espesor del núcleo.

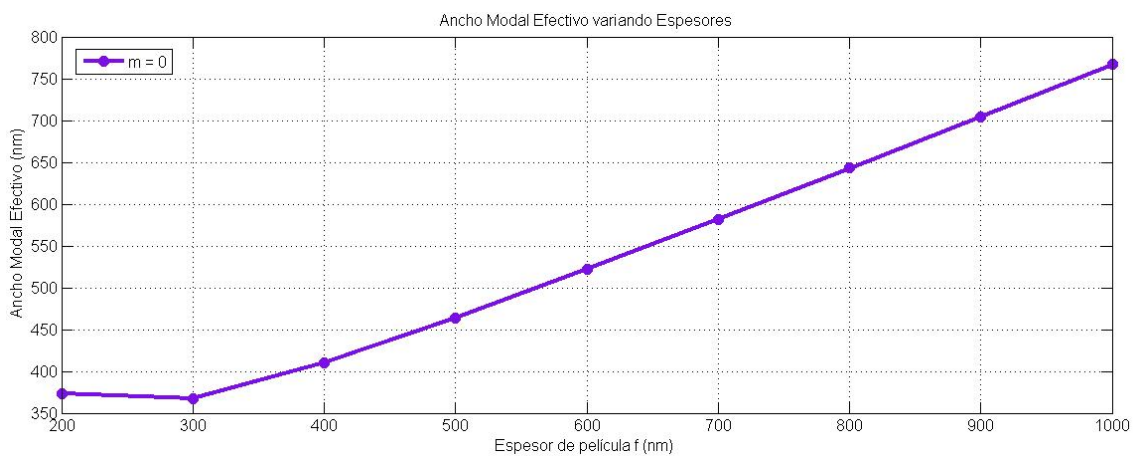


Figura 7. Ancho modal efectivo normalizado contra espesor de núcleo de alúmina.

El factor de asimetría para las guías propuestas es de $\gamma = 1.877$, calculado a partir de la ecuación (20) cercano a uno de los casos de asimetría mostrados en la fig. 6. Se observa de la gráfica anterior que el comportamiento es muy similar al mostrado en la fig. 6. En este caso puede observarse una ligera caída del ancho modal para espesores de entre 200 y 300 nm, para después aumentar linealmente, como en el caso de la fig. 7 para el modo fundamental. También destaca el hecho de que, por debajo del espesor de núcleo de 500 nm, el ancho modal es mayor al del núcleo, mientras que para los espesores iguales o mayores a 500 nm el ancho modal es menor al espesor del núcleo. El ancho modal efectivo disminuye más

y más conforme el espesor de película es mayor. Como se mencionó anteriormente, parte de la potencia del modo viaja por el núcleo, parte por el sustrato y parte por el recubrimiento, por lo que en la siguiente sección se explorará el confinamiento de luz en la zona de del núcleo.

2.1.5.3 Factor de confinamiento

El factor de confinamiento es una razón entre la potencia dentro del núcleo de la guía de onda y la potencia total del modo de propagación. Puede expresarse como porcentaje de confinamiento de luz. Cada zona de la guía tiene su propia expresión para el confinamiento. En este trabajo, se calculó el confinamiento específico para la zona del núcleo con el fin de comparar el confinamiento de un núcleo de un mismo material, pero de diferentes espesores. La expresión para el factor de confinamiento normalizado en la zona del núcleo esta dado por

$$\Gamma_f = \frac{V + \sqrt{b} + \frac{\sqrt{\gamma + b}}{1 + \gamma}}{V + \frac{1}{\sqrt{b}} + \frac{1}{\sqrt{\gamma + b}}} \quad (32)$$

Con esta expresión se calculó el cambio del confinamiento en el núcleo conforme se incrementa el espesor de película, como se puede observar en la siguiente figura:

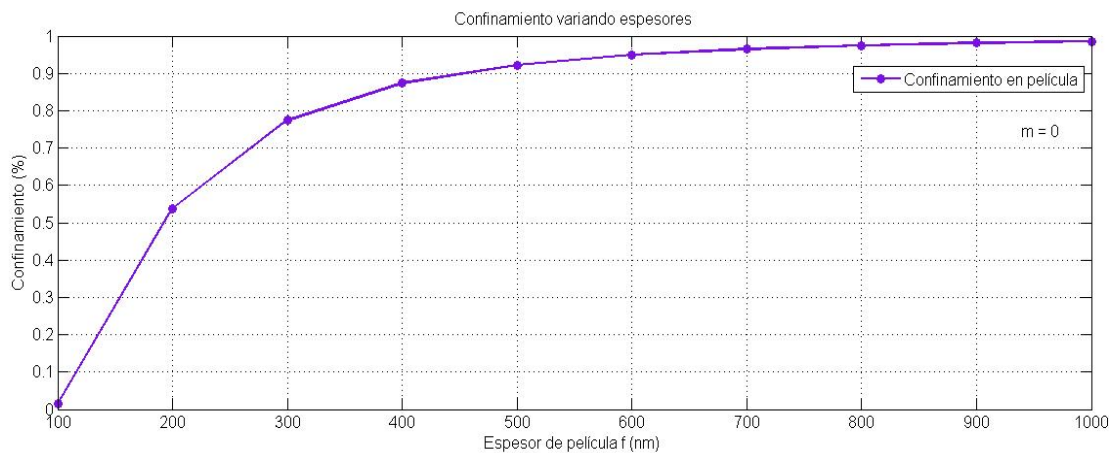


Figura 8. Confinamiento de luz para la zona del núcleo para diferentes espesores de película para el régimen monomodal.

Se observa que, para espesores de 500 nm en adelante, se espera que el confinamiento de luz en la película sea mayor al 90% para el material propuesto para el régimen monomodal. Esto puede indicar que teóricamente este material es apto para el diseño y construcción de elementos de óptica integrada que requieran niveles altos de confinamiento en la zona del núcleo.

2.1.5.4 Distribución de Amplitud del campo eléctrico

Recordando las ecuaciones (7.1), (7.2) y (7.3) que describen el campo eléctrico en las zonas de sustrato, núcleo y recubrimiento, es posible calcular la distribución de amplitud del campo eléctrico. Con estas ecuaciones y en conjunto con la relación de dispersión para modos TE, pueden obtener expresiones que permitan el cálculo de las amplitudes asociadas a cada sección de la guía, de acuerdo con las condiciones de frontera. Tomando en cuenta los parámetros normalizados, las expresiones para la distribución de amplitud del campo eléctrico son:

$$E_y = \begin{cases} E_c e^{-V(\sqrt{\gamma+bx})/f} & x \geq 0 \\ E_c \left[\cos\left(\frac{V\sqrt{1-bx}}{f}\right) + \frac{\sqrt{\gamma+b}}{\sqrt{1-b}} \sin\left(\frac{V\sqrt{1-bx}}{f}\right) \right] & 0 \geq x \geq f \\ E_c [\cos(V\sqrt{1-b}) - \sin(V\sqrt{1-b})] e^{V\sqrt{b}[1+(x/f)]} & -f \geq x \end{cases} \quad (33)$$

Con base en las ecuaciones anteriores, se calculó la distribución de amplitud de campo eléctrico para cada espesor de núcleo. Cada espesor muestra diferentes decaimientos en las zonas de sustrato y recubrimiento, mostrando un decaimiento más suave de la onda evanescente en los espesores de 500 nm y 750 nm que en el espesor de 1000 nm. En la distribución del campo perteneciente a 1000 nm puede observarse un decaimiento rápido de la onda evanescente, indicando que gran parte del modo viaja confinado en el núcleo. Esto es consistente con el comportamiento que se había observado del confinamiento en este espesor para el modo fundamental, el cual indica que el confinamiento en el núcleo es teóricamente alto (> 95%). A continuación, se muestran las distribuciones de campo pertenecientes a los 3 primeros modos TE y las distribuciones calculadas para los tres espesores propuestos.

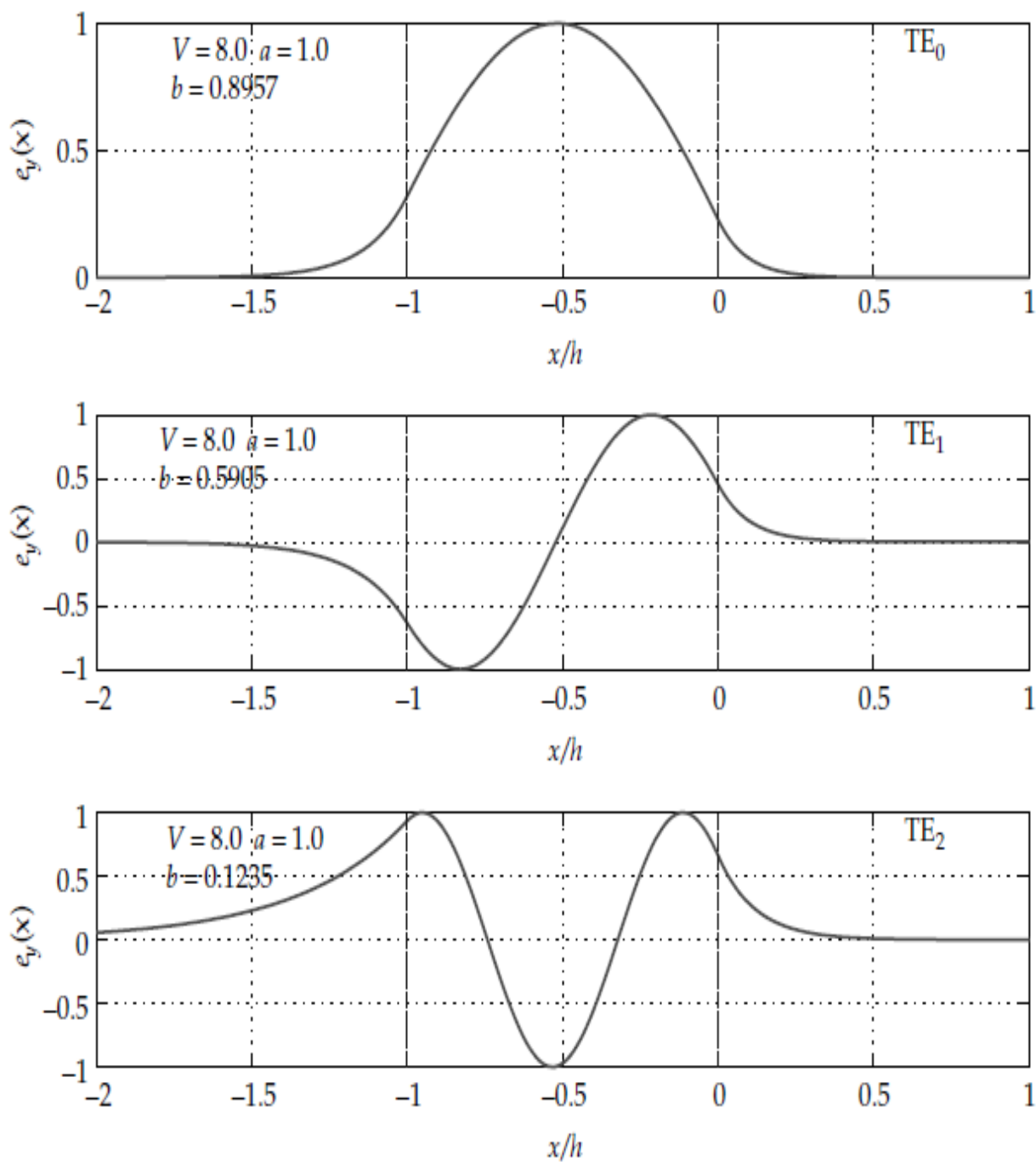


Figura 9. Distribuciones de campo para modos TE_0 , TE_1 y TE_2 . Modificada de Chen Chin-lin, Foundations for guided wave photonics.

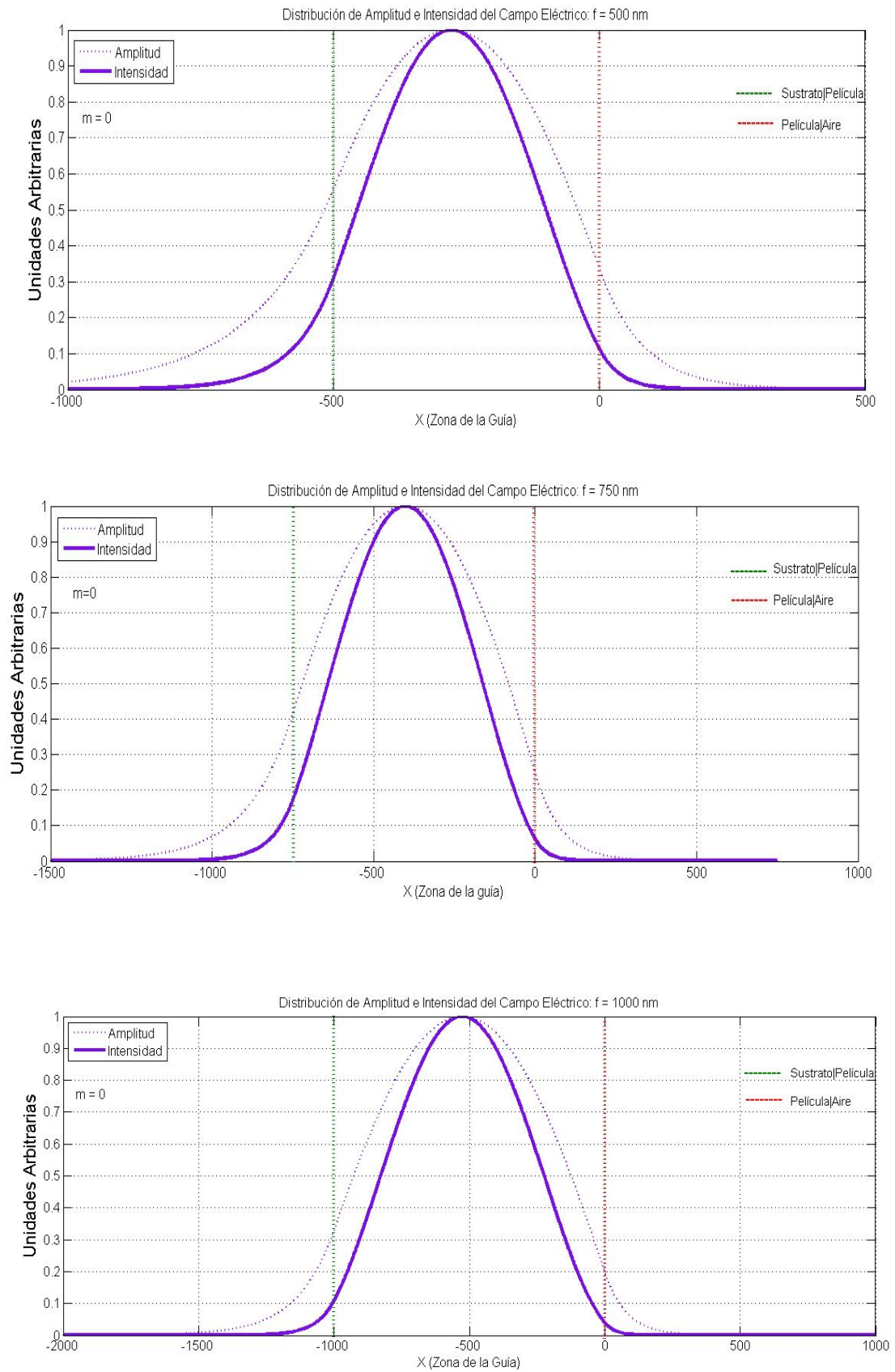


Figura 10. Distribución de intensidad para núcleo de tres diferentes espesores: 500 nm, 750 nm y 1000 nm, régimen monomodal.

2.1.5.3 Índice de refracción efectivo calculado

Finalmente, se presentan los valores calculados para índices de refracción efectivos para cada espesor y polarización (TE y TM). Estos valores se calcularon a partir de los parámetros normalizados de fabricación. Estos valores se obtienen de forma experimental a través de la técnica de acoplamiento por prisma, en secciones posteriores se compararán los valores de la Tabla 1 con los obtenidos por la técnica de acoplamiento por prisma.

Tabla 1. Índices de refracción efectivos calculados para los valores de espesor propuestos, polarizaciones TE y TM

VALORES CALCULADOS (n_{eff})						
Espesor Propuesto	Modo 0		Modo 1		Modo 2	
	TE	TM	TE	TM	TE	TM
500 nm	1.58	1.56				
750 nm	1.61	1.60	1.51	1.49		
1000 nm	1.62	1.61	1.55	1.54	1.48	1.45

2.2 Depósito de Capas Atómicas (ALD)

La técnica de Depósito de Capas Atómicas (Atomic Layer Deposition, por sus siglas en inglés, ALD) es una forma de deposición química de películas delgadas. Siendo una clase de Chemical Vapor Deposition (CVD), se basa en el uso secuencial de precursores en fase gaseosa que reaccionan químicamente con la superficie de un sustrato, uno a la vez, creando lentamente una capa de material. El proceso es repetido hasta obtener la cantidad de capas de material necesarias para formar el espesor de película deseado. Ésta técnica permite un control preciso del espesor, así como superficies homogéneas (Cervantes et al., 2017) y un rango de temperatura de depósito de entre 25°C y 500°C.

La fabricación de una película por ALD se lleva a cabo en una cámara de reacción, la cual se encuentra en ultra alto vacío y a una determinada temperatura (dependiente de cada caso), donde previamente se coloca el sustrato sobre el cual se realizará el depósito. La superficie de este debe estar funcionalizada, ya

sea de forma natural o inducida. El proceso inicia con el pulso de un primer precursor, el cual reacciona con la superficie del sustrato. Los productos restantes de la reacción y el exceso de precursor son purgados gracias a un flujo de gas inerte que entra en la cámara. Después de esta primera purga, se lanza otro pulso de un segundo precursor, comúnmente denominado agente reactante, el cual reacciona también con la superficie del sustrato. Los subproductos derivados de esta reacción y el exceso de agente reactante son retirados por una segunda purga con gas inerte. Todo esto deriva en la creación de una primera capa de material sobre la superficie, la cual tiene apenas algunos ángstroms de espesor. Este ciclo se repite varias veces hasta obtener el espesor buscado de película.

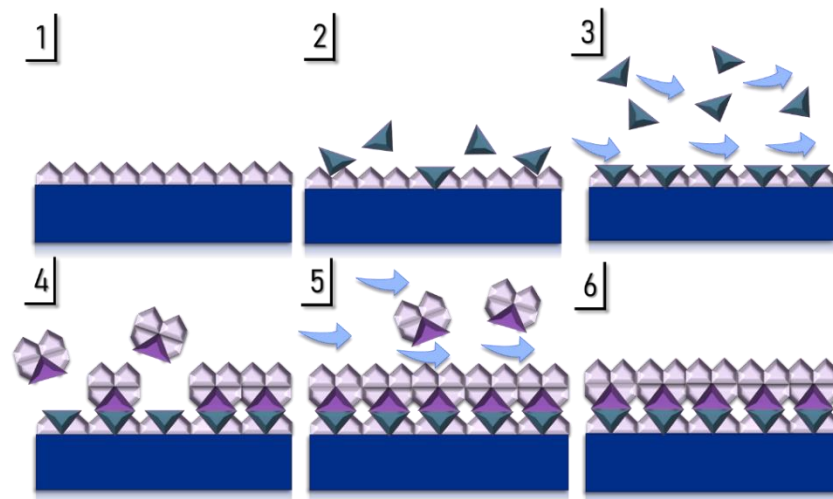


Figura 11. Etapas de un ciclo ALD

Los precursores y los agentes reactantes no reaccionan consigo mismos ni con los grupos superficiales que crean (H.C.M Knoop et al., 2015). Inicialmente, los precursores usados en la técnica ALD se encuentran en diferentes formas como líquida, sólida, en polvo etc. Estos pasan a su fase gaseosa, la que es utilizada en el proceso, a través de la aplicación de temperatura. Dependiendo del material del que se desee fabricar una película o recubrimiento, es el precursor utilizado. Algunos precursores comúnmente utilizados son Tris(methylcyclopentadienyl)Yttrium (III) para la fabricación de películas de Y_2O_3 , Tris(i-propylcyclopentadienyl)cerium(III) para el depósito de Cerio, ambos en forma de polvo. Cada material tiene asociada una tasa de crecimiento por ciclo o Growth per Cycle (GPC por sus siglas en inglés) la cual varía de acuerdo con parámetros como la temperatura de depósito, el agente reactante entre otros factores propios de la fabricación.

Es importante mencionar que los precursores y los agentes reactantes reaccionan con la superficie del sustrato de forma autolimitada. Esto quiere decir que las moléculas del precursor y el reactante reaccionan

con los sitios y/o los grupos químicos de la superficie mientras estos se encuentren presentes. Por lo tanto, las reacciones de la superficie eventualmente llegan a un punto de saturación y se detienen (H.C.M Knoop et al., 2015). Debido a la naturaleza autolimitante de la técnica, la conformidad en el depósito depende únicamente de que una cantidad suficiente de flujo alcance todas las áreas necesarias (H.C.M Knoop et al., 2015).

El rango de temperatura donde el crecimiento es saturado depende de cada proceso ALD específico. Este rango es conocido como ventana de temperatura ALD, fuera de la cual suele haber tasas de crecimiento pobres y depósito de material que no tiene las características ALD (Johnson et al., 2014). Temperaturas muy bajas con respecto a la ventana ALD pueden provocar condensación del precursor o reacciones lentas, mientras que temperaturas muy altas con respecto a la ventana ALD del proceso pueden resultar en la descomposición del precursor (Johnson et al., 2014). Como se puede apreciar en la siguiente figura, existe un rango de temperatura donde la tasa de crecimiento se mantiene estable, la ventana ALD.

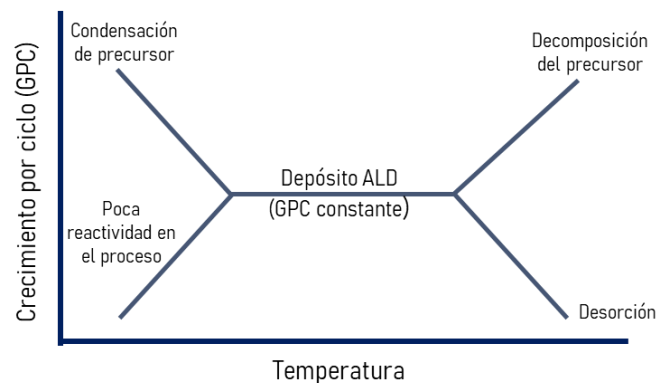


Figura 12. Ventana de temperatura ALD

Las aplicaciones del depósito de capas atómicas son diversas, yendo desde las áreas de catálisis, biomédica, almacenamiento y conversión de energía hasta el área de microelectrónica. Debido a su capacidad de crear recubrimientos uniformes de espesores de hasta algunos ángstroms de espesor y la amplia variedad de materiales disponibles, podría permitir el depósito de capas de óxidos de alta permitividad en compuertas de transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET). De igual forma, es usada en la fabricación de capacitores de memorias de acceso aleatorio dinámicas (DRAM), en multicapas para compuertas MOSFET, interconectores, etc.

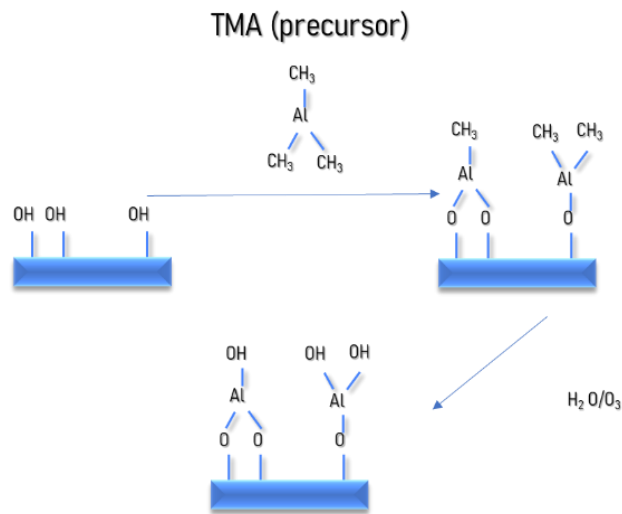


Figura 13. Ciclo ALD para Al_2O_3 utilizando H_2O como reactante.

Dentro de la fabricación de guías de onda, constantemente se buscan técnicas de depósito de materiales que permitan la miniaturización y funcionalidad de estas estructuras para ser compatibles con los dispositivos de óptica integrada de escalas micro y nanométricas. Por lo tanto, las características de la técnica, como uniformidad en la superficie y control del espesor del orden de nanómetros la hacen una fuerte candidata como técnica de fabricación para guías de onda submicrón.

Capítulo 3. Metodología y materiales

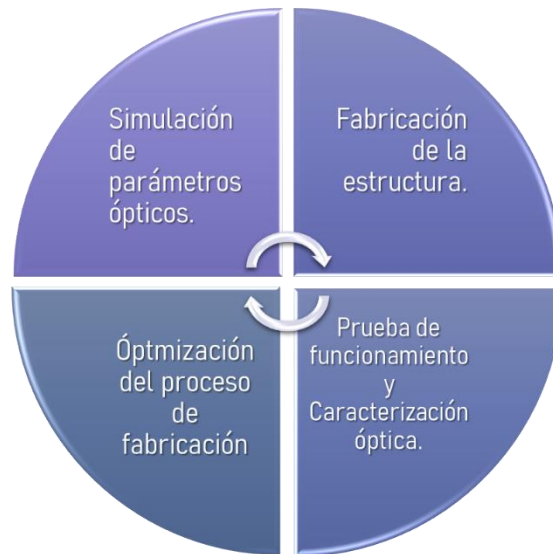


Figura 14. Metodología para la fabricación de guías de onda.

En general la metodología para la obtención de una estructura de guía de onda se resume en 4 etapas: Diseño, fabricación, caracterización y optimización. La primera etapa es la simulación de las características ópticas esperadas de la guía. La simulación implica conocer cómo será la propagación de la luz a través de la guía y cómo esta se verá afectada al cambiar algunos parámetros estructurales como el espesor de núcleo, los materiales con los que está fabricada la guía, etc.

Estas características son generalmente la dispersión de la luz, índice de refracción efectivo, frecuencia de corte, ancho modal efectivo, confinamiento de la luz, distribución de amplitud e intensidad del campo eléctrico, entre otras. En las secciones anteriores se calcularon los valores esperados de estas características solucionando las ecuaciones de dispersión. De igual forma cabe mencionar que cada una de estas características cambia de acuerdo con la polarización de la luz. En base a los valores obtenidos de las simulaciones efectuadas para las características de la guía de onda, se procede a la etapa de fabricación.

Existen diversos métodos de fabricación existentes para guías de onda. Estos pueden separarse en dos grupos principales (Boudrioua, 2009): Técnicas de depósito y técnicas de sustitución. Las técnicas de depósito son aquellas que consisten en depositar una película delgada de índice de refracción mayor al de un determinado sustrato. Algunos ejemplos de estas técnicas son el Depósito de vapores químicos (Chemical Vapor Deposition, CVD), Depósito de Capas Atómicas (Atomic Layer Deposition, ALD), sputtering, Epitaxia en fase de vapor (Liquid -Phase Epitaxy, LPE), entre otras. Las técnicas de sustitución en contraste crean una capa de índice de refracción mayor al del sustrato mediante al introducir nuevos átomos. Algunas técnicas de sustitución utilizadas en la fabricación de guías de onda son la implantación de iones, intercambio de protones, etc. Dependiendo de la estructura deseada, los materiales disponibles y las técnicas accesibles, se escoge una técnica de fabricación y se crea la estructura de la guía. Una vez fabricadas las muestras, se procede a realizar la prueba de funcionamiento a través del acoplamiento de luz a la estructura. Existen diferentes métodos de acoplamiento para guías de onda, entre los que se encuentran la técnica de acoplamiento por prisma, acoplamiento por rejilla y acoplamiento fibra-guía; esta última será la utilizada en este trabajo.

Dentro de la fabricación de guías de onda, constantemente se buscan técnicas de depósito de materiales que permitan la miniaturización y funcionalidad de estas estructuras para ser compatibles con los dispositivos de óptica integrada de escalas micro y nanométricas. Una de las técnicas que en los últimos años ha tomado importancia en la fabricación de guías de onda es el Depósito de Capas Atómicas, la cual debido a sus características principales como capacidad de depósito de películas ultra delgadas del orden de angstroms, depósito a bajas temperaturas y control del espesor, permite la fabricación de películas útiles para ser el núcleo de guías de onda. En este trabajo se propone la fabricación de guías de onda de diferentes espesores de núcleo, basado en películas de Al_2O_3 fabricadas por el método de Depósito de Capa Atómica.

3.1 Características del Al_2O_3

El depósito de la película se realizó sobre sustratos de sílice (sílice, SiO_2) de 10 mm de largo por 15mm de ancho, de 1 mm de altura. A continuación, se presentan la metodología de fabricación de las guías de onda planas propuestas con núcleo de Al_2O_3 , así como la caracterización óptica y del material.

El óxido de aluminio, conocido también como alúmina es un material cuya fórmula química es Al_2O_3 . Este presenta una buena adhesión a varias superficies, como silicio, SiO_2 , etc, así como estabilidad térmica y química. De igual forma, debido a sus propiedades dieléctricas (alta constante dieléctrica k), en el área de microelectrónica ha sido referido como un material potencial para el reemplazo de las capas de SiO_2 en DRAMs y MOSFETs.

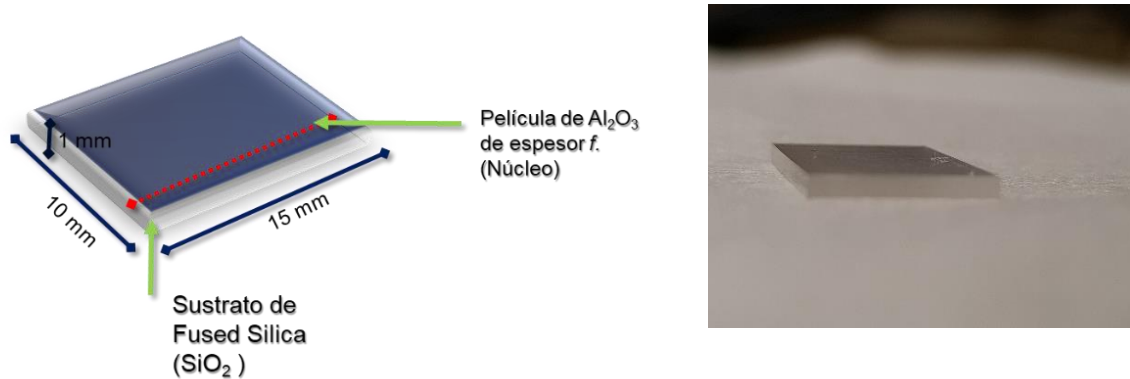
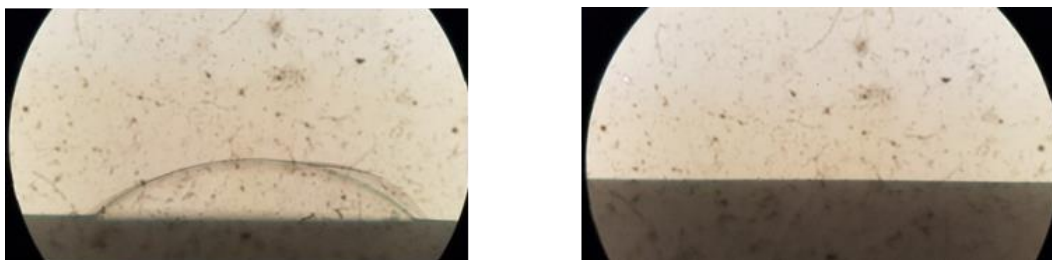


Figura 15. Diagrama e imagen del sustrato de sílice para fabricación.

4.2 Fabricación de guías de onda planas

Para efectos de este trabajo la fabricación de guías onda planas puede dividirse en dos partes: a) la selección y limpieza de sustratos y b) el depósito de películas por ALD.

La selección y limpieza de sustratos tienen una influencia directa en la calidad de guía que se puede obtener. Esto se debe a que existen algunos sustratos que pueden presentar daños estructurales en los cantos que pueden provocar esparcimiento de la luz, derivando en un pobre acoplamiento (los cantos son bordes por donde ocurre el acoplamiento fibra-guía y por donde sale la luz propagada).



a)

b)

Figura 16. a) Sustrato con bordes dañados. b) Sustrato con bordes uniformes.

Los cantos de los sustratos se revisaron previamente con un microscopio óptico, seleccionando cualitativamente aquellos con los bordes más uniformes. Después se procedió a limpiarlos con acetona y alcohol. Posteriormente con el fin de retirar de la superficie del sustrato cualquier mancha de grasa o polvo, se colocó una crema especial para limpieza de sustratos Umicore substrate cleaner, la cual se deja reposar durante un par de horas para después retirarla completamente con alcohol. Después de la limpieza, se colocaron los sustratos en el reactor del equipo ALD, que está dentro de la cámara de depósito. El reactor se calentó previamente a una temperatura de 250°C, usada como temperatura de depósito. El acomodo de las muestras va en función de cómo se tienen caracterizados los flujos de precursores y reactantes en la cámara, variando el mismo de acuerdo con el precursor, reactante y pulsos y purgas de estos. Por lo tanto, se muestra la distribución de sustratos para guías de onda usado para las fabricaciones de agua y ozono. Se colocaron sustratos testigos de oblea de silicio orientación <100> para caracterización de depósito.



Figura 17. Distribución de muestras en el reactor. Los sustratos de sílice se muestran transparentes y los testigos de silicio azules.

El depósito de la película de Al_2O_3 se realizó en el equipo Beneq TFS200 para ALD. Se plantearon dos grupos de fabricación: una utilizando H_2O como agente reactante, variando espesores de núcleo (una muestra de 500 nm, otra 750 nm y otra de 1000 nm) y otro grupo de fabricación también variando los mismos espesores, pero utilizando O_3 como agente reactante. El depósito de cualquier material en este equipo ALD implica el manejo de los siguientes parámetros: tiempo de pulso, tiempo de purga y número de ciclos, los cuales varían de acuerdo con el reactante, el precursor, el material que se desea obtener. El tiempo de pulso es la duración del pulso de precursor o agente reactante que se arrojara a la cámara de depósito. De manera similar, el tiempo de purga indica la duración de la purga de los subproductos derivados de cada reacción y el exceso ya sea de precursor o de reactante; esta purga se realiza con N_2 . El número de

ciclos es la cantidad de ciclos ALD que se llevarán a cabo. durante el proceso, constando un pulso de precursor, su purga, un pulso de reactante y su purga como 1 solo ciclo ALD.



Figura 18. Equipo de Depósito de Capas Atómicas Beneq TFS200.

Para las fabricaciones realizadas con H_2O como reactante, 1 ciclo ALD 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 es de $1.05 \text{ \AA}/\text{ciclo}$. En el caso de las fabricaciones con O_3 , 1 ciclo ALD consistió en un pulso de TMA de 30 ms con una purga de 1s y un pulso de O_3 de 75 ms con una purga de 2s. La tasa de crecimiento utilizada en el caso de las guías de 750 nm es de $0.80 \text{ \AA}/\text{ciclo}$, reportada en la literatura en el depósito de Al_2O_3 utilizando O_3 como reactante. Para las fabricaciones realizadas con ozono es necesario un sistema generador de ozono adicional, externo al sistema de depósito del Beneq. Las condiciones para el generador se fijaron en 5 libras de presión y 5 volts. A continuación, se muestra la distribución de muestras dentro del reactor para ambos casos de fabricaciones (H_2O y O_3).

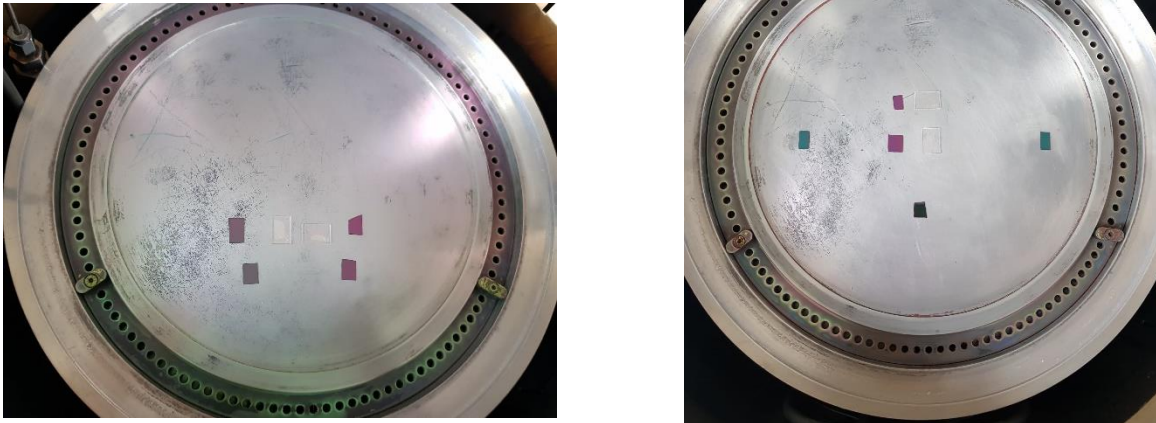


Figura 19. Distribución de muestras en el reactor. Los sustratos de sílice se muestran transparentes y los testigos de silicio azules.

Una vez terminado cada depósito, se realizó una medición de espectrofotometría de UV-VIS sobre los testigos para comprobar si en efecto se había realizado el depósito de alúmina. Esta medición permite obtener un espesor de película aproximado por reflectancia, así como el espectro de absorción. Se observó depósito en todas las fabricaciones. En la medición de espectrofotometría de UV-VIS realizada a la fabricación de 750 nm con O_3 se observó un crecimiento mayor del esperado. Por lo tanto, en base al espesor medido de todos los testigos se aproximó una tasa de crecimiento de 0.089 nm /ciclo, utilizada en los dos depósitos siguientes.

4.3 Caracterización

Una vez terminada la fabricación de ambos sets de muestras se procedió a realizar la caracterización de la película de alúmina y la guía de onda. Para la caracterización de la guía de onda óptica se realizaron medidas de distribución de intensidad de la luz a la salida de la guía, mediciones de potencia de salida de la muestra para el cálculo de los coeficientes de pérdidas de propagación de la luz y mediciones de acoplamiento por prisma para la medición experimental de los valores de índice de refracción efectivo. La caracterización del material consistió en mediciones de Elipsometría para obtención de índice de refracción de la película, Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para observar el espesor de películas,

Espectrometría de fotoelectrones inducidos por rayos (XPS) y Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR). Estos últimos para análisis químico de elementos en la película y carbono.

4.3.1 Propagación: Distribución de Intensidad

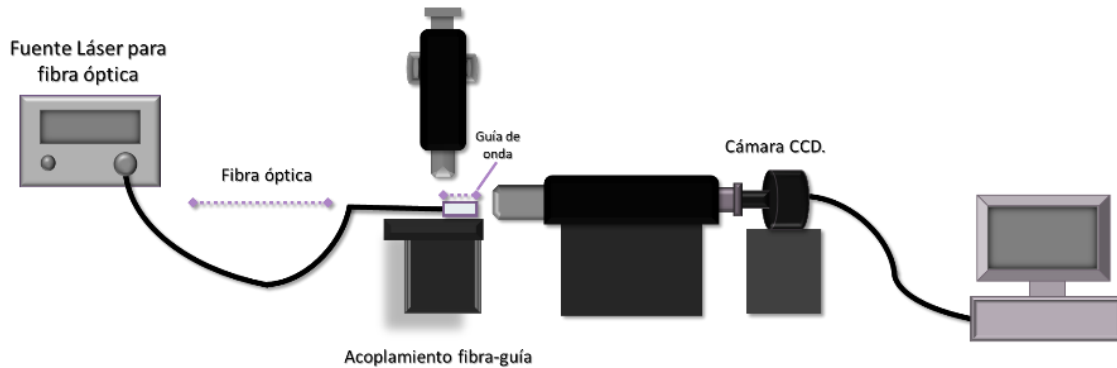


Figura 20. Diagrama del arreglo utilizado para obtener la distribución de intensidad en las guías fabricadas.

Una vez finalizada la fabricación de las guías, la primera caracterización realizada es la prueba de acoplamiento fibra guía. Esto es con el fin de comprobar si la película depositada actúa como núcleo confinando y propagando la luz. La medición de la distribución de intensidad se hace mediante el arreglo óptico mostrado en la Figura 20, el cual consiste en una fuente láser de 633 nm que tiene una salida para fibra óptica monomodo, donde se coloca una fibra óptica a través de la cual se conduce luz hacia una montura donde ocurre un acoplamiento fibra-guía. El acoplamiento fibra-guía es el proceso mediante el cual el modo de propagación que viaja a través de la fibra pasa a la estructura guía de onda que se encuentra en un extremo expuesto sin recubrimiento. Si la muestra cumple con las condiciones necesarias para guiar la luz, el modo saliente de la fibra se acopla a la guía de onda, propagándose.

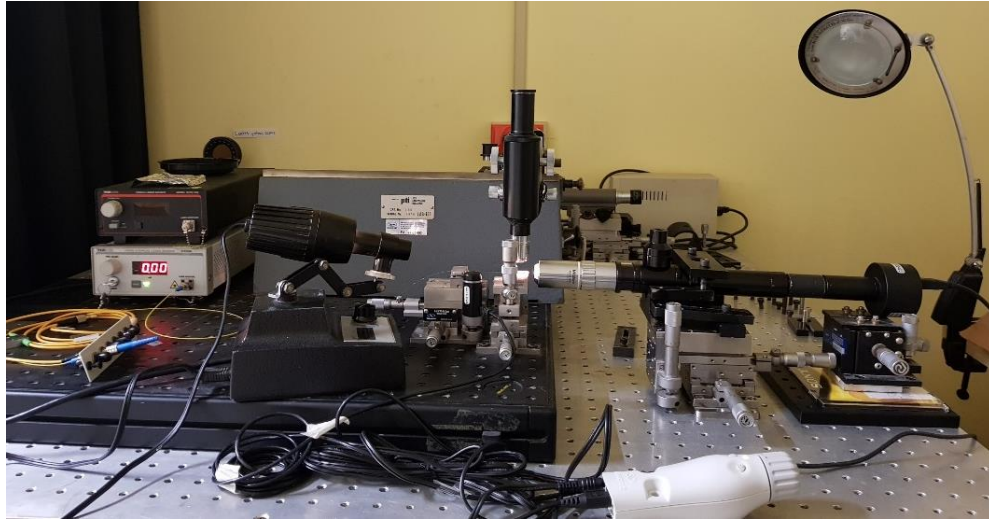


Figura 21. Sistema de acoplamiento fibra-guía, Laboratorio de películas delgadas, CICESE.

Es posible controlar la posición entre la fibra y el sustrato por medio de un nanoposicionador que se encuentra aunado a la montura donde están la fibra y la guía. A continuación, se muestra una imagen del acoplamiento fibra-guía para las muestras fabricadas. Esta imagen se puede observar a través de un microscopio que permite observar qué tan cerca o lejos se encuentra el extremo sin cubierta de la fibra del borde del sustrato. La fibra se acerca lo más posible al sustrato sin tocar el borde de este para disminuir el espacio de aire existente entre el extremo sin cubierta de la fibra y la guía plana. Esto se hace con el fin de que el modo o luz que viaja a través de fibra se acople de forma más sencilla a la guía plana.

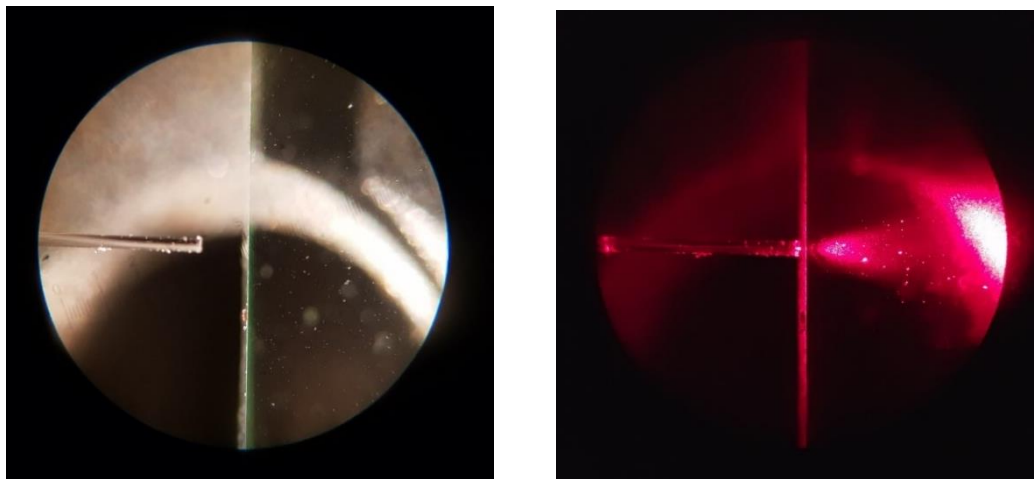


Figura 22. Acoplamiento Fibra-Guía a) Visto con Luz Blanca b) Visto con láser de 632.8 nm.

La luz que emerge de la cara de salida de la guía es captada por un microscopio el cual está acoplado a una cámara CCD, que proporciona una imagen de distribución de intensidad del modo de propagación. Esta se presenta como una línea de luz horizontal continua en el caso de una guía de onda plana, siendo que el confinamiento es en un solo eje. De obtenerse una imagen similar a la mostrada a continuación se procede a realizar el resto de las caracterizaciones ópticas y del material. Se toman imágenes de distribución de intensidad no saturadas con baja potencia de incidencia para realizar un análisis de metrología que es parte de la obtención de pérdidas de propagación.

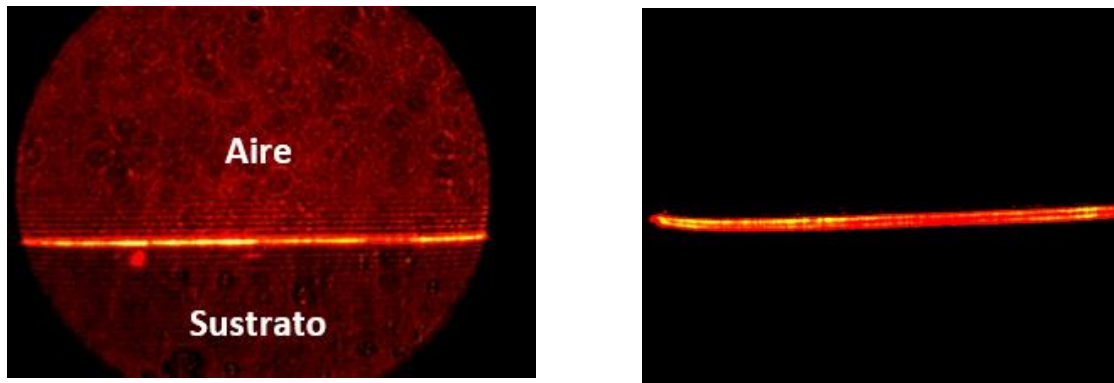


Figura 23. Luz acoplada obtenida por medio de una cámara CCD a diferentes potencias de entrada: a) Luz blanca y 0.10 mW y b) 0.10 mW.

4.3.2 Pérdidas de propagación

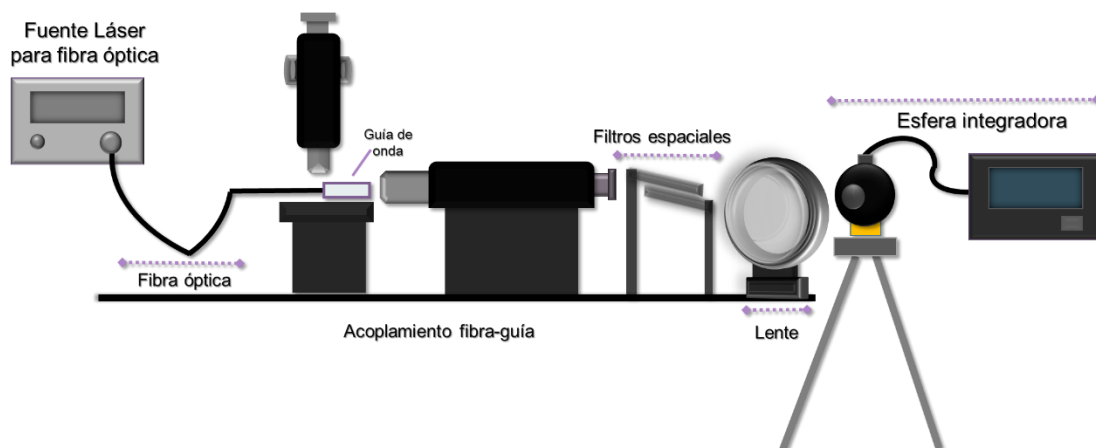


Figura 24. Diagrama del arreglo para la medición de la potencia de salida de cada muestra.

La eficiencia en la propagación de luz en las guías de onda se ve afectada por diversos factores, entre los cuales se encuentran el esparcimiento de la luz a causa de defectos estructurales, absorción del material

o porosidad del material entre otras. Las pérdidas de propagación de la luz cuantifican estos defectos, como una razón de la luz transmitida entre la distancia de propagación, es decir en db/cm. Este valor es calculado como una contribución de pérdidas de luz en el acoplamiento fibra-guía, transmitancia de los lentes en el arreglo, distribución del modo de propagación, índices de refracción de los medios involucrados etc.

El coeficiente de pérdidas de propagación está definido por la siguiente expresión:

$$t_{\omega} = I_o e^{-\alpha_{\omega} L} \quad (34)$$

Donde t_{ω} es la transmitancia en la guía, I_o es la intensidad inicial, α_{ω} el coeficiente de pérdidas de propagación y L la longitud de propagación. Por lo que para obtener el valor de α_{ω} la expresión toma la forma

$$\alpha_{\omega} = -\frac{\ln |t_{\omega}|}{L} \quad (35)$$

Para poder el valor de t_{ω} , se calcula la transmitancia total del sistema mediante la expresión

$$T = t_{f-\omega} \eta_o t_{\omega} t_{out} t_m \quad (36)$$

$$t_{\omega} = \frac{T}{t_{f-\omega} \eta_o t_{out} t_m} \quad (37)$$

Donde $t_{f-\omega}$ es la reflexión de Fresnel en la cara de entrada de la guía de onda, η_o el acoplamiento del modo de la fibra y la guía de onda, t_{out} las reflexiones de Fresnel en la cara de salida de la guía y t_m la transmitancia del microscopio (Márquez H. et al., 2013). El factor de acoplamiento fibra-guía η_o se define de la siguiente manera:

$$\eta_0 = \frac{\left(\sqrt{w_1} \left(\frac{w_1}{w_0} + \frac{w_0}{w_1} \right)^{-\frac{1}{2}} + \sqrt{w_2} \left(\frac{w_2}{w_0} + \frac{w_0}{w_2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right)^2}{\frac{w_1 + w_2}{2} \left(\frac{w_3}{w_0} + \frac{w_0}{w_3} \right)} \quad (38)$$

Donde ω_0 es la cintura del modo de la fibra y ω_1 , ω_2 y ω_3 son las medias cinturas de las distribuciones del modo de la guía de onda. La reflexión de Fresnel en la cara de entrada se obtiene como $t_{f-\omega} = 1 - \eta_R$, donde η_R es la reflexión de Fresnel en la interfaz fibra-guía definida como:

$$\eta_R = \frac{\left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 + \left(\frac{n_f - n_2}{n_f + n_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right) \left(\frac{n_f - n_2}{n_f + n_2} \right) \cos \left(4\pi n_2 g \frac{1}{\lambda} \right)}{1 + \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 + \left(\frac{n_f - n_2}{n_f + n_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right) \left(\frac{n_f - n_2}{n_f + n_2} \right) \cos \left(4\pi n_2 g \frac{1}{\lambda} \right)} \quad (39)$$

y t_{out} como $t_{out} = 1 - R$. La transmitancia total se calcula con la medición de potencia a la salida del sistema con respecto a la potencia de entrada proveniente de la fuente de luz. El diagrama en la figura 24 muestra el arreglo utilizado para realizar esta medición. Este sigue un principio similar al arreglo de propagación previamente presentado, consistiendo en una fuente láser que tiene acoplada una fibra óptica monomodal para una longitud de onda de operación de 633 nm; esta fibra se coloca en el canto de entrada de la guía de onda fabricada con la finalidad de realizar el acoplamiento óptico el modo saliente de la fibra a la guía de onda plana. La imagen de la luz de salida de la guía de onda es captada por un sistema de adquisición de imágenes microscópico. Al salir, esta imagen pasa por dos rendijas que ayudan a aislar el ruido en la imagen perteneciente a la luz que pasa por el sustrato y por el aire, dejando únicamente la luz de la guía. La imagen restante se enfoca con un lente en un detector de potencia el cual arroja una medición de intensidad, la cual corresponde a la potencia de salida de la guía de onda plana, valor usado en los cálculos de pérdidas de propagación.

4.3.3 Elipsometría



Figura 25. Equipo de Elipsometría J. Woollam M-2000 para Elipsometría de Ángulo Variable (VASE). Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California campus Mexicali.

La elipsometría es una técnica para el análisis de superficies y películas delgadas. Se basa en la medición del cambio de estado de polarización de un haz de luz causado por la reflexión sobre la superficie del material o la transmisión a través del material. A partir del cambio de estado de polarización se pueden determinar los espesores y propiedades ópticas de un material. Las mediciones se hicieron sobre las guías fabricadas en sílice, aunque también se realizaron mediciones de testigos de Al_2O_3 sobre silicio con H_2O y con O_3 . Se hizo una recolección de datos para 3 ángulos.

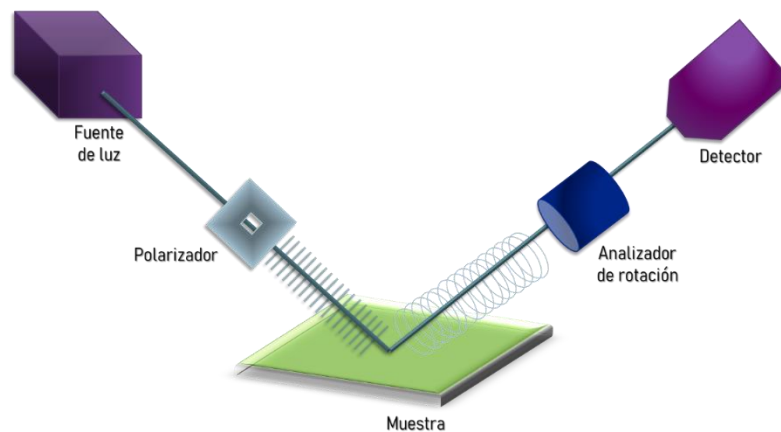


Figura 26. Diagrama de funcionamiento de una medición de elipsometría.

4.3.4 SEM



Figura 27. Equipo JEOL JSM-5300 (SEM) de la Unidad de Nanocaracterización UNaC del CNyN UNAM.

La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) permite la detección de señales de electrones secundarios retrodispersos. Los electrones secundarios proporcionan información topográfica de la muestra, permitiendo distinguir interfaces de materiales, estructuras en el material y rugosidades. Se caracterizaron el espesor de película por cada depósito, utilizando los testigos correspondientes a un voltaje de 15 kV; las muestras no requirieron preparación previa.

4.3.5 FTIR y XPS

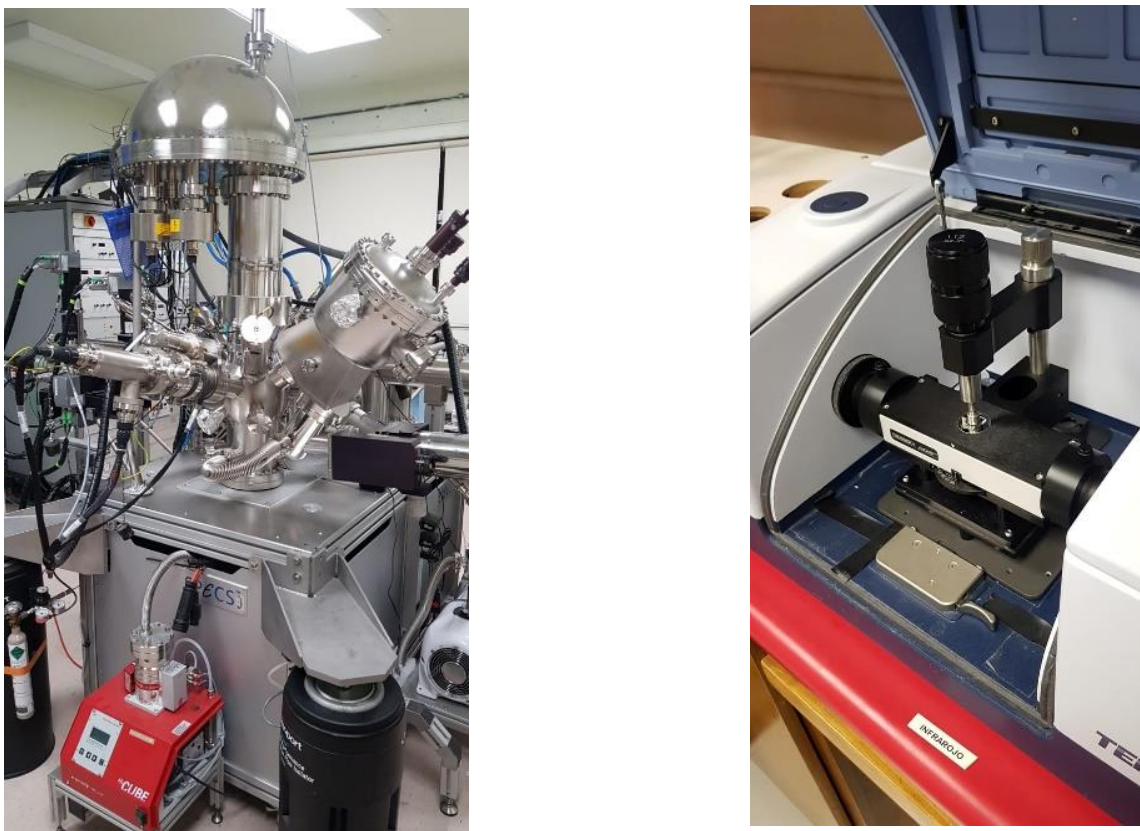


Figura 28. De izquierda a derecha: Equipo de espectroscopía de fotoelectrones de rayos X de alta resolución (XPS-HR) SPECS y Equipo de Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier con Reflexión Total Atenuada (FTIR: ATR). Ambos pertenecientes a CNyN UNAM.

La técnica de espectroscopía fotoelectrónica de rayos-X es una técnica analítica superficial para análisis de composición química, tanto cualitativa como cuantitativa, que además permite determinar el estado químico de los elementos en la superficie de un material. Consiste a grandes rasgos en la excitación mediante un haz de rayos-X de los niveles más internos de los átomos, provocando la emisión de fotoelectrones que nos proporcionan información sobre la energía de cada nivel y, por tanto, sobre la naturaleza de cada átomo emisor. La caracterización de la composición química de la superficie se realizó a un testigo de una fabricación de 750 nm con H_2O y a otro de una fabricación de O_3 del mismo espesor haciendo un análisis superficial sin erosión ni variación en ángulo.

De manera similar, la espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se utiliza para detectar la composición química de un bulto de material. Cuando se exponen a la radiación infrarroja, las moléculas absorben radiación a longitudes de onda muy específicas dependiendo de su composición. Sabiendo esto, se hace pasar radiación infrarroja a través de una muestra y se usa un sensor en el otro lado para identificar las moléculas que se encuentran en esa muestra. Las mediciones de FTIR se realizaron en las guías fabricadas.

4.3.7 Acoplamiento por prisma

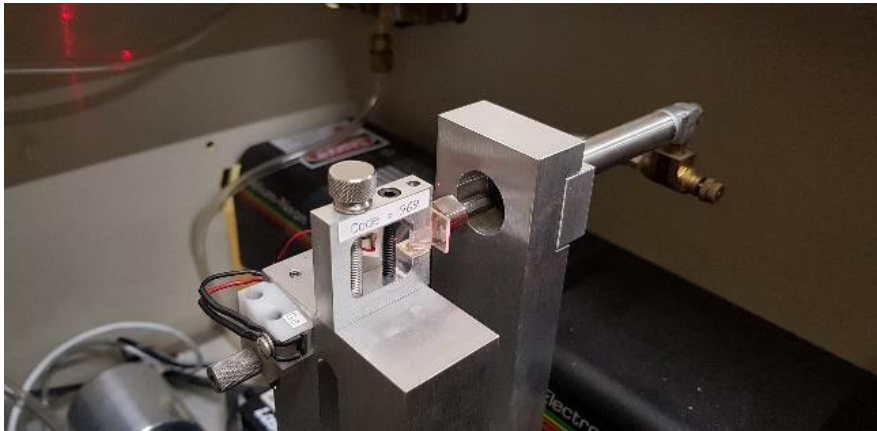


Figura 29. Sistema de acoplamiento por prisma de alto índice Metricon Modelo 2010. Laboratorio de Películas Delgadas, CICESE.

En la prueba de acoplamiento por prisma es utilizada para la obtención del valor experimental del índice de refracción efectivo, n_{eff} de las guías fabricadas. Esta prueba consiste un haz incide de luz en una muestra determinada la cual esta oprimida contra la base de un prisma gracias a un pistón neumático; la parte de la muestra con la película depositada debe estar en contacto con la base del prisma. Esto crea un pequeño gap de aire entre la película y el prisma.

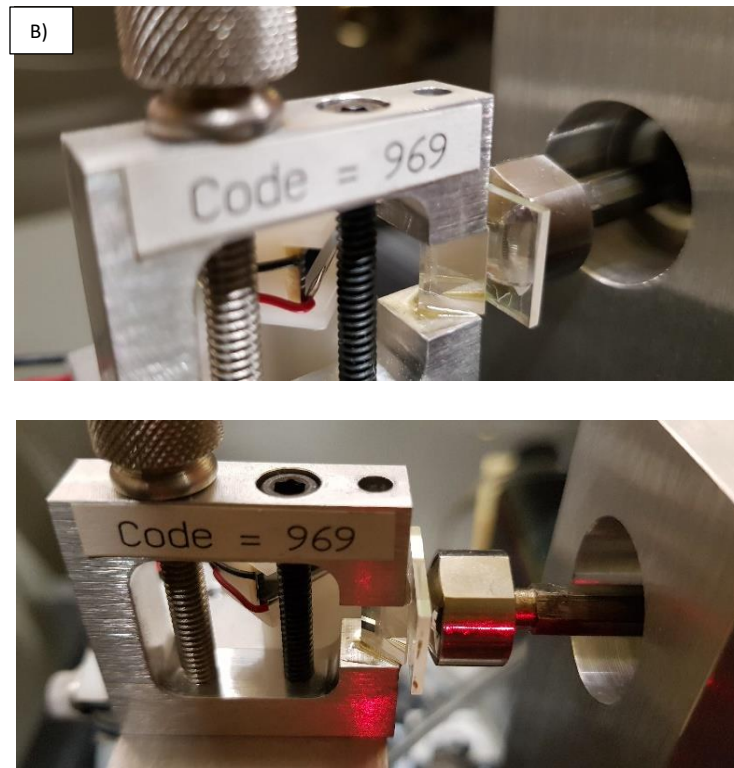
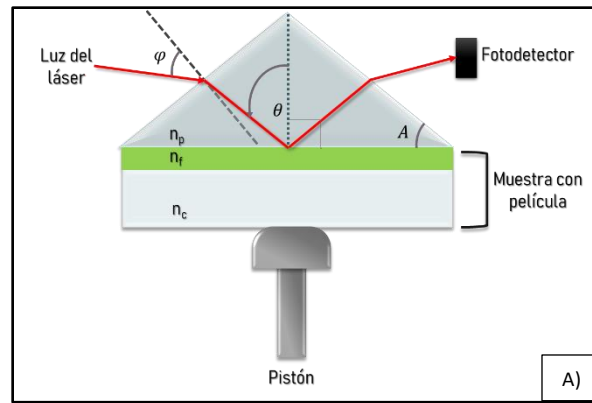


Figura 30. A) Diagrama de funcionamiento del Metricon 2010 y B) Guía de onda de Al_2O_3 en el sistema de acoplamiento por prisma.

Después de realizar el contacto, el haz de un láser incide en la base del prisma y es reflejado hacia un fotodetector. Para ciertos valores discretos del ángulo de incidencia, la luz puede viajar a través de gap de aire existente entre la película y la base del prisma, entrando a la guía y propagándose ópticamente. La propagación de este determinado modo provoca una caída en la intensidad de luz medida por el fotodetector. Esta caída puede verse en un espectro arrojado por el equipo.



Figura 31. Láser de 633 nm incidiendo en una guía de onda de Al_2O_3 , acoplamiento por prisma.

A través de una aproximación el ángulo en el que se encuentra el primero modo de propagación, se determina el índice de refracción efectivo de la guía, mientras que la diferencia angular entre modos determina el espesor aproximado de la película. El cálculo del valor del índice de refracción efectivo n_{em} asociado a la película analizada se realiza mediante la ecuación (40)

$$n_{em} = n_{prisma} \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{\theta}{n_{prisma}} \right) + A \right] \quad (40)$$

Donde n_{prisma} es el índice de refracción del prisma. El haz del láser incide sobre el prisma con un determinado ángulo φ , el cual está asociado al ángulo θ , que es ángulo de incidencia en la película y en conjunto al ángulo A interno del prisma y al índice de refracción del prisma, se obtiene el valor del índice de refracción del modo propagado.

Capítulo 4. Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de las muestras fabricadas por ALD. La caracterización muestra que las guías de onda fabricadas utilizando ozono son viables y funcionales, mostrando algunas diferencias en sus propiedades ópticas y como material. A continuación se explora realizando una comparación entre las propiedades obtenidas de cada muestra fabricada con cada reactante.

4.1 SEM

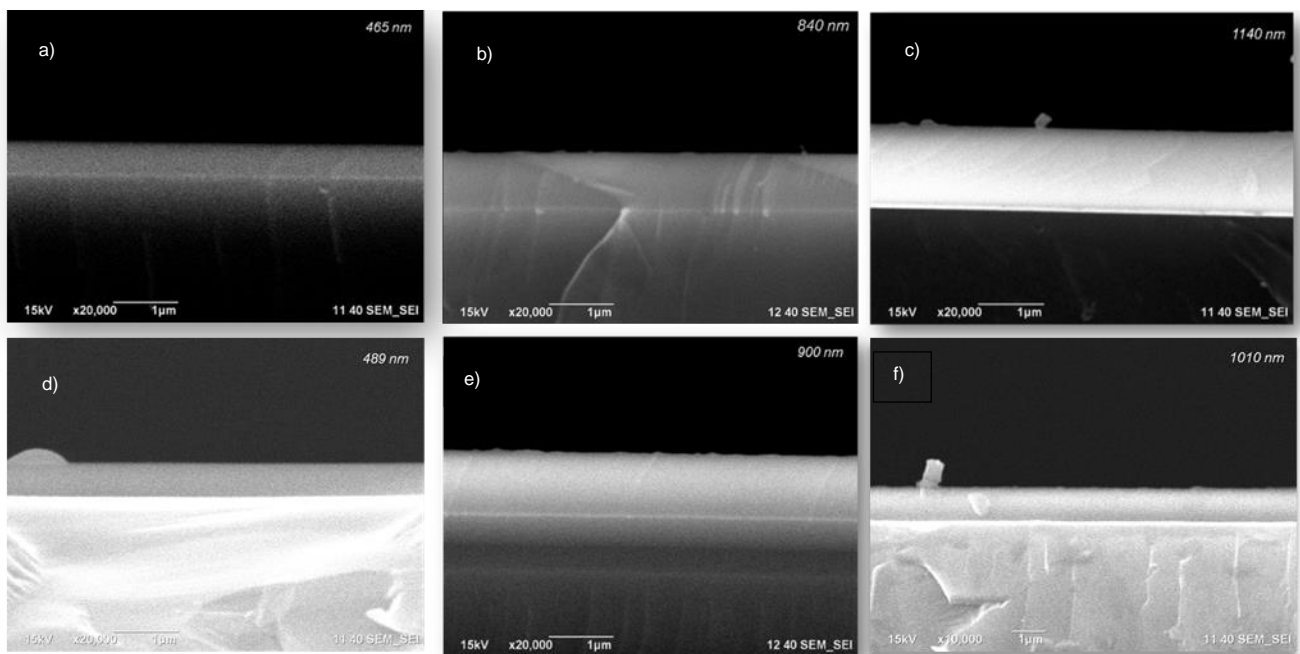


Figura 32. Vista transversal de testigos de SiO_2 , pertenecientes a cada fabricación con H_2O (a, b y c) y con O_3 (d, e, f).

Se realizó un corte transversal a un testigo de cada fabricación de guías de onda, con el fin de observar el crecimiento de la película de alúmina. Fue necesario realizar este análisis sobre testigos de silicio debido a que la montura del equipo no permitía colocar un sustrato de sílice. En el caso de las guías fabricadas utilizando H_2O se obtuvieron espesores de 465 nm, 840 nm y 1140 nm. Por otro lado, las guías fabricadas con O_3 tuvieron espesores de 489 nm, 900 nm y 1010 nm. Las imágenes obtenidas muestran el crecimiento homogéneo de la capa de Al_2O_3 .

4.2 FTIR y XPS

Con el objetivo de detectar la posible presencia de carbono en las películas depositadas, se realizaron análisis de FTIR y XPS a las muestras obtenidas para ambos reactantes. Las mediciones de FTIR se efectuaron sobre las guías de onda (película de alúmina sobre sustrato de sílice), mientras que el análisis de XPS se realizó sobre testigos de las fabricaciones. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para ambas caracterizaciones, haciendo una comparación entre los espectros obtenidos para muestras fabricadas con H₂O y muestras fabricadas con O₃.

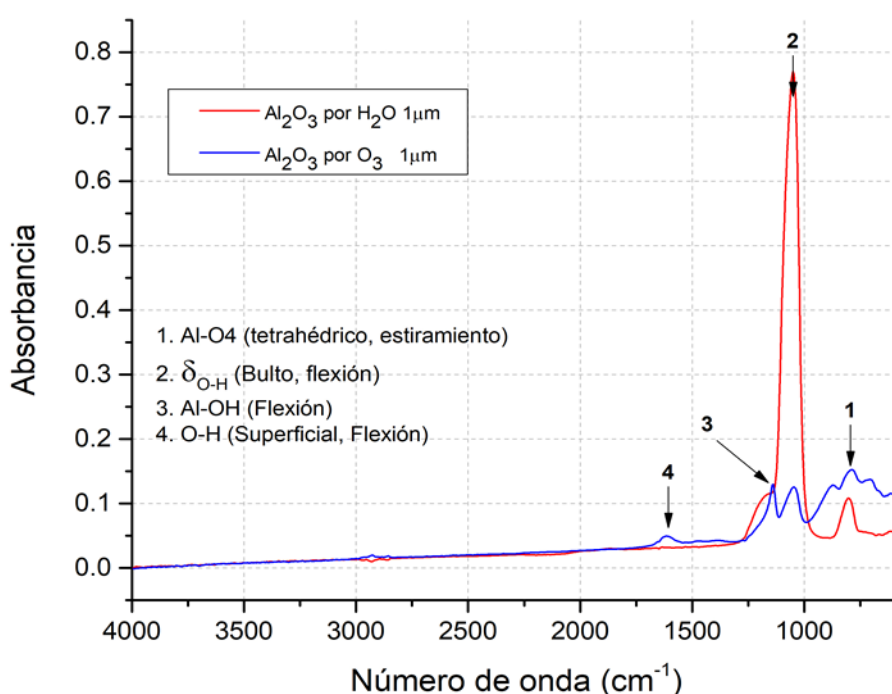
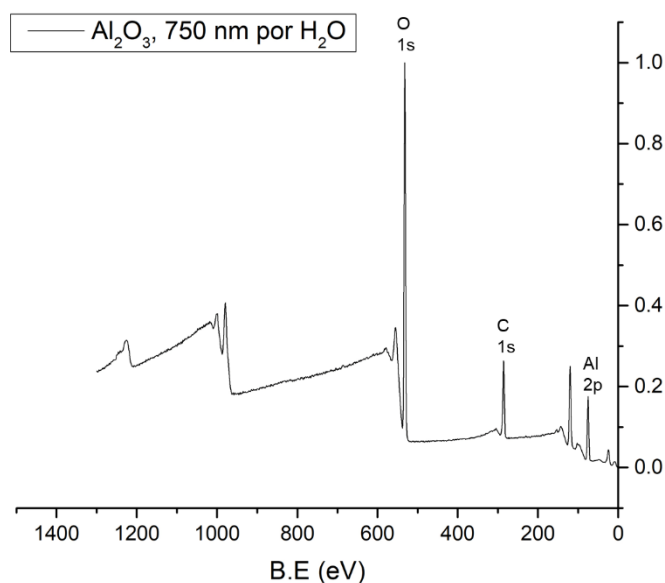


Figura 33. Espectros de absorción obtenidos por FTIR para guías de onda de Al₂O₃. A) Comparación de espectros de absorción de una guía fabricada con H₂O y otra fabricada con O₃.

La gráfica anterior muestra picos muy notorios en 789 cm⁻¹ (1), 1050 cm⁻¹ (2), 1145 cm⁻¹ (3) y 1616 cm⁻¹ (4). El pico (1) centrado en 789 cm⁻¹ es propio de un fuerte estiramiento de Al-O₆ octahédrico, reportado en la región de 750 cm⁻¹ a 600 cm⁻¹ por Morterra y Magnacca en 1996. De igual forma, los pequeños picos alrededor del (1), los cuales se encuentran centrados en 875 cm⁻¹ y 700 cm⁻¹ pueden ser atribuidos a estiramientos derivados de la vibración de la red de Al-O₄ condensados que se encuentran entrelazados (Morterra y Magnacca, 1996). Esto muestra la presencia de diferentes especies de Al en las muestras fabricadas por ALD.

Ahora bien, se puede observar que el pico de mayor intensidad es el número (2), centrado en 1050 cm^{-1} . Este pico se encuentra asociado a la presencia de grupos O-H en el bulto denominados $\delta_{\text{O-H}}$. Estos $\delta_{\text{O-H}}$ se encuentran asociados directamente al bulto, a la película como tal, no a su superficie. Los O-H asociados a la superficie son químicamente diferentes a los O-H del bulto y sus constantes de fuerza vibracional también (Morterra y Magnacca, 1996). En contraste, el pico número (4) centrado en 1616 cm^{-1} se atribuye a grupos O-H en la superficie (Demirtaş et al.,2018). El análisis de FTIR muestra mayor presencia de $\delta_{\text{O-H}}$ en la muestra fabricada con H_2O que en la fabricada con O_3 , lo que podría contribuir en las pérdidas de propagación en cada tipo de guía., puesto que estos están asociados a impurezas que pueden incrementar el nivel de pérdidas de propagación (Demirtaş et al.,2018). Por otro lado, la presencia de diferentes especies de Al en las muestras puede indicar que entre ellas existen propiedades diferentes que podrían ser asociadas a características como cristalinidad o densidad de película. Más adelante se detallarán las diferencias ópticas encontradas entre ambos tipos de muestras.

La medición de FTIR no muestra picos notorios que puedan asociarse a la presencia de carbono en el bulto como tal en ninguno de los dos espectros, aunque podría no ser lo suficiente sensible como para detectarlo. Esto puede comprobarse a través de otra prueba de composición química, como lo es un análisis de XPS. A continuación, se presentan los espectros de XPS, que, de forma similar al caso anterior, fueron obtenidos para una muestra fabricada con H_2O y otra fabricada con O_3 .



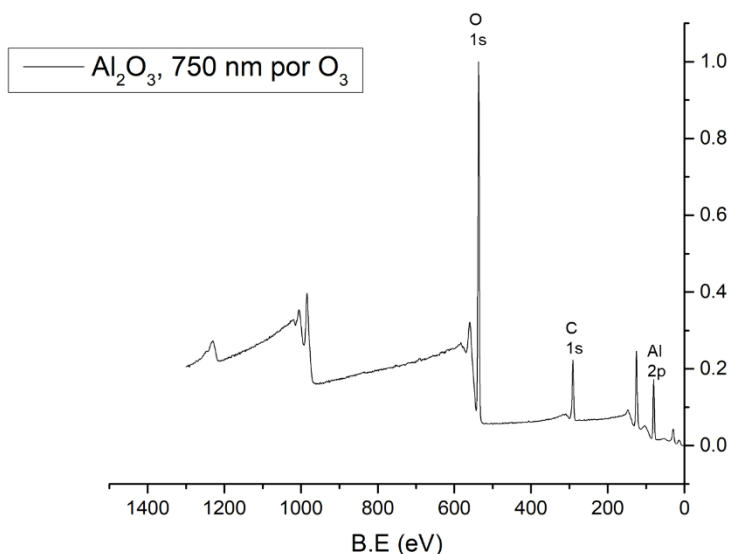
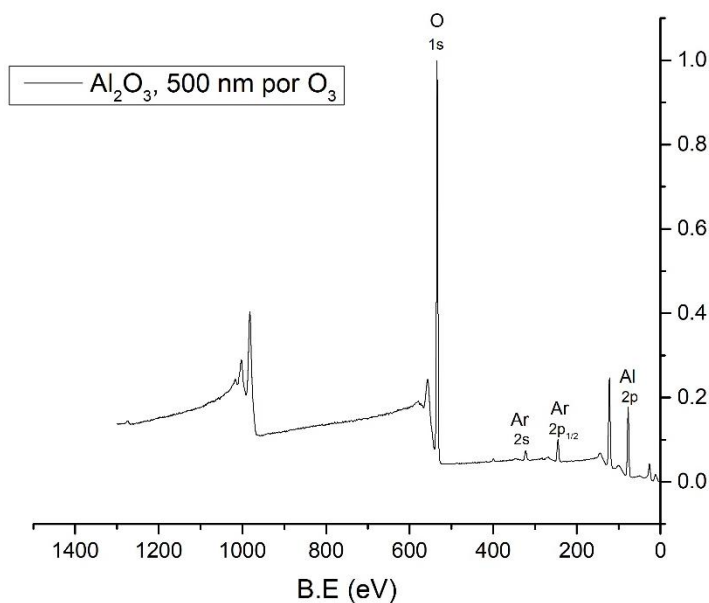


Figura 34. Espectros de XPS para testigos de silicio de Al_2O_3 . A) Utilizando H_2O como reactante y B) Utilizando O_3 como reactante.

Los espectros anteriores muestran los picos característicos de oxígeno (O 1s), aluminio (Al 2p) y carbono (C 1s). Como se puede apreciar, ambos espectros de emisión son iguales, lo que inicialmente indica la presencia de carbono en ambas muestras. Estas mediciones se realizaron directamente en la superficie de testigos de silicio, pertenecientes a diferentes fabricaciones usando H_2O y O_3 . Por lo tanto, el carbono encontrado en estas mediciones está limitado a la superficie. La profundidad de penetración de un análisis superficial sin erosión es de 10 nm aproximadamente, por lo que para comprobar o refutar la existencia de carbono en las películas se realizó otro análisis, erosionando otro testigo de fabricación con iones de Ar^+ (200 nm de erosión). Se realizó de nuevo la medición, obteniendo como resultado la disminución significativa de la intensidad del pico perteneciente al carbono.



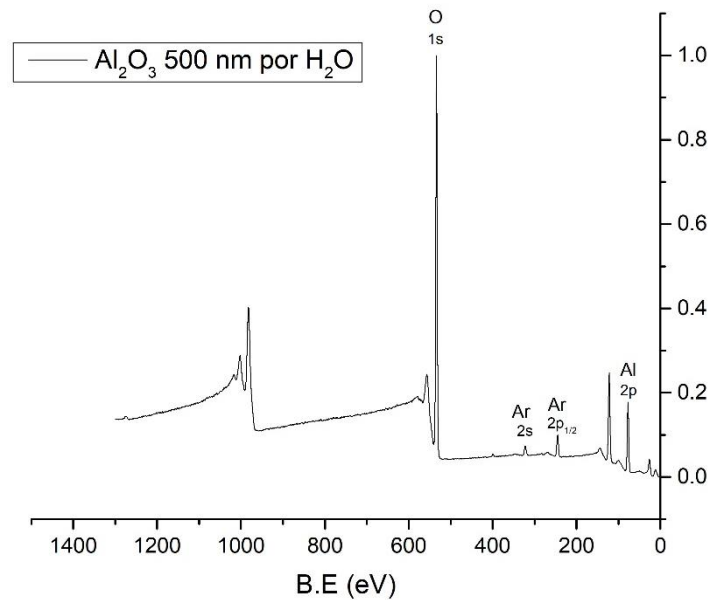


Figura 35. Espectros de XPS para testigos de silicio de Al_2O_3 de 500 nm de espesor, con 200 nm de erosión.

Como se puede apreciar en la gráfica anterior, el pico de carbono presente en los dos espectros de XPS anteriores presenta una disminución de intensidad muy significativa, lo que indica poca presencia de carbono en la película. El análisis de la ventana de carbono en las mediciones con erosión indica una señal muy débil de emisión, cercana al límite de detección (<1%) confirmando así que las guías de onda fabricadas por la técnica de ALD cuentan con poca presencia de carbono.

4.3 Propiedades ópticas de la película

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos de mediciones de elipsometría, así como las curvas de dispersión obtenida para Al_2O_3 fabricado a 250°C por ALD. Se realizaron mediciones de elipsometría a las guías de onda directamente. Retomando el principio de funcionamiento de la elipsometría, la medición consiste en la incidencia de un haz de luz polarizada en la película, para después obtener la razón de cambio entre los coeficientes de reflexión (Lizárraga, 2016). Con los coeficientes de reflexión (r_s y r_p) se calcula el cambio en la amplitud y la fase entre las 2 ondas de polarización s y p respectivamente con la expresión:

$$\tan(\psi)e^{i\Delta} = \frac{r_s}{r_p} \quad (41)$$

donde el ψ es la razón de amplitud entre los coeficientes de reflexión y Δ es la diferencia de fase de la luz reflejada s y p (Lizárraga, 2016).

La obtención de datos en las mediciones de elipsometría se realiza variando el ángulo de incidencia en 55°, 65° y 75°, para los cuales se calculan los valores anteriormente generados. Una vez obtenidos los datos, utilizando un modelo de función dieléctrica se realiza un cálculo de las propiedades del material estudiado, como el índice de refracción, coeficiente de extinción, espesor, rugosidad, etc. De acuerdo con las características del material se selecciona el modelo adecuado para calcular las propiedades de este. Para el caso de películas dieléctricas, los modelos utilizados suelen ser Sellmeier y Cauchy para películas transparentes y Cody Lorentz y Tauc Lorentz para películas que absorben. Para las mediciones realizadas se propuso el modelo de Tauc-Lorentz, basado en el oscilador de Lorentz, debido a que, al realizar el ajuste del modelo a los datos obtenidos de la medición, el error cuadrado medio (MSE) era relativamente bajo (menor a 20). Estas mediciones se realizaron sobre las guías de onda directamente (película de Al_2O_3 sobre sílice).

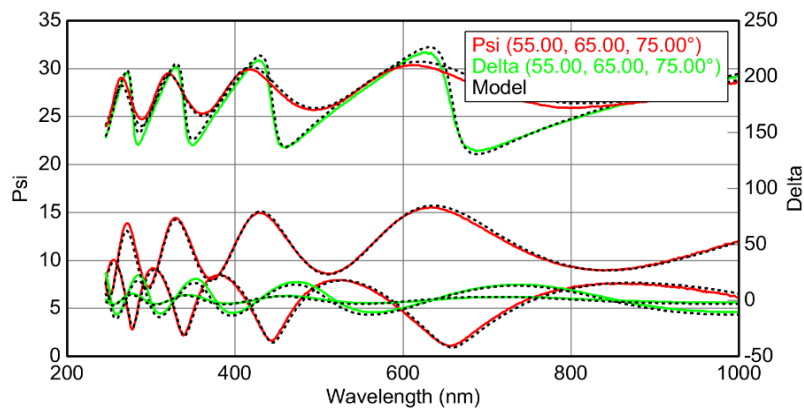


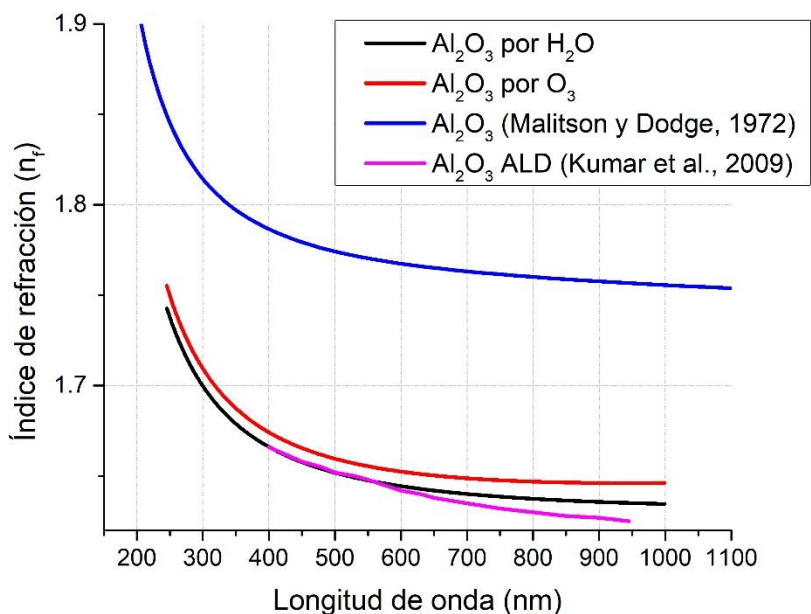
Figura 36. Curvas ψ Δ y ajuste del modelo de Tauc Lorentz para una muestra de H_2O desde el programa CompleteEASE para procesamiento de datos de elipsometría.

A partir de las mediciones de elipsometría se obtuvieron valores de espesor de película e índice de refracción para la película de Al_2O_3 . Se realizó inicialmente el ajuste para una muestra de 500 nm fabricada con H_2O y al obtener el índice de refracción propuesto en las simulaciones, se fijó como modelo de ajuste para el resto de los datos. A continuación, se presentan los datos obtenidos de las mediciones de elipsometría realizadas a una guía de cada espesor propuesto, por reactante.

Tabla 2. Tabla de espesores, índices de refracción y MSE obtenidos en las mediciones de elipsometría.

	Muestra	Espesor medido (± 0.05 nm)	Índice de refracción	MSE
H ₂ O como reactante	G101 (500 nm)	464.31	1.642	6.37
	G112 (750 nm)	779.92	1.642	2.86
	G114 (1000 nm)	1094.41	1.642	3.79
O ₃ como reactante	G125 (500 nm)	455.98	1.651	16.76
	G118 (750 nm)	879.35	1.651	4.74
	G120 (1000 nm)	1051.51	1.651	14.08

Se puede observar en la tabla anterior que el valor de los espesores medidos por elipsometría difieren ligeramente con respecto a los valores obtenidos en SEM, en algunos casos variando nanómetros y en otros en decenas de nanómetros. Si bien el espesor obtenido hasta el momento por ambas técnicas es diferente, el espesor mostrado en las mediciones de elipsometría coincide los datos de índice de refracción efectivo que fueron calculados. Por lo tanto, se toman estos valores de espesor como referencia para la presentación de los datos de índice de refracción efectivo medidos por acoplamiento por prisma. De igual manera, el índice de refracción de las películas con ozono se muestra ligeramente mayor al de las películas con agua, siendo 1.642 para las muestras de agua y de 1.651 para las muestras de ozono.

**Figura 37.** Curvas de dispersión de Al_2O_3 utilizando H_2O y O_3 como reactantes por ALD, dispersión de Al_2O_3 fabricada por ALD usando H_2O por Kumar et. al, 2009 y dispersión de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Safiro) reportada por Malitson y Dodge, 1972.

También es interesante señalar que el modelo propuesto parece ajustar de manera adecuada a las muestras fabricadas con H_2O , pero arroja valores de MSE más altos en el caso de dos guías fabricadas por O_3 . Esto podría deberse a la existencia de diferencias estructurales como porosidad o mayor densidad entre películas, así como a una diferente estequiometría del Al_2O_3 . Para analizar lo anteriormente expuesto, se presentan las curvas de dispersión correspondientes a Al_2O_3 fabricado con diferentes reactantes.

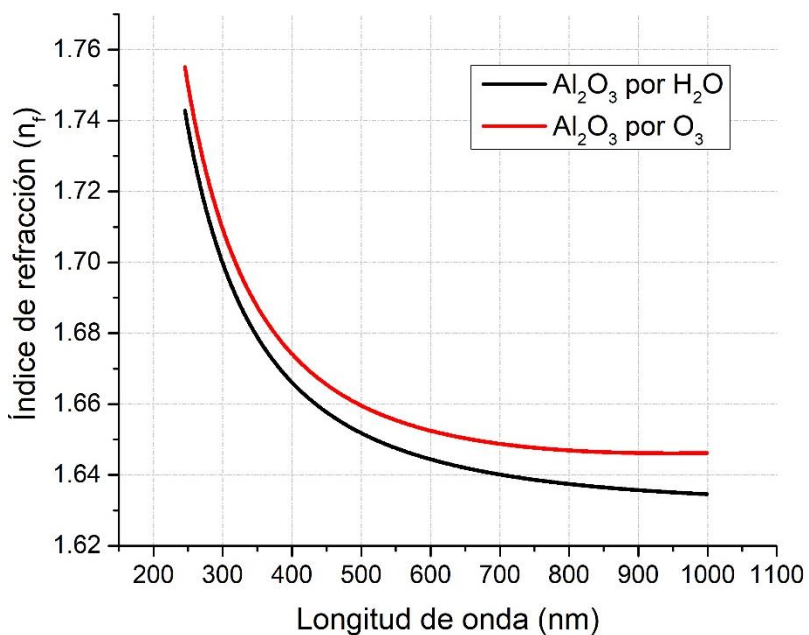


Figura 38. Curvas de dispersión de Al_2O_3 utilizando H_2O y O_3 como reactantes.

Las curvas de dispersión mostradas en la Fig. 38 fueron realizadas con los datos obtenidos de las mediciones de elipsometría de dos muestras, una realizada con H_2O y otra con O_3 . Puede notarse un aumento en los valores de índice de refracción correspondientes a las muestras de ozono. Se analizará la influencia de este cambio de índice de refracción y sus repercusiones en las siguientes secciones.

4.4 Distribución del campo eléctrico

Las imágenes de distribución de la luz se pueden observar durante el acoplamiento fibra-guía. A partir de las imágenes obtenidas del acoplamiento, se puede obtener la distribución de intensidad del modo propagado por la guía en cuestión. A continuación, se muestran las distribuciones de intensidad correspondientes a las diferentes muestras fabricadas.

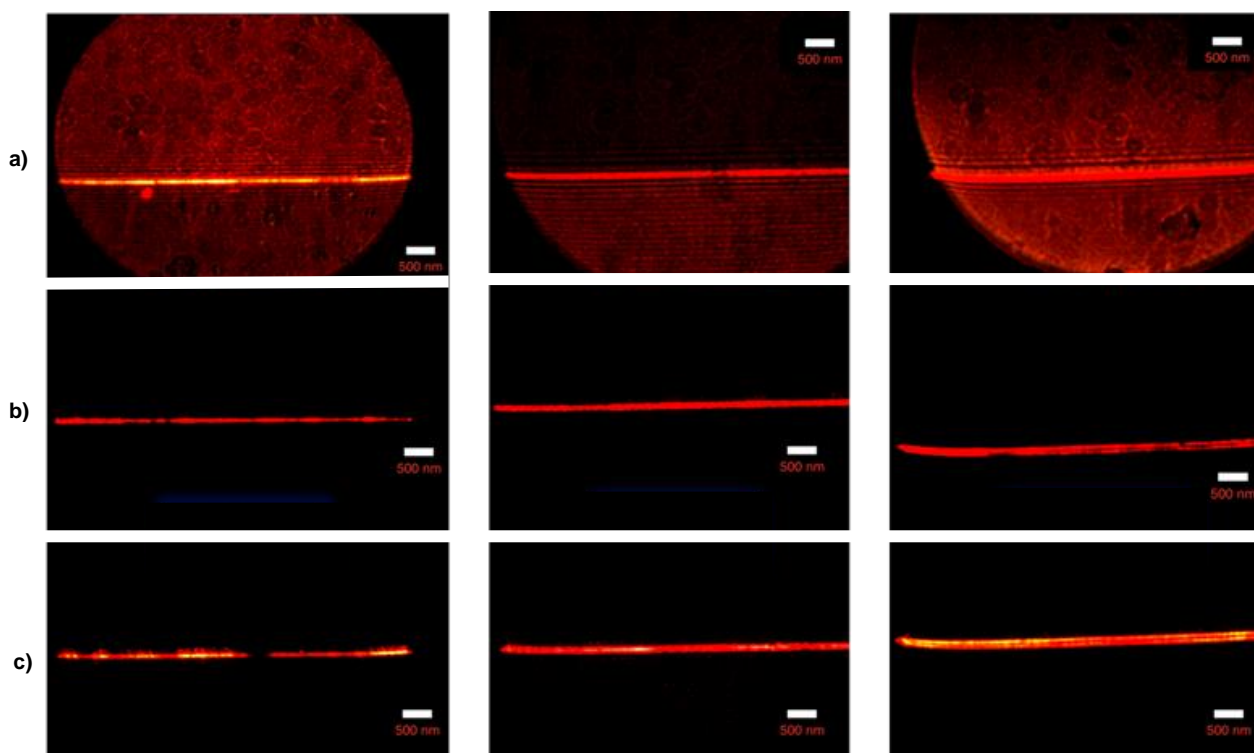


Figura 39. De izquierda a derecha: Imágenes de distribución de intensidad de la luz para 500 nm, 750 nm y 1000 nm. Luz acoplada obtenida por medio de una cámara CCD a diferentes potencias de entrada: a) Luz blanca b) 0.05 mW y c) 0.08 mW.

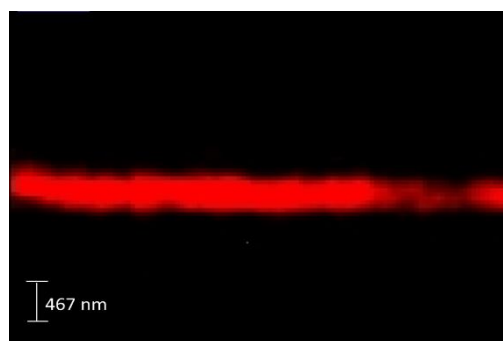


Figura 40. Distribución de intensidad de la luz en guía de onda de 500 nm de espesor fabricada con O_3 .

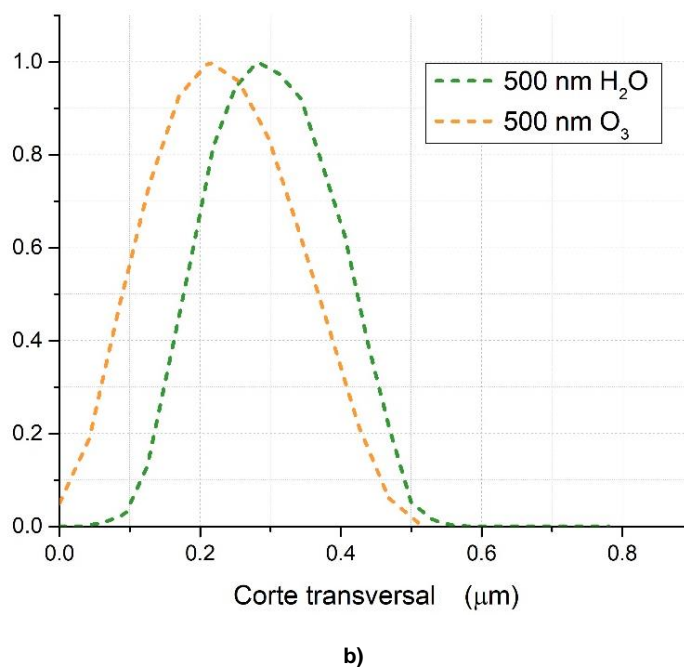
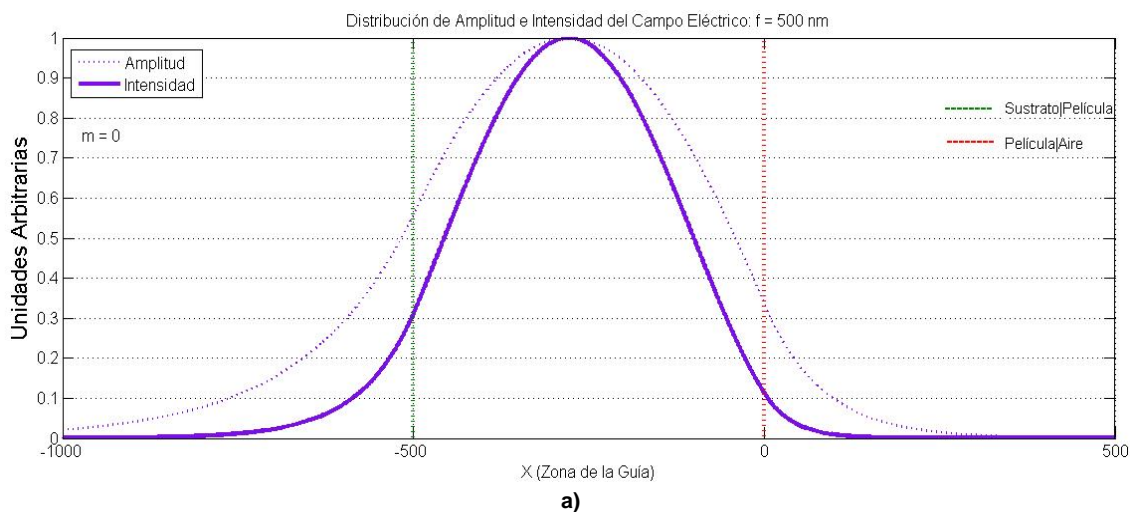


Figura 41. a) Distribución de intensidad del campo eléctrico esperada para guías con 500 nm de espesor de núcleo. b) Distribución de intensidad del campo eléctrico experimental obtenida para guías del mismo espesor, H₂O y O₃.

Las distribuciones de campo eléctrico obtenidas a partir de la distribución de intensidad de la luz de las muestras de 500 nm usando ambos reactantes muestran la misma forma tanto entre ellas como con la distribución simulada previamente. El ancho de la distribución de la intensidad para el caso de la película de 500 nm de O₃ fue de 470 nm, mientras que el de la película fabricada con O₃ fue de 467 nm aproximadamente, utilizando una retícula micro graduada (criterio $1/e^2$) lo que muestra un ancho modal ligeramente menor en la película de ozono. Esto es consistente con los resultados de elipsometría, donde

se observa que las muestras de agua tienen menor índice de refracción que las de ozono. Como indica la ecuación (31), en el ancho modal efectivo existe una dependencia del índice de refracción del núcleo por medio del factor de asimetría, lo que indicaría una diferencia entre los anchos modales si se tienen núcleos de diferente índice de refracción. Como se observa en la gráfica correspondiente a ancho modal de la sección 2, estos anchos modales son cercanos al valor del ancho modal correspondiente a 500 nm polarización TE monomodal, 475 nm. Sin embargo, es importante recalcar que la luz propagada en esta muestra es no polarizada y que, aunque por el espesor se conoce que el único modo propagado es el fundamental, el valor del ancho modal no corresponde exactamente al calculado, difiriendo por 100 nm y 8 nm para H₂O y O₃ respectivamente.

4.5 Acoplamiento por prisma

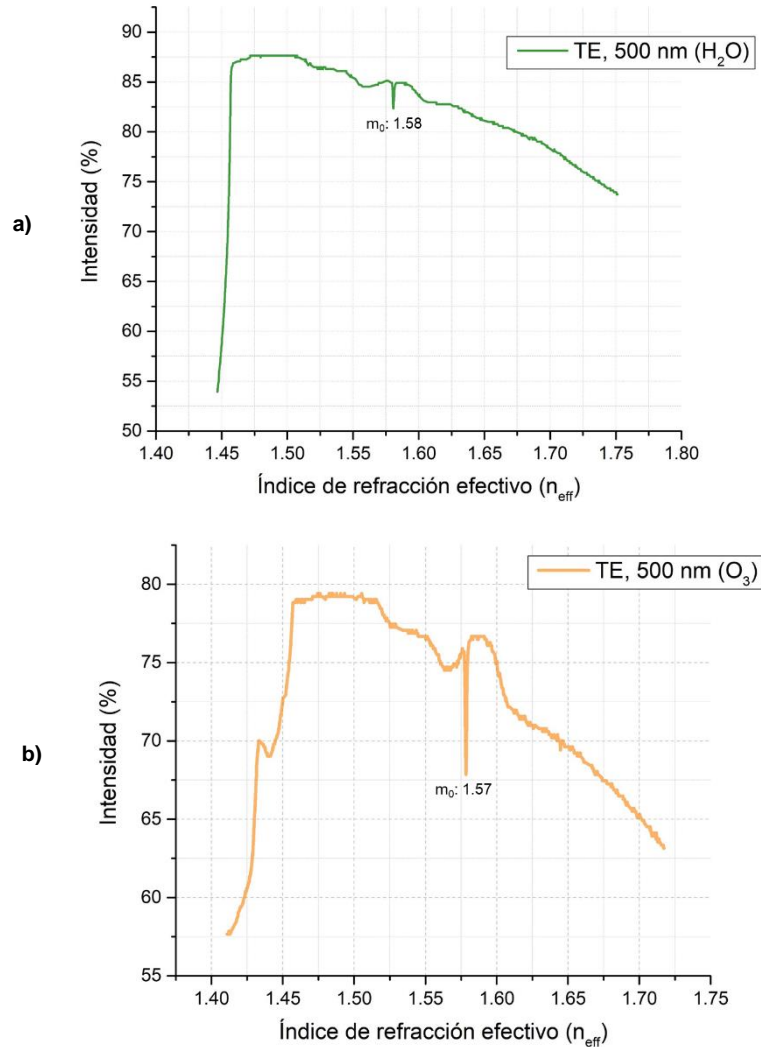


Figura 42. Curvas obtenidas a partir del acoplamiento por prisma para muestra fabricada con a) H₂O y con b) O₃.

Las gráficas anteriores muestran las curvas correspondientes al acoplamiento por prisma de las películas de 500 nm con polarización TE. Se puede apreciar que la caída más significativa (es decir, el momento en que la luz se acopla en la película y deja de llegar intensidad al fotodetector) se encuentra en 1.58 para la muestra con H₂O y en 1.57 para la muestra con O₃; estos valores son el índice de refracción efectivo del modo fundamental de ambas muestras, los cuales muestran una diferencia ligera, pero detectable por el equipo de acoplamiento por prisma de 0.01. A continuación, se presenta el cálculo de los valores de índice de refracción efectivo para los modos de propagación de cada guía, considerando los resultados de elipsometría. De manera similar, se presentan los valores experimentales de índice de refracción efectivo para los modos de propagación de cada guía por reactante, obtenidos mediante la técnica de acoplamiento por prisma.

Tabla 3. Índices de refracción efectivos calculados para TE y TM con los espesores obtenidos mediante la técnica de elipsometría

		VALORES CALCULADOS (n_{eff})						
	Numeración	Espesor por elipsometría	Modo 0		Modo 1		Modo 2	
			TE	TM	TE	TM	TE	TM
H ₂ O como reactante ($n_f=1.642$)	G100	463 nm	1.57	1.56				
	G113	780 nm	1.61	1.6	1.51	1.5		
	G115	1093 nm	1.62	1.62	1.57	1.56	1.48	1.47
O ₃ como reactante ($n_f=1.651$)	G125	450 nm	1.58	1.56				
	G117	897 nm	1.62	1.62	1.54	1.53		
	G119	1055 nm	1.63	1.62	1.57	1.56	1.48	1.46

Tabla 4. Índices de refracción efectivos medidos para TE y TM, por reactante.

		VALORES MEDIDOS (n_{eff})							
		Numeración	Espesor por elipsometría	Modo 0		Modo 1		Modo 2	
				TE	TM	TE	TM	TE	TM
H ₂ O como reactante	G100	463 nm	1.58	1.56					
	G113	780 nm	1.61	1.61	1.52	1.5			
	G115	1093 nm	1.63	1.62	1.57	1.56	1.48	1.47	
O ₃ como reactante	G125	450 nm	1.57	1.56					
	G117	897 nm	1.61	1.61	1.54	1.53			
	G119	1055 nm	1.62	1.62	1.56	1.55	1.47	1.46	

Se observa en la Tabla 4 que algunos de los valores de índice de refracción efectivo medidos para las muestras de ozono difieren en 0.01 de los valores calculados para el índice de refracción obtenido por elipsometría para estas muestras. Análogamente, valores obtenidos de índice de refracción efectivo para las muestras de agua difieren por 0.01 también en varios casos, como en el del modo fundamental de los espesores de 500 nm y 1000 nm. Entre reactantes, la diferencia de índices también tiende a ser de 0.01. Esta fluctuación puede darse a raíz de la diferencia de índices de refracción de los núcleos, obtenidos por elipsometría y a la variación ligera entre los espesores de cada reactante, la cual es suficiente como para que el equipo de acoplamiento por prisma mida valores con 0.01 unidades de diferencia. Esto indica una ligera, pero presente diferencia entre la naturaleza de ambos grupos de guías de onda. En la sección de pérdidas por propagación se explorarán las diferencias existentes entre cada núcleo con respecto al reactante utilizado y su posible relación con las características propias de la propagación de la luz en las guías de onda.

4.6 Pérdidas de propagación

Los valores de pérdidas de propagación obtenidos muestran para ambos casos una disminución del coeficiente de pérdidas de propagación entre 3 y 4 dB/cm aproximadamente al incrementar el espesor del núcleo. De igual forma, hay una diferencia muy marcada entre las pérdidas obtenidas para las guías de H₂O y las obtenidas para las guías de O₃ en general, siendo estas últimas entre 1.5 a 3 dB/cm menores.

Tabla 5. Pérdidas de propagación para ambos grupos de fabricación.

	Muestra	Pérdidas de propagación α_w (cm ⁻¹)	Pérdidas de propagación α_w (dB/cm)
H ₂ O como reactante	500 nm	1.45	6.31
	750 nm	0.71	3.10
	1000 nm	0.69	3.03
O ₃ como reactante	500 nm	1.18	5.16
	750 nm	0.3	1.32
	1000 nm	0.11	0.51

Esta diferencia es mucho más notoria para los espesores de 750 nm y 1000 nm, lo que indica que el uso de ozono en la fabricación de guías de onda de Al₂O₃ por ALD puede reducir el valor de pérdidas de propagación. Las pruebas de FTIR y XPS no muestran un contenido de carbono que pueda considerarse mayor al 1% en ninguno de los casos de las muestras de H₂O o de O₃, por lo que puede considerarse que en los valores de pérdidas no existe una contribución significativa de carbono.

La literatura reporta que las películas de Al₂O₃ fabricadas con O₃ tienen una proporción atómica cercana a la estequiometría correspondiente a la del Al₂O₃ (Kim et al., 2013). Así mismo, las películas fabricadas utilizando H₂O como reactante contienen más grupos CH₃ sin reaccionar (Lin et al., 2015) que aquellas fabricadas con O₃. Los grupos CH₃ sin reaccionar de las muestras con agua podrían tener influencia en la propagación de la luz en la película, provocando esparcimiento de luz e incrementando el valor de las pérdidas de propagación de las guías fabricadas por agua. En contraste, la proporción atómica de las películas de O₃, siendo cercana a la estequiometría correspondiente a la del Al₂O₃ indica un material más estable, lo que parece mostrar una influencia de la estabilidad del material en la propagación de la luz.

Retomando los resultados obtenidos por FTIR, los valores de pérdidas de las muestras con H₂O, aquellas con mayor presencia de grupos O-H en el bulto, son notablemente mayores a los de las muestras de O₃,

lo que muestra que la presencia de O-H en el bulto es un factor crucial en la propagación de la luz. Es importante destacar que la pérdida inducida por $\delta_{\text{O-H}}$ puede asociarse a esparcimiento o absorción dependiendo de la longitud de onda de trabajo de la guía. Así mismo, La presencia de diferentes especies de Al entre ambos grupos de fabricación y el diferente índice de refracción entre ellos sugiere un cambio en la estequiometría, el cual también está asociado a pérdidas por esparcimiento (Chen, 2016).

Capítulo 5. Conclusiones y trabajo a futuro

Con base en el trabajo presentado, se concluye que el Al_2O_3 fabricado por la técnica ALD con H_2O o O_3 como reactantes es un material viable para ser utilizado para la fabricación de guías de onda y posiblemente de otros dispositivos de óptica integrada. El rango de espesores explorado durante el desarrollo de este trabajo muestra que el material propaga la luz en diferentes anchos de núcleo, aunque las pérdidas de propagación aumentan al utilizar espesores inferiores a 750 nm. Sin embargo, se demostró que el material es completamente funcional como núcleo de guía de onda en un régimen submicrón, dado que la propagación de la luz fue demostrada. Se demostró que el uso de ozono como reactante da origen a guías de onda de alúmina funcionales.

De igual forma, la comparativa entre el uso de H_2O u O_3 como reactantes durante el proceso muestra que ambos reactantes resultan en guías fabricadas con bajo contenido de carbono (< 1%). Las guías de ozono un índice de refracción de película mayor, mostrando un ancho efectivo ligeramente menor al de sus contrapartes fabricadas con agua, por lo que el uso de ozono en la fabricación de guías de onda por ALD a 250°C resulta en guías con menores pérdidas de propagación de luz que las fabricadas utilizando H_2O como reactante a la misma temperatura. Estas guías muestran una ventaja por sobre las fabricadas con H_2O , tanto en el visible debido a los valores de pérdidas como en NIR debido a la poca presencia de grupos O-H en el núcleo, los cuales sí se encuentran presentes en guías de H_2O . Así mismo, se sugiere que esta mejora en la propagación puede deberse a que las películas de ozono muestran un material más estequiométricamente estable, mostrando que la estabilidad del material puede influir en la propagación de la luz.

Se llega a la conclusión de que las guías de onda fabricadas usando O_3 como reactante tienen menores pérdidas de propagación que aquellas fabricadas con H_2O como reactante, ambas muestras fabricadas a 250°C. Las pérdidas mayores en las guías con H_2O pueden ser atribuidas a una combinación de factores entre los cuales se encuentran mayor presencia de grupos O-H en el bulto (en la película de H_2O como tal, no en su superficie), causando pérdidas por esparcimiento en el visible. También, una mayor estabilidad del material obtenido por ozono, así como un cambio en la estequiometría entre ambas películas.

Como trabajo a futuro se sugiere lo siguiente:

- Realizar un estudio más profundo sobre los efectos del ozono en las propiedades ópticas y de guiado en guías de onda fabricadas con este agente reactante cambiando las condiciones de fabricación.
- Realizar caracterizaciones concernientes a densidad de película y porosidad.
- Diseño y fabricación de guías de onda de canal basadas en películas de Al_2O_3 .
- Diseño y fabricación de estructuras de óptica integrada como anillos resonadores, divisores de haz, S-bends etc. basados en estas películas.

Literatura citada

- Adams, M. J., 1981. An introduction to optical waveguides (Vol. 14). New York: Wiley.
- Araiza, E. A., & Gonzales, F. J. 2007. Análisis de Guías de Onda y Dispositivos de Óptica integrada mediante simulaciones, Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México
- Barbos, C., Blanc-Pelissier, D., Fave, A., Blanquet, E., Crisci, A., Fourmond, E., ... & Lemiti, M. 2015. Characterization of Al₂O₃ thin films prepared by thermal ALD. *Energy Procedia*, 77, 558564.
- Batra, N., Gope, J., Vandana, Panigrahi, J., Singh, R., & Singh, P. K., 2015. Influence of deposition temperature of thermal ALD deposited Al₂O₃ films on silicon surface passivation. *AIP Advances*, 5(6), 067113.
- Beladiya, V., Faraz, T., Kessels, W. M. M., Tünnermann, A., & Szeghalmi, A. 2018, June. Controlling mechanical, structural, and optical properties of Al₂O₃ thin films deposited by plasma-enhanced atomic layer deposition with substrate biasing. In *Advances in Optical Thin Films VI* (Vol. 10691, p. 106910E). International Society for Optics and Photonics.
- Boudrioua, A. 2009. *Photonic Waveguides*. J. Wiley & Sons.
- Cervantes, J., Rangel, R., & Alvarado, J. J. 2017. Desarrollo de la metodología de Depósito Atómico en Capas en México. *Red de Energía Solar*, 2-8
- Chen, C. L., 2006. *Foundations for guided-wave optics*. John Wiley & Sons.
- Chen, H. P., Cho, W. H., Chen, W. C., Lee, C. T., & Lee, C. C. 2019. The Fabrication of a UV Notch Filter by Using Solid State Diffusion. *Coatings*, 9(3), 208.
- Demirtaş, M., Odacı, C., Perkgöz, N. K., Sevik, C., & Ay, F. 2018. Low loss atomic layer deposited Al₂O₃ waveguides for applications in on-chip optical amplifiers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 24(4), 1-8.
- Dodge, M. J. 1986. Refractive index in handbook of laser science and technology, Volume IV, *Optical Materials: Part 2*, CRC Press, Boca Raton, , p. 30
- Elliott, S. D., Scarel, G., Wiemer, C., Fanciulli, M., & Pavia, G. 2006. Ozone-based atomic layer deposition of alumina from TMA: Growth, morphology, and reaction mechanism. *Chemistry of materials*, 18(16), 3764-3773.
- ExtremeTech. 2012. IBM creates first cheap, commercially viable, electronic- photonic integrated chip. Obtenido de <http://www.extremetech.com/computing/142881-ibm-creates-first-cheap-commercially-viable-silicon-nanophotonic-chip>

- Geuzebroek, D., Dekker, R., Klein, E., & van Kerkhof, J. 2016. Photonic integrated circuits for visible light and near infrared: controlling transport and properties of light. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 223, 952-956.
- Gleizes, A. N., Samélor, D., Vahlas, C., Sarou-Kanian, V., Florian, P., & Massiot, D. 2014. Temperature Dependent 4-, 5-and 6-Fold Coordination of Aluminum in MOCVD-Grown Amorphous Alumina Films: From Local Coordination to Material Properties. In *Advances in Science and Technology* (Vol. 91, pp. 123-133). Trans Tech Publications Ltd.
- Goldstein, D. N., McCormick, J. A., & George, S. M. 2008. Al₂O₃ atomic layer deposition with trimethylaluminum and ozone studied by in situ transmission FTIR spectroscopy and quadrupole mass spectrometry. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(49), 19530-19539.
- Hunsperger, R. G. 1995. *Integrated optics* (Vol. 4). Springer Verlag.
- Intel Latinoamérica. 2014. Intel Silicon Photonics. Obtenido de <https://www.intel.la/content/www/xl/es/architecture-and-technology/silicon-photonics/silicon-photonics-overview.html>
- Jenkins, F. A., & White, H. E. 1958. Fundamentals of optics. *American Journal of Physics*, 26(4), 272-272.
- Johnson, R. W., Hultqvist, A., & Bent, S. F. 2014. A brief review of atomic layer deposition: from fundamentals to applications. *Materials today*, 17(5), 236-246.
- Jurado, J.A. 2018. Fabrication and characterization of metal-oxide-semiconductor (MOS) capacitors based on Al₂O₃-ZrO₂ nanolaminates (Tesis de Maestría). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.
- Katamreddy, R., Inman, R., Jursich, G., Soulet, A., & Takoudis, C. 2006. ALD and characterization of aluminum oxide deposited on Si (100) using tris (diethylamino) aluminum and water vapor. *Journal of The Electrochemical Society*, 153(10), C701-C706.
- Kim, J., Chakrabarti, K., Lee, J., Oh, K. Y., & Lee, C. 2003. Effects of ozone as an oxygen source on the properties of the Al₂O₃ thin films prepared by atomic layer deposition. *Materials Chemistry and Physics*, 78(3), 733-738.
- Knoops, H. C., Potts, S. E., Bol, A. A., & Kessels, W. M. M. 2015. Atomic layer deposition. In *Handbook of Crystal Growth* (pp. 1101-1134). North-Holland.
- Kogelnik, H., & Ramaswamy, V. 1974. Scaling rules for thin-film optical waveguides. *Applied Optics*, 13(8), 1857-1862.

- Krautheim, G., Hecht, T., Jakschik, S., Schröder, U., & Zahn, W. 2005. Mechanical stress in ALD-Al₂O₃ films. *Applied surface science*, 252(1), 200-204.
- Li, M., Gao, D., Li, S., Zhou, Z., Zou, J., Tao, H., ... & Peng, J. 2015. Realization of highly-dense Al₂O₃ gas barrier for top-emitting organic light-emitting diodes by atomic layer deposition. *RSC Advances*, 5(127), 104613-104620.
- Lizárraga, E.G. 2016. Estudio de guías de onda ópticas de SiO_x (Tesis de Doctorado). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.
- López, J., Borbón-Nuñez, H. A., Lizarraga-Medina, E. G., Murillo, E., Machorro, R., Nedev, N., ... & Soto, G. 2017. Al₂O₃-Y₂O₃ ultrathin multilayer stacks grown by atomic layer deposition as perspective for optical waveguides applications. *Optical Materials*, 72, 788-794.
- Malitson I. H. and M. J. Dodge. 1972. Refractive Index and Birefringence of Synthetic Sapphire, *J. Opt. Soc. Am.*62, 1405
- Milvich, J., Kohler, D., Freude, W., & Koos, C. 2018. Surface sensing with integrated optical waveguides: a design guideline. *Optics express*, 26(16), 19885-19906.
- Monserrat, I., López, A., Gloria, D., & Vázquez, V. 2012. Diseño y Caracterización De Láseres De Guía De Onda En Nd : YAG Tesis de Maestría en Optomecatrónica, Centro de Investigaciones en Óptica, Unidad León.
- Morterra, C., & Magnacca, G. 1996. A case study: surface chemistry and surface structure of catalytic aluminas, as studied by vibrational spectroscopy of adsorbed species. *Catalysis Today*, 27(3-4), 497-532.
- Naayi, S. A., Hassan, A. I., & Salim, E. T. FTIR and X-ray diffraction analysis of Al₂O₃ nanostructured thin film prepared at low temperature using Spray pyrolysis method.
- Pappas, E. 2014. Obama Administration Announces \$200 million in Public-Private Investment to Create an Integrated Photonics Manufacturing Institute. Obtenido de [https://www.lightourfuture.org/home/news-media/press-releases/2014/\\$200-mil-photonics-manu-invest/](https://www.lightourfuture.org/home/news-media/press-releases/2014/$200-mil-photonics-manu-invest/)
- Paschotta, R. 2008. Field guide to lasers (Vol. 12). SPIE press
- Ramírez, C. 2014. Estudio de guías de onda ópticas de índice escalón obtenidas por multi-implantación, Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.
- Reyes, J. M., Ramos, B. M. P., Islas, C. Z., Arriaga, W. C., Quintero, P. R., & Jacome, A. T. 2013. Chemical and morphological characteristics of ALD Al₂O₃ thin-film surfaces after immersion in pH buffer solutions. *Journal of The Electrochemical Society*, 160(10), B201-B206.

Saleh, B. E., & Teich, M. C. 2019. Fundamentals of photonics. John Wiley & sons.

Sánchez, V. 2018. Construirán clúster de fotónica en México. Obtenido de Conacyt Prensa: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/energia/22374-construiran-cluster-fotonica-mexico>

Velázquez, R. C., Huerta, I. Z., & Sánchez, A. D. 2005. Fabricación de guías de onda ópticas en silicio utilizando óxido de silicio y nitruro de silicio. *Superficies y Vacío*, 18(4), 21–23.