

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

La investigación fue financiada por el SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación).

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

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



**Doctorado en Ciencias
en Nanociencias**

**Diseño de micro-anillos resonantes en guías de onda ópticas
mediante depósito de capa atómica**

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

Presenta:

José Daniel Castro Toscano

Ensenada, Baja California, México
2025

Tesis defendida por
José Daniel Castro Toscano

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Heriberto Márquez Becerra
Director de tesis

Dra. Alma Georgina Navarrete Alcalá

Dr. Rafael Salas Montiel

Dr. Hugo Jesús Tiznado Vázquez

Dr. Eder German Lizárraga Medina



Dra. Catalina López Bastidas
Coordinadora del Posgrado en Nanociencias

Dra. Ana Denise Re Araujo
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **José Daniel Castro Toscano** como requisito parcial para la obtención del grado de Doctor en Ciencias en Nanociencias.

Diseño de micro-anillos resonantes en guías de onda ópticas mediante depósito de capa atómica.

Resumen aprobado por:

Dr. Heriberto Márquez Becerra
Director de tesis

La óptica integrada permite la aplicación y manipulación de fenómenos de la luz para miniaturizar estructuras ópticas utilizables en una variedad de áreas. Un ejemplo notable son los resonadores de anillo ópticos, dispositivos clave en óptica integrada por su capacidad de filtrar señales ópticas en distancias micrométricas, representando así una alternativa tecnológica frente a los métodos de resonancia y filtrado que requieren mayor espacio como los resonadores de anillo de fibra óptica. Estos resonadores son una propuesta prometedora para desarrollar componentes de alta integración óptica. El objetivo de este trabajo es estudiar el principio de operación, simular la propagación de luz en resonadores de anillo del tipo pasa-todo, para estructuras mono-modales en telecomunicaciones ópticas (banda C, de 1528 nm a 1566 nm) y desarrollar una metodología de fabricación. Para diseñar una estructura más compacta y funcional en óptica integrada, se empleó un software de simulación especializado y se analizaron las propiedades ópticas de materiales transparentes con alto índice de refracción, como Al_2O_3 , ZnO y TiO_2 , sobre sustratos de obleas de silicio como óxido térmico de SiO_2 , y cubiertas de aire. Los resultados de simulación y diseño teórico indican que el ZnO presenta las mejores propiedades ópticas. En cuanto a la fabricación, se desarrolló una metodología por litografía por haz de electrones para estructuras de TiO_2 , que mostró gran versatilidad en una propuesta de método para el acoplamiento de fibra a guía.

Palabras clave: **Diseño fotónico; Litografía por haz de electrones; Resonadores de anillo pasa-todo; Materiales transparentes; Acoplamiento de fibra a guía.**

Abstract of the thesis presented by **José Daniel Castro Toscano** as a partial requirement to obtain the Doctor of Science degree in Nanoscience.

Design of micro-rings resonators in optical waveguides using atomic layer deposition

Abstract approved by:

Dr. Heriberto Márquez Becerra
Thesis Director

Integrated optics enables the application and manipulation of light phenomena to miniaturize optical structures usable across various fields. A notable example is optical ring resonators, which are key devices in integrated optics due to their ability to filter optical signals over micrometric distances, providing a technological alternative to resonance and filtering methods that require more space, such as fiber-optic ring resonators. These resonators are a promising approach for developing highly integrated components in integrated optics. The objective of this work is to study the operating principle, simulate the light propagation in all-pass optical ring resonators for single-mode structures in optical telecommunications (C band, from 1528 nm to 1566 nm), and develop a fabrication methodology. To design a more compact and functional structure in integrated optics, specialized simulation software was used, and the optical properties of high-refractive index transparent materials such as Al_2O_3 , ZnO, and TiO_2 were analyzed on silicon wafer substrates with thermal SiO_2 oxide and air cladding. Simulation and theoretical design results indicate that ZnO exhibits the best optical properties. For fabrication, a functional EBL methodology was developed for TiO_2 structures, which demonstrated great versatility in a proposed method for fiber-to-waveguide coupling known as edge coupling.

Keywords: Photonic design; Electron beam lithography; All-pass ring resonators; transparent materials; Edge coupling.

Dedicatoria

A Dios,
A mi mamá,
A mis hermanos,
Y a mis amistades,
Por su apoyo infinito e incondicional.

A José Daniel del futuro: sé que nunca te detendrás y seguirás adelante,
sin importar los obstáculos.

Agradecimientos

Agradezco a mi madre, mi padre y mis hermanos, quienes fueron pilares fundamentales a lo largo de mi posgrado y contribuyeron a que lograra mi objetivo de obtener el grado en doctor en ciencias. A mi hermano mayor **Moisés Jesús**, quien me ha dado consejos para enfrentar la vida en el posgrado y en el ámbito laboral, especialmente enfocado en la docencia e investigación. A mi hermano mediano **Luis Abraham**, que siempre tiene tiempo para escucharme, ayudarme a enfrentar mis temores y ansiedades, y darme una retroalimentación llena de importancia para mí. A mi padre **Moisés Castro**, por estar siempre al pendiente de mí, incluso cuando yo estaba ocupado. Y, por último, a la persona más especial, agradezco profundamente a mi madre, **Lydia Toscano Palomar**, mi modelo a seguir, quien con su amor y comprensión infinitos, siempre ha estado a mi lado y nunca me ha faltado nada.

Agradezco a los miembros del comité, quienes desempeñaron un rol fundamental en la realización de este proyecto de doctorado. Al **Dr. Heriberto Márquez Becerra**, su enseñanza, apoyo y guía fueron constantes a lo largo de este proceso, brindándome su respaldo tanto en el ámbito académico como en el social e intelectual. Al **Dr. Rafael Salas**, por brindarme la oportunidad de vivir una experiencia internacional, por su total disposición al permitir el uso de los laboratorios de la UTT, y, sobre todo, por facilitarme el encuentro con colegas y amistades que ampliaron mis horizontes en el extranjero. Al **Dr. Hugo Tiznado** y a la **Dra. Georgina Navarrete**, por su invaluable apoyo a lo largo de mi trayectoria doctoral; jamás olvidaré las asesorías que me brindaron durante la preparación del ECB. Al **Dr. Eder Lizárraga**, quien, a pesar de la distancia, siempre estuvo al tanto de mi progreso, ofreciéndome valiosos consejos para afrontar la vida en el posgrado y laboral.

A mis amistades de siempre en Mexicali, quienes han estado a mi lado en las buenas y en las malas y son piezas fundamentales en mi vida. A **Cristina Pérez**, por todo el apoyo que me brindaste a lo largo de mi posgrado, tanto en la maestría como en el doctorado; gracias por ayudarme a ser el hombre que soy hoy y por inspirarme a seguir mejorando en el futuro. Las palabras quedan cortas; mil gracias por todo. A **Waltercesar Ponce**, por tu apoyo incondicional y por permitirme ser parte de tu vida. Eres como un hermano para mí, y espero que nuestra amistad perdure toda la vida. A **Hugo Chávez**, por enseñarme que la amistad puede superar cualquier adversidad y mantenerse fuerte a lo largo del tiempo, sé que nuestra amistad es para toda la vida. A **Francisco Medina**, que a pesar de la distancia, basta con una llamada para ponernos al día. A **Daniela Monroy**, porque una amistad como la tuya trasciende y se convierte en una hermandad para toda la vida; gracias por estar en esos momentos en los que ni yo mismo podía con mi carga. A **Samantha Duarte**, quien, a pesar de las pausas en nuestras conversaciones y las ocupaciones de nuestras vidas, siempre encuentra la manera de brindarme apoyo y comprensión

A mis amistades de la maestría, quienes se han convertido en personas muy importantes en mi vida. A **Liliana Vargas**, que, a pesar de tus responsabilidades familiares y como investigadora, siempre estuviste dispuesta a acompañarme a tomar un café (Brown) y por las pláticas de introspección y motivación. A **Ángela Marín Gómez**, con quien siempre había un momento para ponernos al día, sin importar lo ocupados que estuviéramos. A **David Martínez, Emilio Aguilar y Alejandro Montenegro**, que, aunque ya no estén en el posgrado, siempre demostraron una lealtad y amistad inquebrantables. A **Sharon Ezre**, quien, en mis momentos más solitarios en Ensenada, lograba hacerme sentir en casa, como en Mexicali.

A **Diana Valencia**, por todas esas conversaciones en el malecón sobre nuestras dudas e incertidumbres sobre nuestra carrera; estoy seguro de que nos espera un futuro prometedor. A **Nayeli Casillas**, quien desde la maestría ha sido una gran amiga y me ha dado valiosas recomendaciones sobre la vida en el posgrado. A **Teo Fraissinet**, por sus valiosos consejos, recomendaciones y los cortes de cabello que me realizó.

A mis nuevas amistades del doctorado: a **Daniel Jáuregui**, por tu apoyo constante en mi vida como estudiante de doctorado, por ser un modelo de investigador al que aspiro, y por recordarme siempre la importancia de perseguir mis sueños. A **Aarón Verdugo, Julián Sierra, Mauricio Gómez, Fernando Rayón, Ferney Castro, Sebastián Pinto** y **Camilo Rafael** por hacer de mis estancias en Troyes una experiencia inolvidable, llenándola de apoyo y camaradería; gracias a ustedes, nunca me sentí solo. A **Karina Fuentes** y a **Yael Sierra**, porque a veces las amistades más valiosas surgen cuando coincidimos en otro país, a pesar de venir del mismo.

A **Genoveva Maciel** y **Leonardo Burgos**, por brindarme alojamiento durante el doctorado y por todo el apoyo que me dieron para hacer de mi vida en Ensenada una experiencia sin dificultades.

A la gente que me apoyo en el **GoFundMe**, su generosidad fue clave para que mi estancia se llevara a cabo.

A aquellos seres queridos que partieron, pero cuyo legado me dio la fortaleza de pensamiento y corazón para alcanzar mi meta de terminar el doctorado.

A los investigadores y colaboradores, por su enseñanza y apoyo durante esta importante etapa académica. En especial a **Laura Rosales** e **Isaac Fimbres**, quienes me brindaron su apoyo con los trámites académicos y financieros, haciendo que mi vida en el posgrado fuera mucho más fácil.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Université de Technologie de Troyes (UTT) y al programme ECOS Nord M19P01, así como a las ciudades de Ensenada, Baja California, México, y Troyes, Gran Este, Francia, por brindarme la oportunidad de aprender tanto de la ciencia como de la vida misma.

A los proyectos DGAPA-PAPIIT IN119023 y IG100925.

A SECIHTI por el apoyo académico otorgado bajo el número 776661 (CVU: 832744).

Tabla de contenido

Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos	v
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tablas	xvi
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Panorama actual	1
1.2 Resonador de anillo.....	3
1.3 Antecedentes	4
1.4 Hipótesis.....	7
1.5 Objetivos	7
1.5.1 Objetivo general.....	7
1.5.2. Objetivos específicos.....	8
1.6 Organización del manuscrito:.....	8
Capítulo 2. Marco Teórico	10
2.1 Análisis de resonancia:	10
2.1.1 Resonador Fabry-Pérot:	10
2.1.2 Resonador de Gires-Tournois:.....	11
2.2 Anillos resonantes	12
2.2.1 Anillo resonante pasa todo (AOR):.....	13
2.2.3 Parámetros de los resonadores de anillo:	16
2.3 Respuesta espectral en simulación:	18

2.3.1 Ecuación de onda para análisis de la sección transversal de guías.....	19
2.3.2 Ecuación de onda para la propagación de haces en el análisis de filtrado.....	20
Capítulo 3. Metodología.....	23
3.1 Materiales:	23
3.2 Depósito por capa atómica (ALD).....	24
3.3 Elipsometría.....	25
3.4 FT-IR.....	28
3.5 COMSOL	30
3.5.1 Análisis de la sección transversal.	31
3.5.2 Análisis del filtrado por resonancia.....	32
3.6 Litografía por haz de electrones (EBL).....	34
3.6.1 Depósito de resina y película conductora:.....	35
3.6.2 Litografía por haz de electrones:	38
3.6.3 Revelado:.....	42
3.6.4 Evaporación por haz de electrones:.....	43
3.6.5 Lift-off:.....	44
3.6.6 Sistema de decapado/RIE:	45
3.5.7 Decapado húmedo:.....	56
3.7 Propuesta de método de acoplamiento para fibra-guía.....	57
Capítulo 4. Resultados y Discusión.....	60
4.1 Caracterización de películas delgadas:.....	60
4.1.1 Elipsometría para cálculo de índice de refracción	60
4.1.2 FT-IR de las muestras sintetizadas:	62
4.2 Análisis de la sección transversal de la guía de onda de canal:	63
4.2.1 Índice de refracción efectivo en estructuras mono-modales:	63

4.2.2 Distribución de intensidad y análisis de la onda evanescente.....	64
4.3 Propiedades del AOR:.....	66
4.3.1 Análisis de filtrado de señales y coeficiente de extinción.....	67
4.3.2 Parámetros ópticos de las cavidades de resonancia	72
4.3.3 Análisis de filtrado en resonadores con radio superiores.....	73
4.4 Litografía electrónica:.....	74
4.4.1 Revelado:.....	75
4.4.2 Evaporación por haz de electrones- <i>lift-off</i> :	77
4.4.3 Ataque iónico reactivo:	79
4.4.4 Ataque húmedo:	84
4.5 Propuesta de método de acoplamiento de fibra-guía:	86
4.5.1 Distribución de intensidad entre interfaces.....	87
4.5.2 Longitud de acoplamiento	90
Capítulo 5. Resultados.....	94
Literatura citada	97
Anexos	102

Lista de Figuras

Figura 1. Plataforma monolítica electro-fotónica en CMOS-65nm: a) Fotografía de una oblea monolítica que integra monolíticamente tecnologías electrónicas y fotónicas, junto con vistas ampliadas de un microprocesador tipo WDM. b) Microfotografía de un microprocesador de multiplexación por división de longitud de onda (WDM, por sus siglas en inglés) con cuatro líneas de transmisor (Tx, por sus siglas en inglés) y receptor (Rx, por sus siglas en inglés). c) Microfotografía de un transmisor individual, destacando sus componentes fotónicos y circuitos eléctricos asociados, como: acoplador de rejilla, modulador óptico, detector, fotodiodos para monitoreo de potencia de entrada/salida (I/O), corrector de ciclo de trabajo (DCC, por sus sigla en inglés), línea de retardo (DI, por sus siglas en inglés) y otros elementos relacionados (Atabaki et al., 2018a).	2
Figura 2. Sección de una plataforma monolítica electro--fotónica en CMOS-65nm: a) Fotografía ampliada de una guía de onda y un resonador de micro-anillo en un microprocesador tipo WDM. b) Microfotografía de un acoplador de rejilla para fibra-guía de onda. c) Componentes fotónicos pasivos: guía de onda estrechas, resonador óptico de micro-anillo y acoplador de rejilla (Atabaki et al, 2018b).	3
Figura 3. Fotografía de un resonador de anillo de guía de onda óptica (Heebner et al., 2007a).	4
Figura 4. Configuraciones de resonadores ópticos. a) Filtrado. b) Inyectado. c) Detectado de señales.	4
Figura 5. Modelo de resonancia propuesto por Fabry-Perot (StarEffects, 2006).	5
Figura 6. Resonador de anillo propuesto por Marcatili (Marcatili, 1969).	5
Figura 7. Diagrama esquemático perteneciente a una película delgada unidireccional de anillo láser (Ulrich & Weber, 1972).	6
Figura 8. Diagrama esquemático de un resonador de anillo con doble bus de guía de onda (Rafizadeh et al., 1977b).	6
Figura 9. Resonador de anillo con una radio de 1.5 μm . a) Imagen tomada por SEM y b) imagen tomada por microscopio óptico (Xu et al., 2008b).	7
Figura 10. Esquemas de los diferentes tipos de resonadores de anillo y sus semejantes en espacio libre.	12
Figura 11. Esquema del anillo resonante pasa todo (All-Pass Ring Resonator).	13
Figura 12. Característica de filtro de resonador de anillo tipo filtrado muesca (Rabus, 2007).	15
Figura 13. Resonador de anillo y sus modos azimutales (Hermannn, 2018).	16
Figura 14. Parámetros espectrales distintivos del resonador de anillo (Bogaerts et al., 2011c).	17
Figura 15. Principio de funcionamiento de la técnica ALD, lo que consiste un ciclo ALD.	24
Figura 16. La luz se refleja y refracta de acuerdo a la ley de Snell.	26

Figura 17. Medición de elipsometría a) componentes que integran un elipsómetro y b) visualización en planos de polarización (Ortega-Bailon et al., 2012).....	27
Figura 18. Diagrama de flujo del análisis de datos en elipsometría (Woollam, 2018).	28
Figura 19. Mecanismo de funcionamiento del FT-IR (Themo Nicolet, 2001a).	29
Figura 20. Procesamiento de datos mediante el uso de FFT por la computadora (Themo Nicolet, 2001b).	29
Figura 21. Diagrama de configuraciones para resultados de sección transversal.....	31
Figura 22. Distribución de intensidad del modo fundamental TE_{00} a $1.55 \mu\text{m}$ para la configuración del Al_2O_3	32
Figura 23. Diagrama de configuraciones para resultados de filtrado.....	33
Figura 24. Transmitancia espectral del micro-anillo resonante de ZnO con una sección transversal ($1.4 \mu\text{m}$ x $0.50 \mu\text{m}$), con una d_g : $0.5 \mu\text{m}$, y para un radio de anillo de $60 \mu\text{m}$	33
Figura 25. Análisis de filtrado del micro-anillo resonante de la configuración ZnO con d_g de $0.500 \mu\text{m}$ a) la longitud de onda 1552.56 nm que pasa por el Bus, b) la longitud de onda de 1554.40 nm filtrada hacia el anillo.....	34
Figura 26. Esquema de fabricación mediante el uso de EBL para una resina negativa en una guía de onda de canal mono-modal de TiO_2 , sub-longitud de onda, sobre una plataforma aislada (Si/SiO_2).	35
Figura 27. Fotos en el cuarto limpio (UTT) a) dos muestras de ZnO ($2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$) y b) DECON utilizado para la limpieza de las muestras.	36
Figura 28. Tipos de resina: a) Resina negativa y b) resina positiva.....	37
Figura 29. Equipo para depósito de polímero: a) centrifugadora y b) horno térmico. Fotos cuarto limpio UTT.	37
Figura 30. Componentes que integra el SEM (Metalinspec, 2022).	38
Figura 31. Propuesta final del mapa de código de diseño GDS para el SEM.	40
Figura 32. Esquema de dispositivos a fabricar, desde la primera hasta la segunda estancia, para estructuras mono-modales en la configuración del material TiO_2	41
Figura 33. Fotografías del cuarto limpio de la UTT, a) Equipo de litografía por haz de electrones, b) porta muestras, c) imagen del cañón del SEM, d) procedimiento de calibración del SEM.....	42
Figura 34. Envases que contienen los líquidos para el procedimiento de revelado.....	43
Figura 35. Equipo de evaporación, a) Evaporadora PLASSYS MEB 400, b) estructura interna de la evaporadora, emisor de material y porta muestra, c) muestra con la protección de papel aluminio antes de la evaporación de Cr y d) muestra después de ser depositar 40 nm de Cr.	44

Figura 36. Proceso de eliminación del sobrante de la mascarilla: a) colocar las muestras recién tratadas por la técnica de evaporación asistida por haz de electrones en el portamuestras, b) sumergir las muestras en acetona durante 24 horas, c) aplicar baño sónico a las muestras, y d) muestra final después del proceso de lift-off.....	45
Figura 37. Patrones de grabado: a) isotrópico y b) anisotrópico.....	47
Figura 38. Principales técnicas de grabado en seco, parámetros de presión y potencia según cada técnica de grabado.	47
Figura 39. Esquema del marco de grabado RIE disponible en la plataforma de nanofab en la UTT.....	48
Figura 40. Diferencia de potencial a lo largo de los electrodos en el ritmo de grabado (UTT, 2020).	50
Figura 41. Equipo de RIE PLASSYS MU 400 en el cuarto limpio de la UTT, a) marco de grabado y b) vista del reactor y la fuente de ICP.....	50
Figura 42. Generador de potencia RF a) 300 W para RIE y b) 2 kW para ICP.	51
Figura 43. Estructura en forma de capas delgadas que permite la interferencia del láser, a) trazado de rayos en 3D, b) esquema de interferencia respecto a las interfaces.	52
Figura 44. Conjunto óptico instalado en el RIE para la medida de la tasa de decapado de la película delgada.	53
Figura 45. Ejemplo de franjas de interferencia durante el decapado de la muestra silicio sobre óxido térmico (silicon on insulator, SOI, UTT).....	54
Figura 46. Pruebas para espesor de la mascarilla después de decapado, a) perfilómetro, b) muestra después del decapado con pedazo de oblea de silicio encima, y c) muestra después del decapado seco con pedazo de oblea a un lado.	55
Figura 47. Crucetas para alineación de dispositivos realizados por EBL para la foto-litografía.	57
Figura 48. Esquema de fabricación de guías SU-8 para el acoplamiento de fibra óptica a guía. a) Esquema completo de la trayectoria de la luz en el dispositivo, b) sección transversal en el punto de acoplamiento de fibra a guía, c) sección transversal con la guía de onda TiO ₂ adelgazada, d) sección transversal de la guía de onda de TiO ₂ mostrando el ensanchamiento de la estructura a la condición mono-modal deseada y e) sección transversal del dispositivo sin la presencia del polímero SU-8.	58
Figura 49. Gráfica de curva de dispersión para los materiales Al ₂ O ₃ , ZnO y TiO ₂ , en el rango de longitudes de onda de 500 a 1600 nm. La línea continua representa los valores de elipsometría de los materiales transparentes, mientras que las líneas discontinuas representan una estimación de la curva de dispersión.	61
Figura 50. El espectro IR de a) una película de Al ₂ O ₃ amorfa de 1000 nm de espesor, b) de una película de ZnO cristalino de 500 nm y c) una película de TiO ₂ amorfo de 390 nm.....	62
Figura 51. Curva de dispersión efectiva de modos TE ₀₀ , TM ₀₀ , y TE ₁₀ en la longitud de onda de 1550 nm para a) Al ₂ O ₃ , b) ZnO, c) TiO ₂ . La zona amarilla representa el ancho efectivo para la propagación de monomodos de operación para un espesor de película de a) 2.2 μm, b) 0.50 μm, y c) 0.390 μm. El círculo rojo indica la existencia de modos híbridos (TM ₀₀ -TE ₁₀).	64

- Figura 52.** Distribución de intensidad del modo TE₀₀ y su perfil de intensidad de la sección transversal para la longitud de onda de 1550 nm para a) Al₂O₃ (h=1000nm, w=2200nm, y n=1.62927), b) ZnO (h=500 nm, w=1400 nm, y n=1.88581), y c) TiO₂ (h=390 nm, w=700 nm, y n=2.36372).65
- Figura 53.** Gráficas de filtrado de resonancia para el material Al₂O₃, con valores de d_g de: a) 200 nm, b) 300 nm, c) 400 nm, d) 500 nm y d) 600 nm.68
- Figura 54.** Gráficas de filtrado de resonancia para el material ZnO, con valores de d_g de: a) 200 nm, b) 300 nm, c) 400 nm, d) 500 nm y d) 600 nm.69
- Figura 55.** Gráficas de filtrado de resonancia para el material TiO₂, con los valores de d_g de: a) 200 nm, b) 300 nm, c) 400 nm, d) 500 nm y d) 600 nm.70
- Figura 56.** Coeficiente de extinción para cada material a) en términos de porcentaje de transmisión, b) en unidades de dB.....71
- Figura 57.** Distribución de intensidad en la guía de onda curva asociada a la configuración optima de TiO₂ para un radio de anillo de 60 μm.71
- Figura 58.** Graficas de transmisión del AOR para el rango de las longitudes de onda: a) Banda C y b) 1555 nm.72
- Figura 59.** Gráficas de transmisión del AOR para el rango de longitudes de onda en telecomunicaciones ópticas: a) radio del anillo 120 μm y b) radio del anillo óptico de 180 μm.....73
- Figura 60.** Imágenes tomadas por el microscopio óptico a una amplificación de 100x para la configuración de Al₂O₃ después del proceso de revelado, a) anillos con doble bus con un d_g de 600 nm. B) anillos con doble con un d_g de 200 nm.75
- Figura 61.** Imágenes tomadas por el microscopio óptico a una amplificación de 50x para la configuración de ZnO después del proceso de revelado a) anillo con doble bus con un d_g de 200 nm, b) anillo con doble con un d_g de 600 nm.76
- Figura 62.** Imágenes obtenidas con microscopio óptico de la configuración de TiO₂ después del proceso de revelado, mostrando anillos con doble bus y una amplificación de: a)5x y b) 100x en campo oscuro, con un d_g de 200 nm.76
- Figura 63.** Imágenes obtenidas con microscopio óptico de la configuración de Al₂O₃ después del proceso lift-off, con una película metálica de 10 nm de Al y con una amplificación de: a) 50x para anillos con doble bus con una d_g de 200 nm, b) 50x para anillos con doble bus con una dg de 600 nm, c) 50x anillos tipo polea con una d_g de 200 nm y d) 50x anillos de tipo polea con una d_g de 600 nm.77
- Figura 64.** Imágenes obtenidas con microscopio óptico de la configuración de ZnO después del proceso lift-off, con una película metálica de 50 nm de Ni y con una amplificación de: a) 50x para anillos con doble bus con una d_g de 200 nm, b) 50x para anillos con doble bus con una d_g de 600 nm, c) 50x anillos tipo polea con una d_g de 200 nm y d) 50x anillos de tipo polea con una d_g de 600 nm.78
- Figura 65.** Imágenes obtenidas con microscopio óptico de la configuración de TiO₂ después del proceso lift-off, con una película metálica de 40nm de Cr y con una amplificación de: a) 50x para anillos con doble bus con una d_g de 200 nm, b) 50x para anillos con doble bus con una d_g de 700 nm, c) 100x anillos tipo

polea con una d_g de 200 nm en el campo oscuro y d) 50x anillos de tipo polea con una d_g de 700 nm en el campo oscuro.....	79
Figura 66. Franjas de interferencia durante el decapado sobre la muestra Al_2O_3	80
Figura 67. Muestra de Al_2O_3 con un espesor de $1000\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$, siendo la del centro la que fue tratada mediante RIE.	80
Figura 68. Franjas de interferencia durante el decapado sobre la muestra ZnO	81
Figura 69. Muestra de ZnO con un espesor de $420\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$, donde la muestra central ha sido tratada mediante RIE.	81
Figura 70. Franjas de interferencia durante el decapado sobre la muestra TiO_2	82
Figura 71. Muestra de TiO_2 con un espesor de $350\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$, donde la muestra en la extrema derecha ha sido tratada mediante RIE.....	82
Figura 72. Diagrama del perfilómetro para 65 nm de Ni después del uso del RIE asociado a remover material ZnO	83
Figura 73. Imágenes de microscopio a una amplificación de 100x de las muestras de TiO_2 enfocadas en estructuras de anillos “pasa todo” con un d_g de 700 nm, después del proceso de RIE, para los campos visuales: a) claro y b) oscuro.	84
Figura 74. Imágenes de SEM de las muestras de TiO_2 enfocadas en estructuras de anillos con un d_g de 200 nm, tras el proceso de ataque húmedo, a) dispositivo de anillo “pasa todo”, b) ancho de la guía de onda de anillo 801.4 nm, c) guía de onda bus con un ancho de 809.6 nm.....	85
Figura 75. Esquema de fabricación de guías SU-8 para el acoplamiento de fibra óptica a guía. a) Esquema completo de la trayectoria de la luz en el dispositivo, b) sección transversal en el punto de acoplamiento de fibra a guía, c) sección transversal con la guía de onda TiO_2 adelgazada, d) sección transversal de la guía de onda de TiO_2 mostrando el ensanchamiento de la estructura a la condición monomodal deseada y e) sección transversal del dispositivo sin la presencia del polímero SU-8.	87
Figura 76. Sección transversal de la guía de onda de SU-8, con cubierta de aire y sustrato de SiO_2 , propagando el modo fundamental TE_{00} dentro del rango de telecomunicaciones.....	88
Figura 77. Sección transversal de la guía de onda de SU-8, con cubierta de aire y sustrato de SiO_2 , propagando el modo fundamental TE_{00} dentro del rango de telecomunicaciones e interactuando con la guía adelgazada de TiO_2 . a) con un ancho inicial de 20 nm y b) tras una distancia de propagación de 6 μm	88
Figura 78. Vista superior de la estructura, donde se aprecia la presencia de modos azimutales.	89
Figura 79. Sección transversal de la guía de onda de TiO_2 con un espesor de 390 nm y un ancho de 197 nm, obteniendo un valor de n_{eff} de 1.5552 para el modo fundamental TE_{00}	89
Figura 80. Sección transversal de la guía de onda de TiO_2 con un espesor de 390 nm y un ancho de 700 nm, obteniendo un valor de n_{eff} de 1.87262 para el modo fundamental TE_{00}	90

Figura 81. Propagación del modo a través de tres interfaces de cubierta: primera sección con cubierta SU-8, segunda sección con cubierta de aire y tercera sección con cubierta de SU-8.	90
Figura 82. Esquemas de transmisión de guías SU-8 a guías TiO ₂ para el modo TE ₀₀ en las siguientes longitudes de guías adelgazadas invertidas: a) 20 μm, b) 50 μm, c) 100 μm y d) 200 μm.	91
Figura 83. Taza de transmisión en función de la longitud del taper.	92
Figura 84. Modelo básico de un anillo resonante con doble guía de onda.	105
Figura 85. Característica de filtro de resonador de anillo tipo doble bus (Rabus, 2007).	106
Figura 86. Gráficas de filtrado de resonancia para el material TiO ₂ para aplicación de doble guía de onda, con valores de d _g de: a) 100 nm, b) 200 nm, c) 300 nm, d) 400 nm, d) 500 nm, e) 600 nm y d) 700 nm..	108
Figura 87. Gráficas de filtrado de resonancia para el material TiO ₂ para aplicación de doble guía de onda, con valores de d _g de: a) 100 nm, b) 200 nm, c) 300 nm, d) 400 nm, d) 500 nm, e) 600 nm y d) 700 nm..	109
Figura 88. Esquema de los modos ópticos del resonador de anillo acoplado a una guía de onda a) recta y b) polea (Moille et al., 2019).	111
Figura 89. Configuración de acoplamiento del resonador de anillo de polea (Hosseini et al., 2010a).	112
Figura 90. Esquema de los modos ópticos del resonador de anillo acoplado a una guía de onda a) recta y b) polea (Hosseini et al., 2010b).....	113

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros usados en la síntesis de películas por ALD.	25
Tabla 2. Parámetros considerados para la realización de la litografía por haz de electrones.	41
Tabla 3. Parámetros de la evaporadora por haz de electrones para cada uno de los metales propuestos como mascarillas.....	43
Tabla 4. Parámetros considerados para cada material propuesto para la realización del RIE. (Bradley et al., 2007; Park et al., 2011; Hotovy et al., 2014).....	55
Tabla 5. Propiedades físicas y químicas del Chrome Etch 18 (Microresist 19, n.d.b).....	56
Tabla 6. Parámetros correspondientes a la sección transversal de las guías de onda de canal.....	65
Tabla 7. Porcentaje de distribución de intensidad entre las interfaces.	66
Tabla 8. Los parámetros de filtrado de AOR para un radio de 60 μm	73
Tabla 9. Desempeño del resonador de anillo en función de la variación del radio para cada material.	74
Tabla 10. Parámetros considerados para cada material para la realización del RIE para los laboratorios de la UTT.....	83
Tabla 11. Comparación de medidas de fabricación teórica y experimental para las estructuras de TiO_2 . *W: guías de onda rectas, *ADR: anillos resonantes con doble bus, *AOR: anillos resonantes pasa-todos y *PR: anillos resonantes tipo polea.	86
Tabla 12. Distribución de intensidad para el ancho efectivo.....	89
Tabla 13. Distribución de intensidad para el ancho deseado.....	90
Tabla 14. Comparación de los métodos de fabricación, materiales y dimensiones estructurales de diferentes dispositivos de longitud de onda óptica.....	93
Tabla 15. Transmitancia en puerta de salida y de caída para un resonador de anillo de 60 μm	107
Tabla 16. Transmitancia en puerta de salida y de caída para un resonador de anillo de 120 μm	107

Capítulo 1. Introducción

1.1 Panorama actual

Es importante mencionar, que de manera global, la inversión en las áreas de las tecnologías en semiconductores ha ido incrementando. De manera regional, el sector privado internacional pertenecientes a Arizona y California han comenzado a invertir en el estado de Baja California, mediante la construcción de infraestructura, compra de equipo y capacitaciones a docentes todo esto enfocado en el crecimiento de la industria en semiconductores para las telecomunicaciones (El Economista, 2024). Todo esto debido a que las tecnologías electrónicas y fotónicas han revolucionado nuestras vidas, impactando áreas como la informática, los dispositivos móviles y el Internet. Las demandas futuras en estos campos no solo exigen avances individuales en cada tecnología, sino también la habilidad de integrarlas de manera eficiente para aprovechar al máximo sus capacidades complementarias.

Las constantes innovaciones en electrónica, especialmente en tecnología de semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS, por sus siglas en inglés), han revolucionado la informática, las comunicaciones, la detección y la imagen. Más recientemente, la fotónica de silicio ha aprovechado la infraestructura CMOS para satisfacer la creciente demanda de comunicaciones ópticas en redes de Internet y centros de datos. Esta convergencia entre la fotónica y CMOS abre camino a una transformación en las tecnologías electro-fotónicas, incluyendo memorias con entrada/salida óptica de gran ancho de banda, chips de comunicaciones con procesamiento óptico de alta fidelidad y sensores bioquímicos ópticos para análisis de sangre y secuenciación genética.

Para hacer la realidad estas tecnologías, es esencial integrar dispositivos fotónicos con una amplia gama de funciones nano-electrónicas (digitales, analógicas, de memoria, almacenamiento, entre otras) en un único chip de silicio.

La integración monolítica de dispositivos fotónicos con circuitos electrónicos, ilustrada en la Figura 1, es crucial por dos razones principales: primero, permite alcanzar simultáneamente los niveles necesario de rendimiento, escalabilidad y complejidad para los sistemas electrónico-fotónicos; segundo, acelera significativamente la innovación a nivel de sistema al proporcionar un entorno diseño cohesivo y un ecosistema de dispositivos capaz de implementar sistemas completos en un solo chip.

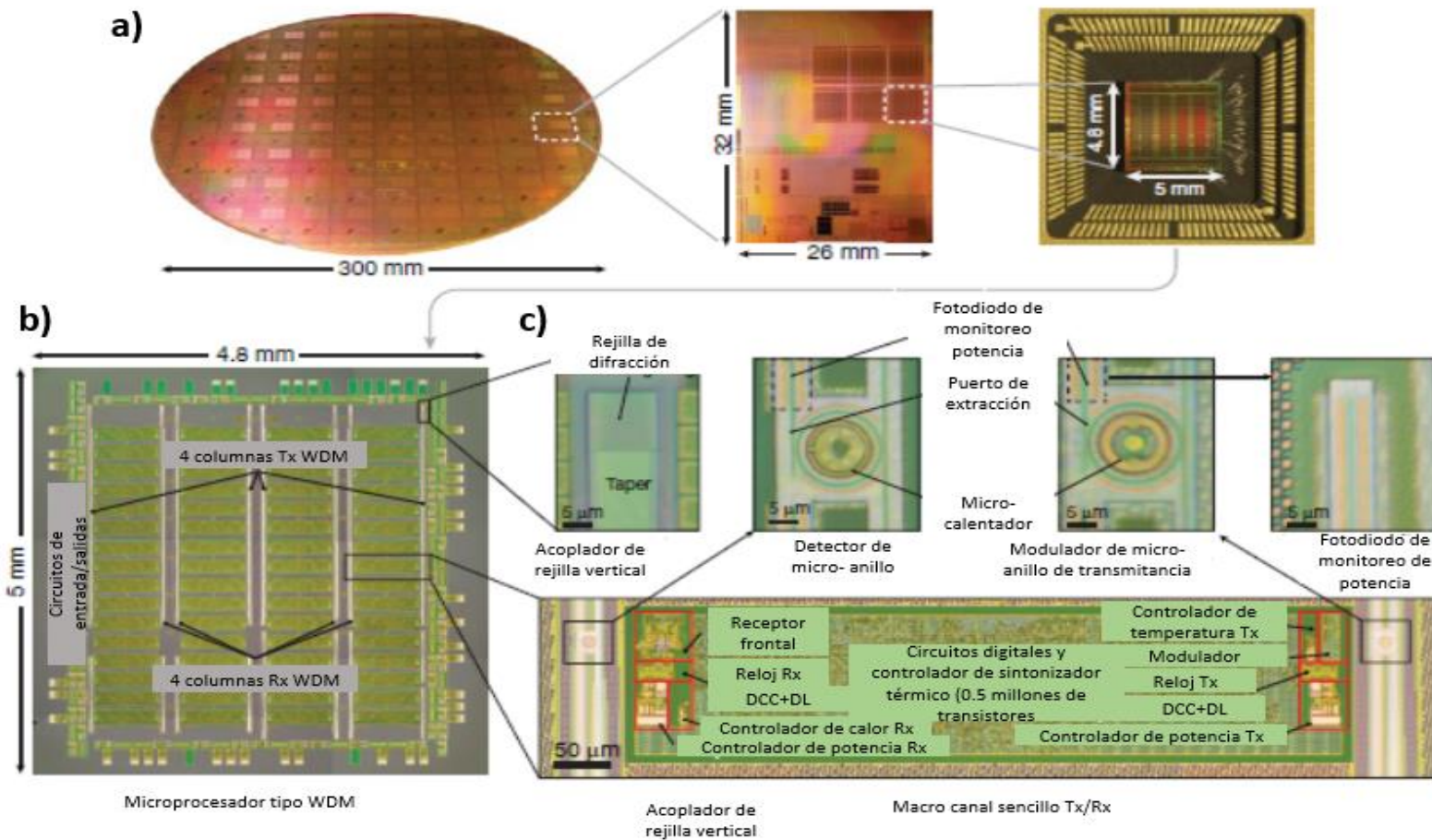


Figura 1. Plataforma monolítica electro-fotónica en CMOS-65nm: a) Fotografía de una oblea monolítica que integra monolíticamente tecnologías electrónicas y fotónicas, junto con vistas ampliadas de un microprocesador tipo WDM. b) Microfotografía de un microprocesador de multiplexación por división de longitud de onda (WDM, por sus siglas en inglés) con cuatro líneas de transmisor (Tx, por sus siglas en inglés) y receptor (Rx, por sus siglas en inglés). c) Microfotografía de un transmisor individual, destacando sus componentes fotónicos y circuitos eléctricos asociados, como: acoplador de rejilla, modulador óptico, detector, fotodiodos para monitoreo de potencia de entrada/salida (I/O), corrector de ciclo de trabajo (DCC, por sus sigla en inglés), línea de retardo (DL, por sus siglas en inglés) y otros elementos relacionados (Atabaki et al., 2018a).

No obstante, la integración de una plataforma fotónica completamente funcional (que incluya funciones pasivas, moduladores ópticos y detectores) con la nano-electrónica CMOS, como se muestra en la Figura 2, aún se encuentra en etapas avanzadas de desarrollo. Dada la alta miniaturización requerida, se han identificado componentes clave para el desarrollo de estas tecnologías: guías de onda angostas, resonadores ópticos y acopladores de fibra-guía de onda de tipo rejilla y/o borde. Investigaciones previas han logrado avances significativos en la síntesis de guías de onda ópticas mediante depósito de capa atómica. En este proyecto, se busca continuar este progreso mediante el desarrollo de micro-resonadores anillos ópticos, que son descritos en la siguiente sección.

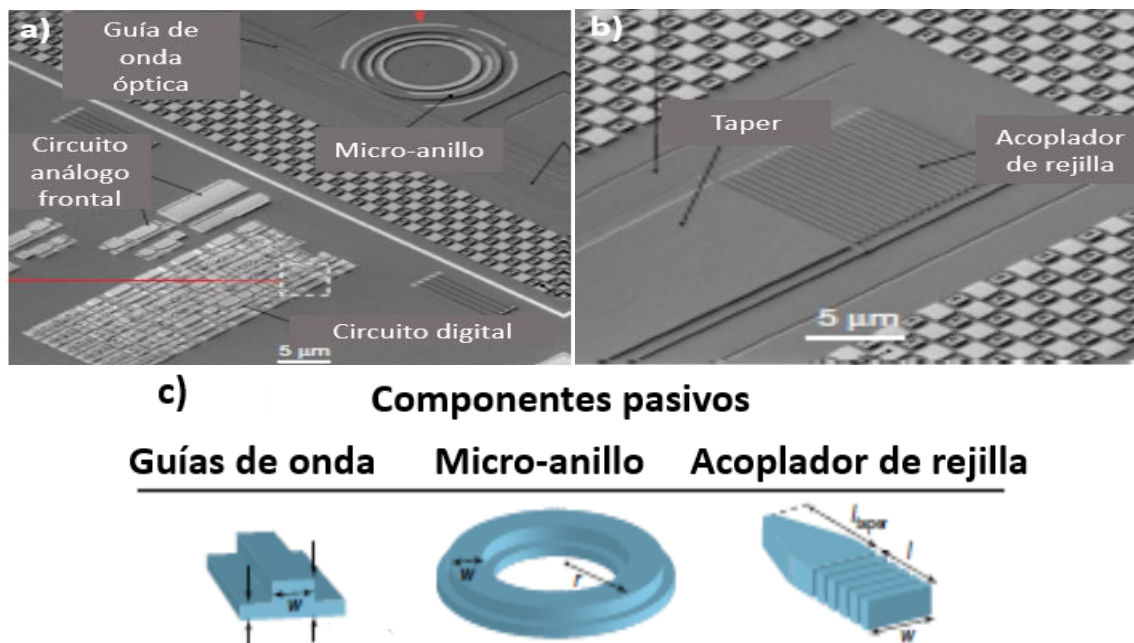


Figura 2. Sección de una plataforma monolítica electro--fotónica en CMOS-65nm: a) Fotografía ampliada de una guía de onda y un resonador de micro-anillo en un microprocesador tipo WDM. b) Microfotografía de un acoplador de rejilla para fibra-guía de onda. c) Componentes fotónicos pasivos: guía de onda estrechas, resonador óptico de micro-anillo y acoplador de rejilla (Atabaki et al, 2018b).

1.2 Resonador de anillo

En óptica integrada se encuentra un dispositivo de alta importancia conocido como resonador de anillo de guías de onda. Dicha estructura es una apuesta para filtrar señales ópticas a distancias micrométricas, haciendo a un lado métodos de filtraje o de resonancia que ocupen espacio libre (con rangos de distancias que van desde metros hasta miles de kilómetros) (CICESE, 2021). A continuación, se muestra en la Figura 3 un micro-resonador de anillo.

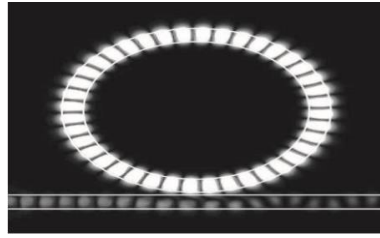


Figura 3. Fotografía de un resonador de anillo de guía de onda óptica (Heebner et al., 2007a).

El micro-resonador de anillo puede ser utilizado para filtrado, inyectado y detectado de señales para el área de telecomunicaciones, como se muestra en la Figura 4:

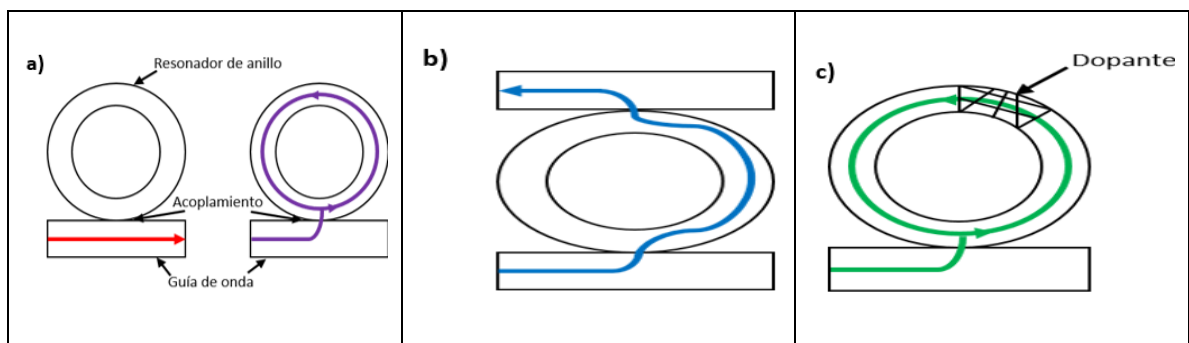


Figura 4. Configuraciones de resonadores ópticos. a) Filtrado. b) Inyectado. c) Detectado de señales.

A continuación se presentan algunas aplicaciones más específicas del resonador de anillo:

- Líneas de retardo óptico que pueden ser utilizados en las áreas de las telecomunicaciones ópticas por ser dispositivos que sincronizan, desfasan o alinean señales ópticas en el tiempo (Bogaerts et al., 2011a).
- Biosensores sin etiqueta que tienen la ventaja de detectar agentes químicos sin la necesidad de métodos invasivos (Girault et al, 2015).
- Cavidades ópticas (Chang et al., 2020)
- Obturadores y filtros espectrales (Melissinaki et al.,2021).

1.3 Antecedentes

Los resonadores ópticos se emplearon como dispositivos funcionales en el año 1899, cuando Fabry y Perot describieron el uso de un resonador de placas paralelas con un interferómetro. La luz incidente en este

resonador Fabry-Perot se divide en componentes transmitidos y reflejados con fracción de potencia como se puede apreciar en la Figura 5.

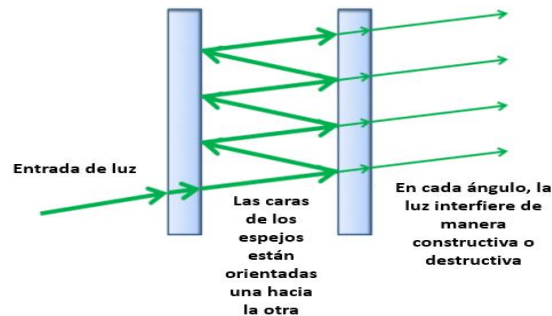


Figura 5. Modelo de resonancia propuesto por Fabry-Perot (StarEffects, 2006).

En el año 1964, los físicos Francois Gires y Pierre Tournois inventaron el resonador Gires-Tournois haciendo una modificación al resonador de Fabry-Perot. Dicho cambio fue que uno de los espejos sería 100% reflectivo (Heebner et al, 2007b).

Los anillos resonantes para ondas electromagnéticas se comenzaron a aplicar en el área de la óptica integrada en la época de los 1960s. En la Figura 6 se puede apreciar el primer resonador de anillo propuesto para hibridación óptica-electrónica. Fue propuesto en el año 1969 por Marcatili en los Laboratorios Bell.

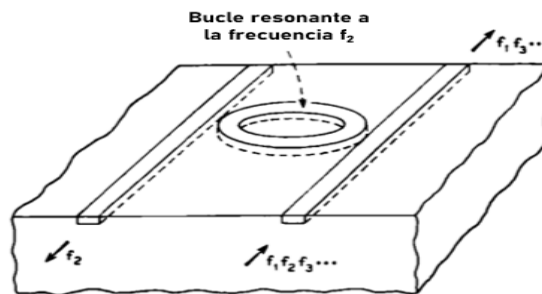


Figura 6. Resonador de anillo propuesto por Marcatili (Marcatili, 1969).

En 1972, Ulrich y su grupo de trabajo, demostraron el primer resonador de anillo. Dicho dispositivo consistía en una varilla de vidrio de 5 mm (índice de refracción de 1.47) recubierta de rodamina-6G y dopada con poliuretano (índice de refracción 1.55), para una circunferencia de resonador de 31.4 mm. La luz perteneciente a un láser de N_2 ($\lambda = 337.1$ nm) se acoplaba dentro y fuera del resonador por un prisma, como se puede observar en la Figura 7.

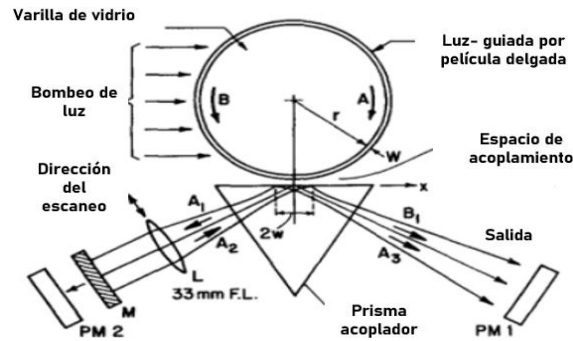


Figura 7. Diagrama esquemático perteneciente a una película delgada unidireccional de anillo láser (Ulrich & Weber, 1972).

En el año 1980, se pudo construir el primer resonador de anillo basado en guías de onda ópticas dopadas con una película delgada de polimetilmetacrilato (PMMA) en sustratos de cuarzo. El anillo tenía una circunferencia de 28.3 cm, luz de la guía de onda y estaba acoplada al anillo resonante por onda evanescente. Tenía la misma funcionalidad al resonador de Gires Tournois (Haavisto & Pajer, 1980).

Desde la época de los 1990s y 2000s se optó por materiales basados en dieléctricos o materiales ópticos (Si , Si_3N_4 y SiO_2) para la fabricación de resonador de anillo (Little et al., 1998; Klunder et al., 2001).

En el año 1997, en la Universidad del Noroeste de Evanston en Illinois se logró acoplar la luz de una guía de onda óptica a otra con el uso de un resonador de anillo de guías de onda óptica, con la misma funcionalidad que el resonador de aire libre Fabry-Perot. Dicho diagrama del resonador se puede analizar en la Figura 8 (Rafizadeh et al., 1997a).

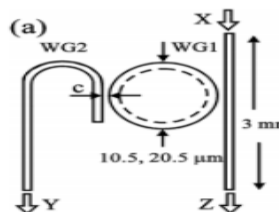


Figura 8. Diagrama esquemático de un resonador de anillo con doble bus de guía de onda (Rafizadeh et al., 1977b).

En el 2008, Q. Xu y su grupo de trabajo (Xu et al, 2008a), fabricaron un resonador de anillo con un radio de $1.5 \mu\text{m}$ basado en guías de onda de silicio con sustrato SiO_2 , con un FSR de 62.5 nm. El resonador de anillo es el más pequeño y funcional hecho hasta ahora, y se muestra en la Figura 9. En el 2018, se pudo fabricar un resonador de anillo basado en Al_2O_3 sobre sustratos de SiO_2 para aplicación en la detección de

biomarcadores sin etiqueta para la longitud de onda de 1550 nm. El radio del anillo es de 200 μm y tiene un factor de calidad de 3200 sin cubierta y de 4500 cuando el dispositivo se sumerge en agua.

Este estudio tiene como objetivo demostrar que los resonadores ópticos de anillo fabricados mediante la técnica de depósito de capa atómica (ALD, por sus siglas en inglés) exhiben propiedades competitivas, lo que hace adecuados para aplicaciones en telecomunicaciones debido al preciso control en la síntesis de capas delgadas.

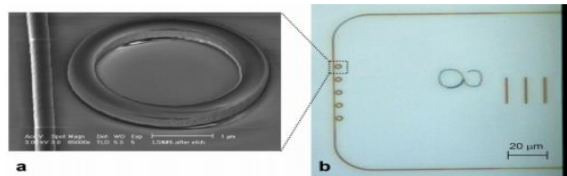


Figura 9. Resonador de anillo con una radio de 1.5 μm . a) Imagen tomada por SEM y b) imagen tomada por microscopio óptico (Xu et al., 2008b).

1.4 Hipótesis

Es posible diseñar dispositivos de micro-anillos resonantes basados en guías de onda ópticas compatibles con la técnica de ALD. Estos dispositivos podrán propagar monomodos y funcionar como resonadores a una longitud de onda de 1550 nm, alcanzando valores de factor de calidad superiores a 5000.

1.5 Objetivos

Cumplir con los objetivos permitirá desarrollar estructuras funcionales que podrán ser utilizadas en investigaciones futuras, posicionando este proyecto como un precursor de estudios posteriores. Asimismo, tendrá aplicaciones en el campo de la óptica integrada, abarcando áreas como telecomunicaciones, biología y sensores.

1.5.1 Objetivo general

Este estudio tiene como objetivo demostrar que los resonadores ópticos de anillo fabricados mediante la técnica ALD exhiben propiedades ópticas competitivas a otros métodos de crecimiento de películas

delgadas como lo son evaporación térmica y pulverización catódica (o por su designación en inglés: sputtering), siendo adecuados para aplicaciones en telecomunicaciones debido al preciso control en la síntesis de capas delgadas. Validando que los dispositivos basados en materiales de Al_2O_3 , ZnO y TiO_2 funcionan de manera efectiva en sistemas de telecomunicaciones. La realización de este proyecto permitirá desarrollar una plataforma de óptica integrada destinada al diseño de resonadores ópticos de micro-anillo.

1.5.2. Objetivos específicos

- Investigar teóricamente el principio de funcionamiento y parámetros de diseño del micro-resonador.
- Simulación de propiedades ópticas del micro-resonador mediante la optimización de la estructura del anillo, utilizando el método de elementos finitos (FEM).
- Diseño de resonadores de anillo basados en materiales ópticos con alto índice de refracción, como Al_2O_3 , ZnO y TiO_2 , sobre sustratos de sílice (SiO_2), con cubierta de aire, operando en un rango de longitudes de onda de $1.528 \mu m - 1.568 \mu m$, dentro del ámbito de las telecomunicaciones ópticas.
- Desarrollo de una metodología de fabricación enfocada en los diseños propuestos de resonadores de anillo.

1.6 Organización del manuscrito:

La organización del trabajo se estructura en cinco capítulos. El primero capítulo presenta la introducción del proyecto, donde se incluyen los antecedentes, la hipótesis y los objetivos. El segundo capítulo abarca el marco teórico del resonador de anillo, proporcionando el contexto necesario para comprender el principio de operación de esta familia de dispositivos, así como el modelado matemático mediante software especializado, en este caso COMSOL, para la resolución de ecuaciones diferenciales.

El tercer capítulo, titulado *Metodología*, describe en detalle los procedimientos utilizados para la obtención de resultados, justificando la selección de materiales ópticos de alto índice de refracción, el software utilizado y el equipo requerido para la síntesis, caracterización y fabricación de las plataformas de resonadores de anillo.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos del diseño de dispositivos de microanillos resonantes basados en estructuras monomodales, el protocolo de fabricación mediante litografía electrónica, y el análisis teórico de la propuesta de acoplamiento de fibra-guía a través de estructuras de guías SU-8 por fotolitografía.

Finalmente, el quinto capítulo expone las conclusiones del proyecto y sugiere posibles líneas de investigación futura.

Capítulo 2. Marco Teórico

Durante el desarrollo del proyecto de investigación, se llevó a cabo un análisis teórico para comprender los fenómenos físicos involucrados en el dispositivo, así como el principio de operación de cada uno de sus componentes. En este capítulo se presenta el funcionamiento de un resonador de anillo tipo pasa-todo y sus propiedades de filtrado óptico. Finalmente, se describen las ecuaciones y las condiciones de frontera utilizadas para simular la respuesta espectral del anillo pasa-todo (AOR, por sus siglas en inglés).

2.1 Análisis de resonancia:

El fenómeno de resonancia describe un conjunto de procesos asociados a movimientos periódicos o casi periódicos que refuerzan una oscilación (onda) cuando un sistema es sometido a una frecuencia específica. Para entenderlo, es fundamental analizar dos tipos de resonadores: el de Fabry-Pérot y el de Gires-Tournois (Heebner et al, 2007c).

2.1.1 Resonador Fabry-Pérot:

Los resonadores ópticos se utilizaron como dispositivos funcionales por primera vez en 1899, cuando Fabry y Pérot describieron el empleo de un resonador de placas paralelas en un interferómetro. La luz incidente en este resonador Fabry-Pérot se divide en componentes transmitidos y reflejados, cuya fracción de potencia depende de varias variables. Por ejemplo, si la luz que incide en el resonador es temporalmente incoherente (blanca), los coeficientes de reflexión y transmisión dependen únicamente de las reflexiones en los espejos. La potencia reflejada total (R) es la suma de la potencia reflejada por el primer espejo y las múltiples reflexiones entre ambos espejos que contribuyen a la reflexión general, cuyo resultado se expresa de la siguiente forma:

$$R = R_1 + T_1^2 R_2 \sum_{m=1}^{\infty} (R_1 R_2)^{m-1} = \frac{R_1 - 2R_1 R_2 + R_2}{1 - R_1 R_2} \xrightarrow{R_1=R_2=R} \frac{2R}{1+R}, \quad (1)$$

A su vez, la potencia de la transmitancia total (T) se expresa como:

$$T = T_1 T_2 \sum_{m=1}^{\infty} (R_1 R_2)^{m-1} = \frac{T_1 T_2}{1 - R_1 R_2} \xrightarrow{R_1=R_2=R} \frac{T^2}{1 - R^2} = \frac{1 - R}{1 + R}, \quad (2)$$

Donde R_1 y T_1 representan los valores de reflectancia y transmitancia del primer espejo, mientras que R_2 y T_2 corresponden a los valores de reflectancia y transmitancia del segundo espejo. Sin embargo, si la luz que incidente es coherente (monocromático), la potencia reflejada será proporcional al cuadrado de la suma coherente de todos los campos reflejados. Dado que los campos contienen información de fase además de su amplitud, la fracción de luz reflejada y transmitida depende no solo de las reflexiones en los espejos, sino también de la longitud de onda de excitación y del espaciado entre los espejos. La suma coherente de los campos se maximiza cuando todos interfieren constructivamente (en fase) y se minimiza cuando interfieren de forma destructiva (fuera de fase).

La fase se acumula a medida que la onda se propaga e interactúa con los espejos. Las versiones coherentes de las ecuaciones 1 y 2 incorporan por un factor de fase acumulada en cada trayecto de ida y vuelta, el cual, debido a las reflexiones en los espejos, puede interpretarse como una desafinación normalizada, $\Phi = T_r \omega$, donde T_r es el tiempo de tránsito de la cavidad, dado por $T_r = n_{eff} L/c$. Aquí, L representa la longitud de la circunferencia y n_{eff} es el índice efectivo. En este contexto, \tilde{r} denota la reflectividad compleja.

$$\tilde{r} = r_1 - t_1^2 r_2 e^{im\Phi} \sum_{m=1}^{\infty} (r_1 r_2 e^{im\Phi})^{m-1} = \frac{r_1 - r_2 e^{i\Phi}}{1 - r_1 r_2 e^{i\Phi}} \xrightarrow{r_1 r_2 = r} \frac{r(1 - e^{i\Phi})}{1 - r^2 e^{i\Phi}}, \quad (3)$$

Donde \tilde{t} representa la transmitancia compleja,

$$\tilde{t} = t_1 t_2 e^{im\Phi/2} \sum_{m=1}^{\infty} (r_1 r_2 e^{im\Phi})^{m-1} = \frac{t_1 - t_2 e^{i\frac{\Phi}{2}}}{1 - r_1 r_2} \xrightarrow{r_1 r_2 = r} \frac{-(1 - r^2) e^{im\frac{\Phi}{2}}}{1 - r^2}, \quad (4)$$

El módulo cuadrado de estas cantidades complejas determina los coeficientes de reflexión R y de transmisión T .

2.1.2 Resonador de Gires-Tournois:

Un resonador Fabry-Perot sin pérdidas, con un espejo de reflectividad $R=100\%$, actúa como un dispositivo que refleja en todas las frecuencias. Sin embargo, las frecuencias resonantes pasan más tiempo circulando en el resonador y experimentan retardos de grupo más largos que las frecuencias no resonantes. A este dispositivo se le denomina resonador de Gires Tournois, también conocido como “filtrado de fase única”. La reflectividad de este dispositivo puede considerarse como un caso límite de la ecuación 3.

$$\tilde{r} = r - t^2 e^{im\Phi} \sum_{m=1}^{\infty} (r e^{im\Phi})^{m-1} = \frac{r - e^{i\Phi}}{1 - r e^{i\Phi}}, \quad (5)$$

El módulo cuadrado de esta expresión es igual a uno para todos los valores del parámetro de desfase Φ . El argumento de fase de esta expresión es:

$$\Phi = \pi + \Phi + 2 \arctan \frac{r \sin(\Phi)}{1 - r \cos(\Phi)}, \quad (6)$$

2.2 Anillos resonantes

Los resonadores Fabry-Pérot y Gires-Tournois son dispositivos extremadamente versátiles, utilizados en aplicaciones como herramientas de espectroscopia, compensadores de dispersión, filtros y cavidades laser. Sin embargo, estos dispositivos requieren un espacio libre entre los espejos acoplados, lo que genera incompatibilidad con la tecnología integrada (Heebner et al, 2007d).

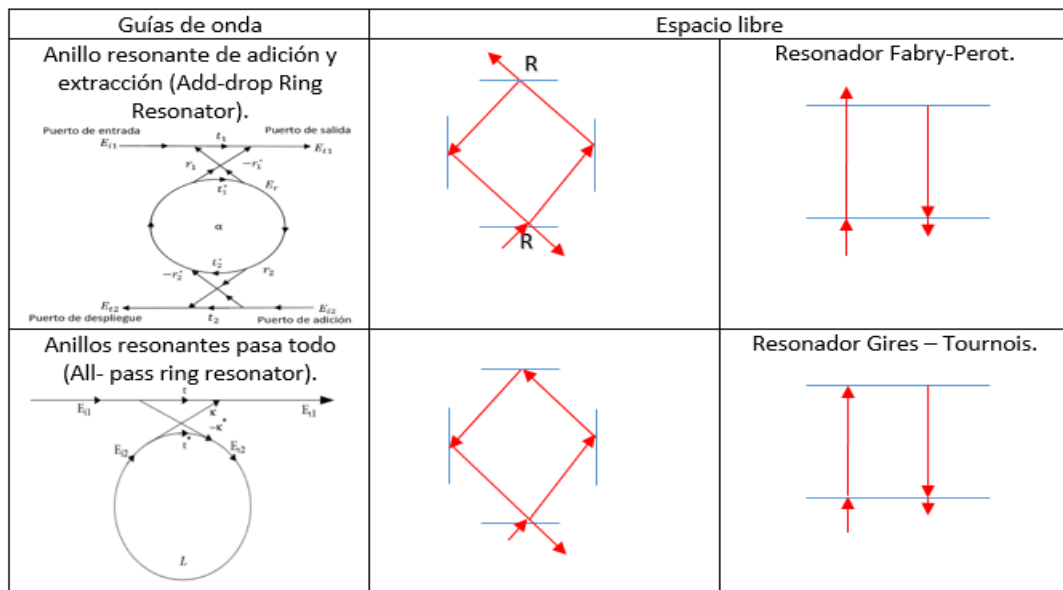


Figura 10. Esquemas de los diferentes tipos de resonadores de anillo y sus semejantes en espacio libre.

Por otro lado, es posible construir dispositivos equivalentes a estos resonadores en una guía de onda, lo que permite su integración mediante el uso de una guía de ondas de anillo acoplada a una o dos guías de onda. En el caso de los resonadores de anillo, las intensidades de acoplamiento desempeñan un papel análogo a los coeficientes de transmisión de los espejos. La Figura 10 ilustra un esquema de estos dos dispositivos de resonador de anillo junto con sus equivalentes de espacio libre.

2.2.1 Anillo resonante pasa todo (AOR):

La configuración básica, que consiste en un acoplamiento unidireccional entre un resonador de anillo de radio y una guía de onda recta conocido como bus, se describe en la Figura 11.

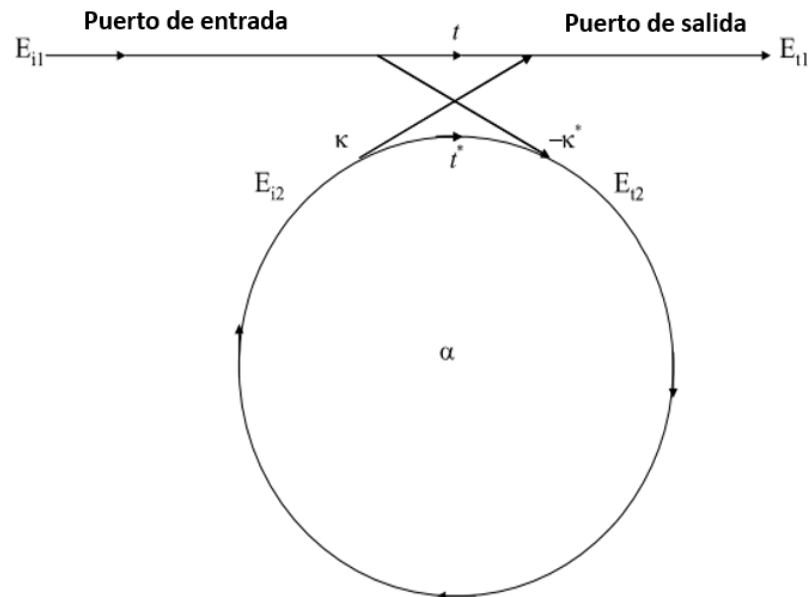


Figura 11. Esquema del anillo resonante pasa todo (All-Pass Ring Resonator).

Definiendo que se excita un único modo unidireccional del resonador, el acoplamiento es sin pérdidas, se considera una única polarización, manteniendo una polarización fija entre el acoplamiento de las guías, y las diversas pérdidas que ocurren a lo largo de la propagación de la luz en el filtro de resonador de anillo se incorporan en la constante de atenuación, la interacción se puede describir mediante la relación matricial.

$$\begin{pmatrix} E_{t1} \\ E_{t2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t & k \\ -k^* & t^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_3(\omega) \\ E_1(\omega) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

Las amplitudes de modo complejas E están normalizadas, de modo que su magnitud al cuadrado corresponde a la potencia modal. Donde k y t son el auto-acoplamiento y acoplamiento-cruzado, respectivamente. El asterisco (*) denota el valor complejo conjugado de t y k , respectivamente. La matriz es simétrica porque las redes de consideración son recíprocas. Por lo tanto:

$$|k^2| + |t^2| = 1 \quad (6)$$

Para simplificar aún más el modelo, se elige E_{i1} igual a 1. Entonces, el recorrido de ida y vuelta en el anillo se expresa como:

$$E_{i2} = \alpha \cdot e^{j\theta} E_{t2} \quad (7)$$

Donde α es el coeficiente de pérdida del anillo (sin pérdidas $\alpha=1$) y $\theta = \frac{\omega L}{c}$, siendo L la circunferencia del anillo, dado por $L = 2\pi r$, donde r es el radio del anillo medido desde del centro del anillo hasta el centro de la guía de onda, c es la velocidad de fase del modo del anillo ($c = \frac{c_0}{n_{eff}}$), y la frecuencia angular fija es $\omega = kc_0$, donde c_0 se refiere a la velocidad de la luz en el vacío. El número de onda en el vacío k está relacionado con la longitud de onda λ a través de: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Usando el número de onda en el vacío, el índice de refracción efectivo n_{eff} se puede introducir fácilmente en las relaciones de acoplamiento del anillo mediante:

$$\beta = k \cdot n_{eff} = \frac{2\pi \cdot n_{eff}}{\lambda} \quad (8)$$

Donde β es la constante de propagación. Esto lleva a:

$$\theta = \frac{\omega L}{c} = \frac{kc_0 L}{c} = k \cdot n_{eff} \cdot 2\pi r = \frac{2\pi \cdot n_{eff} \cdot 2\pi r}{\lambda} = 4\pi^2 n_{eff} \frac{r}{\lambda} \quad (9)$$

De la ecuación 5 y 7 obtenemos:

$$E_{t1} = \frac{-\alpha + t \cdot e^{-j\theta}}{-\alpha t^* + e^{-j\theta}} \quad (10)$$

$$E_{t1} = \frac{-\alpha k^*}{-\alpha t^* + e^{-j\theta}} \quad (11)$$

$$E_{t2} = \frac{-k^*}{1 - \alpha t^* e^{j\theta}} \quad (12)$$

Esto lleva a la potencia de transmisión P_{t1} en la guía de onda de salida, la cual es:

$$P_{t1} = |E_{t1}|^2 = \frac{\alpha^2 + |t|^2 - 2\alpha|t| \cos(\theta + \phi_t)}{1 + \alpha^2|t|^2 - 2\alpha|t| \cos(\theta + \phi_t)} \quad (13)$$

Donde $t = |t|\exp(j\phi_t)$, siendo $|t|$ la representación de las pérdidas de acoplamiento y ϕ_t la fase del acoplador.

La potencia que circula por el anillo P_{i2} esta dado por:

$$P_{i2} = |E_{i2}|^2 = \frac{\alpha^2(1-|t|^2)}{1+\alpha^2|t|^2-2\alpha|t|\cos(\theta+\phi_t)} \quad (14)$$

En resonancia ($\theta + \phi_t = 2\pi m$, donde m es un número entero, se obtiene lo siguiente:

$$P_{t1} = |E_{t1}|^2 = \frac{(\alpha-|t|)^2}{(1-\alpha|t|)^2} \quad (15)$$

Y

$$P_{i2} = |E_{i2}|^2 = \frac{\alpha^2(1-|t|^2)}{(1-\alpha|t|)^2} \quad (16)$$

Un caso especial ocurre cuando $\alpha = |t|$, es decir, cuando las pérdidas internas son iguales a las pérdidas de acoplamiento. La potencia transmitida se vuelve 0, lo que se conoce en la literatura como acoplamiento crítico, causado por interferencia destructiva.

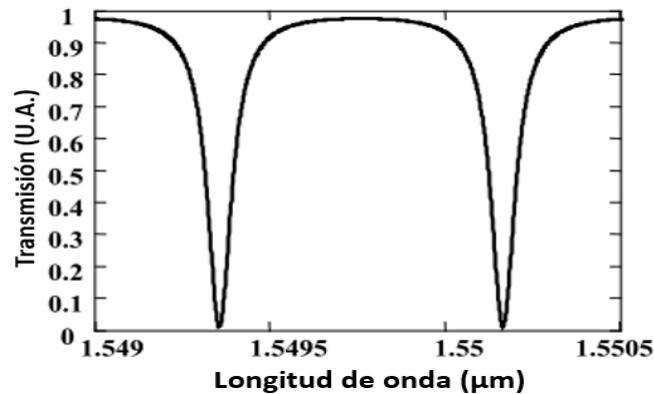


Figura 12. Característica de filtro de resonador de anillo tipo filtrado muesca (Rabus, 2007).

Al utilizar las ecuaciones anteriores, es posible obtener una buena idea del comportamiento de una configuración básica simplificada de un filtro de resonador de anillo que consiste en una sola guía de onda y un solo anillo. La característica de filtro dependiente de la longitud de onda para una configuración de resonador de anillo con un radio de $148 \mu\text{m}$, con acoplamiento y coeficiente de pérdida coincidentes, deriva usando la ecuación 5 hasta la 15, se muestra en la Figura 12.

2.2.3 Parámetros de los resonadores de anillo:

Es importante mencionar que el anillo será resonante cuando la fase sea un múltiplo de 2π , o cuando la longitud de onda de la luz se ajuste un número entero de veces dentro de la longitud del anillo. A esta cantidad de números enteros se le conoce como modos azimutales (Bogaerts et al., 2011b):

$$\lambda = \frac{n_{eff}L}{m}, \quad m = 1,2,3 \dots \quad (17)$$

En la Figura 13 muestra de manera esquemática la cantidad de modos longitudinales en un resonador de anillo, con un total de 15 modos.

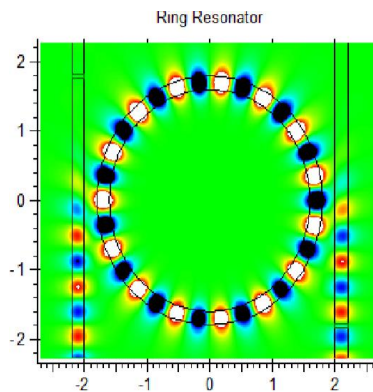


Figura 13. Resonador de anillo y sus modos azimutales (Hermann, 2018).

Para cavidades ideales, es necesario que la atenuación sea nula, lo que permitiría que la transmisión sea unitaria para todos los valores de desfase. A continuación, se pueden observar en la Figura 14 los parámetros espectrales más importantes para los resonadores de anillo:

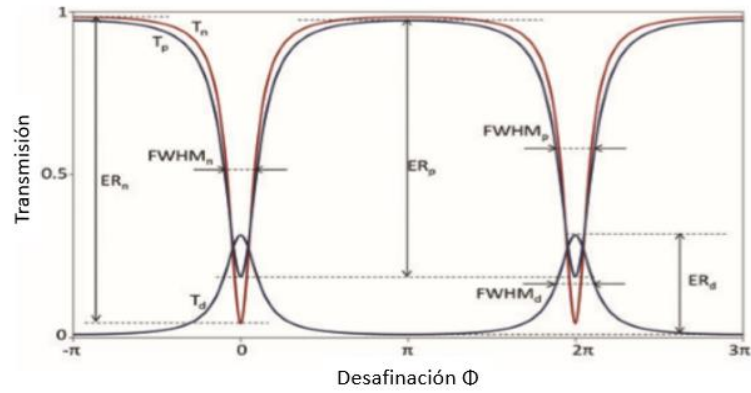


Figura 14. Parámetros espectrales distintivos del resonador de anillo (Bogaerts et al., 2011c).

Estos parámetros dependen de los coeficientes de acoplamiento y de las pérdidas. La primera ecuación de los parámetros espectrales corresponde al FWHM “Full Width at Half Maximum” del espectro de resonancia del anillo resonante, que se expresa como:

$$FWHM = \frac{(1-r\alpha)\lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{r\alpha}}, \quad (18)$$

Siendo r el coeficiente de auto acoplamiento y α el coeficiente de atenuación, al analizar el FWHM para la configuración del resonador de anillo en adición y extracción, se obtiene que:

$$FWHM = \frac{(1-r_1 r_2 \alpha)\lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{r_1 r_2 \alpha}}, \quad (19)$$

En una aproximación de primer orden de la dispersión, el rango de longitud de onda entre dos resonancias, conocido como el rango espectral libre (FSR), en función de la longitud de onda se expresa como:

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g L}, \quad (20)$$

Es importante destacar que tanto el FWHM como el FSR incluyen un denominador del índice de grupo, que no debe confundirse con el índice efectivo n_{eff} . El índice de grupo considera la dispersión de la guía de onda y se define como:

$$n_g = n_{eff} - \lambda_0 \frac{dn_{eff}}{d\lambda}. \quad (21)$$

La velocidad de grupo $v_g = \frac{c}{n_g}$ describe la velocidad a la que viaja la envolvente de un pulso de propagación, siendo esta una característica de un medio dispersivo como una guía de onda. Para nuestro análisis, el índice de grupo será igual al índice efectivo, ya que en las simulaciones de nuestra guía de onda BUS corresponde a una guía de onda escalonada, lo que implica que el índice efectivo de toda la estructura se mantiene constante durante la propagación del haz, siendo uniforme en toda la estructura. Como resultado, no hay variación en el índice de refracción a medida que el haz avanza en la estructura, lo que significa que $\frac{dn_{eff}}{d\lambda} = 0$. La fineza se define como la relación entre el FSR y el ancho de resonancia:

$$Finesa = \frac{FSR}{FWHM'} \quad (22)$$

Por lo tanto, la fineza es una medida de la amplitud de los pulsos de resonancia en relación con su espacio. El factor de calidad (Q-factor) es una relación de que tanta energía guarda nuestro sistema de filtrado en cuestión de la resonancia todo esto con una relación de una longitud de onda central:

$$Q - factor = \frac{\lambda_{res}}{FWHM}. \quad (23)$$

El significado físico de la fineza y del Q factor está relacionado con el número de viajes de ida y vuelta que realiza la luz en el resonador antes de dispersarse, debido a las pérdidas internas asociados a la guía de onda, o más específicamente, al bus.

Por último la tasa de extinción proporciona información sobre las pérdidas del filtrado por transmisión neta, considerando los puntos mínimos y máximos del espectro de trasmisión, siendo este parámetro fundamental para la selección de estructuras en la siguientes secciones.

2.3 Respuesta espectral en simulación:

La respuesta espectral del anillo resonante pasa-todo se obtuvo utilizando COMSOL[®], un software que emplea el método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés), es decir, un método numérico para aproximar soluciones de ecuaciones diferenciales en geometrías complejas. El FEM utiliza una formulación débil de las ecuaciones diferenciales, representándolas en su forma integral. COMSOL[®] maneja diferentes modelos para resolver fenómenos físicos de los cuales veremos en esta sección, tomando toda esta matemática del manual de usos de COMSOL[®] (COMSOL, 2018).

2.3.1 Ecuación de onda para análisis de la sección transversal de guías

La ecuación de onda electromagnética constituye el eje central de la interfaz relacionada con la simulación física, diseñada para resolver la distribución de los campos eléctricos, magnéticos e intensidad. Además, permite analizar la guía de onda de canal en sección transversal con el objetivo de calcular los siguientes parámetros: números modales, índice de refracción efectivo, factor de confinamiento modal y distribución de onda evanescente. La forma de la ecuación de onda usada en la interfaz eléctrica esta descrita de la siguiente manera:

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \epsilon_{rc} E = 0 \quad (24)$$

Para los problemas de tiempo-armónico y de frecuencia propia. El número de onda en el espacio libre k_0 se define como

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \frac{\omega}{c_0} \quad (25)$$

Donde k_0 es el número de onda en el vacío, ω la frecuencia angular, ϵ_0 y μ_0 representan la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética del vacío, respectivamente, y finalmente, c_0 corresponde a la velocidad de la luz en el vacío.

En 2D, el campo eléctrico varía con el número de onda del plano k_z siendo fuera del plano como:

$$E(x, y, z) = E(x, y) \exp(-ik_z z) \quad (26)$$

Para nuestras simulaciones se consideró que las componentes del campo eléctrico se resolvían en las 3 componentes teniendo que k_z igual a cero.

$$E(x, y, z) = E(x, y) \quad (27)$$

Sabiendo que:

$$\epsilon_r = (n - ik)^2 \quad (28)$$

Usando la relación de $\epsilon_r = n^2$, donde n es el índice de refracción, por lo tanto la ecuación puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\nabla \times (\nabla \times E) - k_0^2 n^2 E = 0 \quad (29)$$

Cuando la ecuación se escribe utilizando el índice de refracción, se asume que, $\mu_r = 1$ y $\sigma = 0$ solo están disponibles las relaciones constitutivas para materiales lineales.

Para el análisis de resultados se consideró conductores eléctricos perfectos y magnéticos, siendo las siguientes:

$$n \times E = 0, \quad (30)$$

$$n \times H = 0 \quad (31)$$

Estas condiciones de frontera se enfocan en un caso particular que establece que la componente tangencial del campo eléctrico y magnético sea igual a cero. En lo particular, todas estas condiciones de frontera fueron necesarias para obtener e interpretar los resultados de análisis de la sección transversal de nuestras estructuras.

2.3.2 Ecuación de onda para la propagación de haces en el análisis de filtrado

Una vez realizado el análisis de las propiedades asociadas a la sección transversal de las guías de onda de canal, utilizamos el estudio para diseñar el análisis de filtrado del resonador de anillo, que considera las ecuaciones necesarias para resolver la propagación de haces electromagnéticos unidireccionales y bidireccionales. La ecuación gobernante para el nodo de ecuación de onda de haces envolventes está dado por el campo eléctrico factorizado en el producto:

$$E(r) = E_1(r) \exp(-j\phi_1(r)) \quad (32)$$

Para vectores de onda configurados como unidireccionales. Al agregar esta formulación del campo eléctrico en las ecuaciones de Maxwell, se obtiene la siguiente ecuación de onda para la función de la envolvente:

$$(\nabla - jk_1) \times ((\nabla - jk_1) \times E_1) - k^2 E_1 = 0 \quad (33)$$

Donde

$$k_1 = \nabla \phi_1 \quad (34)$$

El número de onda que viaja en un medio k_1 está definido por

$$k_1 = k_0 n \quad (35)$$

Sustituyendo esto en la ecuación 33 para que quede representada en función del índice de refracción

$$(\nabla - jk) \times ((\nabla - jk) \times E) - k_0^2 (n^2) E = 0 \quad (36)$$

En la ecuación de onda, el nodo de la envolvente en la ecuación 36 es el nodo central, donde las ecuaciones de onda incluyen una función de envolvente, donde j representa la corriente. Al igual que en la sección anterior, en el análisis de filtrado se consideró que el medio era un conductor eléctrico y magnético perfecto, como se observa en las ecuaciones 30 y 31.

La condición de frontera del haz de propagación gaussiano se utiliza para describir la energía electromagnética que entra y sale en nuestro modelo físico, tal como se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$n \times \nabla \times E - j\beta n \times E \times n = 0 \quad (37)$$

Donde (β) es la constante de propagación. La condición de frontera para hacer que un límite sea transparente una onda dispersada. La condición de frontera también es transparente para una onda plana entrante.

$$n \times (\nabla \times E) - (ik)n \times (E \times n) = -n \left(E_0 \times ((ik)n - ik_1) \right) e^{-ijk} \quad (38)$$

Donde las amplitudes de los campos eléctricos incidentes son considerados como

$$E_{0x} = 0, E_{0y} = 0 \text{ y } E_{0z} = 0 \quad (39)$$

Al asignar los valores de las amplitudes, estamos asumiendo que en nuestro sistema no existe dispersión.

Finalmente, la última condición de frontera considera que la continuidad del campo asegura que las componentes tangenciales del campo eléctrico y magnético sea continuas en los límites anteriores, asumiendo que $E_{T,1} = E_{T,2}$ y $H_{T,1} = H_{T,2}$, donde $E_{T,1}$, $H_{T,1}$, $E_{T,2}$, y $H_{T,2}$ son las componentes eléctricas y magnéticas de las estructuras número 1 y 2 respectivamente, en nuestro caso las componentes 1 son de la estructura de la guía de onda recta y el numero 2 las componentes del anillo resonante.

Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se abordará las técnicas y materiales empleados en el desarrollo de dispositivos de micro-anillos resonantes basados en guías de onda ópticas. Se incluirá una breve explicación de los principios de operación de cada una de las etapas para fabricar este tipo de dispositivos de óptica integrada. Además, se describirán los parámetros clave de fabricación que deben considerarse para replicar dichos dispositivos en plataformas de obleas de silicio.

3.1 Materiales:

La selección de materiales es el primer paso clave en la planificación para la fabricación de dispositivos de óptica integrada, ya que define las técnicas que se emplearán en la creación de micro-resonadores de anillo. Existe una amplia variedad de materiales que pueden funcionar como guías de onda ópticas, teniendo características específicas para la propagación y confinamiento de la luz en estas estructuras, como nitruros, carburos y óxidos. En nuestro caso, se ha optado por materiales transparentes basados en óxidos metálicos, específicamente: óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de zinc (ZnO) y óxido de titanio (TiO_2), seleccionados debido a la experiencia previa del grupo de investigación con estos compuestos (Caballero et al., 2020a; Jurado et al., 2022a; Sánchez, 2023).

A continuación, se presentan las características de los materiales ópticos transparentes (Bass et al., 2009):

- Los materiales ópticos presentan bajas pérdidas de propagación en las longitudes de onda relacionados al ultravioleta, visible e infrarrojo cercano.
- Alta capacidad de confinamiento óptico y bajas pérdidas de propagación.
- Baja conductividad térmica y adaptabilidad operativa a altas temperaturas.
- Bajo costo y facilidad de reproducción del material, según la técnica de síntesis utilizada.

Es importante destacar que los materiales seleccionados fueron sintetizados sobre sustratos de obleas de silicio con un óxido térmico de $3\ \mu\text{m}$ de SiO_2 (Si/SiO_2), que funciona como cubierta de bajo índice de refracción para las guías de onda. En la siguiente sección se presenta la técnica utilizada para la síntesis de estos materiales en sus respectivos sustratos.

3.2 Depósito por capa atómica (ALD).

El ALD es una técnica química que hace crecer películas delgadas con una precisión menor inferior a la de un nanómetro, logrando estructuras uniformes y conformales sobre un sustrato. El ciclo ALD consiste en pulsos subsecuentes de un precursor y un oxidante que reaccionan en la superficie de un sustrato formando una monocapa del material deseado (Oviroh et al, 2019). En la Figura 15 se ilustra el proceso de un ciclo de ALD, la muestra presenta grupos hidroxilos en su superficie, los cuales reaccionan con el primer precursor, el material que se desea depositar en forma de película delgada. A continuación, se realiza una purga de N_2 para eliminar el exceso de precursor, seguida de la introducción de un segundo precursor, que en nuestro caso actúa como oxidante. Finalmente se aplica una segunda purga de N_2 , lo que permite el crecimiento de una monocapa o fracción del material. Para alcanzar un espesor deseado, es necesario repetir varios ciclos de ALD.

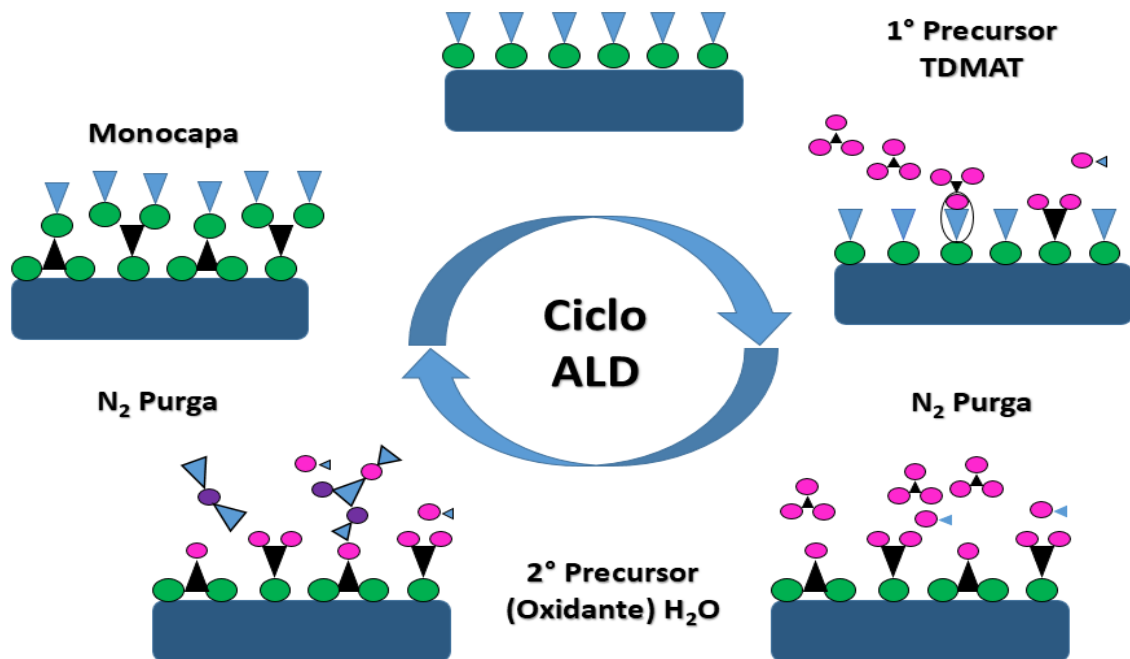


Figura 15. Principio de funcionamiento de la técnica ALD, lo que consiste un ciclo ALD.

En la Tabla 1 se describen los parámetros necesarios para el crecimiento de películas delgadas de cada uno de los materiales transparentes propuestos, depositados sobre sustratos de silicio con un óxido térmico de $3 \mu m SiO_2$, utilizando un flujo de N_2 con una concentración de O_2 de $<10^{-14}$ ppm.

Tabla 1. Parámetros usados en la síntesis de películas por ALD.

Material	Precursor*	Precursor dosis	Temperatura del precursor	Temperatura de la recámara	Purga (N ₂)	H ₂ O dosis
Al ₂ O ₃	TMA	30 ms	25 °C	200 °C	750 ms	100 ms
ZnO	DEZ	40 ms				75 ms
TiO ₂	TDMAT	50 ms	60 °C	200 °C	3 seg	3 seg

TMA: Trimetil de aluminio, DEZ: Tris-ciclopentadienil de ltrio, TDMAT*: Tetrakis-dimetilamido de titanio.

Tras realizar el proceso de crecimiento mediante ALD, respetando todos los parámetros establecidos, se obtuvieron las siguientes tasas de crecimiento para cada material: 1.00 Å/ciclo para Al₂O₃, 1.92 Å/ciclo para ZnO y 0.48Å/ciclo para TiO₂. Los espesores seleccionados para sintetizar fueron 1.0 μm, 0.5 μm y 0.39 μm, lo que requirió 10000, 2605 y 8125 ciclos respectivamente. Cabe destacar que los espesores obtenidos mediante ALD fueron verificados utilizando elipsometría, técnica que se abordará en el siguiente apartado.

3.3 Elipsometría

Una vez sintetizados los materiales en los sustratos mediante la técnica de ALD, fue necesario determinar los parámetros requeridos, como el espesor y el índice de refracción, para el diseño de los anillos micro-resonantes basados en guías de onda monomodales. La elipsometría permite medir el cambio en la polarización de la luz reflejada o transmitida por un material o estructura, representado este cambio mediante la amplitud (ψ) y la diferencia de fase (Δ). La respuesta obtenida depende de las propiedades ópticas y del espesor del material. La elipsometría se utiliza principalmente para determinar espesores en películas delgadas, lo que permite calcular el espesor resultante de la síntesis por ALD. Además, esta técnica se utiliza para caracterizar la composición, cristalinidad, rugosidad (esparcimiento), índice de refracción, concentración de dopante y otras propiedades del material que afectan su respuesta óptica. (Woollam, 2018)

Para el cálculo del índice de refracción, es necesario que las ecuaciones de Maxwell se cumplan cuando la luz interactúa con un material, lo que da lugar a las condiciones de frontera en las interfaces. La luz incidente se reflejará y refractará en la interfaz, como se muestra en la Figura 16. El ángulo entre el rayo incidente y la normal de la superficie (θ_i), será igual al ángulo reflejado (θ_r). La luz que ingresa en el material se refracta en un ángulo θ_t dado por la ley de Snell.

$$n_i \sin\theta_i = n_t \sin\theta_t \quad (40)$$

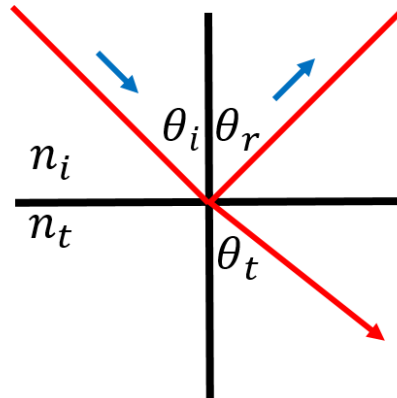


Figura 16. La luz se refleja y refracta de acuerdo a la ley de Snell.

Lo mismo ocurre en cada interfaz, donde una parte de la luz se refleja y el resto se transmite con un ángulo refractado. Las condiciones de frontera generan soluciones distintas para los componentes del campo eléctrico, tanto paralelos como perpendiculares a la superficie de la muestra. De esta manera, la luz puede descomponerse en componentes ortogonales con respecto al plano de incidencia. Los campos eléctricos paralelos y perpendiculares a dicho plano corresponden a la polarización p y s, respectivamente. Estas dos componentes son independientes y pueden calcularse por separado mediante las ecuaciones de Fresnel, las cuales describen la cantidad de luz reflejada y transmitida entre interfaces.

$$r_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = \frac{n_t \cos\theta_i - n_i \cos\theta_t}{n_t \cos\theta_i + n_i \cos\theta_t} \quad (41)$$

$$t_p = \frac{E_{tp}}{E_{ip}} = \frac{2n_i \cos\theta_i}{n_t \cos\theta_i + n_i \cos\theta_t} \quad (42)$$

$$r_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = \frac{n_i \cos\theta_i - n_t \cos\theta_t}{n_i \cos\theta_i + n_t \cos\theta_t} \quad (43)$$

$$t_s = \frac{E_{ts}}{E_{is}} = \frac{2n_i \cos\theta_i}{n_i \cos\theta_i + n_t \cos\theta_t} \quad (44)$$

Las estructuras de películas delgadas implican múltiples interfaces, donde los coeficientes de transmisión y reflexión de Fresnel se aplican en cada una. Es crucial rastrear la fase relativa de cada componente de luz para determinar con precisión el haz total reflejado y transmitido. Para lograrlo, se define el espesor de fase de la película como:

$$\beta = 2\pi \left(\frac{d_1}{\lambda}\right) n_i \cos \theta_i \quad (45)$$

El espesor de la película se determina por la interferencia entre la luz reflejada en la superficie y la luz que atraviesa película. La elipsometría se enfoca principalmente en como las componentes p y s de la luz cambian al reflejarse o transmitirse a través de la muestra. Así, el haz de referencia se convierte en un elemento clave del experimento. Una polarización conocida incide en la muestra y, tras reflejarse o transmitirse, se mide la polarización de salida. El cambio en esta polarización es lo que se mide en elipsometría, comúnmente expresado como:

$$\frac{R_p}{R_s} = \tan \psi e^{i\Delta} \quad (46)$$

En la Figura 17 se muestra un ejemplo de medición elipsometría. La luz incidente, con polarización lineal, contiene las componentes p y s . Al reflejarse, la luz experimenta cambios tanto en amplitud (ψ) como en fase (Δ) para las componentes p y s . La elipsometría se encarga de medir estos cambios y asociarlos a espesor e índice de refracción de los materiales involucrados.

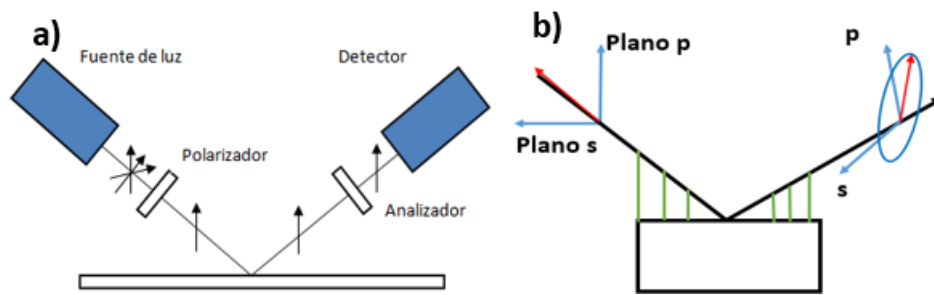


Figura 17. Medición de elipsometría a) componentes que integran un elipsómetro y b) visualización en planos de polarización (Ortega-Bailon et al., 2012).

Los componentes principales para recopilar datos de elipsometría son los siguientes: fuentes de luz, polarizador, muestra, analizador de polarización y detector. Una fuente de luz produce luz no polarizada que luego viaja a través de un polarizador. El polarizador permite que pase la luz de una orientación de campo eléctrico preferida. El eje del polarizador está orientado entre los planos p y s , de modo que ambos lleguen a la superficie de la muestra. La luz linealmente polarizada se refleja en la superficie de la muestra, se polariza elípticamente y viaja por un polarizador que gira continuamente (compensador rotacional). La cantidad de luz transmitida depende de la orientación del polarizador (o compensador rotacional) en relación con la "elipse" formada por el campo eléctrico reflejado por la muestra. El detector convierte esta luz en una señal electrónica para determinar la polarización reflejada. Esta información se compara

con la polarización de entrada conocida para calcular el cambio de polarización provocado en la muestra, lo cual se mide como los parámetros elipsométricos (ψ) y (Δ). En la Figura 18 se presenta un diagrama de flujo que ilustra el proceso de obtención de datos de elipsometría.

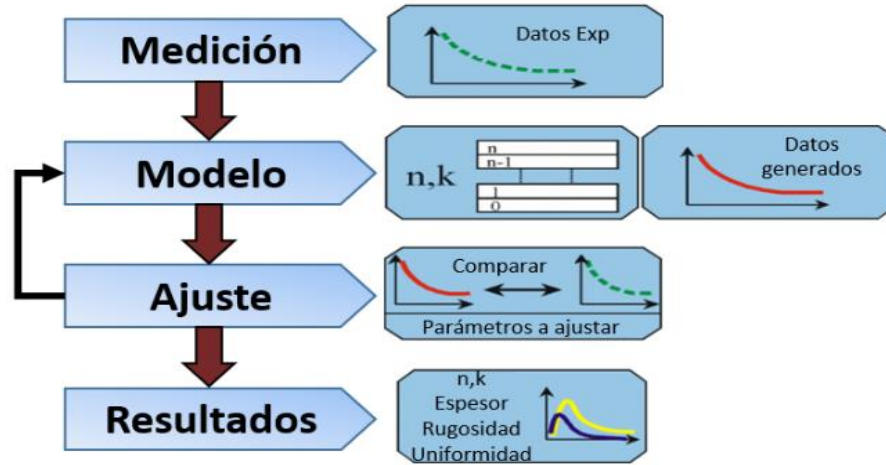


Figura 18. Diagrama de flujo del análisis de datos en elipsometría (Woollam, 2018).

3.4 FT-IR

Además del utilizar la elipsometría para caracterizar los materiales, se empleó la espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR, por sus siglas en inglés) para verificar si los materiales transparentes sintetizados mediante ALD correspondían a las características esperadas. En la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), la radiación IR atraviesa la muestra, donde una parte es absorbida y otra parte es transmitida y analizada. El espectro resultante refleja la absorción y transmisión molecular, creando una huella única para cada muestra. En general, no existen dos estructuras moleculares que generen el mismo espectro infrarrojo, lo que hace que la espectroscopia infrarroja sea una herramienta valiosa para diversos tipos de análisis. Permite identificar materiales, evaluar la calidad o consistencia de la muestra y cuantificar los componentes presentes.

Un espectro infrarrojo corresponde a las frecuencias de vibración de los enlaces atómicos que componen un material. Debido a que cada material es una combinación única de átomos, no existen dos compuestos diferentes que generen un espectro infrarrojo idéntico.

Además, el tamaño de los picos en el espectro indica directamente la cantidad de material presente. La espectroscopia infrarroja se ha convertido en una herramienta excelente para el análisis cuantitativo.

En la Figura 19 se pueden observar los componentes que conforman un FT-IR. Este dispositivo incluye una fuente de energía que emite longitudes de onda en el rango infrarrojo, que luego ingresa a un interferómetro. En este interferómetro, un prisma separa las frecuencias individuales de las energías emitidas por la fuente infrarroja. Un rayo de luz se refleja en un espejo plano fijo, mientras que el otro rayo se refleja en un espejo plano montado en un mecanismo que permite su movimiento a distancias muy cortas. Ambos haces se reflejan en sus respectivos espejos y se recombinan al encontrarse nuevamente en la rejilla o divisor de haz. Esta recombinación genera un efecto de interferencia, y la señal resultante viaja hacia la muestra de interés, donde ciertas longitudes de onda son absorbidas y otras transmitidas. El haz que emerge de la muestra es capturado por un detector que mide la cantidad de energía de cada frecuencia, interpretándose como una gráfica de intensidad de frecuencias conocida como "interferograma".

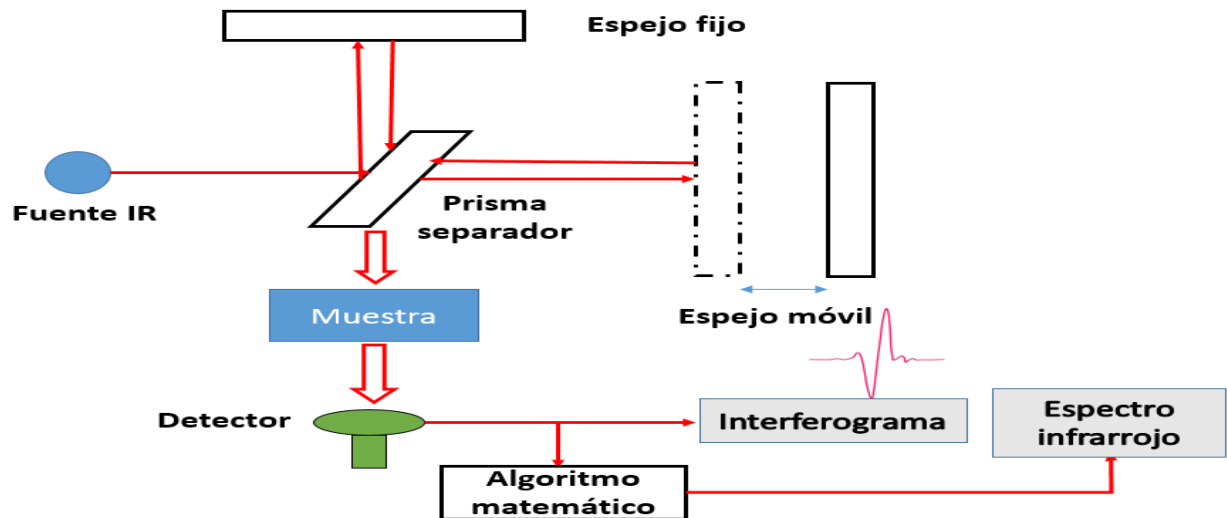


Figura 19. Mecanismo de funcionamiento del FT-IR (Themo Nicolet, 2001a).



Figura 20. Procesamiento de datos mediante el uso de FFT por la computadora (Themo Nicolet, 2001b).

Una vez obtenido el interferograma, es necesario analizarlo utilizando transformadas de Fourier, para procesar de frecuencias individuales. Este análisis es llevado a cabo por el software del equipo, que presenta la información espectral de la muestra, como se puede observar en la Figura 20.

3.5 COMSOL

Una vez caracterizadas las películas delgadas mediante elipsometría y espectroscopia FT-IR, se procedió a realizar un diseño utilizando COMSOL Multiphysics, un software comercial especializado en la simulación de aplicaciones físicas y de ingeniería.

COMSOL utiliza el método de elemento finito (FEM) para aproximar soluciones de ecuaciones diferenciales parciales en geometrías complejas. Este método numérico permite realizar simulaciones precisas de fenómenos físicos.

A continuación se presenta los pasos que usa el elemento finito para resolver ecuaciones:

1. Encontrar la formulación débil de la ecuación diferencial integrando en ambos lados, para luego multiplicar cada término por una función de prueba.
2. Aproximar nuestra solución exacta utilizando una función base.
3. Obtener nuestra matriz de diferenciación.
4. Resolver el sistema lineal de ecuaciones para encontrar la incógnita.

El software tiene la capacidad de realizar simulaciones en 3 dimensiones; sin embargo, en nuestro caso se optó por realizar análisis en estructuras 2D, esto debido que las estructuras propuestas se está asumiendo que son homogéneas, uniformes, sin presencia de rugosidad y con un valor de índice de refracción constante entre las interfaces; teniendo ventaja los análisis 2D por tener un requerimiento computacional inferior sobre los estudios de 3D. Se utilizó COMSOL para analizar la sección transversal de las guías de onda ópticas y el filtrado por micro-anillos resonantes, diseñados para propagar el modo fundamental a la longitud de onda de telecomunicaciones ópticas (1.55 μm).

3.5.1 Análisis de la sección transversal.

Para el análisis de la sección transversal se utilizó el asistente “Wave Optics” junto a la interfaz “Electromagnetic Waves, Frequency Domain” (EWFD) de COMSOL. En este estudio, se calcularon parámetros ópticos y estructurales para la propagación de los modos fundamentales TE_{00} , (Saleh, 2019) que incluyeron el índice de refracción efectivo, ancho efectivo, distribución de intensidad, y el análisis de la onda evanescente. A continuación, se presenta los parámetros de simulación considerados para el estudio de la sección transversal de la guía:

- **Longitud de onda de operación:** 1.55 μm
- **Espesores determinados por la técnica de ALD:** 1.00 μm (Al_2O_3), 0.50 μm (ZnO) y 0.39 μm (TiO_2)
- **Índices de refracción para el núcleo:** Al_2O_3 , ZnO y TiO_2
- **Índice de refracción del aire para la cubierta:** 1.00
- **Índice de refracción del sustrato (SiO_2):** 1.44
- **Rango de valores de anchura:** 0.500 μm -3.0 μm
- **Resolución de anchos:** 0.1 μm

En la Figura 21 se muestra el esquema de trabajo para el procesamiento de datos:

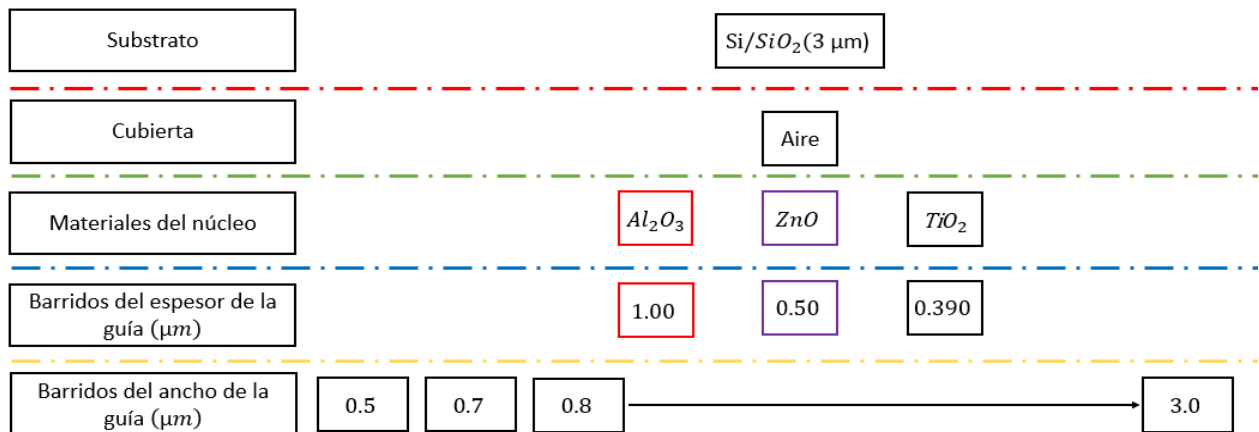


Figura 21. Diagrama de configuraciones para resultados de sección transversal.

Este estudio fue esencial para evaluar la capacidad de las estructuras para propagar únicamente modos fundamentales en el rango de las telecomunicaciones ópticas, así como para comprender la distribución de la intensidad entre las interfaces mediante un análisis centrado en la onda evanescente. La Figura 22

ilustra un ejemplo de la distribución de intensidad del modo fundamental TE_{00} en escala de grises para la configuración de la alúmina.

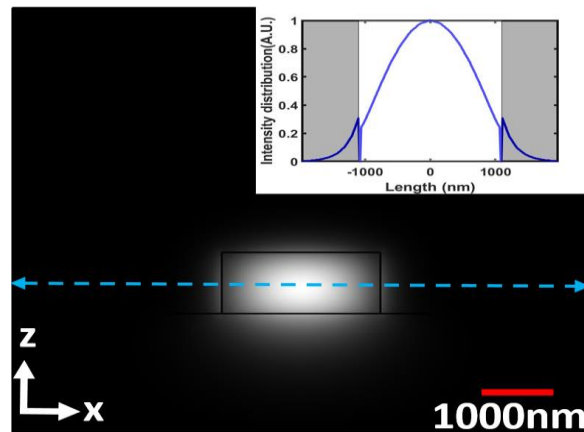


Figura 22. Distribución de intensidad del modo fundamental TE_{00} a $1.55 \mu\text{m}$ para la configuración del Al_2O_3 .

Los parámetros calculados fueron necesarios para la simulación posterior de los micro-anillos resonantes, centrándose en el estudio de filtrado por resonancia.

3.5.2 Análisis del filtrado por resonancia.

Para el estudio del filtrado de resonancia, se utilizó el asistente “Wave Optics” junto con la interfaz “Wave Optics, Electromagnetic Wave, Beam Envelopes” (EWBE) de COMSOL. En el análisis de filtrado de señales ópticas en micro-anillos resonantes, se propuso una estructura capaz de filtrar al menos 9 longitudes de onda en el área de las telecomunicaciones, enfocándose en la banda C ($1.529 \mu\text{m}$ - $1.566 \mu\text{m}$), ver Figura 24. Se realizó un análisis con un radio inicial de anillo de $60 \mu\text{m}$, seguido de radios de $120 \mu\text{m}$ y $180 \mu\text{m}$; los motivos se detallarán en la sección de resultados. Además, se buscó determinar la distancia de separación óptima entre guía de onda canal bus y el resonador de anillo, analizando el parámetro de separación d_g desde $0.2 \mu\text{m}$ hasta $0.7 \mu\text{m}$, con una resolución de $0.1 \mu\text{m}$. A continuación, se presentan los datos y resoluciones de simulación considerados para el estudio completo:

- **Espesor de la guía de onda de canal por material:** $1.00 \mu\text{m}$ (Al_2O_3), $0.50 \mu\text{m}$ (ZnO), y $0.39 \mu\text{m}$ (TiO_2)
- **Ancho de la guía de onda de canal por material:** $2.20 \mu\text{m}$ (Al_2O_3), $1.40 \mu\text{m}$ (ZnO), y $0.70 \mu\text{m}$ (TiO_2)
- **Índices de refracción** para los núcleos de Al_2O_3 , ZnO y TiO_2
- **Índice de refracción del aire para la cubierta:** 1.00

- Índice de refracción del sustrato (SiO_2): 1.44
- Rango de valor de d_g : $0.20 \mu\text{m}$ - $0.60 \mu\text{m}$
- Resolución de (d_g): $0.1 \mu\text{m}$
- Rango de longitud de onda de operación (Banda C): $1.528 \mu\text{m}$ - $1.566 \mu\text{m}$
- Resolución de la longitud de onda: 0.04 nm
- Radio del anillo: $60 \mu\text{m}$

En la Figura 23 se muestra el esquema de trabajo del procesamiento de datos utilizado para el análisis de filtrado:

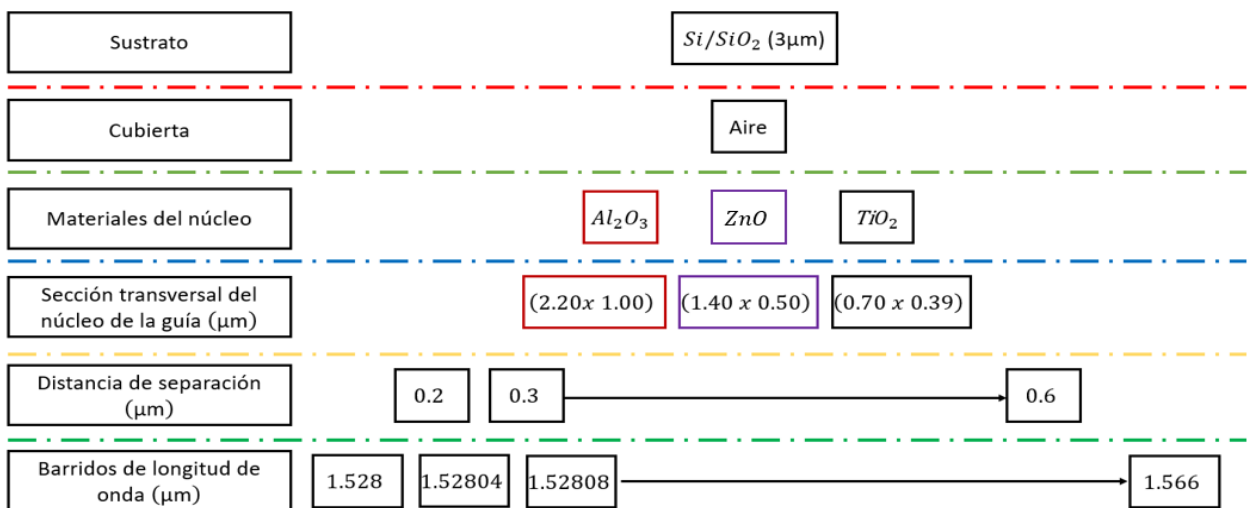


Figura 23. Diagrama de configuraciones para resultados de filtrado.

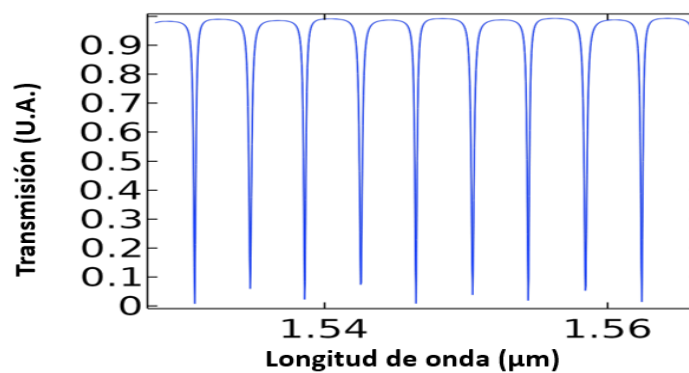


Figura 24. Transmitancia espectral del miro-anillo resonante de ZnO con una sección transversal ($1.4 \mu\text{m} \times 0.50 \mu\text{m}$), con una d_g : $0.5 \mu\text{m}$, y para un radio de anillo de $60 \mu\text{m}$.

La Figura 24 muestra una gráfica de transmitancia con una resolución de 950 puntos, equivalente a 0.04 nm para las longitudes de onda en la banda C. En la Figura 25, la luz de una determinada longitud de onda

viaja a través de la guía de onda bus, mientras que la luz de otras longitudes de onda es completamente filtrada por el micro-anillo resonante.

La Figura 25 ilustra los extremos de distribución óptica de un micro-anillo resonante, mostrando el comportamiento de la luz cuando viaja completamente a través de la guía de onda de canal y cuando una gran parte de la señal es filtrada en la cavidad.

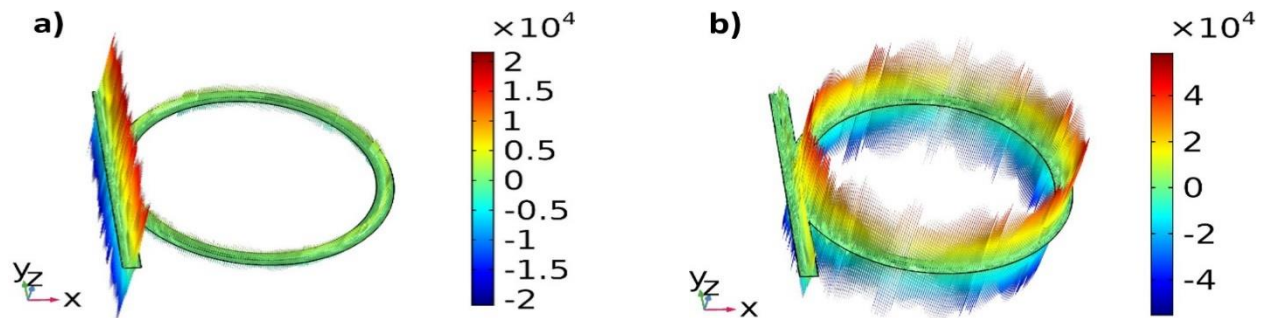


Figura 25. Análisis de filtrado del micro-anillo resonante de la configuración ZnO con d_g de $0.500 \mu\text{m}$ a) la longitud de onda 1552.56 nm que pasa por el Bus, b) la longitud de onda de 1554.40 nm filtrada hacia el anillo.

A través del análisis de filtrado de resonancia, se calcularon los siguientes parámetros: Full-width half maximum (*FWHM*), free spectral range (*FSR*), factor de calidad (*Q-Factor*), fineza (*F*), coeficiente de extinción (r_e). Para optimizar la selectividad de la mejor configuración de cada material, se utilizó el parámetro r_e para determinar el parámetro d_g ideal para resonadores de anillo de $60 \mu\text{m}$, el cual se describirá en detalle en la sección de resultados. A partir de ahí, se modificó la configuración en el análisis de anillos, aumentando el radio a $120 \mu\text{m}$ y $180 \mu\text{m}$, mientras se mantenía el parámetro d_g ideal de $60 \mu\text{m}$. Una vez establecida la configuración óptima para cada material, se procedió a fabricar las películas delgadas para transformarlas en guías de onda de canal utilizando la litografía por haz de electrones (EBL, por sus siglas en ingles).

3.6 Litografía por haz de electrones (EBL)

El EBL es una técnica que usa un microscopio de barrido electrónico (SEM) para realizar una litografía con una resolución superior a técnicas convencionales, como la litografía óptica. El principio de operación se basa en un haz de electrones enfocado que incide sobre una muestra con una película conductora. El EBL se utiliza para hacer fabricación de dispositivos de guías de onda ópticas y micro-dispositivos híbridos de

óptica integrada. La técnica de EBL tiene resolución de alrededor de 10 nm mientras que la litografía óptica convencional tiene una resolución de 120-180 nm (ACCSi, 2023; Villatoro 2009).

En la Figura 26 se muestra la metodología de fabricación de una guía de onda TiO_2 sub-longitud de onda, mono-modal, diseñada para el área de telecomunicaciones ópticas, en una plataforma aislada (Si-SiO_2) con un espesor de SiO_2 de $3\ \mu\text{m}$:

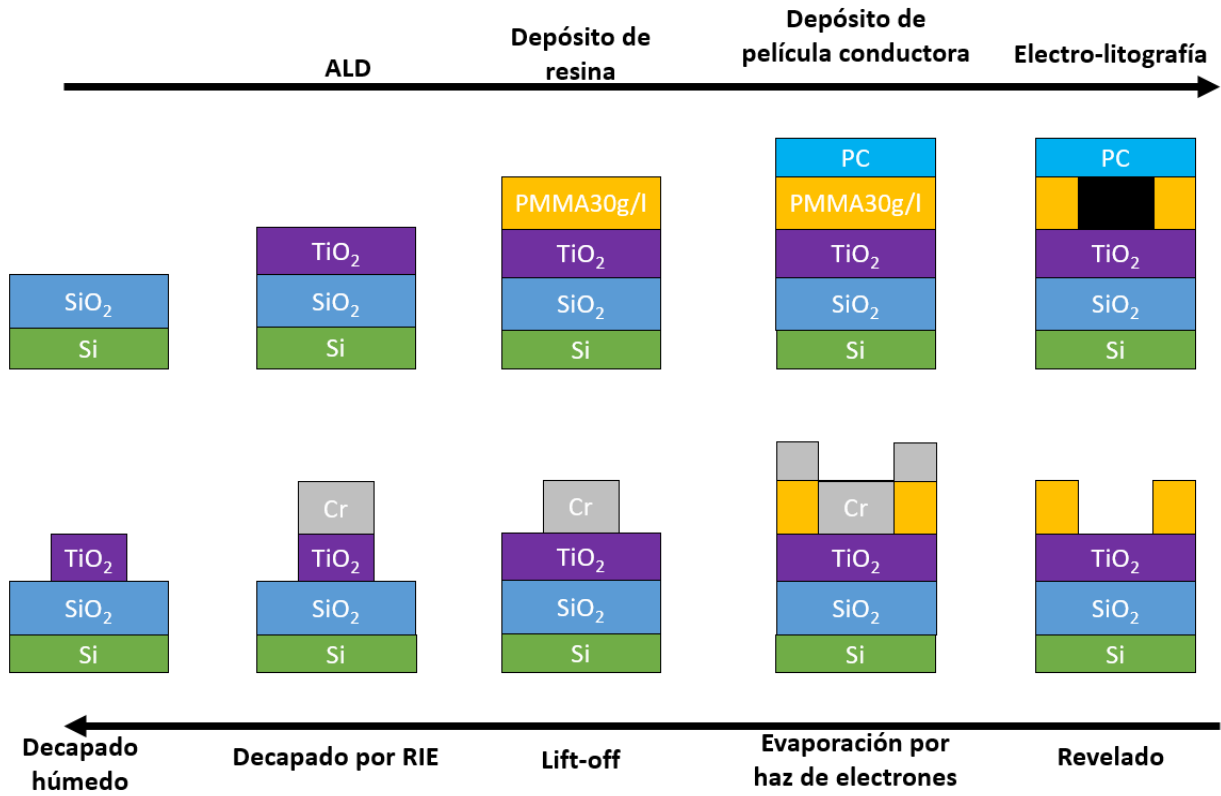


Figura 26. Esquema de fabricación mediante el uso de EBL para una resina negativa en una guía de onda de canal mono-modal de TiO_2 , sub-longitud de onda, sobre una plataforma aislada (Si/SiO_2).

En las siguientes subsecciones se describen cada uno de los pasos que conforman la logística de fabricación mediante el EBL.

3.6.1 Depósito de resina y película conductora:

Una vez que la muestra ha sido sintetizada por la técnica de ALD, el siguiente paso consiste en preparar las muestras para todo el proceso de fabricación de EBL. El primer paso es cortar las muestras para obtener

un área de 2 cm x 2 cm, como se puede apreciar en la Figura 27, para luego hacer un proceso de limpieza que consta de los siguientes pasos:

1. Sumergir las muestras en un baño ultrasónico durante 10 minutos en 20 ml de agua desionizada y 2ml de un limpiador de muestras conocido como “DECON”.
2. Sumergir las muestras en un baño ultrasónico durante 5 minutos en 20 ml de agua desionizada.
3. Sumergir las muestras en un baño ultrasónico durante 5 minutos en 20ml de alcohol isopropílico (IPA).
4. Secar las muestras utilizando una pistola de aire.

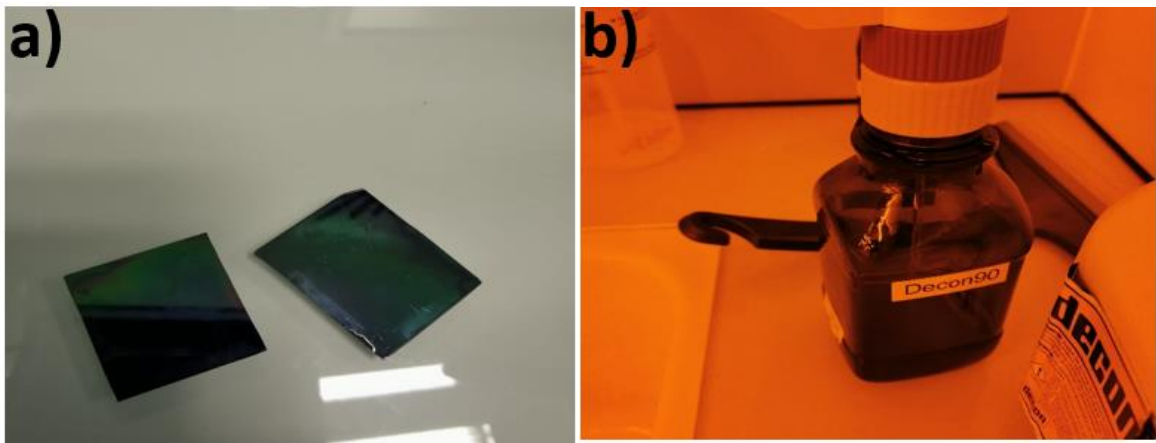


Figura 27. Fotos en el cuarto limpio (UTT) a) dos muestras de ZnO (2 cm x 2 cm) y b) DECON utilizado para la limpieza de las muestras.

Una vez que la muestra está limpia, el siguiente paso es depositar la resina negativa PMMA30g/l utilizando una centrifugadora (spin coating en inglés). El PMMA30g/l es el polímero empleado para generar los patrones de litografía en la técnica EBL. Es importante destacar que existen dos tipos de polímeros utilizados sensibles a electrones en la litografía: los positivos y los negativos. En los polímeros positivos, cuando el haz de electrones pasa sobre el polímero y se realiza el revelado, las áreas no expuestas son eliminadas durante el proceso. En cambio, en los polímeros negativos, el relevado elimina las áreas que fueron expuestas por la litografía, conservando el patrón creado. En la Figura 28 se ilustran los diferentes tipos de resinas.

Los parámetros de la centrifugadora empleados para obtener una película de 180 nm del polímero PMMA30g/l son los siguientes:

- Velocidad: 4000 rpm
- Aceleración: 3000 rpm/s
- Tiempo: 30 segundos

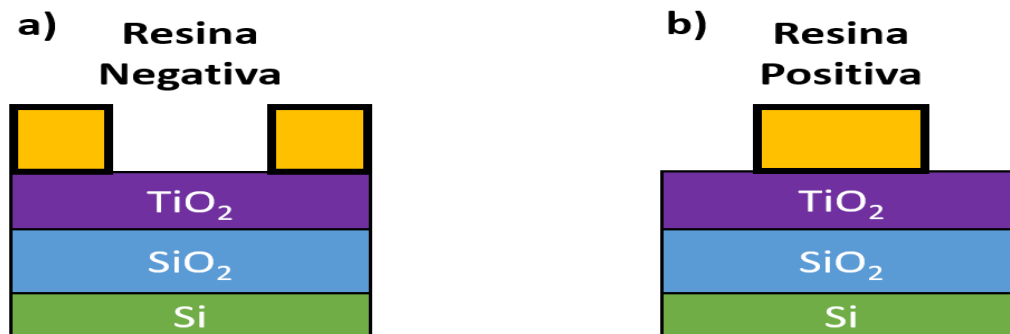


Figura 28. Tipos de resina: a) Resina negativa y b) resina positiva.

Después de depositar el polímero negativo con la centrifugadora, es necesario hornear la muestra a 160°C durante 3 horas. Una vez completado el horneado, se debe aplicar una película conductora para mejorar el flujo de electrones del haz de electrones en el EBL, utilizando nuevamente la centrifugadora con la misma receta para el depósito de PMMA30g/l. El equipo utilizado para el depósito y el horneado se muestra en la Figura 29.



Figura 29. Equipo para depósito de polímero: a) centrifugadora y b) horno térmico. Fotos cuarto limpio UTT.

Una vez que el polímero y la película conductora han sido depositados en las muestras, se procede a realizar la litografía electrónica.

3.6.2 Litografía por haz de electrones:

Una vez que las muestras están preparadas con la película conductora, se pueden procesar mediante la técnica de litografía por haz de electrones. Es importante mencionar que la litografía por haz de electrones es ejecutada por un microscopio de barrido electrónico (SEM) adaptado. El SEM es un tipo de microscopia que emplea un haz de electrones de alta energía, el cual interactúa con la superficie de la muestra, generando diversas señales que permiten formar una imagen detallada de dicha superficie. A diferencia del microscopio óptico, que utiliza luz y lentes para obtener una imagen con resolución en micrómetros; el SEM emplea un haz de electrones y lentes magnéticas para generar imágenes con una resolución de nanómetros. En la Figura 30 se muestran los componentes que conforman un SEM.

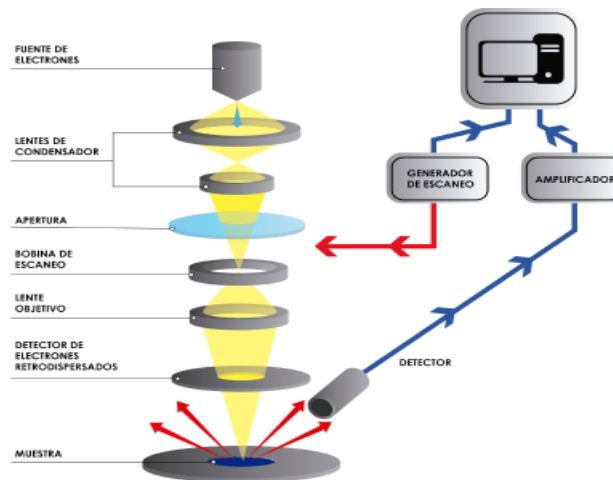


Figura 30. Componentes que integra el SEM (Metalinspec, 2022).

Es crucial que la columna del SEM este al vacío antes de ser usado, ya que esto permite que los electrones viajen sin ningún obstáculo hacia la muestra. Una vez alcanzado el vacío, se puede activar el cañón de electrones, que dispara los electrones hacia la cámara donde se encuentra el ánodo. El ánodo atrae a los electrones, formando así un haz dirigido.

El haz viaja por la columna hasta llegar a una lente magnética que genera un campo magnético el cual interactúa con los electrones ocasionando un haz más preciso por la fluidez de los electrones. Después de atravesar la lente magnética, los electrones viajan hacia la bobina de barrido, que generan un campo magnético capaz de posicionar el haz de electrones con gran precisión, permitiendo cubrir toda la superficie de la muestra. La muestra se coloca en la platina, donde será grabada por el SEM.

El detector de electrones secundarios captura los electrones emitidos por la muestra tras la interacción del haz, lo que permite al SEM generar imágenes detalladas de la superficie, las cuales son analizadas por una computadora. El segundo detector, que se encarga de captar los electrones retro dispersados, recoge los electrones que provienen del haz después de interactuar con la muestra, contribuyendo significativamente a la generación de imágenes superficiales junto con el detector de electrones secundarios. Algunos SEM también cuentan con un tercer detector, que recopila los rayos X generados por la interacción del haz de electrones con la muestra, permitiendo un análisis cualitativo de la composición elemental a través de la espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS).

Comprendiendo el principio de funcionamiento de un SEM, es importante destacar que para llevar a cabo la litografía, es necesario que el cañón de electrones permanezca encendido durante todo el proceso de diseño. Por lo general, la mayoría de los microscopios de barrido electrónico apagan el haz de electrones al moverse de un punto a otro. Una característica notable de este tipo de litografía es que el haz de electrones expone el patrón de diseño punto por punto y línea por línea. Para que el SEM realice la litografía sobre las muestras, es necesario cargar un mapa de código de la librería GDS utilizando Python, como se ilustra en la Figura 31.

Es importante destacar que se desarrollaron dos conjuntos de mapas de diseño GDS para la fabricación mediante EBL, resultado de las dos estancias realizadas en los laboratorios de la Universidad de Tecnología de Troyes (UTT) y la retroalimentación obtenida del grupo de trabajo (programme ECOS NORD M19P01). Los primeros diseños consistieron en 9 familias de dispositivos, cada una con 5 variantes optimizadas para la propagación mono-modal. Estos dispositivos incluían: 4 familias de guías de onda rectas, 1 familia de divisores de potencia, 1 familia de acopladores direccionales, 1 familia micro-anillos resonante pasa-todo, 1 familia de micro-anillos de inyectado y 1 familia de micro-anillos de polea.

Durante la segunda estancia, se recibió una retroalimentación sobre los diseños, lo que resultó en un esquema final GDS, mostrado en la Figura 32. Las modificaciones permitieron una mayor eficiencia en los tiempos de fabricación utilizando el SEM. Como se observa en la Figura 32, se incluyeron 6 familias de dispositivos optimizados para la propagación mono-modal, con los siguientes componentes: 6 micro-anillos de polea, 6 micro-anillos pasa-todo, 6 micro-anillos de inyectado y 15 guías de onda rectas con diferentes anchos.

En ambos casos, cada dispositivo tenía una separación de 30 μm entre sí, siguiendo los estándares de fabricación para optimizar el acoplamiento de luz entre los dispositivos, y una distancia de 1 mm entre

cada familia. En el primer diseño propuesto, se fabricaron guías de onda con un ancho inicial de $3\ \mu\text{m}$, que se fue reduciendo gradualmente hasta alcanzar el ancho mono-modal deseado, funcionando como un “taper óptico”, con guías de onda de una longitud total de 2.00 cm.

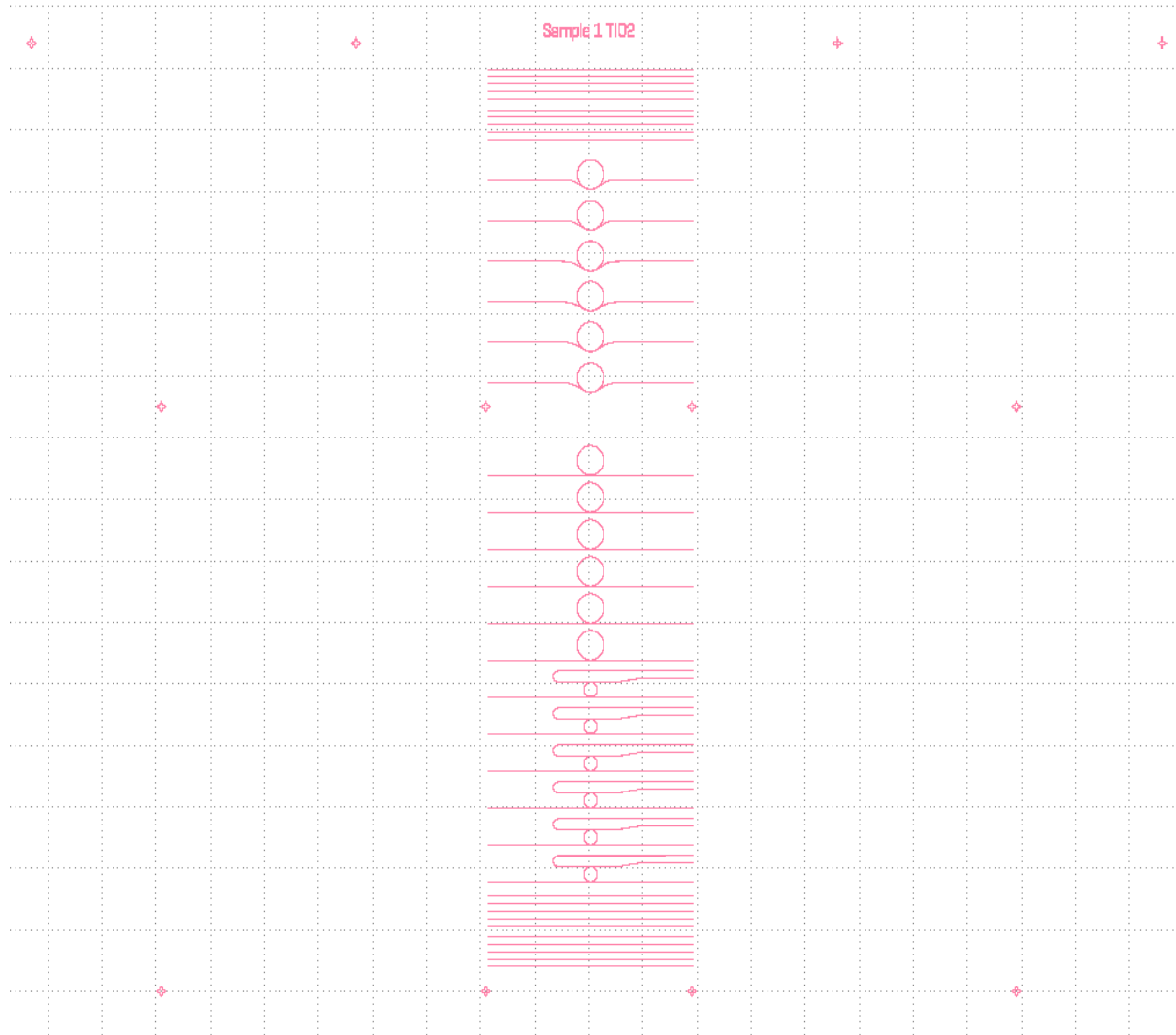


Figura 31. Propuesta final del mapa de código de diseño GDS para el SEM.

En el diseño final, se implementó una guía con un ancho inicial de 20 nm, incrementando progresivamente hasta llegar al ancho mono-modal, siguiendo el concepto de “taper invertido”, con una longitud total de 16 cm. Estos aspectos se detallan en la sección de propuesta de acoplamiento fibra-guía y en la sección de resultados. La Figura 32 ilustra los cambios realizados en los diseños de dispositivos mono-modales de TiO_2 entre la primera y segunda estancia en la UTT. Es fundamental realizar los siguientes pasos de calibración antes de proceder con la litografía en el SEM:

- Enfocar el haz de electrones.
- Sincronizar el cañón de electrones con la platina (porta muestras).
- Detectar y ajustar la orientación de la esquina de la muestra.
- Corregir el estigmatismo.
- Cargar los archivos GDS en el SEM.

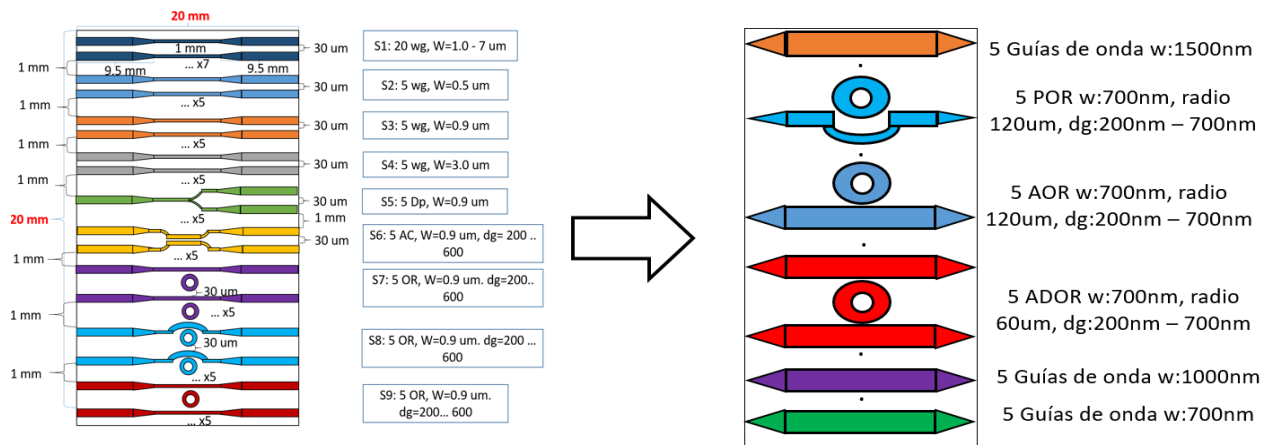


Figura 32. Esquema de dispositivos a fabricar, desde la primera hasta la segunda estancia, para estructuras monomodales en la configuración del material TiO_2 .

La Tabla 2 muestra los parámetros utilizados para la litografía de las muestras.

Tabla 2. Parámetros considerados para la realización de la litografía por haz de electrones.

Parámetros	Valores
Vacío de la cámara	1.78×10^{-6} mbar
Vacío de la pistola	4.2×10^{-10} mbar
Alta tensión de electrones (EHT)	20 kV
Tamaño de la apertura	$15 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$
Magnitud	1.0
Distancia de trabajo	6 mm
Exposición	$300 \mu\text{C}/\text{cm}^2$
Corriente del haz	58.47 pA

La Figura 33 muestra el equipo utilizado para llevar a cabo la litografía por haz de electrones, específicamente el SEM ubicado en los cuartos limpios de la UTT. Para nuestros diseños, el SEM requería aproximadamente 6 horas para completar la litografía en una sola muestra. Una vez expuesta la muestra

mediante la técnica de EBL, se procede a realizar el revelado de la muestra, dicho proceso se explicará con mayor detalle en la siguiente subsección.



Figura 33. Fotografías del cuarto limpio de la UTT, a) Equipo de litografía por haz de electrones, b) porta muestras, c) imagen del cañón del SEM, d) procedimiento de calibración del SEM.

3.6.3 Revelado:

En cualquier técnica de litografía, el revelado es el paso que le sigue a la exposición. Este proceso, si se realiza adecuadamente debe generar el diseño creado por la litografía. En la Figura 34 se muestra el área de trabajo donde se llevará el proceso de revelado para la técnica EBL y el polímero que utilizamos. Este procedimiento consta de cuatro etapas:

1. La película conductora se remueve con la inmersión de la muestra en agua desionizada, durante 15 segundos.
2. La inmersión de la muestra en el revelador MIBK-IPA durante 60 segundos.
3. La inmersión de la muestra en el agente de paro IPA durante 15 segundos.

4. Secado rápido con pistola de aire



Figura 34. Envases que contienen los líquidos para el procedimiento de revelado.

3.6.4 Evaporación por haz de electrones:

Una vez que completado el proceso de revelado, es necesario depositar una mascarilla protectora sobre las estructuras procesadas. Las áreas expuestas al haz de electrones deben ser protegidas para el siguiente paso, que consiste en eliminar el exceso de material de la muestra, ya que las zonas expuestas por el EBL definen el ancho de las guías de onda de canal. La técnica utilizada para depositar la mascarilla protectora fue la evaporación asistida por haz de electrones. Esta técnica consiste en aplicar un alto voltaje a un filamento de tungsteno, generando electrones que son dirigidos al material fuente que se desea evaporar. El haz de electrones se controla mediante campos magnéticos, lo que permite que el material fuente alcance el estado de sublimación. El vapor resultante viaja hacia la muestra, que se encuentra situada sobre la fuente del material, actuando como un diodo cargado positivamente y recubriéndose con el material evaporado. En la Tabla 3 se presentan los metales utilizados como mascarillas protectoras para cada uno de los materiales transparentes.

Tabla 3. Parámetros de la evaporadora por haz de electrones para cada uno de los metales propuestos como mascarillas.

Metal	Aluminio (Al)	Níquel (Ni)	Cromo (Cr)
Utilizado para material transparente	Al ₂ O ₃ y ZnO	ZnO y TiO ₂	TiO ₂
Espesor (nm)	10	50	50
Presión (torr)	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁷		
Temperatura (°C)	20-30		30-45

En particular el cromo (Cr) fue utilizado para nuestro proceso, debido a que es un metal muy conocido y usado en el área de la optoelectrónica como mascarilla protectora en procesos de litografía. La técnica por evaporación asistida por haz de electrones fue fabricada usando el equipo "PLASSYS MEB 400". Es importante mencionar que solo se buscó depositar el metal en el área donde se expuso el haz de electrones, esto fue logrado con protección de papel aluminio para mejor el proceso de *lift-off*. En la Figura 35 se puede apreciar la evaporadora junto con la técnica para las muestras.

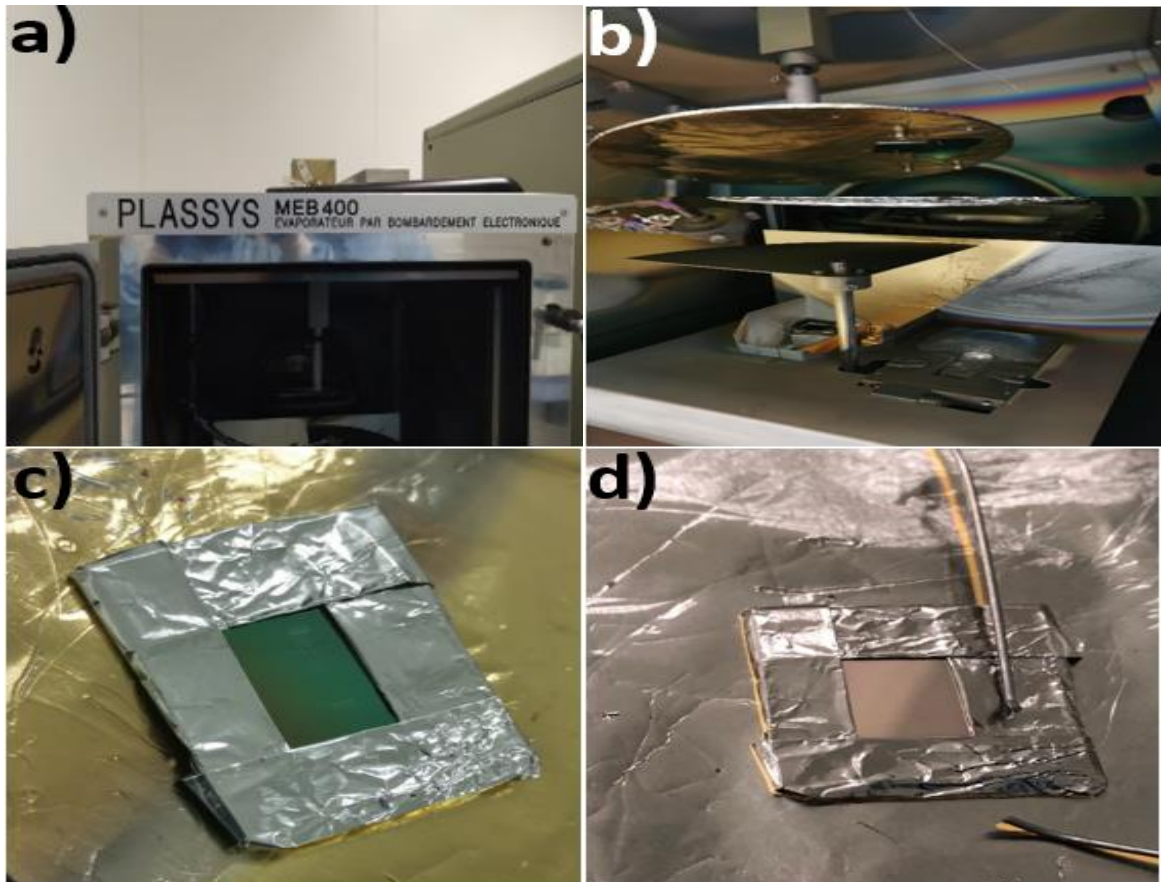


Figura 35. Equipo de evaporación, a) Evaporadora PLASSYS MEB 400, b) estructura interna de la evaporadora, emisor de material y porta muestra, c) muestra con la protección de papel aluminio antes de la evaporación de Cr y d) muestra después de ser depositar 40 nm de Cr.

Una vez completado con el proceso de evaporación para el crecimiento de la mascarilla, es necesario remover el exceso de Cr que no protege los patrones fabricados por EBL; este proceso se conoce como *lift-off*.

3.6.5 Lift-off:

Una vez que la mascarilla protectora fue depositada, es necesario realizar el proceso de despegue del metal sobrante, conocido en inglés como "*lift-off*". El proceso de *lift-off* consta de los siguientes pasos:

1. Sumergir la muestra en acetona durante 24 horas.
2. Realizar un baño sónico durante 5 minutos.
3. Aplicación de IPA a la muestra.
4. Secar rápidamente con una pistola de aire.

En la Figura 36 se muestra los pasos del *lift-off*.

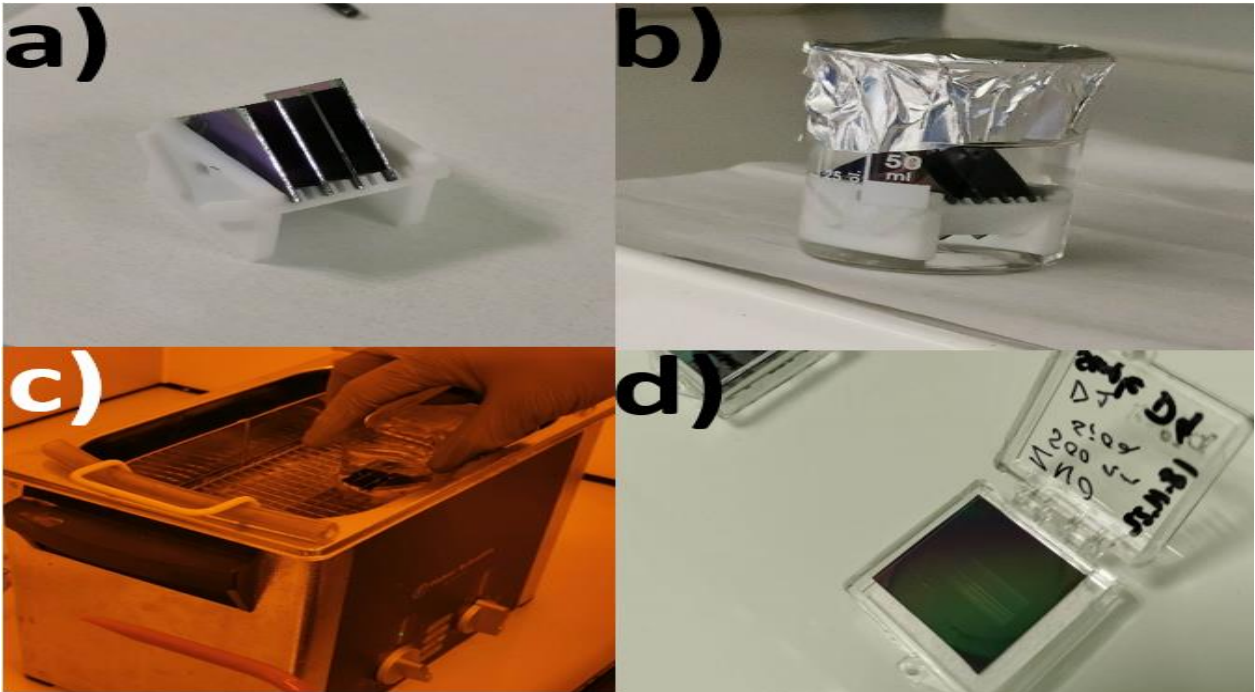


Figura 36. Proceso de eliminación del sobrante de la mascarilla: a) colocar las muestras recién tratadas por la técnica de evaporación asistida por haz de electrones en el portamuestras, b) sumergir las muestras en acetona durante 24 horas, c) aplicar baño sónico a las muestras, y d) muestra final después del proceso de *lift-off*.

El proceso de lift-off es esencial para proteger el patrón de litografía en pasos posteriores, como el decapado, que se abordará en el siguiente subtema.

3.6.6 Sistema de decapado/RIE:

Es esencial remover el material sobrante de la película delgada que no se utilizará como guía de onda para garantizar la funcionalidad óptima de los dispositivos opto-electrónicos. Cabe recordar que la técnica de ALD determinó el espesor de las muestras, mientras que la litografía electrónica se centra en el ancho de

la estructura para la propagación de la luz. Los siguientes puntos están relacionados con terminologías y parámetros estructurales relacionados con el decapado de materiales:

- **Velocidad de grabado vertical promedio:** La velocidad de grabado vertical promedio v_g , es la relación de la profundidad del patrón grabado durante la duración del grabado.

$$v_g = \frac{\text{profundidad del grabado}}{\text{tiempo de grabado}} \quad (47)$$

- **Selectividad (S):** Durante el decapado de un material, la máscara también puede ser atacada por agentes de grabado. El objetivo es reducir o anular la velocidad de grabado de la máscara respecto a la del material. Por lo tanto, definimos la selectividad, S , película/máscara como la relación de la velocidad de grabado vertical del material v_g , sobre la velocidad de grabado vertical de la máscara v_m .

$$S = \frac{v_g}{v_m} \quad (48)$$

Mientras mayor sea la selectividad, más fina y mejor conservada será la máscara. Por ejemplo, en el proceso de crío-grabado, la selectividad Si/SiO₂ es superior a 100:1. La máscara se graba muy poco por la química de la plasma SF₆/O₂.

- **Grado de anisotropía (A)** El grado de anisotropía A , representa la tendencia del proceso de grabado a realizarse predominantemente en la dirección vertical. Si el material tiene una tasa de grabado lateral v_l que es equivalente a su tasa de grabado vertical v_g , entonces el grado de anisotropía será igual a 0. Este es generalmente el caso de los ataques químicos en un medio líquido. Si la tasa de grabado lateral es cero, el grado de anisotropía será entonces igual a 1. Entonces tenemos:

$$A = 1 - \frac{v_l}{v_g} \quad (49)$$

Para obtener un grado de anisotropía que tienda a 1 es necesario disminuir la velocidad de grabado lateral. En la Figura 37 se tiene los diferentes tipos de patrones isotrópicos y anisotrópicos.

- **Pendiente de los lados (A)** En caso de que el grabado sea casi anisotrópico, podemos caracterizar el perfil de grabado por la pendiente de sus lados. Idealmente $A=1$ y la pendiente del perfil es de 90 grados.
- **Factor de aspecto:** El factor de aspecto FA es la relación entre la profundidad de grabado D y del patrón en la apertura O , es decir: $FA = D/O$.

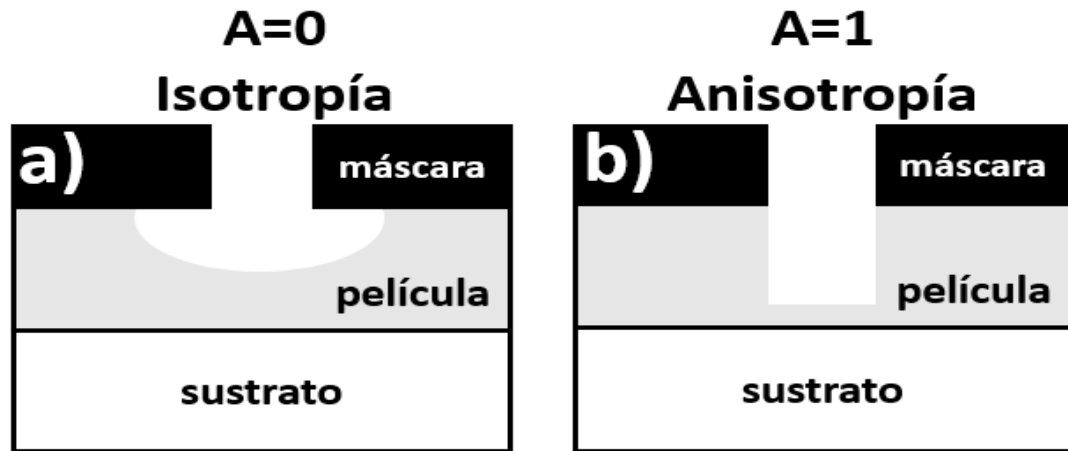


Figura 37. Patrones de grabado: a) isotrópico y b) anisotrópico.

En las técnicas de grabado se encuentran dos tipos: los grabados húmedos y en seco. En el grabado húmedo los materiales se decapan mediante el uso de un líquido químico. Ataque que puede ser muy selectivo, de bajo costo y de cinética rápida. Su desventaja es que se obtiene un grabado isotrópico. Mientras que el grabado seco se ha utilizado más en la actualidad para resolver los problemas de isotropía y contaminación ocasionada por los rastros del grabado húmedo. Es el paso obligado para acceder a tecnologías con un mayor control de calidad. Se trata de elegir el tipo de grabado en función de las dimensiones de los patrones a reproducir. De hecho, un sistema de grabado químico húmedo que es isotrópico, el resultado del grabado es inaceptable siempre que las dimensiones de los patrones sean del mismo orden de magnitud que el grosor de las capas atacadas. En la Figura 38 se muestra una tabla con las diferentes técnicas de grabado en seco.

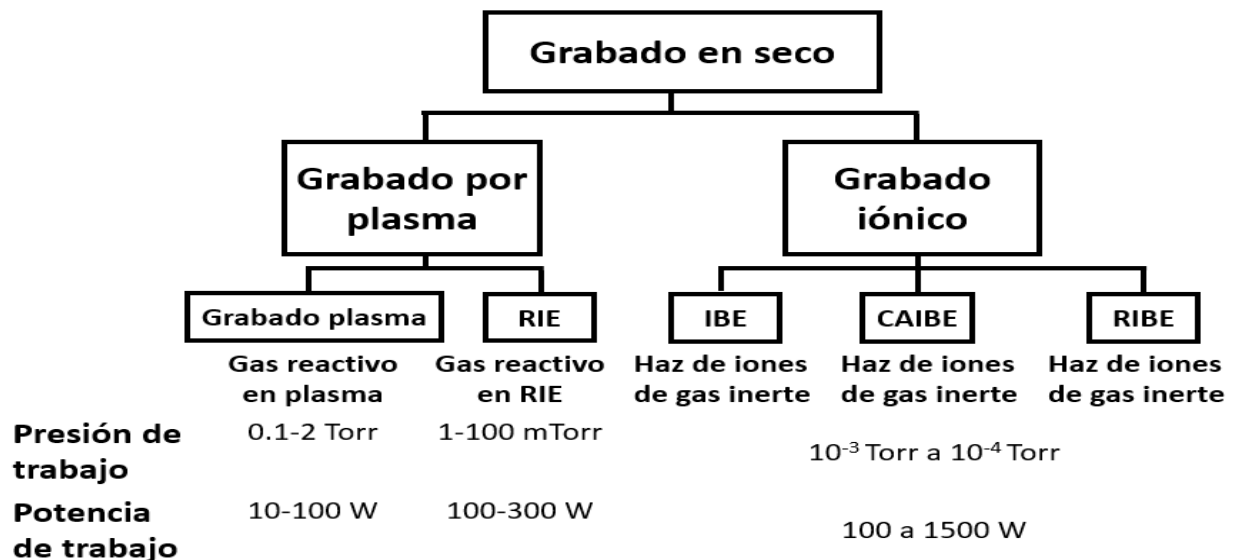


Figura 38. Principales técnicas de grabado en seco, parámetros de presión y potencia según cada técnica de grabado.

A continuación, se presenta una breve explicación de los diferentes tipos de decapado en seco:

- **Grabado por plasma:** La técnica de grabado con plasma utiliza una descarga luminiscente establecida a baja presión (10^{-2} a 1 Torr) genera especies químicamente activas y especies iónicas a partir de un gas; estas especies se combinan con la capa a grabar para formar compuestos volátiles evacuados por el sistema de bombeo, siendo una técnica conocida como decapado químico.
- **Grabado de iones:** El principio del grabado iónico consiste en utilizar haces de iones dirigidos hacia la muestra. Si los iones poseen una alta energía y son químicamente inactivos (por ejemplo, argón), entonces hay una reacción mecánica (mecanizado de iones). El grabado resultante es vertical (anisotropía significativa) pero sin selectividad. La energía cinética de los iones es del orden de 100 a 1000 eV. El grabado con haz de iones proporciona una anisotropía perfecta con respecto al grabado húmedo. Siendo conocida como una técnica de decapado física.

Un caso particular es cuando se combinan estos dos tipos de grabados en seco para dar el tipo de decapado iónico reactivo (RIE, por sus siglas en inglés) siendo la técnica que se usó para remover material en este proyecto. De esta forma, se asocia el mecanismo químico del grabado por plasma, que proporciona la selectividad, con el mecanismo físico del bombardeo de iones, logrando como resultado estructuras anisotrópicas a la muestras. El grabado iónico reactivo toma lugar en un reactor de plasma con electrodos paralelos, uno está conectado eléctricamente al sustrato, lo que aumenta el número de iones normales a la superficie, causando así una alta anisotropía sin pérdida apreciable de selectividad. En la Figura 39 se muestra un diagrama de la máquina de grabado disponible en los laboratorios de la Universidad de Troyes (L2n CNRS UMR 7076).

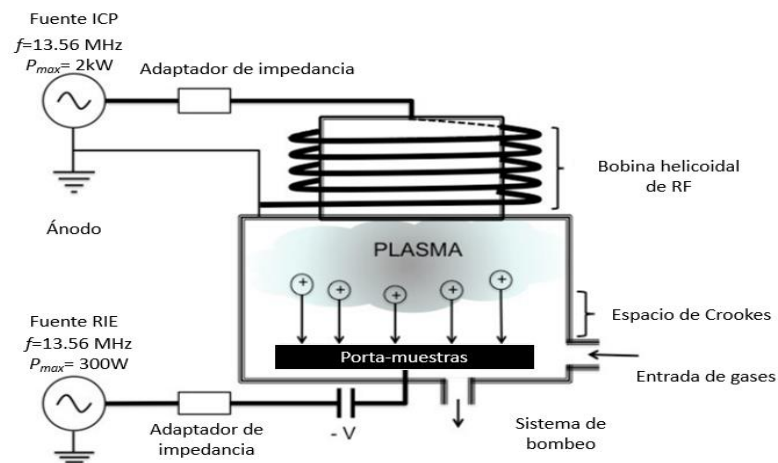


Figura 39. Esquema del marco de grabado RIE disponible en la plataforma de nanofab en la UTT.

El principio del grabado iónico reactivo es el siguiente: el cátodo que soporta el sustrato está conectado al generador RF (fuente RIE $f= 13.56$ MHz, $P_{max}= 300$ W) a través de un igualador de impedancia. Las paredes de la cámara conectada a tierra juegan el papel de ánodo. El sistema de bombeo está conectado a la cámara por una válvula de mariposa reguladora de presión. Las moléculas de gas introducidas en la cámara (entrada de gas) se ionizan por colisión con los pocos electrones primarios contenidos en el gas o de las paredes. Estos electrones, agitados por el campo de RF, se multiplican durante colisiones ionizantes. Se distingue, entre los dos electrodos, la zona luminosa (el plasma) que toca el ánodo conectado a tierra, y una zona oscura denominada “zona de Crookes” que rodea al cátodo. Esta zona de Crookes constituye la zona de influencia del cátodo con respecto al plasma.

En la zona de Crookes hay alternativamente iones o electrones según el signo de la alternancia de voltaje frecuencia de radio. Durante la alternancia positiva del voltaje de RF, los electrones son atraídos por el cátodo. Durante la alternancia negativa, son los iones positivos los que son atraídos y los que neutralizan los electrones. Los iones que tienen una velocidad de difusión en el plasma inferior a la de los electrones, hay más electrones que alcanzan el cátodo, y el resultado es la aparición de una polarización negativa en este electrodo.

El sistema evoluciona rápidamente hacia una polarización de equilibrio ($-V$) tal que el flujo de electrones durante un tiempo t_1 es neutralizado por el flujo de iones positivos durante t_2 . Es en el espacio oscuro de Crookes que se produce la caída de tensión y la aceleración de las especies cargadas. No hay ionización en esta área. Los iones y electrones que bombardean el objetivo provienen de la interfaz entre el espacio oscuro de Crookes y el plasma. El espesor de esta zona oscura evoluciona como la polarización continua negativa. Depende de naturaleza del gas utilizado. Aumenta cuando aumenta el voltaje de alta frecuencia o cuando la presión en el altavoz disminuye y viceversa.

El sistema RIE de la plataforma nanofab de la UTT permite generar, mediante un ICP (Inductively Coupled Plasma), una alta densidad de especies iónicas para aumentar la velocidad de ataque del material a grabar. El elemento principal en este tipo de fuente ICP es una bobina helicoidal de RF colocada alrededor de un material dieléctrico. Las densidades de corriente (\vec{J}) RF en la bobina (bobina de inductancia) generan un flujo de densidad magnética ($\vec{B}(t)$) alternando en la zona por encima del plasma. En la Figura 40 se puede apreciar la diferencia de potencial entre los electrodos durante el proceso de grabado.

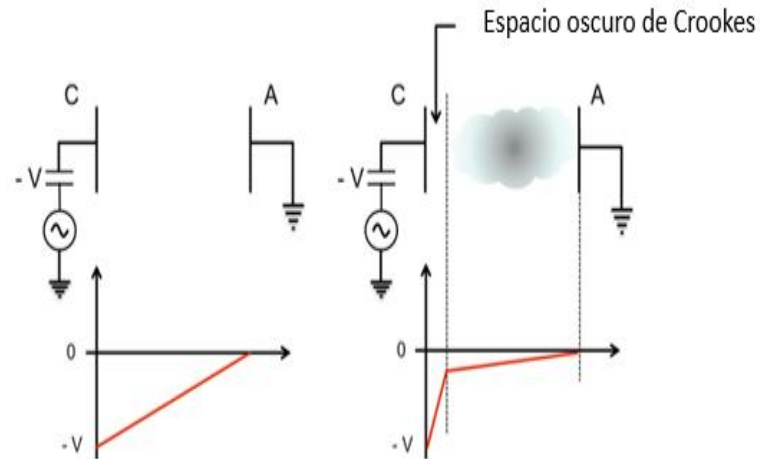


Figura 40. Diferencia de potencial a lo largo de los electrodos en el ritmo de grabado (UTT, 2020).

Dos áreas bien diferenciadas son inducidas entre los electrodos; la zona de plasma o luminosa y la zona oscura de Crookes.

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \vec{j} \quad (50)$$

Este flujo de densidad magnética genera a su vez un campo eléctrico (\vec{E}), según la ley de Faraday correspondiente a la ecuación 51, lo que permite acelerar los electrones libres y mantener la descarga.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (51)$$

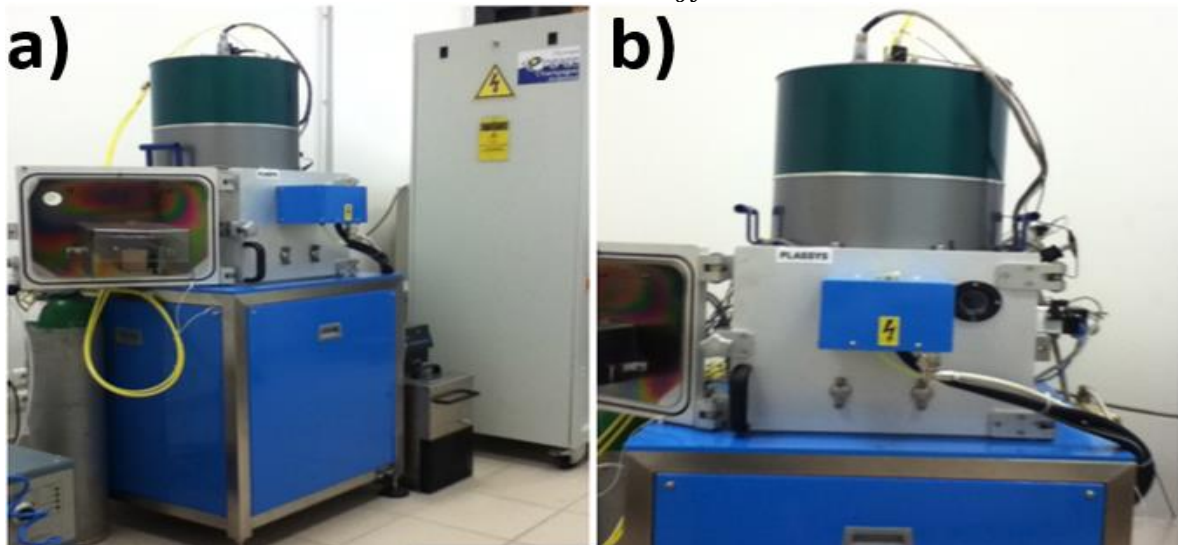


Figura 41. Equipo de RIE PLASSYS MU 400 en el cuarto limpio de la UTT, a) marco de grabado y b) vista del reactor y la fuente de ICP.

El sistema RIE disponible en el L2N es el reactor PLASSYS MU 400, siendo un reactor semiautomático cuya interfaz entre el reactor y el usuario es proporcionada por una computadora. En la Figura 41 se muestra una fotografía del sistema de molienda de iones perteneciente al equipo MU 400 de PLASSYS.

A continuación, se presentan los componentes que involucran el equipo de RIE PLASSYS MU 400:

- **Fuentes**

El sistema tiene dos fuentes de RF. Una fuente de RF y una fuente de ICP, como se puede apreciar en la Figura 42.

- **Fuente de radiofrecuencia:** Es una fuente CESAR 133 RF con una frecuencia de operación de $13.560 \text{ MHz} \pm 0.005\%$ como se puede apreciar en la Figura 42 a). La potencia máxima es de 300 W con una carga de 50Ω .
- **Fuente PKI:** La fuente ICP puede generar una potencia máxima de 2000 W con una impedancia de 50Ω . El oscilador genera una señal sinusoidal a 13.560 MHz y la potencia reflejada es controlada por un sintonizador automático. En la Figura 42 b) muestra una foto del generador. El generador RF está conectado a una antena que permite cebado de plasma por ICP.

- **La cámara de difusión**

Reactores de puerta delantera de tamaño pequeño. Detrás de la puerta hay un soporte de sustrato refrigerado.



Figura 42. Generador de potencia RF a) 300 W para RIE y b) 2 kW para ICP.

- **Sistema de bombeo**

La presión residual, así como la de trabajo en el recinto se alcanzan mediante una bomba turbo molecular asistida por bomba primaria de paletas (Alcatel: 63 m³/h).

- **Controlador de grabación**

Un sistema óptico interferométrico permite controlar el espesor del grabado del material a partir del cual es posible para calcular la velocidad de decapado. El principio básico de un interferómetro se conoce desde hace mucho tiempo. Dos rayos provenientes de la misma fuente de la luz se separan. Uno está fuera de fase con el otro. Cuando se recombinan en un solo haz, el cambio de fase provoca franjas de interferencia, es decir, alternancia de líneas paralelas de luz y oscuridad.

En otras palabras, cuando los dos haces están en fase, la luz es máxima. Por otra parte, cuando ellos están en desfase, las intensidades de luz se anulan entre sí. Este principio se puede utilizar para la medición de velocidades de decapado para los materiales, siendo analizados en forma de capas delgadas respecto al RIE. La variación del espesor de una capa delgada se puede obtener cuantitativamente a partir de los cambios de reflectancia de la capa debido a la diferencia en el camino óptico recorrido entre los haces reflejados R_{12} y R_{23} cómo se puede apreciar en la Figura 43.

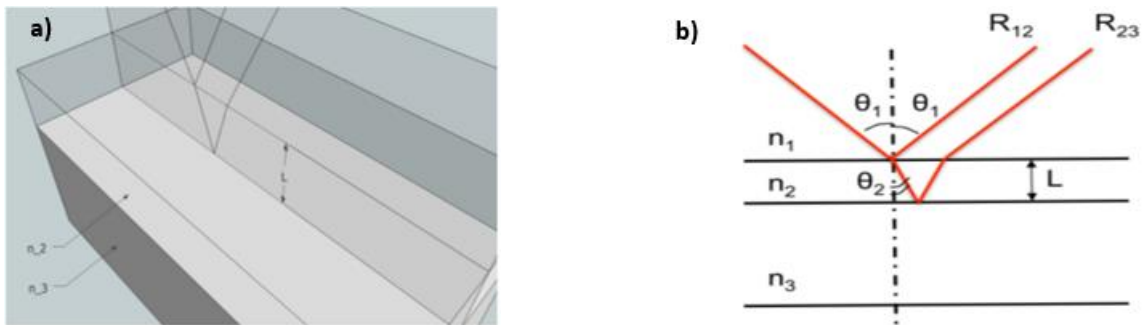


Figura 43. Estructura en forma de capas delgadas que permite la interferencia del láser, a) trazado de rayos en 3D, b) esquema de interferencia respecto a las interfaces.

Consiste en una película delgada con un espesor L y un índice de refracción n_2 sobre un sustrato n_3 , con una cubierta n_1 . La reflectividad en una estructura como la de la Figura 43 se puede escribir como:

$$R = \frac{R_{12}^2 + 2R_{12}R_{23} \cos(\varphi) + R_{23}^2}{1 + 2R_{12}R_{23} \cos(\varphi) + R_{23}^2} \quad (52)$$

donde R_{12} y R_{23} son los coeficientes de Fresnel en las interfaces. Se definen como $R_{12} = (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)$ y $R_{23} = (n_2 - n_3)/(n_2 + n_3)$. El término φ está dado por:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (2n_2L) \quad (53)$$

el cual determina la diferencia de fase entre el rayo R_{12} y R_{23} . Es $\frac{2\pi}{\lambda}$ veces la diferencia en el camino óptico recorrido por el haz incidente en la capa de espesor L . Cuando el haz incidente con un ángulo θ_1 con respecto a la normales, el término n_2L de la ecuación anterior se convierte en $L\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}$. Cuando $\varphi = 2\pi$, la reflectancia R realiza una oscilación completa.

El ensamblaje óptico del equipo de interferometría correspondido al RIE se esquematiza en la Figura 44. La fuente utilizada en el ensamblaje óptico corresponde a un láser He-Ne de $\lambda = 650$ nm. Los rayos reflejados en las caras frontal y posterior de la capa delgada se recombinan usando un divisor y luego se obtiene la interferencia medida por un fotodiodo. Finalmente, los datos son representados en una gráfica de interferencia gracias a la computadora integrada en el RIE.

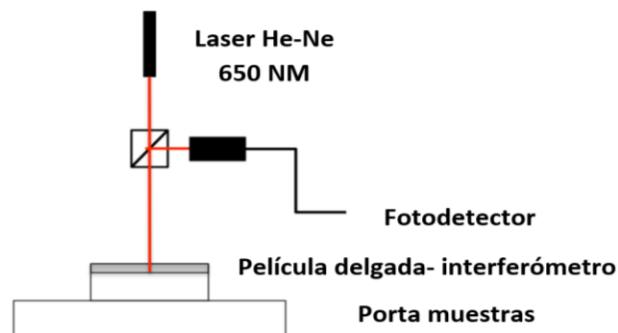


Figura 44. Conjunto óptico instalado en el RIE para la medida de la tasa de decapado de la película delgada.

Para realizar una interpretación de resultados respecto a la velocidad de decapado, nos interesa especialmente la evolución de las ondas por relación con el tiempo. Esta evolución nos permite medir las variaciones en el espesor de las capas. La variación del cambio de fase con respecto al espesor de la capa delgada viene dada por la siguiente ecuación:

$$2\pi \cdot \frac{dL}{d\varphi} = \frac{\varphi}{2n_2} \quad (54)$$

El análisis de máximos y mínimos nos permite, por tanto, volver al espesor grabado en la capa, desde donde puede reducir la velocidad de combustión. Para ilustrar la medición de la velocidad de grabado de materiales en forma de capas delgadas, se ha elegido como ejemplo un sustrato Si sobre oxido térmico sobre sustrato de Si (SOI). Se busca medir la tasa de grabado del Si el cual tiene un espesor de 340 ± 10 nm y el índice de refracción del Si es de 3.8 a la longitud de onda de emisión del láser instalado en el RIE. Los parámetros de grabado son: potencia RIE = 90 W, presión = 4 mTorr, con una combinación de gases de SF₆ a 17 sccm y O₂ a 6 sccm. La Figura 45 muestra los resultados obtenidos a partir de la medición realizada con el interferómetro.

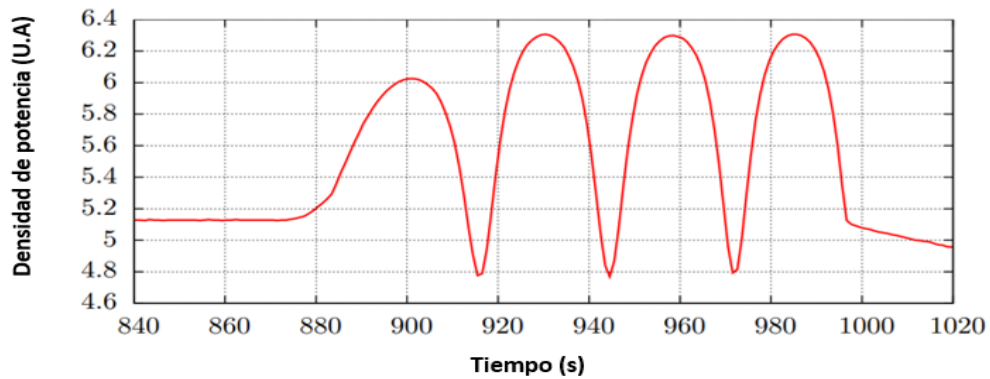


Figura 45. Ejemplo de franjas de interferencia durante el decapado de la muestra silicio sobre oxido térmico (silicon on insulator, SOI, UTT).

Se puede apreciar oscilaciones ocasionadas por la interferencia entre los rayos provenientes de las interfaces delantera y trasera de la capa Si. El número de máximos es 4 mientras que el número de mínimos es 3. Estas franjas de interferencia repartidas en una duración de 122s ($997.4 \text{ s} - 872.0 \text{ s}$). De la ecuación 54, obtenemos un cambio de espesor del Si de 85.5 nm/franja. Para los 4 máximos, el espesor grabado es de 342.5 nm, es decir, la capa de Si ha sido totalmente removida en 122 s. La velocidad media de grabado vertical es, por tanto, de 170 nm/min.

Para cada material a decapar se requiere de una receta especial esto ya depende de los gases que cuente el cuarto limpio y a su vez la potencia que pueda alcanzar los generadores pertenecientes del RIE. En la Tabla 4 se presenta los parámetros considerados para cada uno de los materiales propuestos para la realización del decapado por la técnica del RIE, obtenidos de diferentes fuentes bibliográficas y con los gases que se tenían en los laboratorios de cuarto limpio de la UTT Troyes.

Tabla 4. Parámetros considerados para cada material propuesto para la realización del RIE. (Bradley et al., 2007; Park et al., 2011; Hotovy et al., 2014).

Material	Gas	Proporción	Presión (mTorr)	Flujo (sccm)	Prc (W)	ICP (W)	Tasa de decapado (nm/min)
ZnO	CF ₄ :Ar	85:15*2	5	CF ₄ 25 Ar 10	250-400	750	140
Al ₂ O ₃	CF ₄ :O ₂	90:10*3	10	CF ₄ 45 O ₂ 5	100-400	1500	150
TiO ₂	CF ₄ :Ar	28:72*5	4	CF ₄ 4 Ar 10	150	200	93

Es fundamental garantizar que la película metálica depositada por evaporación pueda soportar todo el proceso de decapado. En este caso particular, se utilizó el perfilómetro perteneciente a los laboratorios de la UTT, que sirve para medir perfiles, acabados y rugosidades de muestras en tiempo relativamente cortos (Basics & Basics, 2024). Por esta razón, en las pruebas de RIE, se colocaba un trozo de oblea sobre las muestras con metal depositado para analizar la altura del escalón generado por el RIE. En la Figura 46 se puede observar el perfilómetro, así como una demostración de las pruebas de resistencia del metal.

Una vez que el material no deseado fue decapado y que la mascarilla resistirá la receta del RIE, se prosigue a remover la mascarilla metálica, mediante el uso de un ataque químico.

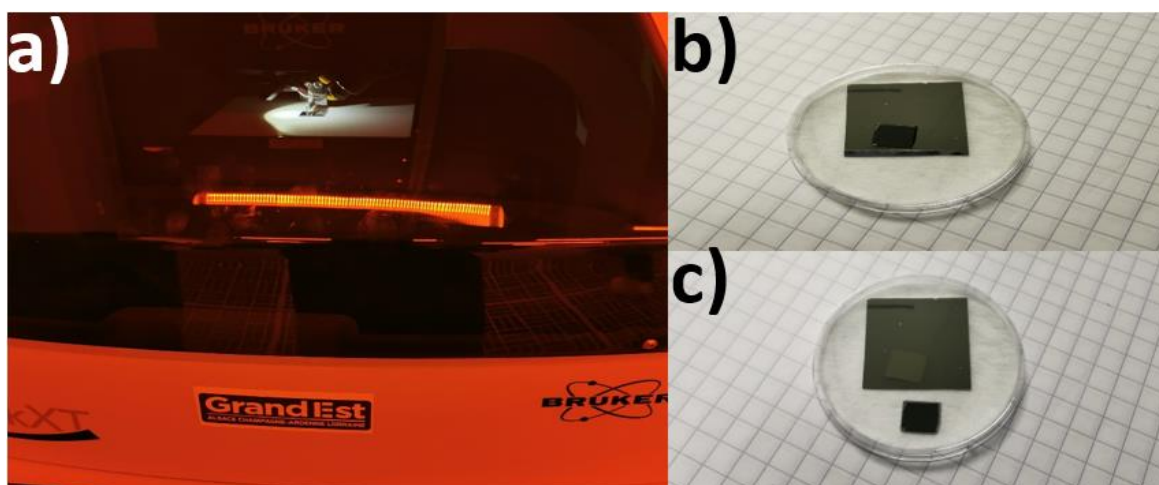


Figura 46. Pruebas para espesor de la mascarilla después de decapado, a) perfilómetro, b) muestra después del decapado con pedazo de oblea de silicio encima, y c) muestra después del decapado seco con pedazo de oblea a un lado.

3.5.7 Decapado húmedo:

El último paso en la litografía electrónica consiste en remover el metal protector que se depositó sobre las guías de onda para preservar la integridad de las estructuras ópticas fabricadas por el SEM. Cabe destacar que la única configuración que alcanzó este punto en el proceso de fabricación fueron las estructuras que utilizaban Cr como metal protector. Por esta razón, se empleó la técnica de decapado humero para eliminar el Cr depositado sobre nuestras estructuras. Como se mencionó en la sección anterior, el decapado húmedo implica la aplicación de un líquido químico que disuelve un material en específico. En nuestro caso, se utilizó el removedor de cromo conocido como Chrome Etch 18, cuyas propiedades físicas y químicas se encuentran en la Tabla 5 (Microresist, n.d.a).

Tabla 5. Propiedades físicas y químicas del Chrome Etch 18 (Microresist 19, n.d.b).

Apariencia	Líquido naranja, transparente
Densidad (20 °C)	1.15 g/cm ³
Filtración	0.45
Contenido de Cerio (iv)	43 g/L
Ácido total	2 mol/L
Ácidos involucrados	Ácido nítrico, ácido perclórico
Taza de decapado en reposo (20°C)	60 nm/min
Taza de decapado con baño sónico (20°C)	300-420 nm/min

Los pasos para remover la mascarilla de 40nm de Cr utilizada en las muestras fueron los siguientes:

1. Sumergir el dispositivo en ácido Chrome Etch 18 durante 30-40 segundos, sin agitar, a temperatura ambiente.
2. Transferir el dispositivo a un recipiente con IPA para neutralizar el ácido durante 5 minutos.
3. Secar muestra con una pistola de aire.

Con este último procedimiento se concluye el proceso de fabricación de dispositivos de guías de onda ópticas para el área de la opto-electrónica, usando litografía electrónica.

3.7 Propuesta de método de acoplamiento para fibra-guía

Una vez que los dispositivos fueron fabricados por la técnica de litografía electrónica, es esencial desarrollar una metodología que permita acoplar luz de manera eficiente a los dispositivos. El equipo de trabajo de la UTT propuso acopladores de polímero tipo guías de onda de canal mediante foto-litografía, sobrepuestas en las terminales de entrada y salida de las muestras. Los diseños GDS desarrollados durante la segunda estancia aseguran que los dispositivos están alineados con la mascarilla utilizada para la fotolitografía de las guías, mediante referencias de figuras con forma de cruz por toda la zona de trabajo del SEM, como se muestra en la Figura 47 y distribuidas en la Figura 31.

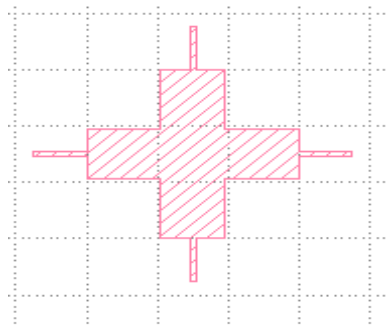


Figura 47. Cruceas para alineación de dispositivos realizados por EBL para la foto-litografía.

Se trata de guías de onda fabricadas sobre un polímero fotosensible conocido como SU-8, el cual tiene un índice de refracción de 1.55 para la longitud de onda de 1550 nm (Zhu et al., 2023a). En la Figura 48, se muestra el esquema de fabricación de las guías SU-8, desde el inicio hasta el final, con una longitud total de 2.00 cm. Estas guías fueron fabricadas sobre los dispositivos previamente trabajados mediante la técnica EBL.

Además de COMSOL, utilizado para el análisis de estructuras en 3D mediante la interfaz EWBE, se empleó otro software comercial especializado en simulaciones por el método FEM, Lumerical, enfocado en la simulación y diseño de dispositivos ópticos. Este software fue utilizado para evaluar si la propuesta de acoplamiento de fibra a guía funcionaría en la configuración de dispositivos mono-modales de TiO_2 . En la Figura 48 se muestra un esquema de la fabricación de las guías de SU-8 para el acoplamiento de fibra a guía.

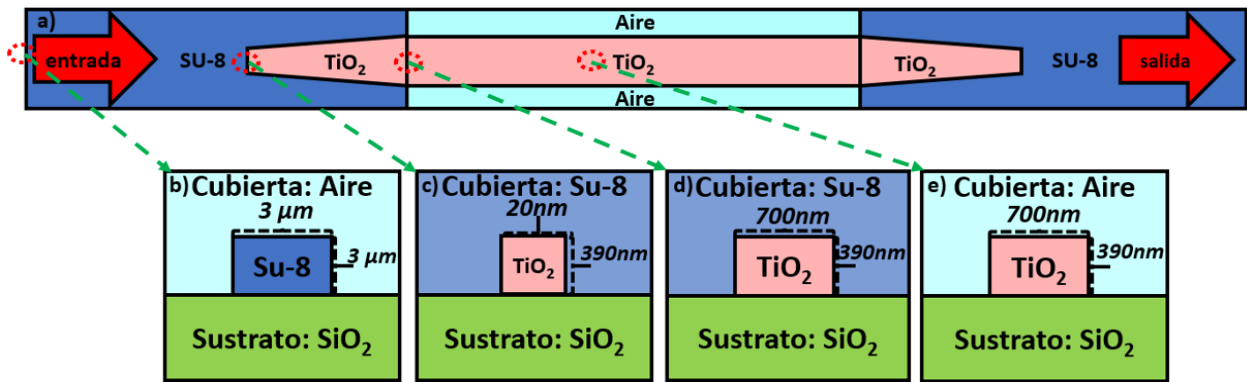


Figura 48. Esquema de fabricación de guías SU-8 para el acoplamiento de fibra óptica a guía. a) Esquema completo de la trayectoria de la luz en el dispositivo, b) sección transversal en el punto de acoplamiento de fibra a guía, c) sección transversal con la guía de onda TiO₂ adelgazada, d) sección transversal de la guía de onda de TiO₂ mostrando el ensanchamiento de la estructura a la condición mono-modal deseada y e) sección transversal del dispositivo sin la presencia del polímero SU-8.

A continuación, se detallan los pasos para la fabricación de guías SU-8 mediante la técnica de fotolitografía:

1. Realizar una limpieza por plasma (O₂) en la muestra utilizando RIE, con el objetivo de mejorar la adhesión entre la muestra y el polímero SU-8. Parámetros: 5 minutos a 5 mTorr con un flujo de 20 sccm, potencia ICP de 0W y Prc de 50W.
2. Depositar la fotoresina SU-82005 mediante centrifugado con los siguientes parámetros:
 - a. Velocidad: 500 rpm
 - b. Aceleración: 100 rpm/s
 - c. Tiempo: 10 segundos
3. Ejecutar una segunda corrida de centrifugado con los mismos parámetros:
 - a. Velocidad de 500 rpm
 - b. Aceleración: 100 rpm/s
 - c. Tiempo: 30 segundos

4. Calentar la muestra a 95 °C durante 2 minutos en una parrilla caliente.
5. Realizar la fotolitografía, alineando la mascarilla con las guías previamente grabadas por EBL.
6. Calentar nuevamente la muestra a 95 °C durante 3 minutos en la parrilla.
7. Cortar la muestra reducir las pérdidas de propagación y evitar el efecto borde causado por la técnica de litografía electrónica, dejando aproximadamente 1.5 cm por lado.
8. Finalizar el proceso de fotolitografía mediante revelado, sumergiendo la muestra en el revelador durante 1 minuto, seguido de una limpieza con IPA durante al menos 10 segundos.

Con estos pasos, se concluye el proceso de acoplamiento de fibra a guía para las estructuras, y se da por terminado el capítulo de metodología.

Capítulo 4. Resultados y Discusión

Para este capítulo se abordará los resultados obtenidos de este proyecto de investigación, respetando el orden de los temas que se abordaron en el capítulo de metodología, siendo los siguientes puntos:

1. Caracterización de películas delgadas
 - Elipsometría para cálculo de índice de refracción
 - FT-IR de las muestras sintetizadas
2. Análisis de la sección transversal de la guía de onda de canal
 - Índice de refracción efectivo en estructuras mono-modales
 - Distribución de intensidad y análisis de la onda evanescente
3. Propiedades del diseño del AOR
 - Análisis de filtrado de señales y coeficiente de extinción
 - Parámetros ópticos de las cavidades de resonancia
4. Litografía electrónica
 - Revelado
 - Evaporación térmica-lift-off
 - Ataque iónico reactivo
 - Ataque húmedo
5. Propuesta de método de acoplamiento de fibra-guía
 - Distribución de intensidad entre interfaces
 - Longitud de acoplamiento

4.1 Caracterización de películas delgadas:

Como se había mencionado en el Capítulo 3, en la primera sección de resultados se describen los parámetros ópticos de la guía de onda de canal.

4.1.1 Elipsometría para cálculo de índice de refracción

Una vez que las películas delgadas fueron sintetizadas mediante la técnica de ALD, se procede a medir el

índice de refracción de cada muestra para determinar si los materiales seleccionados serán guías de onda potenciales. Como se puede observar en la Figura 49, el índice de refracción es un valor fundamental que guiara toda la planificación estructural, el diseño y la fabricación de nuestros dispositivos optoelectrónicos. La técnica de elipsometría fue fundamental para el cálculo de índice de refracción, mediante el uso del elipsómetro de ángulo variable espectral (VASE, por sus siglas en inglés) nos permitió obtener el n de las películas sintetizadas (Al_2O_3 , ZnO , y TiO_2), en el rango de las longitudes de onda de 500nm a 1000nm. Los modelos matemáticos utilizados en la técnica de elipsometría para interpretar los resultados incluyeron el oscilador Tauc-Lorentz para los materiales Al_2O_3 y TiO_2 . Este modelo fue seleccionado debido a que se ha usado para materiales dieléctricos y al ajustarse a los datos obtenidos durante las mediciones, arrojó un error cuadrático medio (MSE) relativamente bajo, inferior a 20 (Caballero et al., 2020b; Jurado et al., 2022b). Para calcular el índice de refracción del ZnO , se empleó una combinación de dos modelos: el Psemi-MO y el gaussiano. El modelo Psemi-MO se utiliza para representar la forma de la función osciladora de semiconductores cristalinos con banda ancha y directa, mientras que el oscilador gaussiano se aplica para describir la absorción de radiación (Sánchez, 2023). Para completar la curva de dispersión para longitudes de onda mayores a 1000 nm, se utilizó el método de extrapolación cubica B-spline, obteniendo los valores de índice de refracción a 1550 nm fueron de 1.62927 (Al_2O_3), 1.88581 (ZnO), y 2.36372 (TiO_2). El uso de la técnica de elipsometría para calcular el índice de refracción fue necesaria para continuar con el análisis modal en la sección transversal para nuestras estructuras de guías de onda canal.

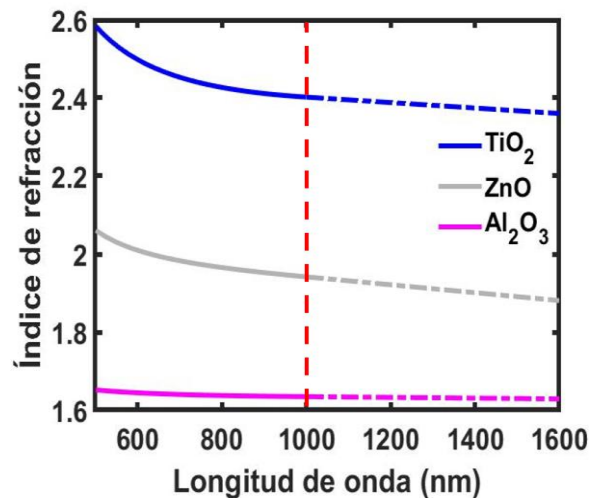


Figura 49. Gráfica de curva de dispersión para los materiales Al_2O_3 , ZnO y TiO_2 , en el rango de longitudes de onda de 500 a 1600 nm. La línea continua representa los valores de elipsometría de los materiales transparentes, mientras que las líneas discontinuas representan una estimación de la curva de dispersión.

4.1.2 FT-IR de las muestras sintetizadas:

Es importante el manejo de otras técnicas para la descripción y caracterización de muestras. En este caso el FT-IR toma importancia para confirmar si el material transparente sintetizado por la técnica de ALD fue realmente lo que se fabricó sobre las muestras. En la Figura 50 se puede observar el espectro IR de cada uno de nuestros materiales propuestos; el equipo utilizado tiene un rango de número de onda hasta 4000 cm^{-1} , se prosiguió en acotar el rango de número de onda hasta los $1200\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ para aumentar el enfoque en los compuestos químicos ubicados en dicha zona. Las muestras analizadas fueron en sustratos de cuarzo (SiO_2) y con la modalidad de transmisión para el análisis del FT-IR. Los picos de vibración que pertenecen al SiO_2 están relacionados en los modos de estiramiento de 1000 a 1100 cm^{-1} . Para las estructuras Al_2O_3 , ZnO y TiO_2 , los picos de vibración están ubicados en el rango de números de onda de 700 a 1000 cm^{-1} , respectivamente (Caballero et al., 2020c; Rajakaruna et al., 2020; Valverde-Aguilar & Zepeda, 2014).

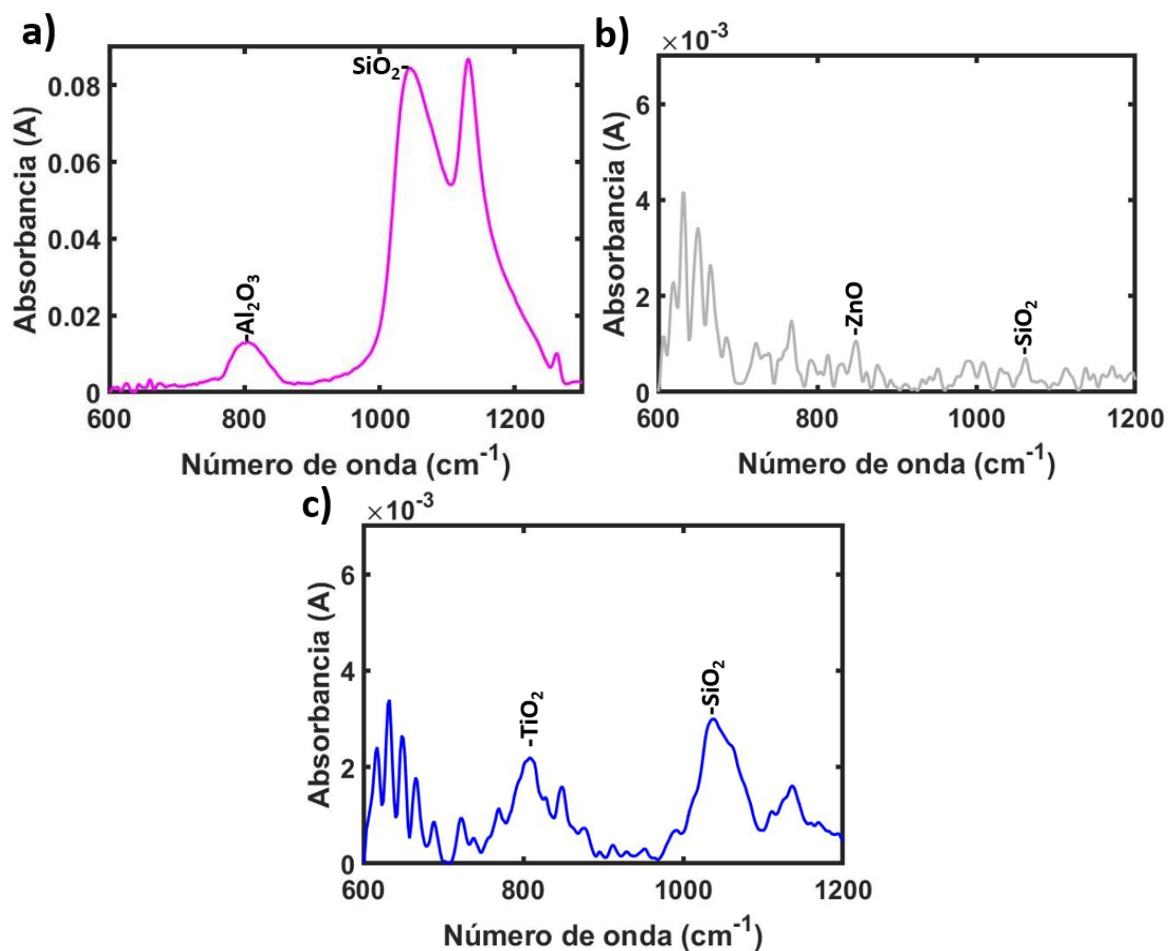


Figura 50. El espectro IR de a) una película de Al_2O_3 amorfa de 1000 nm de espesor, b) de una película de ZnO cristalino de 500 nm y c) una película de TiO_2 amorfo de 390 nm.

4.2 Análisis de la sección transversal de la guía de onda de canal:

En esta sección se presentan los resultados de diseño obtenidos mediante el software comercial COMSOL, enfocados en la sección transversal de las guías de onda de canal propuestas para nuestros materiales transparentes. Este estudio es crucial, ya que proporcionará los parámetros estructurales necesarios para la propagación mono-modal en el área de las telecomunicaciones. A continuación, se analizarán los siguientes parámetros:

- Ancho efectivo
- Índice de refracción efectivo
- Distribución de intensidad
- Onda evanescente

4.2.1 Índice de refracción efectivo en estructuras mono-modales:

Se analizó la sección transversal de la guía de onda de canal descrita anteriormente para calcular el índice de refracción efectivo (n_{eff}) a una longitud de onda de 1550 nm, relevante para las telecomunicaciones ópticas. Se tomaron en cuenta los índices de refracción de las interfaces: cubierta de aire (1.00), el sustrato de SiO_2 (1.44) y los valores del núcleo mostrados en la Figura 49. Utilizando el espesor de la película delgada (h) descrito en la sección de ALD para cada muestra, se evaluó el ancho óptimo o efectivo (w) del modo fundamental en los diferentes materiales transparentes. En la Figura 51 se presenta el análisis de la curva de dispersión efectiva con una resolución de $0.100 \mu\text{m}$ para anchos en el rango de $0.5 \mu\text{m}$ a $3.0 \mu\text{m}$. El círculo rojo indica la presencia de modos híbridos en cada curva de dispersión efectiva. En el caso del Al_2O_3 , se observa un área más amplia sin la estimulación de modos híbridos (TM_{00} - TE_{10}), debido a su menor índice de refracción en comparación con el ZnO y TiO_2 (Kaushalram et al., 2020).

La región amarilla señala la condición efectiva para asegurar la existencia del modo fundamental TE_{00} . La línea roja discontinua corresponde al índice de refracción del sustrato del SiO_2 ; si el n_{eff} de la estructura es superior a este valor, existe propagación modal. Para este análisis se considero un margen de tolerancia de $0.20 \mu\text{m}$ debido a la técnica de EBL, lo que define los anchos máximos de propagación del modo fundamental (TE_{00}): $2.4 \mu\text{m}$ para Al_2O_3 , $1.6 \mu\text{m}$ para ZnO y $0.9 \mu\text{m}$ para TiO_2 . Como resultados, se analizaron los siguientes anchos óptimos: $2.2 \mu\text{m}$ para Al_2O_3 , $1.4 \mu\text{m}$ para ZnO y $0.7 \mu\text{m}$ para TiO_2 . Los valores de n_{eff} para cada estructura fueron: 1.5266 (Al_2O_3), 1.5946 (ZnO) y 1.7732 (TiO_2).

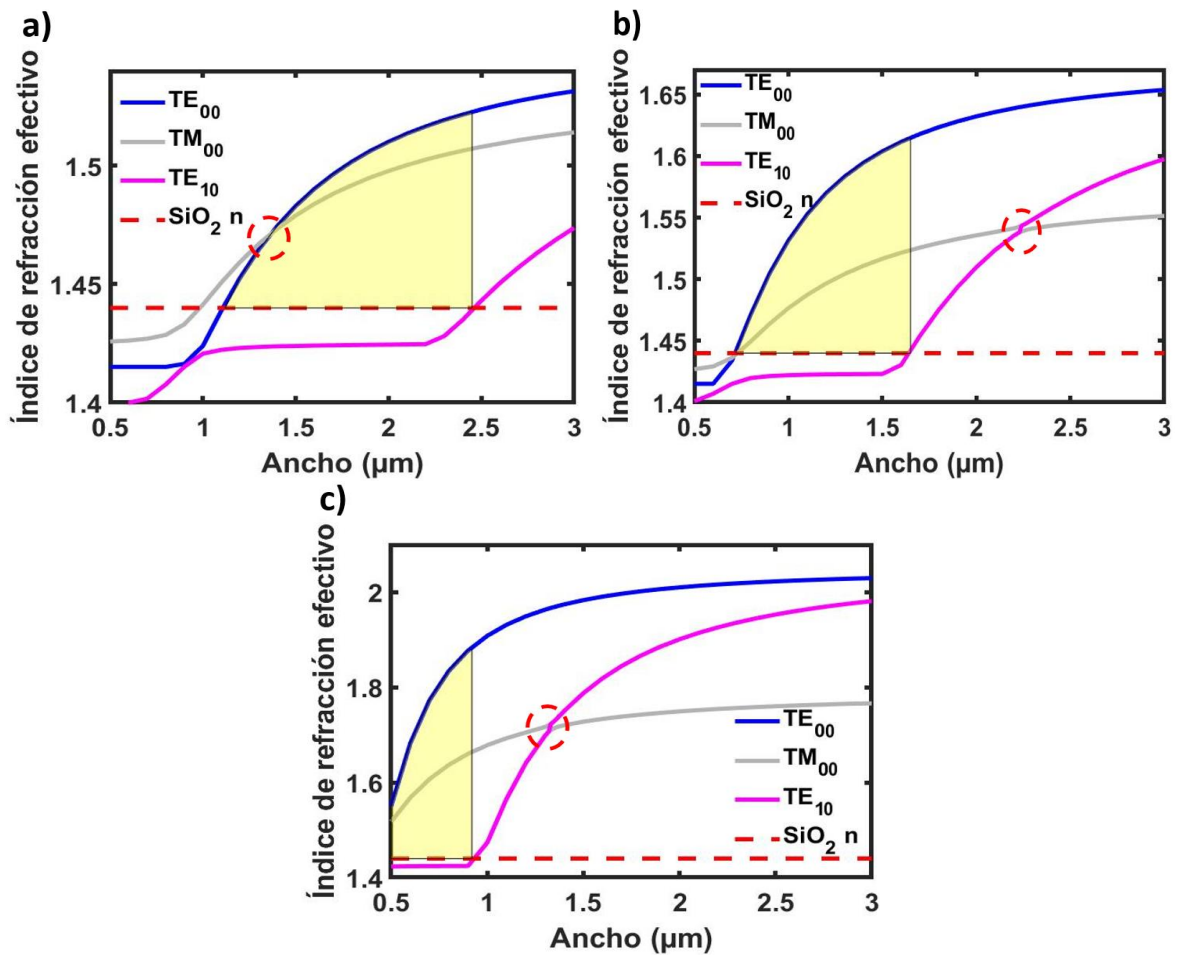


Figura 51. Curva de dispersión efectiva de modos TE₀₀, TM₀₀, y TE₁₀ en la longitud de onda de 1550 nm para a) Al₂O₃, b) ZnO, c) TiO₂. La zona amarilla representa el ancho efectivo para la propagación de monomodos de operación para un espesor de película de a) 2.2 μm, b) 0.50 μm, y c) 0.390 μm. El círculo rojo indica la existencia de modos híbridos (TM₀₀-TE₁₀).

4.2.2 Distribución de intensidad y análisis de la onda evanescente

Una vez que fue seleccionada la sección transversal efectiva para cada material, es crucial realizar un análisis de la distribución de intensidad en cada estructura. La Figura 52 muestra la distribución de intensidad para el modo de propagación TE₀₀ en cada uno de los materiales seleccionados, mientras que la Tabla 6 presenta los parámetros correspondientes de las guías de onda.

Es importante destacar que un mayor índice de refracción conlleva un mayor confinamiento modal, lo que permite una mejor miniaturización de la estructura. Considerando la configuración de la estructura para la propagación del modo fundamental, es necesario calcular el porcentaje de distribución de intensidad

en cada una de las interfaces de la guía de onda, como se muestra en la Tabla 7. El material de la guía de onda con un alto valor de n_{eff} , como el TiO_2 , presenta un confinamiento modal relativamente bajo. Por el contrario, los materiales con un índice de refracción efectivo más bajo muestran un mayor confinamiento modal en el núcleo (Al_2O_3). Sin embargo, esto se debe a las dimensiones de la guía de onda. En el caso del TiO_2 , las dimensiones son menores, ya que se trata de una estructura operando en el régimen de sub-longitud de onda, lo que implica que el área de la sección transversal es más pequeña que la longitud de onda propagada en la guía.

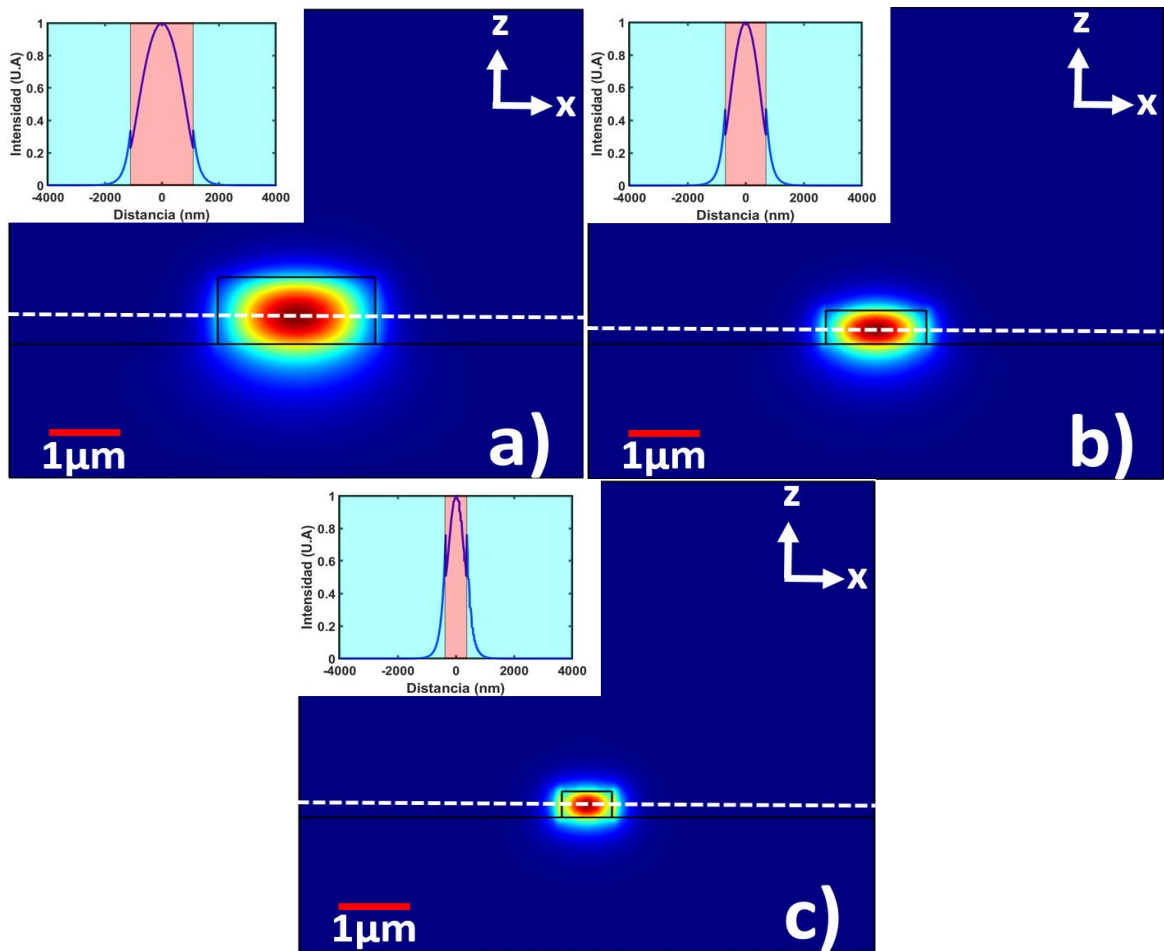


Figura 52. Distribución de intensidad del modo TE_{00} y su perfil de intensidad de la sección transversal para la longitud de onda de 1550 nm para a) Al_2O_3 ($h=1000\text{nm}$, $w=2200\text{nm}$, y $n=1.62927$), b) ZnO ($h=500\text{ nm}$, $w=1400\text{ nm}$, y $n=1.88581$), y c) TiO_2 ($h=390\text{ nm}$, $w=700\text{ nm}$, y $n=2.36372$).

Tabla 6. Parámetros correspondientes a la sección transversal de las guías de onda de canal.

Material	Espesor (nm)	Ancho (nm)	$n_{\text{eff}}(\text{TE}_0)$
Al_2O_3	1000	2200	1.5166
ZnO	500	1400	1.5946
TiO_2	390	700	1.7732

Tabla 7. Porcentaje de distribución de intensidad entre las interfaces.

Material	Núcleo	Sustrato	Cubierta
Al₂O₃	60%	27%	13%
ZnO	46%	33%	21%
TiO₂	40%	27%	33%

A través del análisis de la distribución de intensidad, se estudió el comportamiento de la onda evanescente en los materiales examinados. Esta propiedad es clave, ya que proporciona información sobre la capacidad de acoplar luz entre guías de onda de canal, desempeñando un papel fundamental en el acoplamiento de luz desde la guía de onda bus hacia el resonador de anillo. Para el estudio de las ondas evanescentes, se examinó el perfil de intensidad mostrado en la Figura 52, donde la línea blanca indica la sección en la que llevo a cabo dicho análisis.

La distribución del perfil modal muestra la excitación de valles descendentes en la interfaz núcleo-cubierta, esto debido a la presencia de modos débilmente guiados por la interfaz núcleo-cubierta (Jahani et al., 2018; Wu & Tong, 2013; Castillo et al., 2023). La extensión de la onda evanescente para cada configuración de material, considerando un 0.01% de la distribución total fue de: 860nm (Al₂O₃), 855 nm (ZnO), 716 nm (TiO₂). Como se observa en la Figura 52, estas distancias son apropiadas para la técnica de litografía por haz de electrones.

4.3 Propiedades del AOR:

Una vez calculada la distribución de intensidad y el modo evanescente del modo de propagación fundamental en las estructuras, el siguiente paso es diseñar el resonador de anillo. En esta sección de resultados se discutirán las propiedades del AOR, así como la selección de las características estructurales del dispositivo para el diseño y fabricación de cada configuración de materiales transparentes. El análisis completo de las propiedades del AOR abarca los siguientes puntos:

- Análisis de filtrado de señales y coeficiente de extinción
- Parámetros de cavidades de resonancia
- Análisis de filtrado en resonadores con radio superiores

4.3.1 Análisis de filtrado de señales y coeficiente de extinción

Como primer paso es el estudio del filtrado de señales para la selección de parámetros estructurales del resonador de anillo. Para ello, es crucial considerar las características del modo de filtrado para el diseño AOR, comenzando con un radio de anillo inicial de 60 μm . El diseño debe estar optimizado para obtener al menos nueve modos resonantes, los cuales deben ser compatibles con la banca C de telecomunicaciones. Estos constituyen los primeros parámetros de diseño, con un máximo de 4.22 nm para el rango espectral libre (FSR), que representa la separación entre cada modo resonante.

Para estimar las propiedades ópticas del AOR, se seleccionó un radio de 60 μm y se realizó un análisis de la eficiencia de acoplamiento relacionado al parámetro d_g . El análisis de resolución para d_g se llevó a cabo en incrementos de 100 nm, abarcando un rango de 200 nm a 600 nm, y se consideró el espectro de longitud de onda correspondiente a la banda C (1528 nm a 1566 nm).

En la Figura 53 se ilustra los resultados de análisis de filtración en la configuración del Al_2O_3 , siendo la configuración de 200 nm de d_g la más eficiente por presentar un rango de relación de transmisión del bus y filtrado de la señal más pronunciado. Para la d_g con mayor valor de relación de transmisión es la de 200 nm.

En la Figura 54 se ilustra los resultados de análisis de filtración en la configuración del ZnO , siendo la configuración de 500 nm de d_g la más eficiente por presentar un rango de relación de transmisión del bus y filtrado de la señal más pronunciado. A su vez la distancia de separación menos óptima es la de 200 nm.

Y por último en la Figura 55 se presentan los resultados de análisis de filtración en la configuración del TiO_2 , siendo la configuración de 500 nm de d_g la más ideal por presentar un rango de relación de transmisión del bus y filtrado de la señal más pronunciado, mientras que la menos eficiente corresponde a una distancia de separación de 200 nm al igual que la configuración de ZnO .

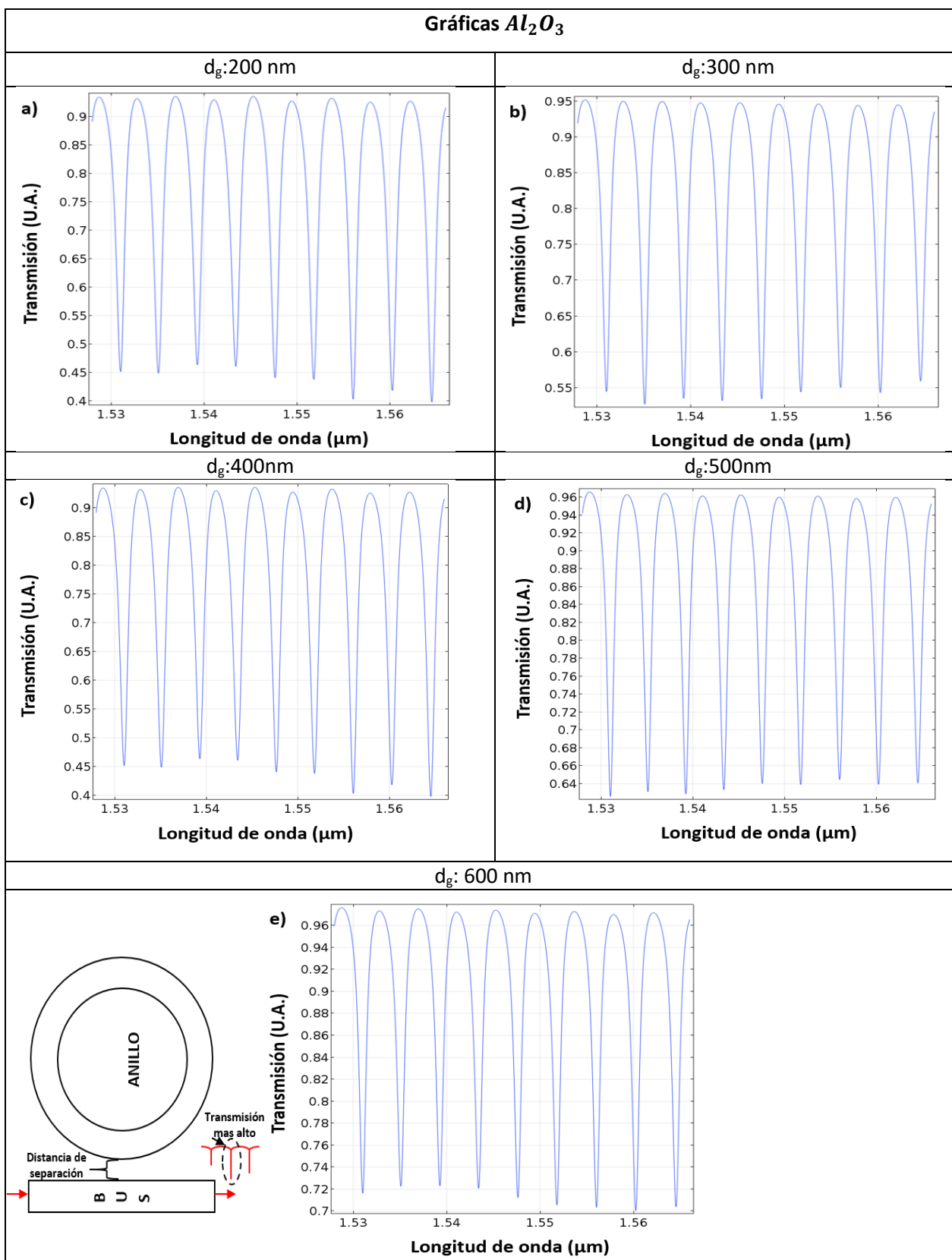


Figura 53. Gráficas de filtrado de resonancia para el material Al_2O_3 , con valores de d_g de: a) 200 nm, b) 300 nm, c) 400 nm, d) 500 nm y d) 600 nm.

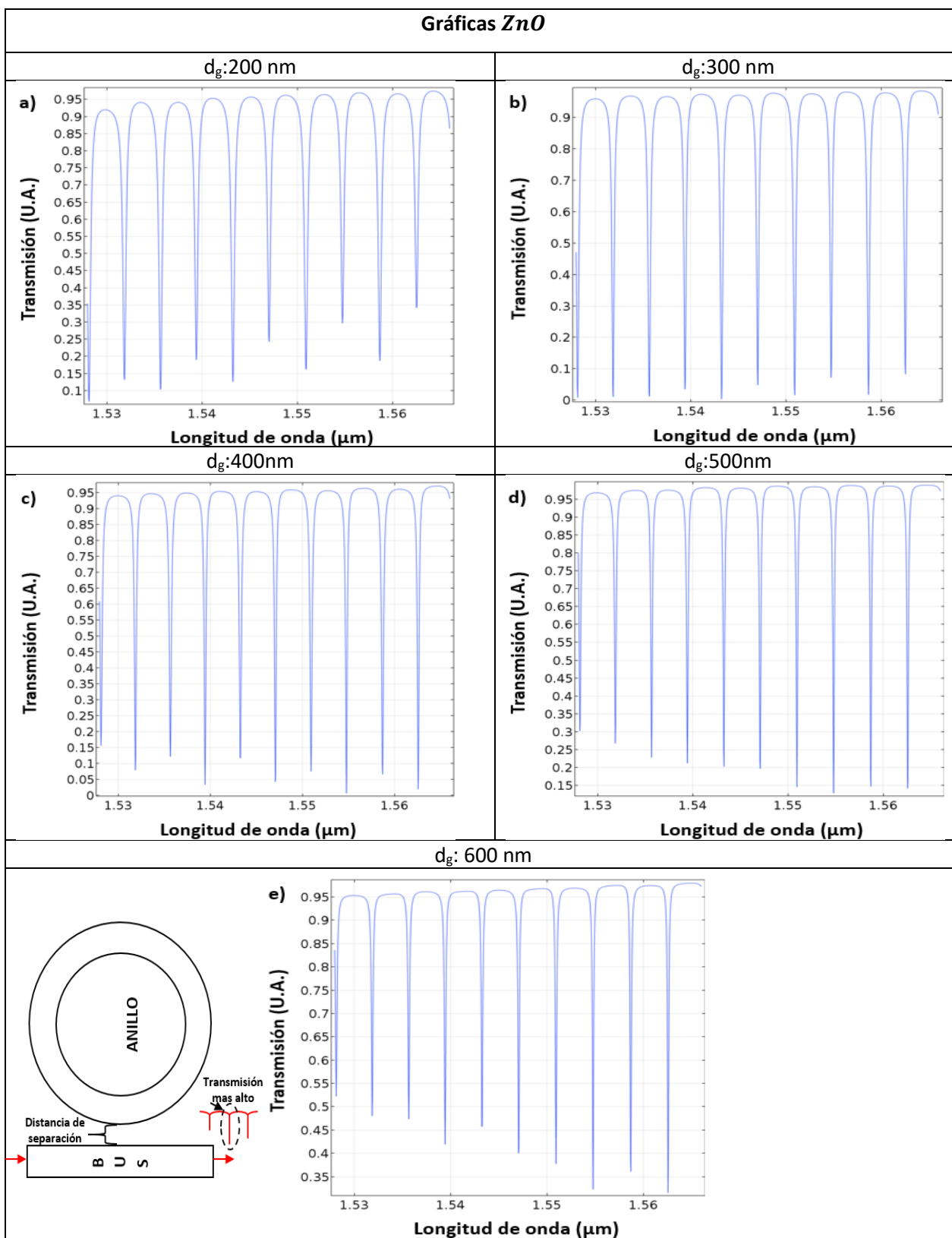


Figura 54. Gráficas de filtrado de resonancia para el material ZnO, con valores de d_g de: a) 200 nm, b) 300 nm, c) 400 nm, d) 500 nm y d) 600 nm.

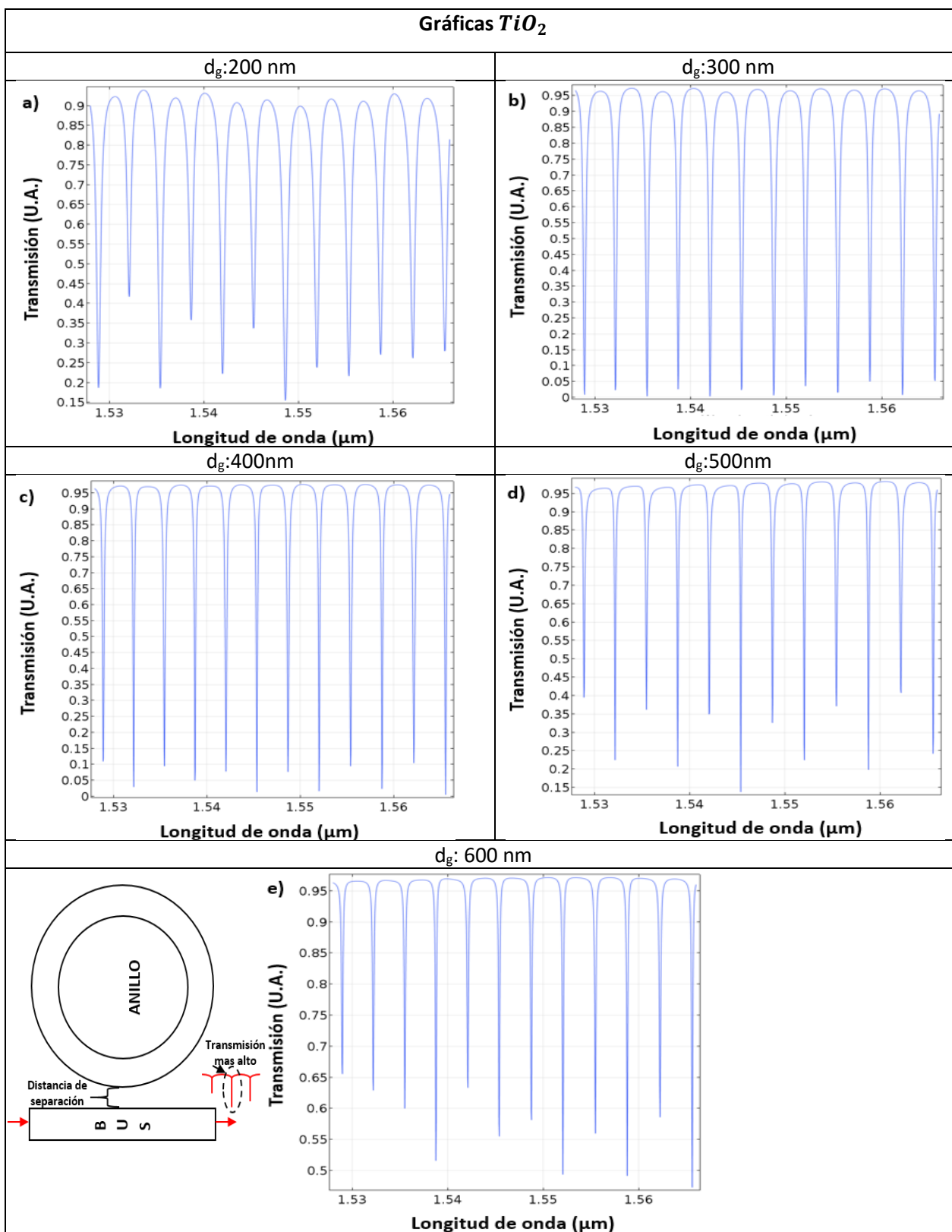


Figura 55. Gráficas de filtrado de resonancia para el material TiO_2 , con los valores de d_g de: a) 200 nm, b) 300 nm, c) 400 nm, d) 500 nm y d) 600 nm.

El coeficiente de extinción está definido como la transmisión neta que el resonador de anillo filtra. Este parámetro proporciona información clave sobre la funcionalidad del dispositivo, siendo fundamental para su caracterización. El valor de coeficiente de extinción se calculó y se presenta en la Figura 56, lo que resulta esencial para la selección de la configuración óptima, especialmente en relación con la distancia de separación entre el bus y el anillo. Los valores más altos obtenidos de coeficiente de extinción fueron de 3.76dB (Al_2O_3), 14.84dB (ZnO) y 22.50 dB (TiO_2) para su correspondiente d_g de 200 nm y 500 nm en los últimos materiales.

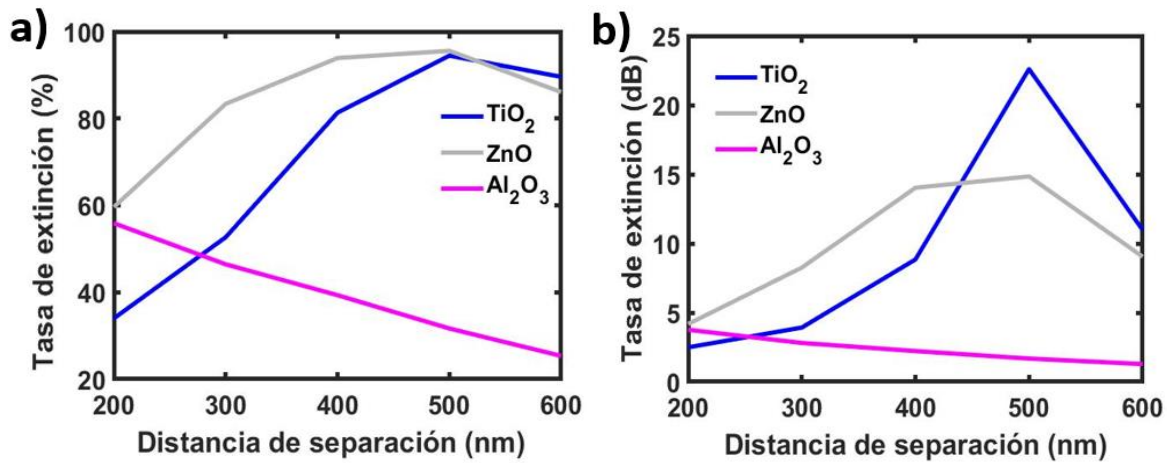


Figura 56. Coeficiente de extinción para cada material a) en términos de porcentaje de transmisión, b) en unidades de dB.

Cabe destacar que la propagación del modo no presenta batimiento modal dentro del radio del anillo, lo que indica que la distribución de la intensidad está centrada en la guía de onda curva, como se puede apreciar en la Figura 57, el modo de propagación se encuentra centrado en la guía de onda de canal de anillo

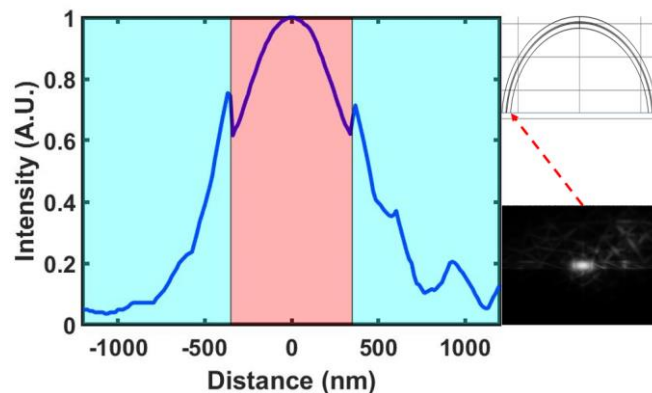


Figura 57. Distribución de intensidad en la guía de onda curva asociada a la configuración óptima de TiO_2 para un radio de anillo de $60 \mu\text{m}$.

4.3.2 Parámetros ópticos de las cavidades de resonancia

El análisis de filtrado para el cálculo de los parámetros ópticos de las cavidades de resonancia se realizó considerando la señal óptica filtrada en el rango cercano a 1555 nm, como se muestra en la Figura 58. Es importante destacar que el Al_2O_3 presentó una baja transmisión en profundidad de filtrado, mientras que las configuraciones basadas en TiO_2 y ZnO mostraron un ancho de línea adecuado.

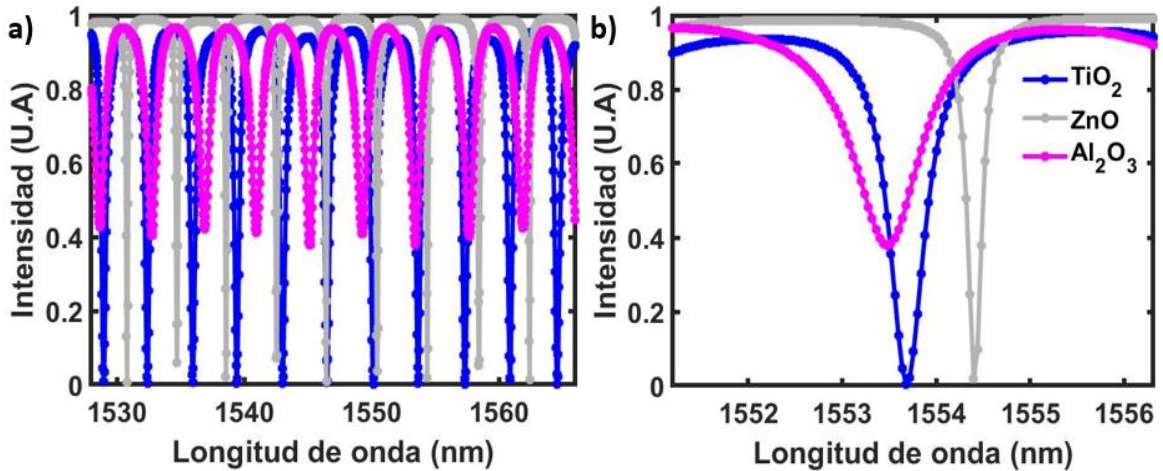


Figura 58. Graficas de transmisión del AOR para el rango de las longitudes de onda: a) Banda C y b) 1555 nm.

La longitud de onda de operación se puede apreciar en: 1553.48 nm (Al_2O_3), 1554.4nm (ZnO) y 1553.68nm (TiO_2). Considerando esta longitud como la de resonancia (λ_{res}), se pueden calcular los parámetros ópticos: rango espectral libre (FSR) = $\frac{\lambda^2}{n_{eff}L}$, el ancho completo a medio máximo ($FWHM$) = $\frac{(1-r\alpha)\lambda_{res}^2}{\pi n_{eff}L\sqrt{r\alpha}}$, el factor de calidad (Q) = $\frac{\lambda_{res}}{FWHM}$ y fineza (F) = $\frac{FSR}{FWHM}$. Aquí, (L) es la longitud de la cavidad, (r) es el coeficiente de acoplamiento y (α) el coeficiente de atenuación. Los parámetros ópticos correspondientes para cada material se muestran en la Tabla 8. El ZnO presenta un factor Q moderado y un $FWHM$ atractivo para aplicaciones de filtrado en telecomunicaciones ($FWHM$ estrecho y transmisión máxima). Por su parte, el TiO_2 tiene un desempeño comparable al de ZnO , aunque su factor Q necesita ser mejorado. Por último, el Al_2O_3 muestra un factor Q muy bajo, pero exhibe un mejor confinamiento modal que las demás estructuras.

Como se puede observar, el factor Q requiere mejoras. Por ello, en la siguiente sección se decidió realizar un análisis de filtrado en resonadores de anillo con radios mayores, con el objetivo de desarrollar un dispositivo funcional y confiable (Jiang et al., 2015).

Tabla 8. Los parámetros de filtrado de AOR para un radio de 60 μm .

	TiO ₂ ($\lambda=1553.68$ nm)	ZnO($\lambda=1554.4$ nm)	Al ₂ O ₃ ($\lambda=1553.48$ nm)
Pico de transmitancia (U.A.)	0.9465	0.9893	0.9640
Cresta de transmisión (U.A.)	0.0047	0.0184	0.3791
Relación de extinción (U.A.)	0.9418	0.9709	0.5849
FSR promedio (nm)	3.56	3.95	4.15
FWHM (nm)	0.4396	0.22188	0.8310
F	8.0969	17.8020	4.9937
Q-Factor	3533	7005	1869

4.3.3 Análisis de filtrado en resonadores con radio superiores

Para este estudio, se optó por realizar un análisis de filtrado en resonadores de anillo con los radios de 120 μm y 180 μm , con el objetivo de incrementar el factor Q de nuestros dispositivos. El estudio se centró en una comparativa con el radio previamente seleccionado, como se muestra en la Figura 59.

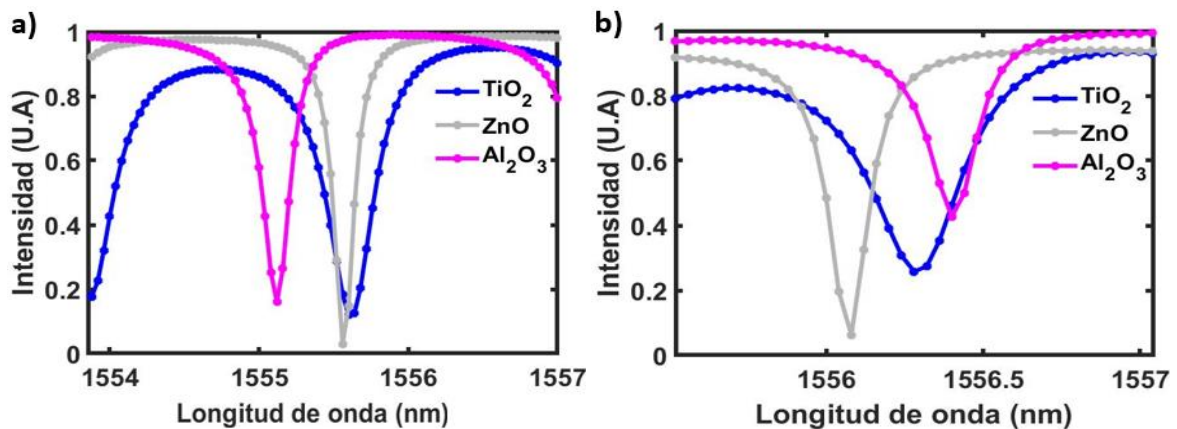


Figura 59. Gráficas de transmisión del AOR para el rango de longitudes de onda en telecomunicaciones ópticas: a) radio del anillo 120 μm y b) radio del anillo óptico de 180 μm .

Como se observa en la Tabla 9, las estructuras con un mayor radio de anillo ofrecen una mayor cantidad de señales en resonancia para un ancho de banda dado, reflejado en el valor de FWHM. A medida que aumenta el radio del anillo, se obtiene un mayor Factor Q y menores pérdidas de curvatura. En el caso del Al₂O₃, esto es más evidente, ya que es la única estructura que no es un dispositivo de sub-longitud de onda, a diferencia de los dispositivos basados en ZnO y TiO₂. Para estructuras sub-longitud de onda, como ZnO y TiO₂, se observa que existe un límite en el radio del anillo a partir del cual las pérdidas por curvatura se vuelven menos significativas; sin embargo, al superar este límite, las pérdidas por curvatura asociadas

la distancia de propagación comienzan a incrementarse.

Tabla 9. Desempeño del resonador de anillo en función de la variación del radio para cada material.

Al ₂ O ₃	60µm (λ=1553.48 nm)	120µm (λ=1555.12 nm)	180µm (λ=1556.4 nm)
FWHM (nm)	0.8310	0.2208	0.1871
Q-Factor	1869	7041	8310
Pérdidas de propagación (dB/cm)	-154.4591	-20.2365	-6.4330
ZnO	60µm (λ=1554.4 nm)	120µm (λ=1555.56 nm)	180µm (λ=1556.08 nm)
FWHM (nm)	0.2218	0.1596	0.1210
Q-Factor	7005	9742	12842
Pérdidas de propagación (dB/cm)	-19.4699	-4.4377	-7.3069
TiO ₂	60µm (λ=1553.68 nm)	120µm (λ=1555.6 nm)	180µm (λ=1556.28 nm)
FWHM (nm)	0.4396	0.3550	0.3082
Q-Factor	3533	4381	5045
Perdidas de propagación (dB/cm)	-0.9708	-0.3103	-0.4845

A pesar del efecto mencionado anteriormente, las pérdidas son mínimas y no afectan el desempeño del AOR. En este punto, la configuración óptima para un resonador de anillo con bajas pérdidas, alta relación de extinción, un factor Q adecuado, buena fineza y un ancho de línea estrecho es la plataforma ZnO, con un radio de anillo de 180 µm, una d_g de 500 nm, y una sección transversal de 1400 nm de ancho por 500 nm de espesor de película delgada, con revestimiento de aire y un sustrato de SiO₂. Cabe destacar que las plataformas basadas en TiO₂ y Al₂O₃ también son competitivas y pueden ser utilizadas en diversas aplicaciones de sensores. Estos son los resultados preliminares basados en los cálculos obtenidos mediante el análisis, diseño y simulación de los dispositivos. La selección del mejor material dependerá de su viabilidad en la fabricación, cuyos resultados se analizan en los siguientes apartados.

4.4 Litografía electrónica:

Una vez que las muestras con un polímero de tipo negativo son expuestas al cañón de electrones y se obtiene el patrón deseado para la fabricación, se realiza el proceso de revelado logró diseñar la mejor configuración estructural enfocada en dispositivos de AOR para cada uno de nuestros materiales transparentes, mediante el uso de software especializado, el siguiente paso es desarrollar toda la

metodología de fabricación para cada material previamente analizado; en averiguar si es posible la fabricación de una plataforma basados en dispositivos de guías de onda ópticas en nuestros materiales. En esta sección de resultados se discutirán los siguientes puntos de fabricación correspondientes a la metodología de litografía por EBL:

- Revelado
- Evaporación por haz electrones-lift-off
- Ataque iónico reactivo
- Ataque húmedo

4.4.1 Revelado:

Una vez que las muestras con un polímero de tipo negativo son expuestas al cañón de electrones y se obtiene el patrón deseado para la fabricación, se realiza el proceso de revelado. Esto significa que áreas expuestas serán removidas durante dicho proceso. En la Figura 60 se observan las estructuras reveladas en las plataformas de Al_2O_3 , utilizando un microscopio en campo oscuro con una resolución de 100x, lo que permite una mejor apreciación de los detalles estructurales.

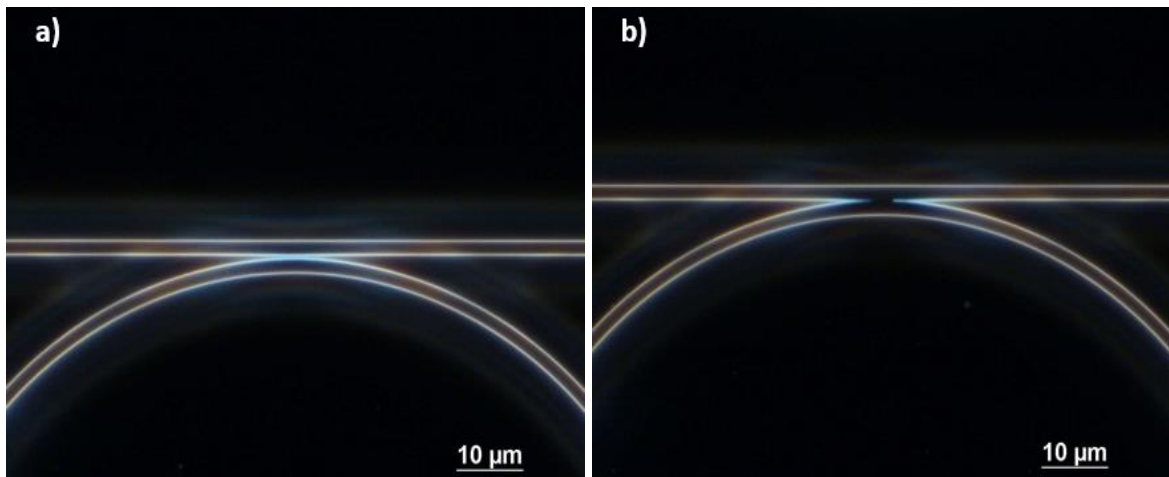


Figura 60. Imágenes tomadas por el microscopio óptico a una amplificación de 100x para la configuración de Al_2O_3 después del proceso de revelado, a) anillos con doble bus con un d_g de 600 nm. B) anillos con doble con un d_g de 200 nm.

En la Figura 61 se pueden apreciar las estructuras reveladas de la configuración de ZnO , utilizando un microscopio con una resolución de 50x en campo claro.

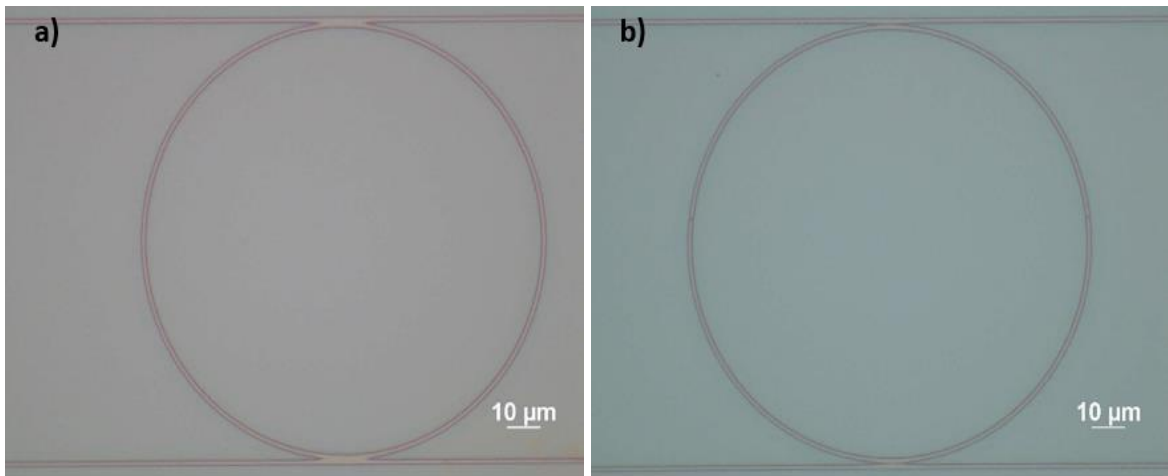


Figura 61. Imágenes tomadas por el microscopio óptico a una amplificación de 50x para la configuración de ZnO después del proceso de revelado a) anillo con doble bus con un d_g de 200 nm, b) anillo con doble con un d_g de 600 nm.

Finalmente, en la Figura 62 se pueden observar las estructuras reveladas de TiO_2 con una amplificación variable de 5x y 100x, tanto en campo claro como en campo oscuro, correspondientes a un arreglo de resonadores de anillo con doble bus.

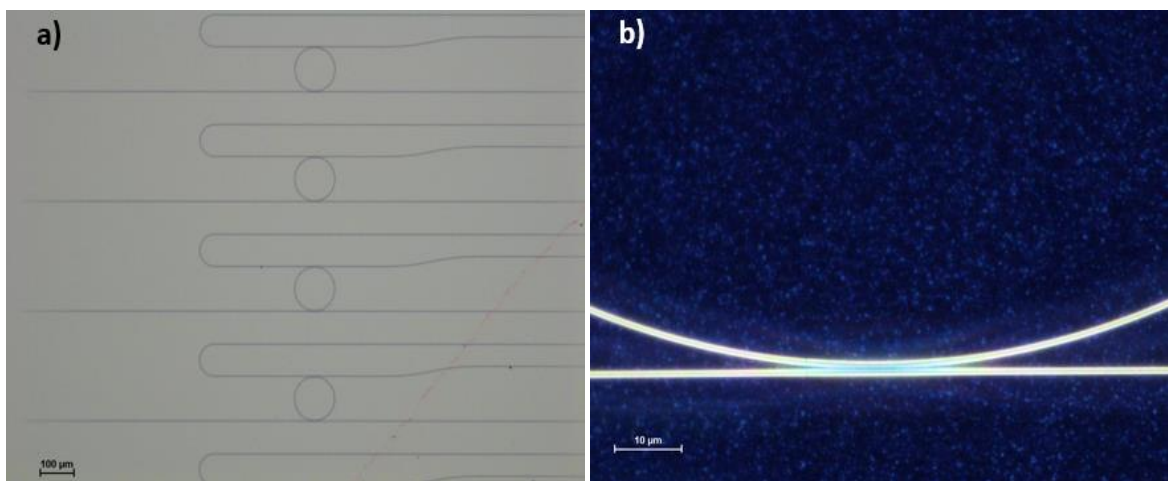


Figura 62. Imágenes obtenidas con microscopio óptico de la configuración de TiO_2 después del proceso de revelado, mostrando anillos con doble bus y una amplificación de: a) 5x y b) 100x en campo oscuro, con un d_g de 200 nm.

A pesar de ser imágenes obtenidas con microscopio, se puede apreciar que la técnica de EBL permite fabricar arreglos de estructuras del orden de cientos de nanómetros, como en el caso ZnO Y TiO_2 . Para las estructuras de Al_2O_3 y ZnO, se observa que en la configuración de d_g mínima el bus y el anillo están unidos, lo que podría deberse al envejecimiento de la resina, así como a la falta de uniformidad y homogeneidad en el proceso de centrifugado. Además, los tiempos de fabricación más largos provocaron que las lentes

se desenfocan con el uso, probablemente porque los GDS no consideraron el efecto de taper invertido. En caso de TiO_2 , la configuración con d_g mínimo fue fabricada con éxito.

4.4.2 Evaporación por haz de electrones-*lift-off*:

Una vez completado el proceso de revelado, es necesario realizar una evaporación por haz de electrones sobre las muestras para proteger las estructuras procesadas mediante EBL. Posteriormente, se procede con el proceso de *lift-off*. En la Figura 63 se observan las estructuras de Al_2O_3 recubiertas con una película metálica de aluminio (Al) de 10 nm de espesor, donde se aprecia que el proceso de *lift-off* no dañó ninguna parte de la estructura.

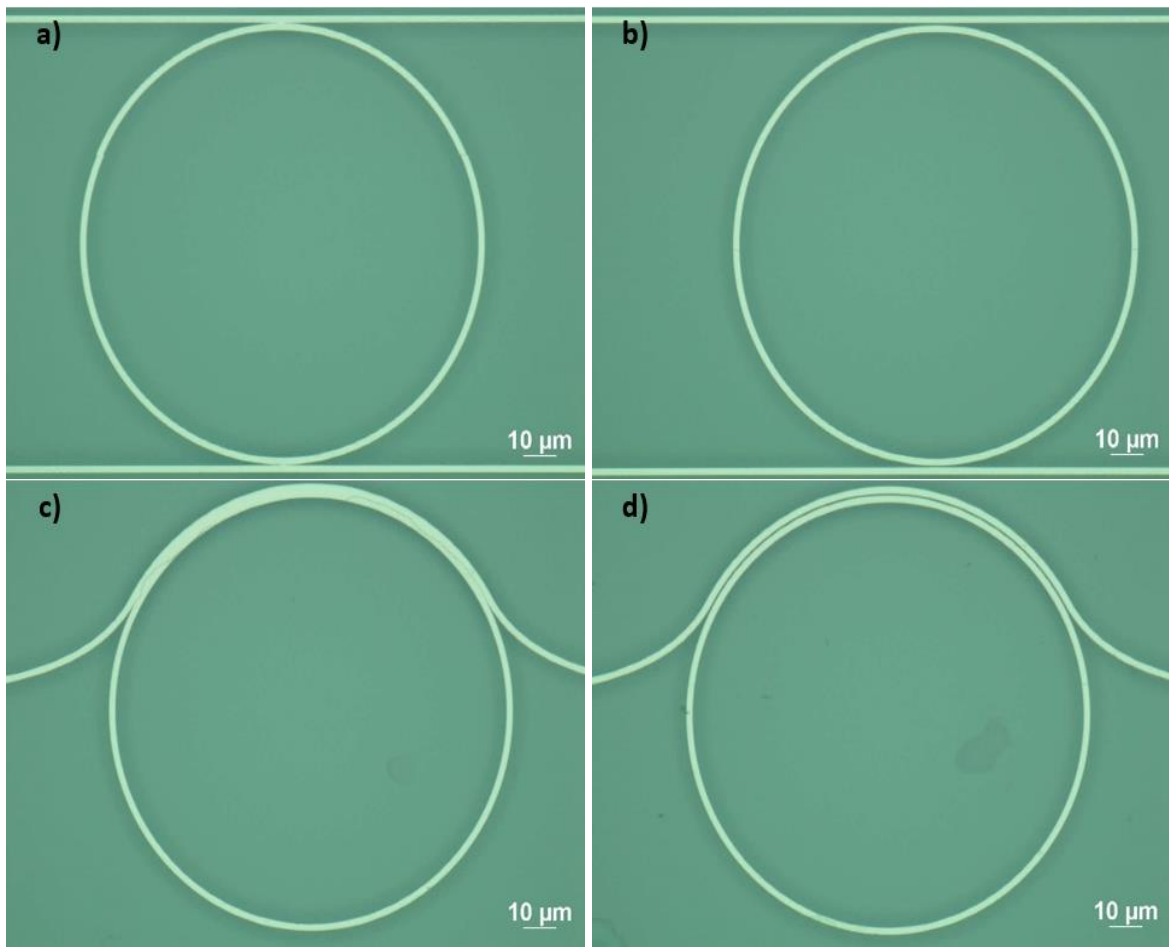


Figura 63. Imágenes obtenidas con microscopio óptico de la configuración de Al_2O_3 después del proceso *lift-off*, con una película metálica de 10 nm de Al y con una amplificación de: a) 50x para anillos con doble bus con una d_g de 200 nm, b) 50x para anillos con doble bus con una d_g de 600 nm, c) 50x anillos tipo polea con una d_g de 200 nm y d) 50x anillos de tipo polea con una d_g de 600 nm.

En la Figura 64 se observan las estructuras de ZnO recubiertas con una película metálica de níquel (Ni) de 50nm de espesor. A pesar de contar con una buena aproximación en la fabricación, se puede notar que en la configuración con el menor valor de d_g en ambas guías aparecen unidas.

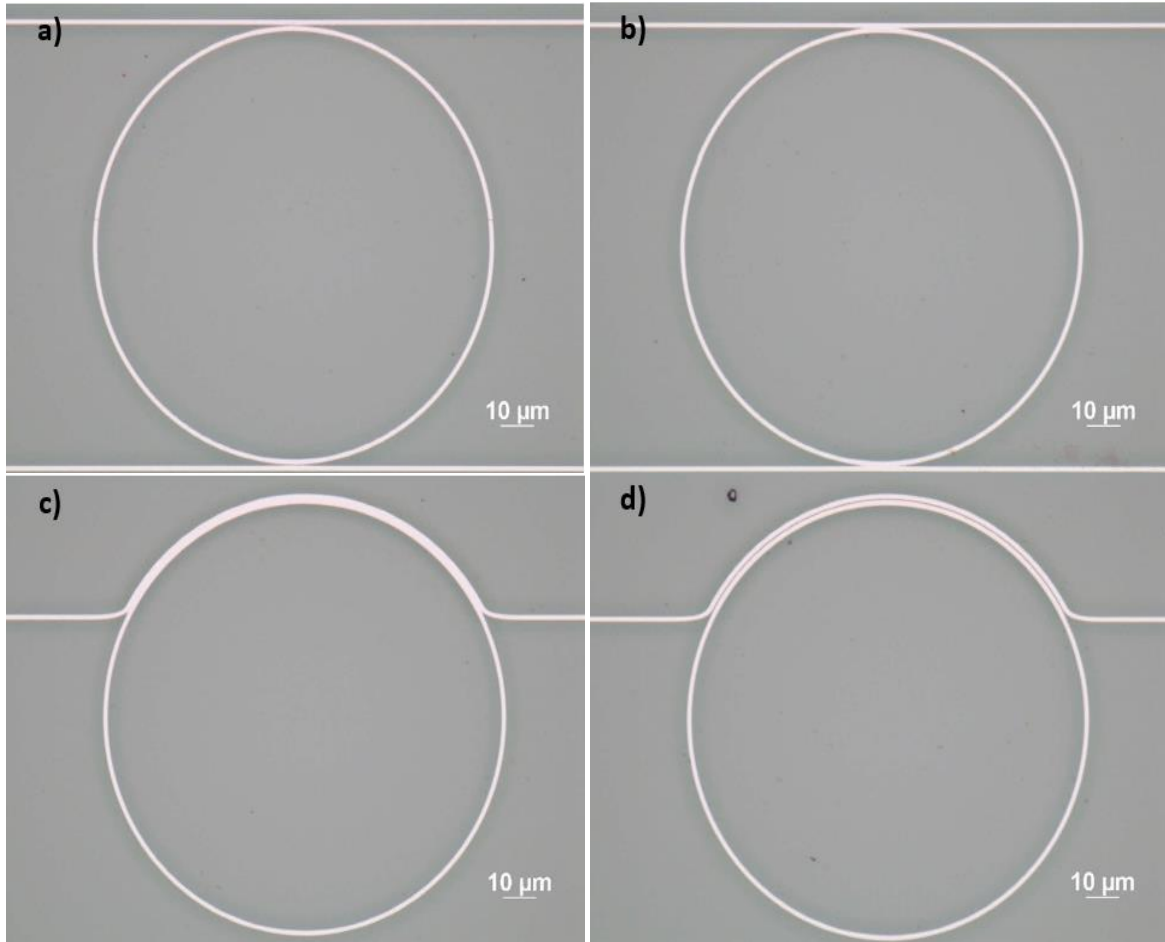


Figura 64. Imágenes obtenidas con microscopio óptico de la configuración de ZnO después del proceso lift-off, con una película metálica de 50 nm de Ni y con una amplificación de: a) 50x para anillos con doble bus con una d_g de 200 nm, b) 50x para anillos con doble bus con una d_g de 600 nm, c) 50x anillos tipo polea con una d_g de 200 nm y d) 50x anillos de tipo polea con una d_g de 600 nm.

Por último se puede apreciar en la Figura 65 las estructuras de TiO_2 con una película metálica de Cr de 40 nm de espesor, manteniendo su integridad en todas las distancias de separación, tanto en las más pequeñas como en las mayores.

Se puede observar que el proceso de vaporación por haz de electrones y *lift-off* no es complicado de ejecutar. A pesar de trabajar con diferentes muestras y películas metálicas, el proceso no dañó las estructuras fabricadas mediante SEM. Es crucial que la película metálica a depositar tenga un espesor

inferior a 180 nm para garantizar una correcta ejecución del *lift-off*. En el siguiente proceso, evaluaremos si las estructuras mantienen su integridad mediante la ejecución del decapado ion reactivo.

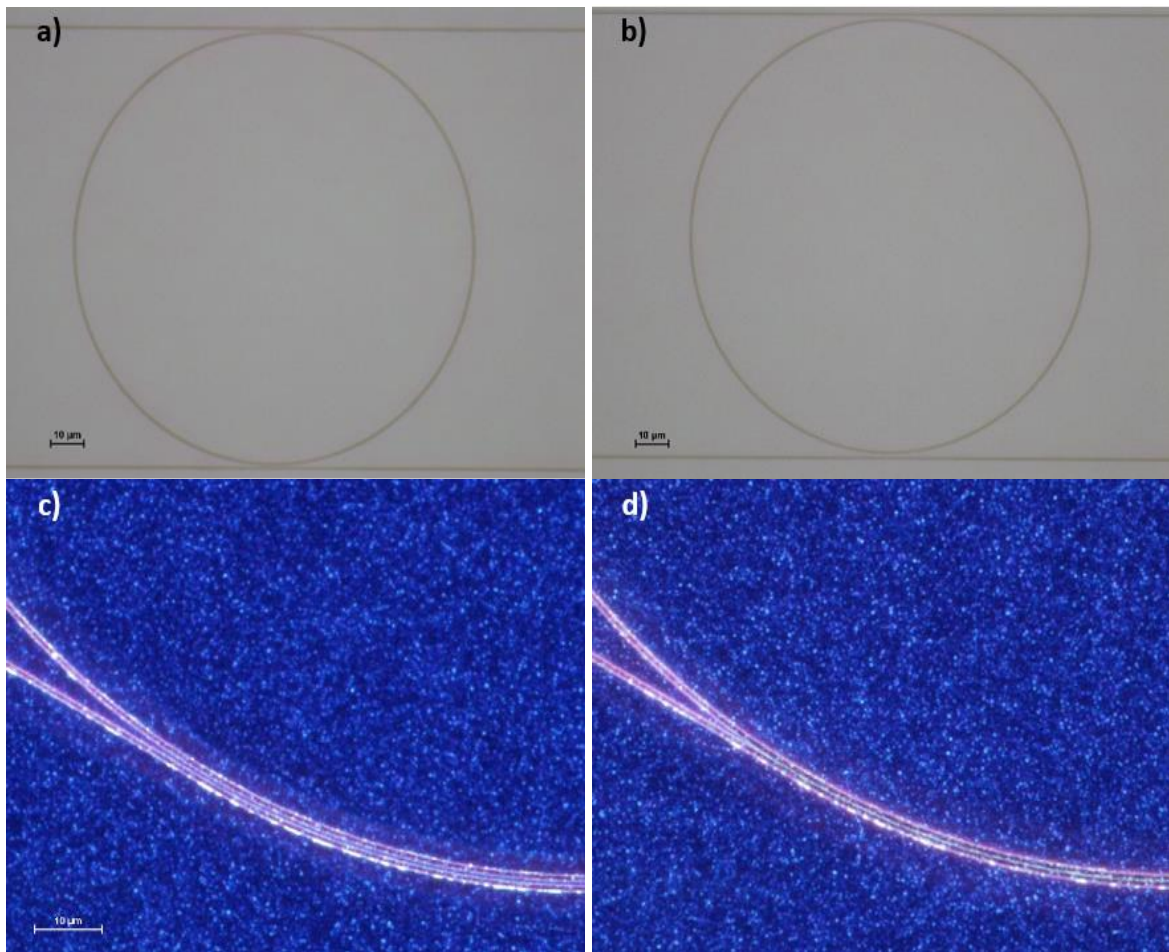


Figura 65. Imágenes obtenidas con microscopio óptico de la configuración de TiO_2 después del proceso *lift-off*, con una película metálica de 40nm de Cr y con una amplificación de: a) 50x para anillos con doble bus con una d_g de 200 nm, b) 50x para anillos con doble bus con una d_g de 700 nm, c) 100x anillos tipo polea con una d_g de 200 nm en el campo oscuro y d) 50x anillos de tipo polea con una d_g de 700 nm en el campo oscuro.

4.4.3 Ataque iónico reactivo:

Una vez que las estructuras completaron el proceso de *lift-off* y se tiene la película metálica en la zona deseada. Se procede a realizar un decapado por RIE para la revocación de material sobrante en la muestra.

En la Figura 66 se muestran las franjas de interferencia correspondientes a las muestras de Al_2O_3 . Cabe destacar que estos análisis se realizaron utilizando un índice de refracción del material asociado a una longitud de onda de 640 nm, cuyo valor para Al_2O_3 es de 1.642. Las oscilaciones observadas son el

resultado de la interferencia entre los rayos reflejados en las interfaces delantera y trasera de la capa de Al_2O_3 . Se identificaron 5 máximos y 5 mínimos de interferencia, distribuidos en un intervalo de 1614.211 segundos (desde 138.189 s hasta 1752.4 s). Se obtuvieron los tiempos $t_1=357.99$ s, $t_2=724.49$ s, $t_3=1046.93$ s, $t_4=1325.82$ s y $t_5=1631.23$ s. Con estos valores, se calculó un promedio que permitió determinar una velocidad de decapado de 37.10 nm/min para una longitud de onda de 640 nm y 37.68 nm/min para una longitud de onda de 650 nm.

De manera experimental, el proceso de decapado comenzó a los 2 minutos y 18 segundos, finalizando a los 29 minutos y 12 segundos, lo que implicó un tiempo total de 26 minutos y 54 segundos para decapar 1 micra de Al_2O_3 . El rango de decapado fue de 37.17 nm/min.

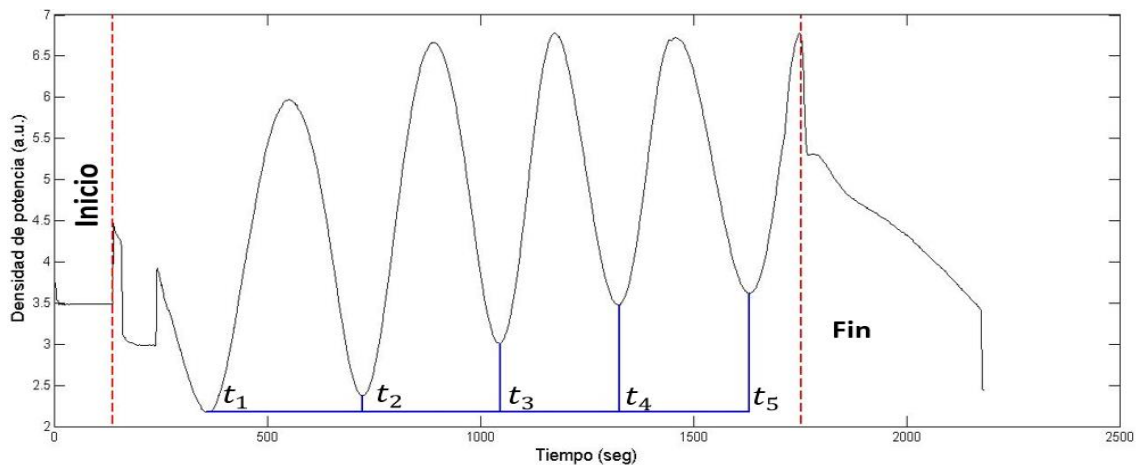


Figura 66. Franjas de interferencia durante el decapado sobre la muestra Al_2O_3 .

En la Figura 67 se presentan las muestras de Al_2O_3 antes y después del decapado por RIE. Se observa que la muestra central está en muy mal estado debido al ataque del RIE, lo que indica que no resistió el proceso. La receta utilizada para remover Al_2O_3 , es muy agresiva y puede dañar o quemar las muestras.



Figura 67. Muestra de Al_2O_3 con un espesor de $1000 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$, siendo la del centro la que fue tratada mediante RIE.

En la Figura 68 se muestran las franjas de interferencia correspondientes a las muestras de ZnO. Cabe destacar que estos análisis se realizaron utilizando un índice de refracción del material de 1.9993, asociado a una longitud de onda de 640 nm.

Se observan oscilaciones causadas por la interferencia entre los rayos reflejados en las interfaces delantera y trasera de la capa de ZnO. Se identificaron 3 máximos y 2 mínimos de interferencia, distribuidos a lo largo de 397.8789 segundos (desde 84.3051 s hasta 482.184 s). Se obtuvieron los tiempos $t_1 = 271.421$ s y $t_2 = 418.441$ s, lo que permitió calcular una velocidad de decapado de 65.32 nm/min para una longitud de onda de 640 nm y 66.34 nm/min para una longitud de onda de 650 nm. De manera experimental, el proceso de decapado comenzó al 1 minuto y 28 segundos, y finalizó a los 8 minutos y 7 segundos, con una duración total de 6 minutos y 39 segundos para decapar 420 nm de ZnO. Se obtuvo una velocidad de decapado de 63.15 nm/min.

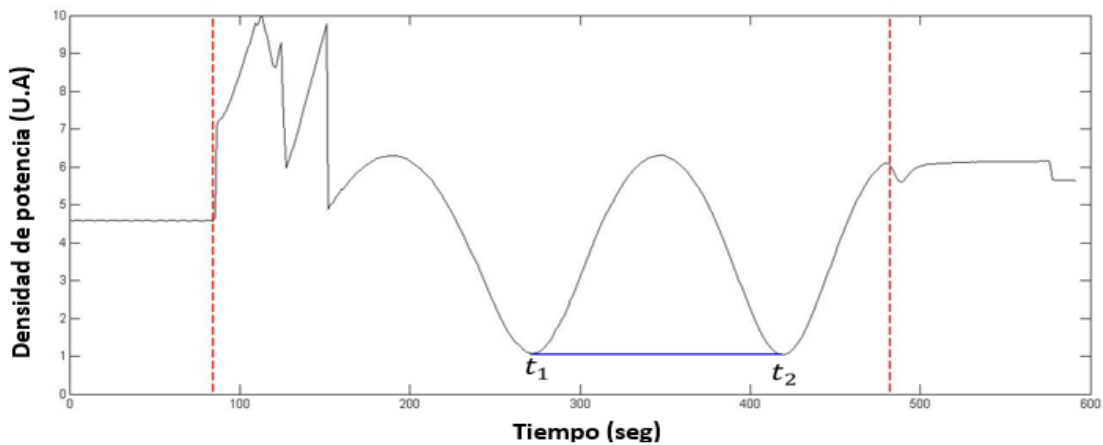


Figura 68. Franjas de interferencia durante el decapado sobre la muestra ZnO.

En la Figura 69 se presentan las muestras de ZnO antes y después del decapado mediante RIE.



Figura 69. Muestra de ZnO con un espesor de $420 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$, donde la muestra central ha sido tratada mediante RIE.

En la Figura 70 se muestran las franjas de interferencia correspondientes a las muestras de TiO_2 . Cabe destacar que estos análisis se realizaron utilizando un índice de refracción de 2.47638 para TiO_2 , asociado a una longitud de onda de 640 nm. Las oscilaciones observadas son el resultado de la interferencia entre los rayos reflejados en las interfaces delantera y trasera de la capa de TiO_2 . Se identificaron 2 máximos, casi 3, y 2 mínimos en las franjas de interferencia, distribuidos a lo largo de 207.165 segundos (desde 155.124 s hasta 362.289 s) Se obtuvieron los tiempos $t_1 = 252.202$ s y $t_2 = 330.264$ s, lo que permitió calcular una velocidad de decapado de 99.30 nm/min para una longitud de onda de 640 nm.

De manera experimental, el proceso de decapado comenzó a los 2 minutos y 22 segundos, y finalizó a los 6 minutos y 6 segundos, con una duración total de 4 minutos y 44 segundos. Se obtuvo una velocidad de decapado de 101.37 nm/min.

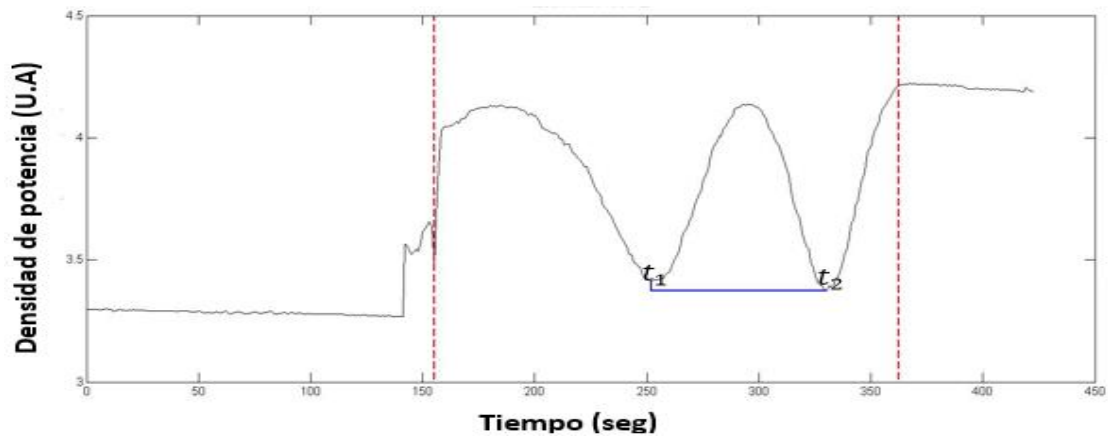


Figura 70. Franjas de interferencia durante el decapado sobre la muestra TiO_2 .

En la Figura 71 se presentan las muestras de TiO_2 antes y después del decapado mediante RIE, siendo un proceso exitoso al igual que el de ZnO enfocado en la remoción de material sobrante.

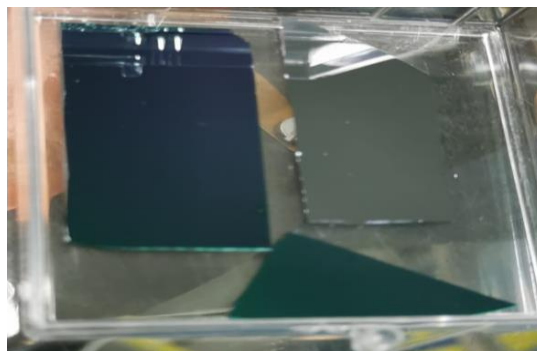


Figura 71. Muestra de TiO_2 con un espesor de $350\text{nm} \pm 10$ nm, donde la muestra en la extrema derecha ha sido tratada mediante RIE.

En la Tabla 10 se presentan las recetas de decapados para cada uno de los materiales con las tasas de decapado alcanzadas en los laboratorios de la UTT y actualizados debido a problemas de mantenimiento.

Tabla 10. Parámetros considerados para cada material para la realización del RIE para los laboratorios de la UTT.

Material	Gas	Proporción	Presión	Flujo	Prc (W)	ICP	Taza de decapado experimental
ZnO	CF ₄ :Ar	85:15*2	5 mTorr	35 sccm CF ₄ 25 Ar 10	200	700	73 nm/min
Al₂O₃	CF ₄ :O ₂	90:10*3 CF ₄ Y O ₂	10 mTorr	50 sccm CF ₄ 45 O ₂ 5	200-190	1500	37.17 nm/min
TiO₂	CF ₄ :Ar	28:72*5	4 mTorr	14 sccm CF ₄ 10 Ar 4	200-190	200	54.44 nm/min

En esta prueba se comenzó a descartar las plataformas fabricadas mediante la técnica de EBL, comenzando por las de Al₂O₃. Esto debido a que la película metálica de Al no fue lo suficientemente resistente para soportar la receta de RIE. En general, ni la muestra pudo resistir el proceso de decapado. Por lo tanto, se descartó para esta tesis el uso de RIE para el decapado del material en el proceso de EBL. En el caso del ZnO, Ni sí resistió la receta de RIE para remover material de ZnO, lo cual fue comprobado mediante pruebas con perfilómetro. Se depositaron 65 nm de Ni sobre muestras de silicio utilizando la evaporadora por haz de electrones, y luego se aplicó la técnica de RIE, cubriendo una sección de la muestra. Como se observa en la Figura 72, la receta de RIE deja un remanente de 15 nm de Ni después del proceso.

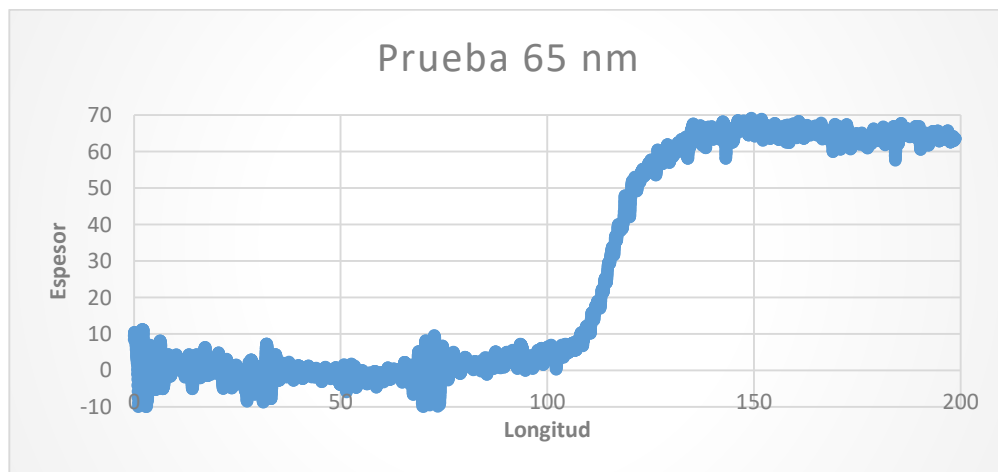


Figura 72. Diagrama del perfilómetro para 65 nm de Ni después del uso del RIE asociado a remover material ZnO.

Por último, la receta del RIE para remover TiO_2 resulto según lo planeado ya que los 40 nm de Cr resistieron el proceso. Esto se puede comprobar en la Figura 73, donde se observa que las estructuras fabricadas mediante EBL en las muestras de TiO_2 superaron el proceso de decapado satisfactoriamente.

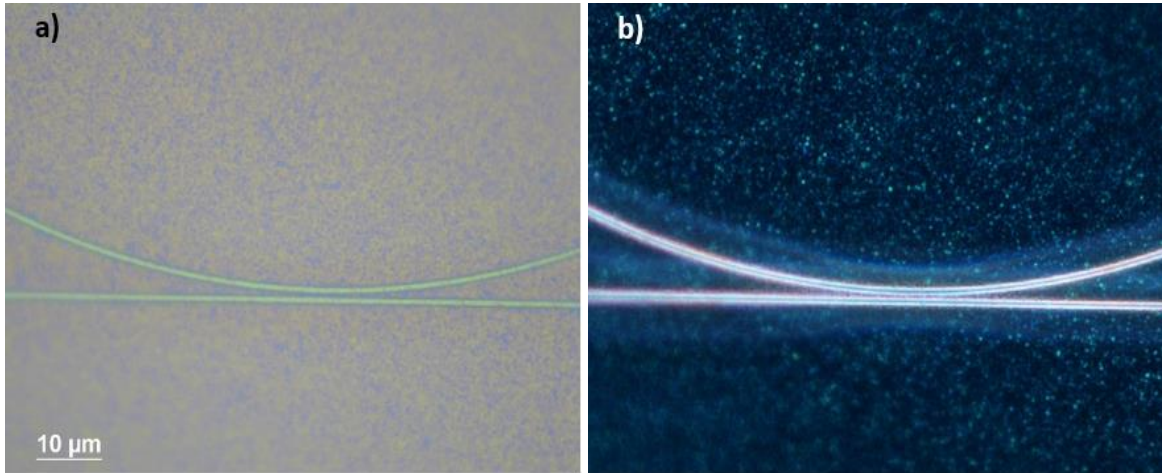


Figura 73. Imágenes de microscopio a una amplificación de 100x de las muestras de TiO_2 enfocadas en estructuras de anillos “pasa todo” con un d_g de 700 nm, después del proceso de RIE, para los campos visuales: a) claro y b) oscuro.

A pesar de que el Ni puede soportar la receta del RIE, se optó por descartar las estructuras de ZnO fabricadas mediante EBL y utilizar TiO_2 por las siguientes razones:

- No se dispone del agente removedor adecuado para la película metálica del Ni.
- La receta de RIE para remover TiO_2 es menos agresiva con la muestra en comparación con la de ZnO.
- El ancho de las guías de TiO_2 es menor que el de las guías de ZnO, lo que agiliza la fabricación de los dispositivos.

Por lo tanto, la única plataforma que logró superar el proceso de decapado fue la de TiO_2 , lo que permitió avanzar al último paso del procedimiento, enfocado en el ataque húmedo.

4.4.4 Ataque húmedo:

Es necesario remover la película metálica de Cr en las estructuras de TiO_2 , ya que esta capa fue utilizada previamente como protección durante los procesos de eliminación de exceso de material. Para ello, se

empleó un ácido especializado el *Chrome etching 18* mencionado en la sección de metodología, diseñado específicamente para remover películas de Cr. En la Figura 74 se presentan imágenes tomadas por SEM que muestran el estado final de las guías de onda de canal tras completar el proceso de fabricación mediante EBL y el ataque húmedo para eliminar el Cr de las muestras.

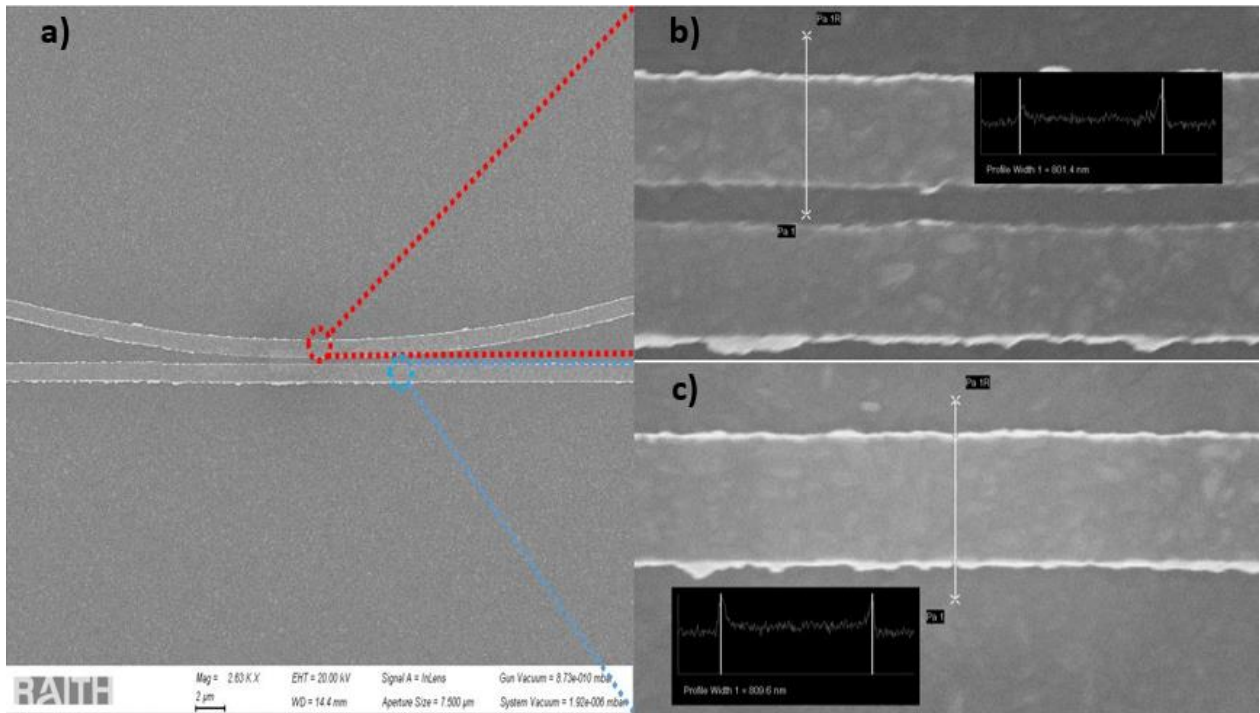


Figura 74. Imágenes de SEM de las muestras de TiO_2 enfocadas en estructuras de anillos con un d_g de 200 nm, tras el proceso de ataque húmedo, a) dispositivo de anillo “pasa todo”, b) ancho de la guía de onda de anillo 801.4 nm, c) guía de onda bus con un ancho de 809.6 nm.

En la Tabla 11 se presenta la tasa de error en los anchos y d_g en las estructuras fabricadas al finalizar el proceso de EBL, mostrando que la tasa de error varía entre 50 nm y 200nm. Estos errores pueden deberse a los siguientes factores:

- Falta de uniformidad en toda la muestra, relacionada con la centrifugadora utilizada en el depósito del polímero sensible a electrones.
- Uso de resina envejecida.
- El tiempo prolongado en el SEM puede provocar desenfoque en las lentes de transmisión del microscopio.
- El depósito de la película metálica y su remoción puede generar errores de fabricación debido a efectos de rugosidad.
- No lograr una anisotropía óptima en el proceso del RIE

A pesar de estos inconvenientes, las estructuras continúan siendo mono-modales, lo que las hace adecuadas para aplicaciones en telecomunicaciones ópticas.

Tabla 11. Comparación de medidas de fabricación teórica y experimental para las estructuras de TiO₂. *W: guías de onda rectas, *ADR: anillos resonantes con doble bus, *AOR: anillos resonantes pasa-todos y *PR: anillos resonantes tipo polea.

	Ancho de bus teóricos (nm)	Ancho de bus real (nm)	D _g teórico (nm)	D _g real (nm)	Ancho de las guías de anillo teóricos (nm)	Anchos de las guías de anillo reales (nm)
W1	1000	996				
W2	700	635				
ADR ₁	700	785.7	200	354.5	700	772.8
ADR ₂	700	658	700	889.4	700	714
AOR ₁	700	622/809	200	413.5/214	700	801/643.13
AOR ₂	700	655	700	906	700	667.5
PR ₁	700	643	200	321	700	603
PR ₂	700	656	700	770	700	622

Ahora, lo último de la sección de resultados la propuesta de método de acoplamiento de fibra-guía.

4.5 Propuesta de método de acoplamiento de fibra-guía:

Para esta última sección de resultados, se propone un método conocido como “edge coupling” o acoplamiento por el filo para acoplar luz de una fibra a guía en la plataforma de TiO₂, como se mencionó previamente en la sección de metodología. En la Figura 75 se presenta nuevamente el diagrama de fabricación utilizado en dicha sección.

El proceso comienza con una guía de SU-8, que actúa como el medio a través del cual la luz de la fibra se acoplará a la plataforma de óptica integrada. Posteriormente, la luz interactúa con la guía adelgazada fabricada mediante la técnica de EBL. Esta guía se ensancha gradualmente hasta alcanzar el ancho necesario para propagar modos fundamentales dentro del rango de telecomunicaciones para el material TiO₂, tal como se estudió en la sección de diseño de este capítulo. Una vez que el modo está confinado en la guía de onda de TiO₂, ya no es necesaria la presencia de la guía SU-8 para que el dispositivo funcione, de acuerdo con lo demostrado en los estudios de simulación y diseño.

Para capturar los datos de salida del dispositivo en un receptor, es necesario invertir el proceso: la guía de TiO_2 se adelgaza nuevamente, interactuando con la guía de SU-8, de modo que todo el modo se acople a la guía de SU-8 para ser finalmente capturado por una fibra.

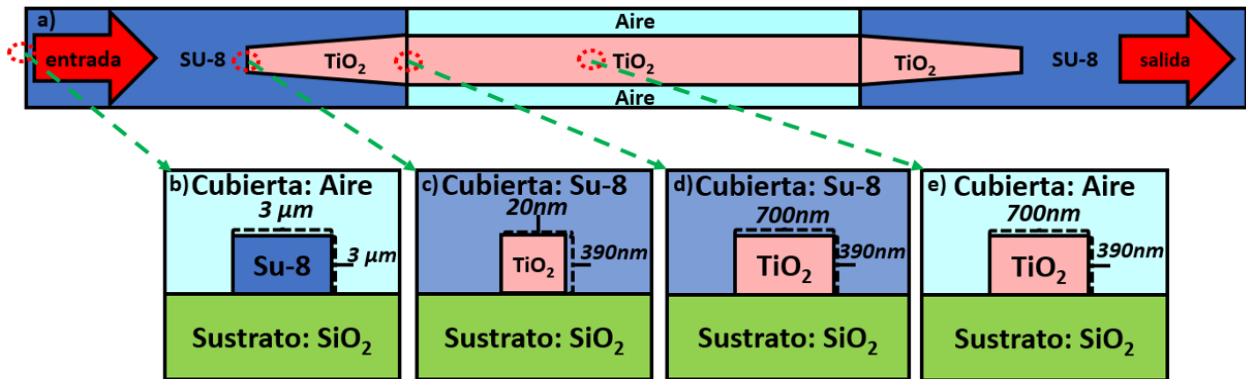


Figura 75. Esquema de fabricación de guías SU-8 para el acoplamiento de fibra óptica a guía. a) Esquema completo de la trayectoria de la luz en el dispositivo, b) sección transversal en el punto de acoplamiento de fibra a guía, c) sección transversal con la guía de onda TiO_2 adelgazada, d) sección transversal de la guía de onda de TiO_2 mostrando el ensanchamiento de la estructura a la condición monomodal deseada y e) sección transversal del dispositivo sin la presencia del polímero SU-8.

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos a partir de simulaciones y aproximaciones físicas, abarcando los siguientes puntos:

- Distribución de intensidad entre interfaces
- Longitud de propagación

Para el procesamiento de resultados, se consideró un índice de refracción de 1.5552 para el SU-8, correspondiente a una longitud de onda de 1550 nm (Zhu, 2023b).

4.5.1 Distribución de intensidad entre interfaces

A continuación, se presentarán todos los resultados relacionados con la distribución de intensidades entre las diferentes interfaces del esquema de fabricación, simuladas mediante el software comercial COMSOL. En la Figura 76, se muestra la sección guía de onda de canal de SU-8 propagando un modo TE_{00} , obteniendo un valor de 1.52225 para la longitud de onda de 1550 nm. Esta guía de onda de canal tiene la capacidad de propagar un modo de propagación dentro la propuesta inicial como plataforma aislada.

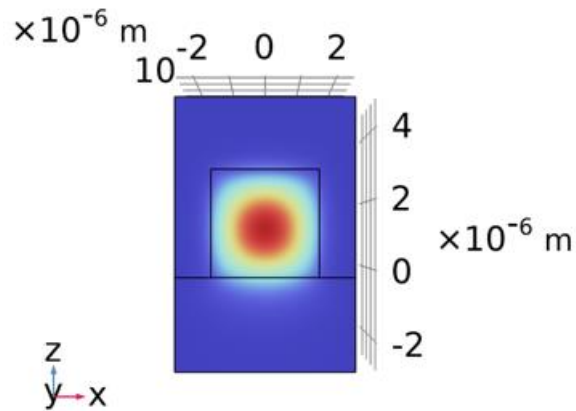


Figura 76. Sección transversal de la guía de onda de SU-8, con cubierta de aire y sustrato de SiO_2 , propagando el modo fundamental TE_{00} dentro del rango de telecomunicaciones.

En la Figura 77 se ilustra el modo de propagación cuando la luz encuentra la guía adelgazada, con un tamaño inicial de 20 nm. En la segunda imagen, se muestra el ensanchamiento de la guía hasta alcanzar 6 μm desde el inicio.

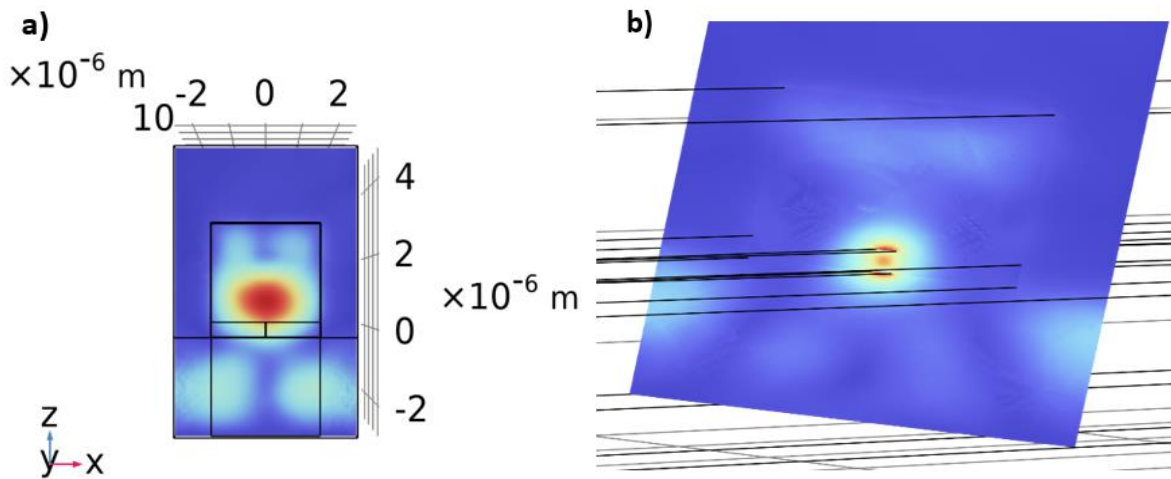


Figura 77. Sección transversal de la guía de onda de SU-8, con cubierta de aire y sustrato de SiO_2 , propagando el modo fundamental TE_{00} dentro del rango de telecomunicaciones e interactuando con la guía adelgazada de TiO_2 . a) con un ancho inicial de 20 nm y b) tras una distancia de propagación de 6 μm .

En la Figura 78 se ilustra el recorrido completo de la guía de onda adelgazada a 200 μm . Se observa como el modo, inicialmente acoplado a la guía de SU-8, termina acoplándose a la guía TiO_2 mediante el principio de reflexión total interna.

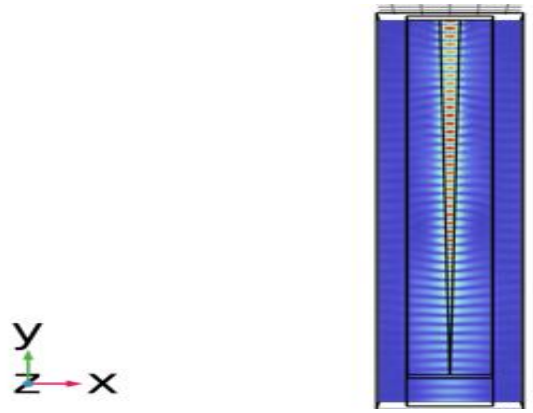


Figura 78. Vista superior de la estructura, donde se aprecia la presencia de modos azimutales.

Se realizó un análisis de la sección transversal para determinar un ancho efectivo con el SU-8 actuando como cubierta. Se calculó que un ancho efectivo de 197 nm es necesario para lograr confinamiento modal en el TiO_2 , como se muestra en la Figura 79. En la Tabla 12 se presenta el porcentaje de distribución en cada interfaz.

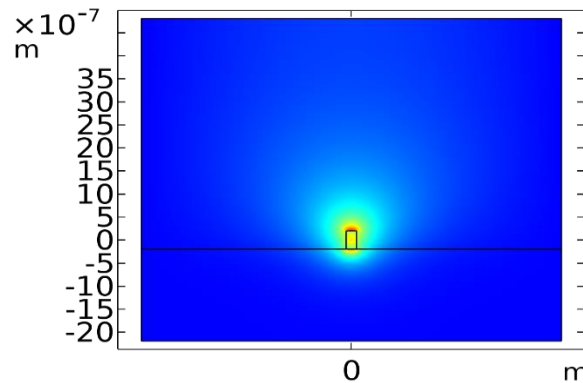


Figura 79. Sección transversal de la guía de onda de TiO_2 con un espesor de 390 nm y un ancho de 197 nm, obteniendo un valor de n_{eff} de 1.5552 para el modo fundamental TE_{00} .

Tabla 12. Distribución de intensidad para el ancho efectivo.

Interfaz	Porcentaje
<i>Núcleo</i>	1 %
<i>Sustrato</i>	10%
<i>Cubierta</i>	89 %

En la Figura 80 se ilustra la distribución de la sección transversal del modo fundamental cuando se alcanza un ancho de 700 nm para el TiO_2 , calculado para propagación de modos TE_{00} en el rango de telecomunicaciones. En la Tabla 13 se presenta el porcentaje de distribución de intensidad cuando la guía de onda de TiO_2 alcanza el ancho deseado de 700 nm.

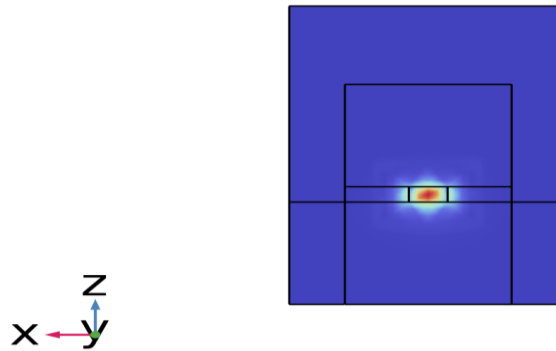


Figura 80. Sección transversal de la guía de onda de TiO_2 con un espesor de 390 nm y un ancho de 700 nm, obteniendo un valor de n_{eff} de 1.87262 para el modo fundamental TE_{00} .

Tabla 13. Distribución de intensidad para el ancho deseado

Interfaz	Porcentaje
<i>Núcleo</i>	36%
<i>Sustrato</i>	21%
<i>Cubierta</i>	43%

4.5.2 Longitud de acoplamiento

Como análisis final de los resultados, se determinó la longitud de acoplamiento necesaria para lograr la transferencia del modo TE_{00} desde la guía SU-8 hacia la guía TiO_2 . Cabe destacar que las imágenes 3D de las próximas figuras fueron generadas con COMSOL, mientras que los valores de transmitancia en función de la longitud fueron analizados mediante LUMERICAL. En la Figura 81 se muestran los modelos de propagación en 3D de las guías de onda de canal.

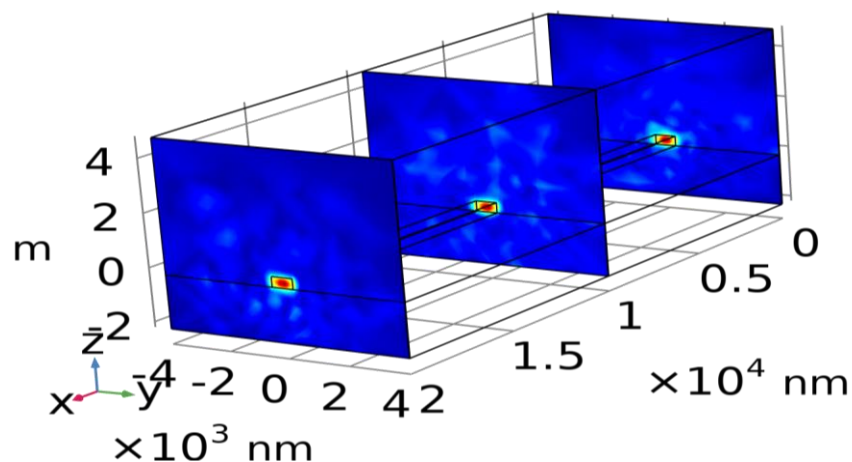


Figura 81. Propagación del modo a través de tres interfaces de cubierta: primera sección con cubierta SU-8, segunda sección con cubierta de aire y tercera sección con cubierta de SU-8.

Entre la interfaz de SU-8, utilizada como cubierta para la guía de onda de canal de TiO_2 , y el cambio a una cubierta de aire, se obtuvo una transmitancia del 0.99940, una absorbancia de $-8.9350\text{E}-8$ y una reflectancia en el primer puerto de $5.9547\text{E}-4$, indicando pérdidas insignificantes. Sin embargo, un inconveniente de las simulaciones en COMSOL fue la imposibilidad de calcular con precisión la transmitancia y reflectancia en el taper debido a la alta densidad de cálculo requerida. Para determinar la longitud efectiva que permita una transmisión del 98%, fue necesario realizar el análisis utilizando Lumerical. La Figura 82 muestra simulaciones realizadas con Lumerical, que ilustran el fenómeno de transmisión del modo TE_{00} desde la guía SU-8 hacia la guía adelgazada invertida de TiO_2 .

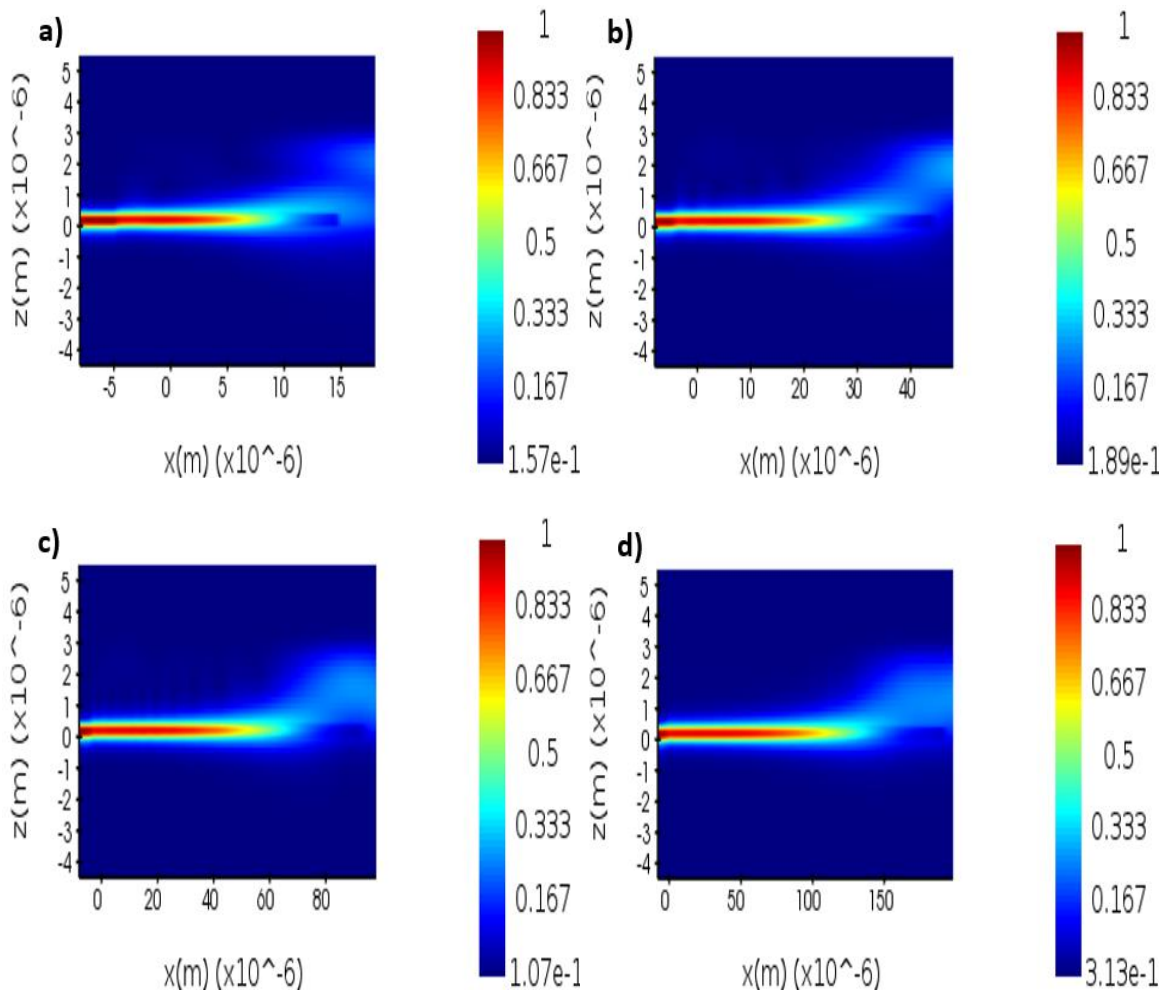


Figura 82. Esquemas de trasmisión de guías SU-8 a guías TiO_2 para el modo TE_{00} en las siguientes longitudes de guías adelgazadas invertidas: a) 20 μm , b) 50 μm , c) 100 μm y d) 200 μm .

Para ilustrar como ocurre la transmisión entre las interfaces, en la Figura 83 se presenta una gráfica que muestra la tasa de transmisión en función de la longitud de la guía adelgazada. Con un largo de 90 μm , se logra una tasa de transmisión superior al 96% (requisito mínimo de fabricación), después de lo cual la

transmisión se mantiene constante a lo largo de la guía adelgazada. En algunos casos, para adelgazamientos muy cortos, las pérdidas no son directamente proporcionales a la longitud del adelgazado. Los picos descendentes se conocen como zonas adiabáticas. Para la fabricación, se recomienda un adelgazamiento de la guía con una longitud de 200 μm .

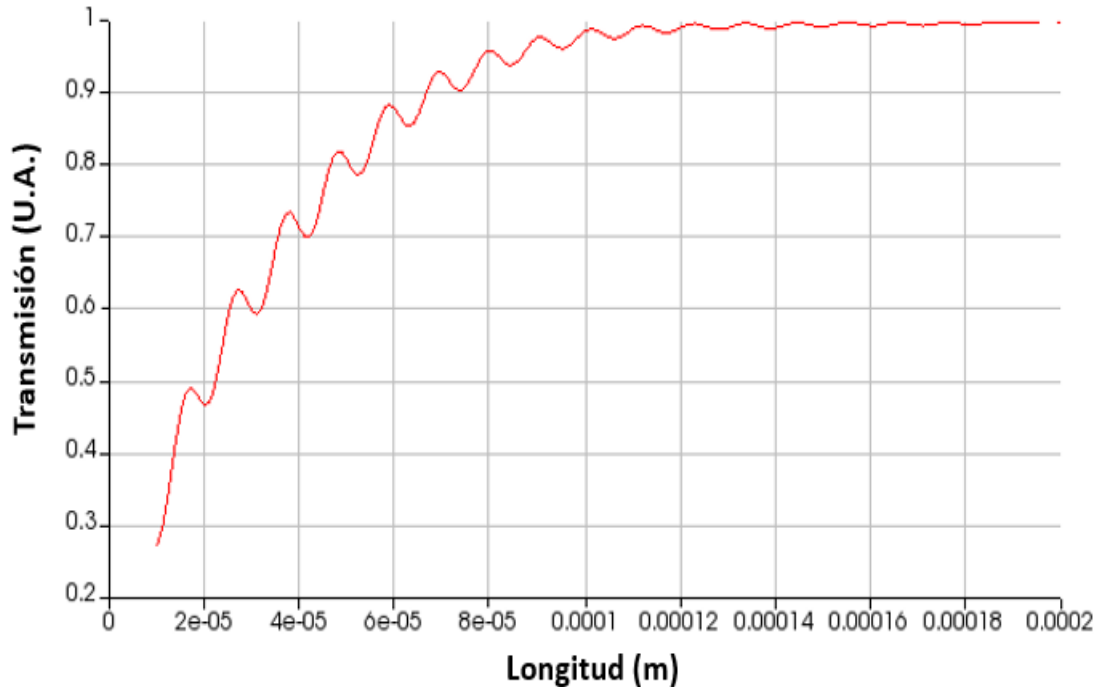


Figura 83. Taza de transmisión en función de la longitud del taper.

Con este último análisis, se concluye la sección de resultados, quedando como la siguiente y última parte las conclusiones del proyecto, pero antes es importante mencionar que en la Tabla 14 se presenta el aporte de la contribución del trabajo comparando estudios previos sobre dispositivos optoelectrónicos; como se puede apreciar, las plataformas de óxido térmico sobre silicio son el material estándar para estructuras sub-longitud de onda.

Además, el uso de ALD para sintetizar materiales transparentes es poco común en la fabricación de dispositivos optoelectrónicos. Es importante destacar que este manuscrito se enfoca en materiales transparentes sintetizados mediante ALD para aplicaciones en telecomunicaciones ópticas, tanto en estructuras de sub-longitud de onda como en tamaños superiores.

Tabla 14. Comparación de los métodos de fabricación, materiales y dimensiones estructurales de diferentes dispositivos de longitud de onda óptica.

Dispositivo	Cubierta/Núcleo/sustrato	Método de síntesis	λ [μm]	Estructura Sub-longitud	Perdidas(-dB/cm)	Autor Año
SWG	SiO ₂ /Si/SiO ₂	N/M	1.55	Si	18	Cheben et al., (2006)
SWG	Aire/Si/SiO ₂	PECVD	1.52-1.56	Si	18	Sun et al., (2020)
SWG	SiO ₂ /Si/SiO ₂	N/M	1.55	Si	2.6	Chen et al., (2018)
AOR	Aire/GaAs /AlGaAs	N/N	5.9972	No	18	Haas et al., (2019)
AOR	AlGaAs/GaAs/AlGaAs	N/M	1.55	Si	40	Absil et al., (2000)
AOR	Aire/SiGe/Si	N/M	4.8	Si	0.2	Armand et al.,(2023)
AOR	Aire/Ge/Si	N/M	4.6	Si	1.7	Morgan et al., (2022)
COW	Aire/TiO ₂ /SiO ₂	RFMS	0.6328	No	9.7	Furuhashi et al., (2011)
COW/MRR	Aire/TiO ₂ /SiO ₂	DCS	0.633-1.55	Si	7.5	Evans et al.,(2015)
MRR	Aire/TiO ₂ /SiO ₂	IBS	1.55	No	3.1	Fu et al.,(2020)
COW	Aire/ZnO/SiO ₂	N/M	0.6328	No	6	Shen et al.(2022)
POW	Aire/ZnO/SiO ₂	RCMS	0.677	No	38-14	Struk et al., (2009)
AOR	Aire/ZnO/SiO ₂	ALD	1.55	Si	19.46-4.43	*T, (2025)
AOR	Aire/TiO ₂ /SiO ₂	ALD	1.55	Si	0.97-0.31	*T, (2025)
AOR	Aire/Al ₂ O ₃ /SiO ₂	ALD	1.55	No	154.45 – 6.43	*T, (2025)

*SWG: Rejillas sub-longitud; *COW: Guías de onda de canal; *MRR: Micro anillos resonantes; *POW: Guía de onda plana; *N/M: no mencionado; *PECVD: Deposito por evaporación química mediante plasma; *AOR: resonador de anillo pasa-todo; *RFMS: Sputtering magnético por radiofrecuencia; *DCS: Sputtering por corriente directa; *IBS: Sputtering por haz de iones; *RCMS: Sputtering por magnetron de cátodo reactivo. *T: presente tesis.

Capítulo 5. Resultados

En este proyecto de tesis se estudió la simulación y la viabilidad de fabricar diversas estructuras de resonadores ópticos de anillo basadas en guías de onda, utilizando diferentes materiales de índice de refracción sintetizados en las instalaciones del CNYN-UNAM y CICESE, haciendo uso, además, de equipos de litografía pertenecientes a los laboratorios de la UTT. El trabajo incluyó la caracterización de películas delgadas, el análisis de guías de onda canal y la evaluación de la actividad de resonancia en micro-anillos tipo pasa-todo. Además, se desarrolló una metodología para la fabricación de dispositivos de óptica integrada y se exploró una propuesta para el acoplamiento de luz desde una fibra óptica hacia las guías. Las conclusiones derivadas de este trabajo son:

1. Síntesis y caracterización de películas delgadas:

Se llevó a cabo la síntesis y caracterización de películas delgadas de Al_2O_3 , ZnO y TiO_2 mediante la técnica de Depósito de Capa Atómica (ALD). Basándose en investigaciones previas del grupo de trabajo, se seleccionaron espesores ideales de 1000 nm para Al_2O_3 , 500 nm para ZnO y 390 nm para TiO_2 , debido a su capacidad para garantizar un adecuado confinamiento óptico y bajas pérdidas de propagación. Una vez fabricadas las películas delgadas, el cálculo del índice de refracción mediante elipsometría y su extrapolación a 1550 nm fue fundamental para el diseño de los dispositivos, obteniendo los siguientes valores de n para cada material: 1.62927 (Al_2O_3), 1.88581 (ZnO) y 2.36372 (TiO_2). Esto proporcionó una gama de estructuras con distintos índices de refracción, ampliando las posibilidades de fabricación. El TiO_2 , al presentar el índice de refracción más alto, permite una mejor miniaturización en los dispositivos, mientras que el Al_2O_3 con un índice más bajo, resulta en espesores más manejables. Finalmente, el análisis por espectroscopia infrarroja (IR) confirmó que los materiales sintetizados cumplen con los objetivos iniciales de fabricación.

2. Análisis de la sección transversal de la guía de onda de canal:

Se calculó la distribución de intensidad en los futuros dispositivos de óptica integrada destinados al área de telecomunicaciones; se determinó primero el ancho necesario para propagar modos TE_{00} en cada material sintetizado por ALD, obteniendo los siguientes valores: 1.00 μm para Al_2O_3 , 1.4 μm para ZnO y 0.70 μm para TiO_2 . Las estructuras de ZnO y TiO_2 son especialmente capaces de propagar longitudes de onda superiores al área de la sección transversal de la guía de onda de canal, lo que se conoce como guías

de onda de sub-longitud. Los valores de índice de refracción efectivo (n_{eff}) para cada plataforma fueron 1.5166 para Al_2O_3 , 1.5946 para ZnO y 1.7732 para TiO_2 . La estructura de TiO_2 permite una mejor miniaturización al propagar modos fundamentales, mientras que el Al_2O_3 es menos favorable en este aspecto. En cuanto al alcance de la onda evanescente, los valores obtenidos fueron de 860 nm para Al_2O_3 , 855 nm para ZnO y 716 nm para TiO_2 , siendo el de Al_2O_3 el mayor debido a su menor índice de refracción.

3. Propiedades del diseño del AOR:

En cuanto al estudio de filtrado para aplicaciones de telecomunicaciones, para la distancia de separación (d_g) se obtuvo una resolución de 100 nm en el rango de 200 nm a 600 nm. En la banda C de telecomunicaciones (1528 nm a 1566 nm), con un radio de anillo de 60 μm ; se encontró que la distancia de separación óptima es de 200 nm para Al_2O_3 y 500 nm para ZnO y TiO_2 . Los parámetros ópticos fueron para Al_2O_3 (λ_{res} : 1553.48 nm FWHM: 0.8310 nm, pérdidas de propagación: -154.4591 dB/cm, and Factor-Q: 1869), para ZnO (λ_{res} : 1554.4 nm, FWHM: 0.2218, pérdidas de propagación: -0.734 dB/cm, and Factor-Q: 7005), y para TiO_2 (λ_{res} : 1553.68 nm FWHM: 0.4396, pérdidas de propagación: -0.9708 dB/cm, and Factor-Q: 3533). Dado que el Q- Factor es una variable clave a mejorar, se decidió realizar un nuevo estudio con radios de anillo de 120 μm y 180 μm . Como mejor configuración de plataforma se obtuvo ZnO con un radio de 180 μm , alcanzando los siguientes parámetros ópticos: (λ_{res} :1554.76 nm, FWHM: 0.1210 nm, pérdidas propagación:-7.3069 dB/cm, and Q-Factor:12842). Esta plataforma optimizada es ideal para la aplicación de filtros de muesca en telecomunicaciones y podría resultar atractiva para aplicaciones en cavidades de microláseres y biodetección. Estos resultados demuestran que la técnica ALD produce materiales de alto índice de refracción y, considerando los parámetros de fabricación mediante litografía por haz de electrones, es posible desarrollar una plataforma óptica, compacta y eficiente que puede integrarse en chips.

4. Litografía electrónica:

La sección de litografía electrónica fue el proceso culminante para seleccionar la plataforma idónea en la fabricación utilizando la metodología EBL. Aunque todos los materiales avanzaron en la mayor parte del proceso, el grabado reactivo con iones (RIE) fue una etapa crítica. Para las guías de onda de Al_2O_3 , fue necesario considerar una alternativa en el decapado, ya que la receta empleada para remover el material sobrante resultó demasiado agresiva tanto para las muestras como para el equipo. En el caso de ZnO, aunque era la mejor plataforma en términos de análisis y diseño, se requiere una capa protectora metálica que sea fácil de retirar tras el decapado húmedo y lo suficientemente resistente para soportar el proceso

RIE asociado con ZnO. Se consideró al Ni como material idóneo, pero la falta del ácido necesario para su remoción impidió avanzar. Finalmente, la plataforma de TiO₂ logró completar su fabricación, utilizando una capa de Cr que soportó adecuadamente el RIE y para la cual se disponía del ácido especial para remover la película metálica. En cuanto a la tasa de error en la fabricación, se observaron desviaciones entre 50 y 200 nm, principalmente atribuidas al proceso de remoción del Cr.

5. Propuesta del método de acoplamiento de fibra-guía:

La propuesta de un método de acoplamiento de fibra a guía para las estructuras de TiO₂, empleando el polímero SU-8, resultó ser un éxito en una primera etapa. Las simulaciones mostraron que, a una distancia de 90 μm del taper invertido, se alcanzó un acoplamiento del 96% del modo propagado desde la guía SU-8 hacia la interfaz con TiO₂. Cabe destacar que sería relevante extender este estudio a las otras plataformas para evaluar si el método de acoplamiento mediante guías SU-8 es aplicable a materiales con distintos índices de refracción. Este método demostró ser altamente efectivo y podría adoptarse como la opción predeterminada para futuros dispositivos. Además, este estudio facilitó el desarrollo de modelos de simulación en 3D mediante COMSOL.

En conclusión, este trabajo representa un paso significativo en el desarrollo de estructuras ópticas avanzadas con potencial para aplicaciones en telecomunicaciones, microláseres y biodetección. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de las metodologías y materiales empleados, abriendo nuevas oportunidades para la optimización y miniaturización de dispositivos de óptica integrada. El trabajo futuro se enfocará en la validación experimental y la mejora de los procesos de fabricación, con el fin de consolidar una plataforma confiable y eficiente que contribuya al avance tecnológico en el campo de la fotónica. Este proyecto, por tanto, sienta las bases para investigaciones y desarrollos que continúen expandiendo las fronteras de la óptica integrada.

Literatura citada

- Absil, P. P., Hryniewicz, J. V., Little, B. E., Cho, P. S., Wilson, R. A., Joneckis, L. G., & Ho, P. (2000). Wavelength conversion in GaAs micro-ring resonators. *Optics Letters*, 25(8), 554. <https://doi.org/10.1364/ol.25.000554>
- AccSci Technology (ACCSci). (2023). *Introducción a la litografía por haz de electrones (EBL)*. Recuperado el 20 de octubre del 2024, de <https://www.accscicn.com/es/soluciones/que-es-la-litografia-por-haz-de-electrones/>
- Armand, R., Perestjuk, M., Della Torre, A., Sinobad, M., Mitchell, A., Boes, A., Hartmann, J., Fedeli, J., Reboud, V., Brianceau, P., De Rossi, A., Combrié, S., Monat, C., & Grillet, C. (2023). Mid-infrared integrated silicon-germanium ring resonator with high Q-factor. *APL Photonics*, 8(7). <https://doi.org/10.1063/5.0149324>
- Atabaki, A. H., Moazeni, S., Pavanello, F., Gevorgyan, H., Notaros, J., Alloatti, L., Wade, M. T., Sun, C., Kruger, S. A., Meng, H., Qubaisi, K. A., Wang, I., Zhang, B., Khilo, A., Baiocco, C. V., Popović, M. A., Stojanović, V. M., & Ram, R. J. (2018). Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip. *Nature*, 556(7701), 349-354. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0028-z>
- Basics, G., & Basics, G. (2024, 17 junio). *What is a Profilometer?* | GD&T Basics. GD&T Basics. Recuperado el 13 de septiembre del 2024, de <https://www.gdandtbasics.com/what-is-a-profilometer/>
- Bass, M., DeCusatis, C., Enoch, J., Lakshminarayanan, V., Li, G., Macdonald, C., Mahajan, V., & Van Stryland, E. (2009). *Handbook of Optics*, (3rd ed). Volume III: Vision and Vision Optics(set).
- Bogaerts, W., De Heyn, P., Van Vaerenbergh, T., De Vos, K., Selvaraja, S. K., Claes, T., Dumon, P., Bienstman, P., Van Thourhout, D., & Baets, R. (2011). Silicon microring resonators. *Laser & Photonics Review*, 6(1), 47-73. <https://doi.org/10.1002/lpor.201100017>
- Bradley, J., Ay, F., Wörhoff, K., & Pollnau, M. (2007). Fabrication of low-loss channel waveguides in Al₂O₃ and Y₂O₃ layers by inductively coupled plasma reactive ion etching. *Applied Physics B*, 89(2-3), 311-318. <https://doi.org/10.1007/s00340-007-2815-3>
- Caballero-Espitia, D., Lizarraga-Medina, E., Borbon-Nuñez, H., Contreras-Lopez, O., Tiznado, H., & Marquez, H. (2020). Study of Al₂O₃ thin films by ALD using H₂O and O₃ as oxygen source for waveguide applications. *Optical Materials*, 109, 110370. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110370>
- Castillo-Perez, R., Ek-Ek, J. R., Jacome-Peñaherrera, C. E., Jauregui-Vazquez, D., Sanchez-Lara, R., Offerhaus, H. L., & Alvarez-Chavez, J. A. (2023). Comparative modal analysis in micro-nano-optical fiber tapers using spectral parameter power series method and exact modes method. *Journal Of Computational Electronics*, 22(2), 690-697. <https://doi.org/10.1007/s10825-023-02006-y>
- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE). (2021). *Estudio de comunicaciones ópticas bajo condiciones atmosféricas adversas*. Recuperado el 24 de enero del 2025, de <https://todos.cicese.mx/sitio/noticia.php?n=1627>

- Chang, L., De Goede, M., Dijkstra, M., Van Emmerik, C. I., & García-Blanco, S. M. (2020). Modular microring laser cavity sensor. *Optics Express*, 29(2), 1371. <https://doi.org/10.1364/oe.411811>
- Cheben, P., Xu, D., Janz, S., & Densmore, A. (2006). Subwavelength waveguide grating for mode conversion and light coupling in integrated optics. *Optics Express*, 14(11), 4695. <https://doi.org/10.1364/oe.14.004695>
- Chen, L. R., Wang, J., Naghdi, B., & Glesk, I. (2018). Subwavelength Grating Waveguide Devices for Telecommunications Applications. *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, 25(3), 1-11. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2018.2879015>
- COMSOL GROUP, (2018) *Wave Optics Module User's Guide (COMSOL 5.4)*. Recuperado el 10 de octubre del 2024, de <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.woptics/WaveOpticsModuleUsersGuide.pdf>
- El Economista. (2024, 12 abril). Baja California impulsa industria de semiconductores y tecnología. El Economista. Recuperado el 10 de noviembre de 2024, de <https://www.economista.com.mx/estados/Baja-California-impulsa-industria-de-semiconductores-y-tecnologia-20240411-0106.html>
- Evans, C. C., Liu, C., & Suntivich, J. (2015). Low-loss titanium dioxide waveguides and resonators using a dielectric lift-off fabrication process. *Optics Express*, 23(9), 11160. <https://doi.org/10.1364/oe.23.011160>
- Fu, M., Zheng, Y., Li, G., Hu, H., Pu, M., Oxenløwe, L. K., Frandsen, L. H., Li, X., & Guan, X. (2020). High-Q titanium dioxide micro-ring resonators for integrated nonlinear photonics. *Optics Express*, 28(26), 39084. <https://doi.org/10.1364/oe.404821>
- Furuhashi, M., Fujiwara, M., Ohshiro, T., Tsutsui, M., Matsubara, K., Taniguchi, M., Takeuchi, S., & Kawai, T. (2011). Development of microfabricated TiO₂ channel waveguides. *AIP Advances*, 1(3). <https://doi.org/10.1063/1.3615716>
- Girault, P., Lorrain, N., Poffo, L., Guendouz, M., Lemaitre, J., Carré, C., Gadonna, M., Bosc, D., & Vignaud, G. (2015). Integrated polymer micro-ring resonators for optical sensing applications. *Journal Of Applied Physics*, 117(10). <https://doi.org/10.1063/1.4914308>
- Haas, J., Artmann, P., & Mizaikoff, B. (2019). Mid-infrared GaAs/AlGaAs micro-ring resonators characterized via thermal tuning. *RSC Advances*, 9(15), 8594-8599. <https://doi.org/10.1039/c8ra10395j>
- Haavisto, J., & Pajer, G. A. (1980). Resonance effects in low-loss ring waveguides. *Optics Letters*, 5(12), 510. <https://doi.org/10.1364/ol.5.000510>
- Heebner, J., Grover, R., & Ibrahim, T. (2007). Optical microresonators. *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-73068-4>
- Herman. (2018) Custom PDK: Ring Resonator PIC. SYNOPSIS Silicon to software. Diapositiva 13. Archivo PDF.

- Hosseini, E. S., Yegnanarayanan, S., Atabaki, A. H., Soltani, M., & Adibi, A. (2010). Systematic design and fabrication of high-Q single-mode pulley-coupled planar silicon nitride microdisk resonators at visible wavelengths. *Optics Express*, 18(3), 2127. <https://doi.org/10.1364/oe.18.002127>
- Hotovy, I., Hascik, S., Gregor, M., Rehacek, V., Predanocy, M., & Plecenik, A. (2014). Dry etching characteristics of TiO₂ thin films using inductively coupled plasma for gas sensing. *Vacuum*, 107, 20-22. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.03.025>
- Jahani, S., Kim, S., Atkinson, J., Wirth, J. C., Kalhor, F., Noman, A. A., Newman, W. D., Shekhar, P., Han, K., Van, V., DeCorby, R. G., Chrostowski, L., Qi, M., & Jacob, Z. (2018). Controlling evanescent waves using silicon photonic all-dielectric metamaterials for dense integration. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04276-8>
- Jiang, C., Tang, C., & Song, J. (2015). The Smallest Resonator Arrays in Atmosphere by Chip-Size-Grown Nanowires with Tunable Q-factor and Frequency for Subnanometer Thickness Detection. *Nano Letters*, 15(2), 1128-1134. <https://doi.org/10.1021/nl504135x>
- Jurado-González, J., Lizárraga-Medina, E., Vazquez, J., Romo, O., López, J., Contreras-López, O., Nedev, N., Márquez, H., & Tiznado, H. (2022). TiO₂-x films as a prospective material for slab waveguides prepared by atomic layer deposition. *Optics & Laser Technology*, 158, 108880. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108880>
- Kaushalram, A., Hegde, G., & Talabattula, S. (2020). Mode hybridization analysis in thin film lithium niobate strip multimode waveguides. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73936-x>
- Klunder, D., Krioukov, E., Tan, F., Van Der Veen, T., Bulthuis, H., Sengo, G., Otto, C., Hoekstra, H., & Driessen, A. (2001). Vertically and laterally waveguide-coupled cylindrical microresonators in Si₃N₄ on SiO₂ technology. *Applied Physics B*, 73(5-6), 603-608. <https://doi.org/10.1007/s003400100705>
- Little, B., Foresi, J., Steinmeyer, G., Thoen, E., Chu, S., Haus, H., Ippen, E., Kimerling, L., & Greene, W. (1998). Ultra-compact Si-SiO₂ microring resonator optical channel dropping filters. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10(4), 549-551. <https://doi.org/10.1109/68.662590>
- LuzMasLuz. (2018, 23 diciembre). Espectroscopía por transformada de Fourier [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=gE-Udea1PZI>
- Marcatili, E. A. J. (1969). Bends in Optical Dielectric Guides. *Bell System Technical Journal*, 48(7), 2103-2132. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01167.x>
- Melissinaki, V., Tsilipakos, O., Kafesaki, M., Farsari, M., & Pissadakis, S. (2021). Micro-Ring Resonator Devices Prototyped on Optical Fiber Tapers by Multi-Photon Lithography. *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, 27(6), 1-7. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2021.3062716>

- Metalinspec (2022). *¿Qué es y cómo funciona un microscopio electrónico de barrido?* Recuperado el 15 de noviembre del 2024, de <https://www.blog.metalinspec.com.mx/que-es-y-como-funciona-un-microscopio-electronico-de-barrido>
- Microresist. (n.d.). Chrome Etch 18: A ready-to-use etchant for chromium thin films and other metals. Recuperado el 15 de octubre del 2024, de https://www.microresist.de/wp-content/uploads/0900/03/ChromeEtch18_21032901_kl.pdf
- Moille, G., Li, Q., Briles, T. C., Yu, S., Drake, T., Lu, X., Rao, A., Westly, D., Papp, S. B., & Srinivasan, K. (2019). Broadband resonator-waveguide coupling for efficient extraction of octave-spanning microcombs. *Optics Letters*, 44(19), 4737. <https://doi.org/10.1364/ol.44.004737>
- Morgan, R., Heidelberger, C., Kharas, D., Cahoy, K., & Sorace-Agaskar, C. (2022). Low-loss Germanium-on-Silicon Waveguides and Ring Resonators for the Mid-Wave Infrared. *Conference On Lasers And Electro-Optics*, 7, SW50.1. https://doi.org/10.1364/cleo_si.2022.sw5o.1
- Ortega-Bailón, C & Lopez-Juarez, I. & Osorio, Román & Peña-Cabrera, Mario. (2012). Determinación de características geométricas de cordón en soldadura GMAW empleando procesamiento de imágenes. En *SOMI XXVII Congreso de Instrumentación*. Recuperado el 30 de octubre del 2024, de: https://www.researchgate.net/publication/299433412_Determinacion_de_caracteristicas_geometricas_de_cordon_en_soldadura_GMAW_employando_procesamiento_de_imagenes
- Oviroh, P. O., Akbarzadeh, R., Pan, D., Coetzee, R. A. M., & Jen, T. (2019). New development of atomic layer deposition: processes, methods and applications. *Science And Technology Of Advanced Materials*, 20(1), 465-496. <https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1599694>
- Park, J. C., Kim, J. K., Kim, T. G., Lee, D. W., Cho, H., Kim, H. S., Yoon, S. J., & Jung, Y. (2011b). Dry etching of SnO₂ and ZnO Films in halogen-based inductively coupled plasmas. *International Journal Of Modern Physics B*, 25(31), 4237-4240. <https://doi.org/10.1142/s0217979211066660>
- Rabus, D. G. (2007). Integrated Ring Resonators. *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68788-7>
- Rafizadeh, D., Zhang, J. P., Hagness, S. C., Taflove, A., Stair, K. A., Ho, S. T., & Tiberio, R. C. (1997). Waveguide-coupled AlGaAs/GaAs microcavity ring and disk resonators with high finesse and 216-nm free spectral range. *Optics Letters*, 22(16), 1244. <https://doi.org/10.1364/ol.22.001244>
- Rajakaruna, T. P. B., Udawatte, C. P., Chandrajith, R., & Rajapakse, R. M. G. (2020). Nonhazardous Process for Extracting Pure Titanium Dioxide Nanorods from Geogenic Ilmenite. *ACS Omega*, 5(26), 16176-16182. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01756>
- Sánchez, B. (2023). *Diseño, fabricación y caracterización de guías de onda ópticas de óxido de zinc*. [Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/>

- Shen, Y., Wu, B., Liu, W., Zhu, H., Zhang, B., Lu, Q., Ren, Y., & Chen, F. (2022). Femtosecond laser writing of waveguides in zinc oxide crystals: fabrication and mode modulation. *Optics Express*, 30(15), 27694. <https://doi.org/10.1364/oe.462649>
- Struk, P., Pustelny, T., Gut, K., Gołaszewska, K., Kamińska, E., Ekielski, M., Pasternak, I., Łusakowska, E., & Piotrowska, A. (2009). Planar Optical Waveguides Based on Thin ZnO Layers. *Acta Physica Polonica A*, 116(3), 414-418. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.116.414>
- Sun, L., Zhang, Y., He, Y., Wang, H., & Su, Y. (2020). Subwavelength structured silicon waveguides and photonic devices. *Nanophotonics*, 9(6), 1321-1340. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0070>
- Thermo Nicolet. (2001) Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry Recuperado el 12 de octubre de 2024, de <https://www.chem.uci.edu/~dmitryf/manuals/Fundamentals/FTIR%20principles.pdf>
- Ulrich, R., & Weber, H. P. (1972). Unidirectional Thin-Film Ring Laser. *Applied Physics Letters*, 20(1), 38-40. <https://doi.org/10.1063/1.1653971>
- Université de Technologie de troyes (UTT). (2020) Manual de uso para el RIE. Archivo de PDF
- Valverde-Aguilar, G., & Zepeda, J. L. M. (2014). Photoluminescence and photoconductivity studies on amorphous and crystalline ZnO thin films obtained by sol-gel method. *Applied Physics A*, 118(4), 1305-1313. <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8836-y>
- Villatoro, F. R. (2009, 11 abril). *Fotolitografía 3D con resolución de 1/20 de la longitud de onda que alcanza los 40 nanómetros - La Ciencia de la Mula Francis*. La Ciencia de la Mula Francis. Recuperado el 10 de septiembre de 2024, de <https://francis.naukas.com/2009/04/11/fotolitografia-3d-con-resolucion-de-120-de-la-longitud-de-onda-que-alcanza-los-40-nanometros/>
- Woollam, J.A. (2018) *Ellipsometry Tutorial* Recuperado el 5 de noviembre de 2024, de <https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial>
- Wu, X., & Tong, L. (2013). Optical microfibers and nanofibers. *Nanophotonics*, 2(5-6), 407-428. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2013-0033>
- Xu, Q., Fattal, D., & Beausoleil, R. G. (2008). Silicon microring resonators with 1.5- μm radius. *Optics Express*, 16(6), 4309. <https://doi.org/10.1364/oe.16.004309>
- Zhu, J., Zhang, B., Huang, Y., Lv, Z., Ying, L., Mei, Y., Zheng, Z., & Zhang, D. (2023). Optical gain at 1.55 μm of Er(TMHD)3 complex doped polymer waveguides based on the intramolecular energy transfer effect. *Optics Express*, 31(4), 5242. <https://doi.org/10.1364/oe.479180>

Anexos

Anexo A: FT-IR desarrollo matemático:

Se tiene una fuente de iluminación de He-Neón y se quiere analizar su contenido espectral. Usando un interferómetro de Michelson de espectro ancho se usará para dicho análisis. Cuando el espectro de la fuente tiene una distribución $S(k)$ el patrón sigue una intensidad dada por la siguiente expresión.

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} S(k)(1 + \cos(2kh)) dk \quad (55)$$

Usando la expresión de Euler para expandir el término

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} S(k) \left(1 + \frac{e^{i2kh} + e^{-i2kh}}{2} \right) dk \quad (56)$$

Separamos la integral en dos partes

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} S(k) dk + \int_{-\infty}^{\infty} S(k) \left(\frac{e^{i2kh} + e^{-i2kh}}{2} \right) dk \quad (57)$$

Se maneja los términos

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} S(k) dk + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} S(k) e^{i2kh} dk + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} S(k) e^{-i2kh} dk \quad (58)$$

Se puede observar que la segunda integral es la transformada Fourier inversa del espectro $S(k)$. Se analiza en detalle la tercera integral, porque si esa dicha integral fuese una transformada de Fourier directa, el dominio debería ser h y no k .

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(k) e^{-i2kh} dk \quad (59)$$

Se hace un intercambio de variables a $-k = \lambda$ y $dk = d\lambda$ entonces los límites de integración van a modificarse de la siguiente forma

$$k = -\infty \quad \lambda = \infty$$

$$k = \infty \quad \lambda = -\infty$$

Remplazamos el cambio de variables en la ecuación:

$$- \int_{\infty}^{-\infty} S(-\lambda) e^{-i2\lambda h} d\lambda \quad (60)$$

El símbolo negativo que tenemos podemos usarlo para cambiar los límites:

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(-\lambda) e^{-i2\lambda h} d\lambda \quad (61)$$

Si se propone el hecho que el espectro de potencia $S(\lambda)$ es una función par en el dominio de la frecuencia entonces $S(-\lambda)$ es lo mismo que $S(\lambda)$

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(\lambda) e^{2\lambda h} d\lambda \quad (62)$$

Algo para ver si λ es una variable muda es lo mismo tener la integral de λ que tenerlos en el dominio en k

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(k) e^{2kh} dk \quad (63)$$

Entonces esa tercera integral es la transformada Fourier inversa igual que el segundo termino

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} S(k) dk + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} S(k) e^{i2kh} dk + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} S(k) e^{i2kh} dk \quad (64)$$

Podemos combinar ambas integrales en una sola

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} S(k) dk + \int_{-\infty}^{\infty} S(k) e^{i2kh} dk \quad (65)$$

Por otra parte la primera integral es la intensidad total disponible entonces se puede abreviar I_0

$$I = I_0 + \int_{-\infty}^{\infty} S(k) e^{i2kh} dk \quad (66)$$

Además el resultado de aplicar la transformada de Fourier inversa sobre el espectro de potencias $S(k)$ hace que la intensidad I depende de h

$$I(h) = I_0 + \int_{-\infty}^{\infty} S(k)e^{i2kh} dk \quad (67)$$

Despejando la integral podemos definir una función W que depende de h como la diferencia de $I(h) - I_0$

$$W(H) = I(h) - I_0 \quad (68)$$

$$W(h) = \int_{-\infty}^{\infty} S(k)e^{i2kh} dk \quad (69)$$

Como el operador de la transformada de Fourier está actuando sobre la distribución espectral $S(k)$ entonces ese operador lo podemos pasar al otro lado de la integral para tener la transformada de Fourier en función.

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(h)e^{-i2kh} dh = S(k) \quad (70)$$

Significa que si conocemos la función $W(h)$ entonces basta con calcular la transformada de Fourier para tener el espectro de potencias $S(k)$, es por eso que para medir espectro se le conoce espectroscopia por transformada de Fourier (LuzMasLuz, 2018).

Anexo B: Principio de funcionamiento de anillos con doble bus y resultados de interpretación en estructuras de TiO₂:

El modelo básico de anillos resonantes con una guía de onda recta vista en este proyecto se puede extenderse para adaptarse a los requisitos de varios de configuraciones de resonadores de anillo, como los dispositivos de anillos que tienen doble bus, o conocido también como resonadores de anillo de adición y extracción, que consiste en una guía de onda de entrada, una guía de onda de salida y el resonador de anillo. Los cuatro puertos del resonador de anillo se denominaran en lo sucesivo como puerto de entrada, puerto de salida, puerto de extracción y puerto de adición como se puede apreciar en la Figura 84 (Rabus, 2007).

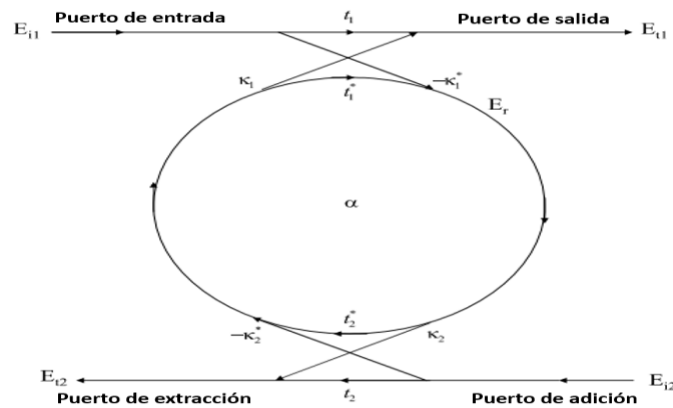


Figura 84. Modelo básico de un anillo resonante con doble guía de onda.

Para simplificar, E_{i1} se define, como antes, igual a 1. La amplitud del modo de paso en la primera guía de onda se expresa como:

$$E_{t1} = t_1 + \frac{-k_1 k_1^* t_2^* \alpha_{1/2}^2 e^{j\theta}}{1 - t_1^* t_2^* \alpha_{1/2}^2 e^{j\theta}} \quad (71)$$

Sabiendo que:

$$|k^2| + |t^2| = 1 \quad (72)$$

La ecuación 71 se iguala a:

$$E_{t1} = \frac{t_1 - t_2^* \alpha_{1/2}^2 e^{j\theta}}{1 - t_1^* t_2^* \alpha_{1/2}^2 e^{j\theta}} = \frac{t_1 - t_2^* \alpha e^{j\theta}}{1 - t_1^* t_2^* \alpha e^{j\theta}} \quad (73)$$

Para este cálculo, se utilizan $\alpha_{1/2}$ y $\theta_{1/2}$, que son respectivamente la pérdida y la fase de media vuelta. Se define $\alpha = \alpha_{1/2}^2$ y $\theta = 2\theta_{1/2}$. Ahora, la amplitud del modo en el anillo debe pasar por el segundo acoplador, como se puede ver en el esquema, para convertirse en la nueva amplitud de modo caído E_{t2} . La amplitud del modo caído en la segunda guía de onda se da entonces por:

$$E_{t2} = \frac{-k_1^* k_2 \alpha_{1/2} e^{j\theta/2}}{1 - t_1^* t_2^* \alpha e^{j\theta}} \quad (74)$$

En resonancia, la potencia de salida desde el puerto de caída está dada por:

$$P_{t2-resonancia} = |E_{t2-resonancia}|^2 = \frac{(1-|t_1|^2) \cdot (1-|t_2|^2) \cdot \alpha}{(1-\alpha|t_1 t_2|)^2} \quad (75)$$

La amplitud del modo en el puerto de paso E_{t1} en la ecuación 71 será cero en resonancia para acopladores simétricos e idénticos $t_1=t_2$ si $\alpha = 1$, lo cual indica que la longitud de onda en resonancia es completamente extraída por el resonador. El valor de $\alpha = 1$ solo puede lograrse mediante la incorporación de ganancia en el resonador de anillo para compensar las pérdidas en la guía de onda. Es un resonador de anillo puramente pasivo, el valor del coeficiente de pérdida α es fijo. Una posibilidad para lograr una intensidad mínima ($P_{t1}=0$) en resonancia en la transmisión de salida P_{t1} en el puerto de paso es ajustar los parámetros de acoplamiento t_1 , t_2 al coeficiente de pérdida α . A partir de la ecuación 73 obtenemos:

$$\alpha = \left| \frac{t_1}{t_2} \right| \quad (76)$$

Si el resonador de anillo no tiene pérdidas ($\alpha = 1$), entonces los acopladores deben ser simétricos para lograr una intensidad mínima. La transmisión de un filtro de adición y extracción de un resonador de anillo sin pérdidas, con un radio de $r=148 \mu\text{m}$, se muestra en la Figura 85.

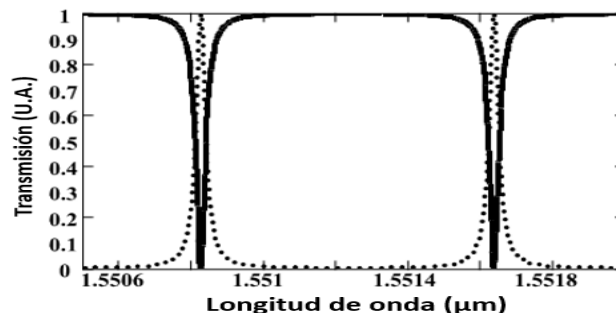


Figura 85. Característica de filtro de resonador de anillo tipo doble bus (Rabus, 2007).

A continuación, se describen las características de los dispositivos utilizados en la simulación de los resonadores de anillo de doble bus:

- Valores de filtración de d_g para ambos bus: 100-700 nm
- Radio del resonador de anillo: 60 y 120 μm
- Resolución de barridos: 130 valores
- Rango de longitud de onda: 1551.16-1556.32 nm

En la Figura 86 se presentan los resultados de filtrado de un anillo de 60 μm con doble bus, para sus puerto de salida (azul), puerto de extracción (rojo) y puerto de adición (verde). En la Tabla 15 se presentan los valores transmisión en ambos bus respecto al valor de d_g para un resonador de anillo de 60 μm con doble bus. Mientras que en la Figura 87 se presentan los resultados de filtrado de un anillo de 120 μm con doble bus, para sus puerto de salida (azul), puerto de extracción (rojo) y puerto de adición (verde). En la Tabla 16 se presentan los valores transmisión en ambos bus respecto al valor de d_g para un resonador de anillo de 120 μm con doble bus

Tabla 15. Transmitancia en puerta de salida y de caída para un resonador de anillo de 60 μm .

D_g (nm)	Transmitancia en puerto de salida	Transmitancia en puerto de caída
100	0.8471	0.2975
200	No calculado	No calculado
300	No calculado	No calculado
400	0.7997	0.2685
500	0.9010	0.3538
600	0.8910	0.2967
700	0.8367	0.1408

Tabla 16. Transmitancia en puerta de salida y de caída para un resonador de anillo de 120 μm .

D_g (nm)	Transmitancia en puerto de salida	Transmitancia en puerto de caída
100	No calculado	No calculado
200	0.8002	0.1606
300	No calculado	No calculado
400	No calculado	No calculado
500	0.4018	0.0996
600	0.8637	0.1556
700	0.8538	0.1605

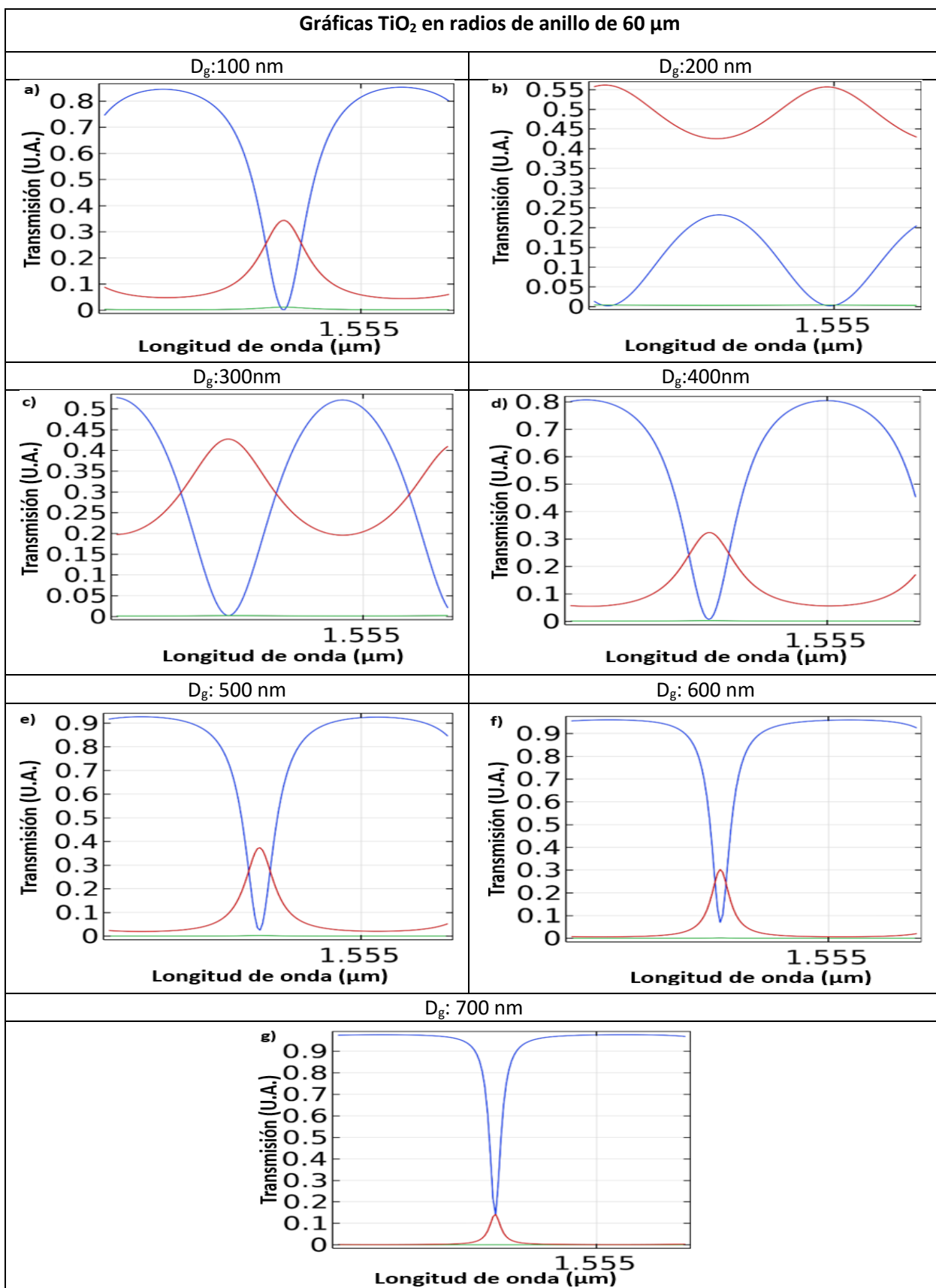


Figura 86. Gráficas de filtrado de resonancia para el material TiO_2 para aplicación de doble guía de onda, con valores de d_g de: a) 100 nm, b) 200 nm, c) 300 nm, d) 400 nm, d) 500 nm, e) 600 nm y d) 700 nm.

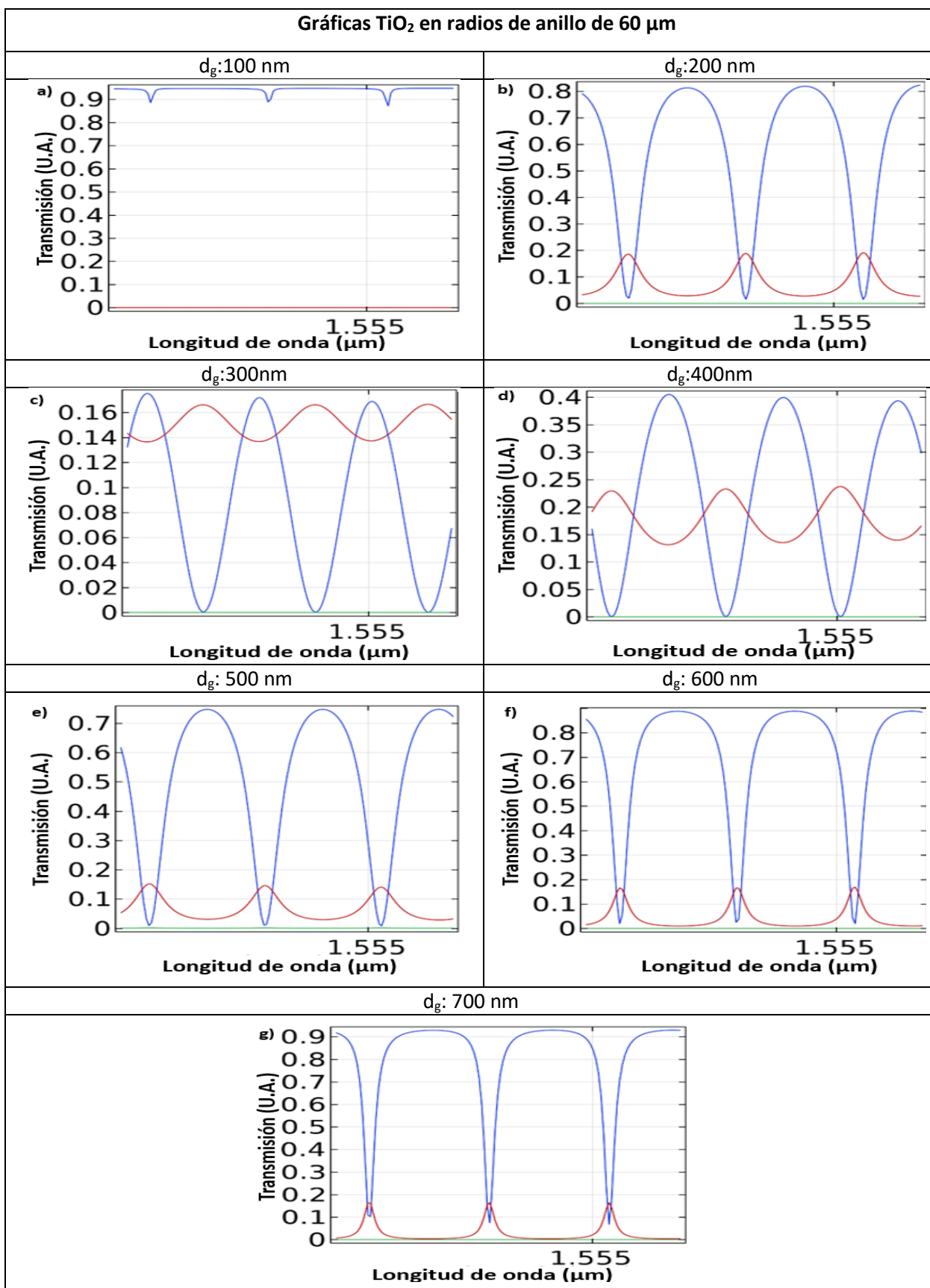


Figura 87. Gráficas de filtrado de resonancia para el material TiO_2 para aplicación de doble guía de onda, con valores de d_g de: a) 100 nm, b) 200 nm, c) 300 nm, d) 400 nm, d) 500 nm, e) 600 nm y d) 700 nm.

Se eligió la estructura con un radio de 60 μm para priorizar el valor de transmitancia en el puerto de caída del segundo bus, además de contar con valores reales calculados para la transmitancia de todo el dispositivo.

Anexo C: Anillos tipo polea:

Hay un tipo particular de resonador de anillo conocido como anillos resonantes tipo polea, que a comparación de los anillos resonantes con guías de onda rectas, en este tipo de anillos se tienen una longitud mayor de acoplamiento que los anillos convencionales. Como se pueden observar en la Figura 88.

Sin embargo, dicha configuración requiere a una estricta condición de fase, ya que, a menos que las dos ondas viajeras tengan la misma velocidad de fase, el desfase entre ellas hace que el coeficiente de acoplamiento sea prácticamente despreciable. En la Figura 88 a) y b) se compara el coeficiente de transmisión de potencia de una guía de onda recta y una guía de onda envolvente acoplada lateralmente a un micro disco.

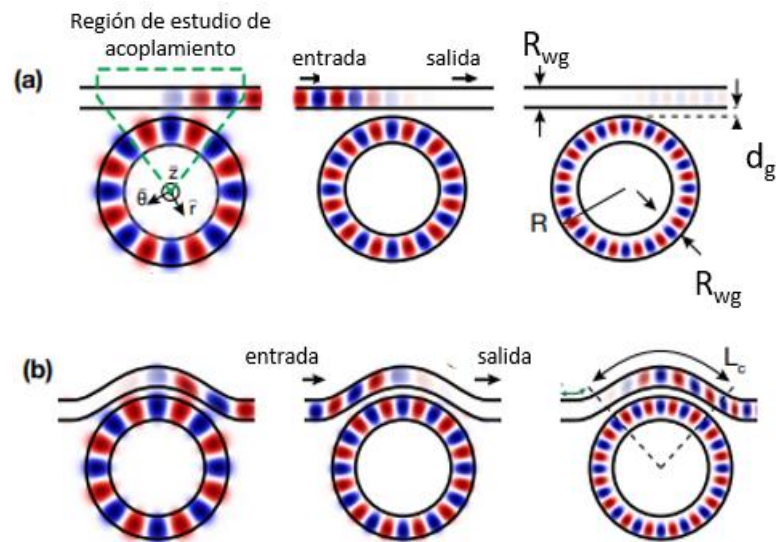


Figura 88. Esquema de los modos ópticos del resonador de anillo acoplado a una guía de onda a) recta y b) polea (Moille et al., 2019).

En la Figura 89 que la configuración de acoplamiento de polea, en el cual la guía de onda interactúa efectivamente con el micro anillo en la región radial entre $-\theta_0$ y θ_0 . R_{disco} es el radio del disco, d_g es el espacio de acoplamiento entre el micro anillo y la guía de onda, W es el ancho de la guía de onda, y $R_{wg} = R_{disco} + d_g + W/2$ es el radio efectivo de la guía de onda curva.

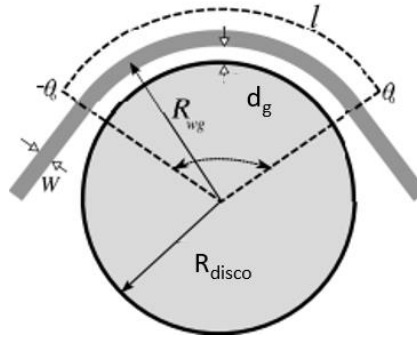


Figura 89. Configuración de acoplamiento del resonador de anillo de polea (Hosseini et al., 2010a).

El principio de funcionamiento de estos tipos de resonadores de anillo está relacionado con el coeficiente de acoplamiento entre una guía de onda y una cavidad adyacente se da según la teoría de perturbación temporal de primer orden como:

$$k = \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \left[\frac{i\omega}{4} \int_0^W \int_0^d (\varepsilon(r, z) - \varepsilon_0) E_{disco} \cdot E_{wg} r dr dz \right] e^{j\phi} d\theta, \quad (77)$$

El cual E_{disco} y E_{wg} corresponden a las amplitudes normalizadas de los campos eléctricos del disco y de la guía de onda, respectivamente; θ_0 es el rango angular del acoplamiento envolvente, d es el grosor de la capa guía, y W es el ancho de la guía de onda. $\varepsilon(r, z) - \varepsilon_0$ es la perturbación que la guía de onda introduce en el modo del micro disco y depende de la forma de la guía de onda. El factor de fase ϕ en la ecuación (77) es la diferencia entre las fases de propagación de los modos de la guía de onda y de la cavidad, y puede expresarse como:

$$\theta = -m\theta + \beta_{wg} R_{wg} \theta = -m\theta + k_0 n_{wg} R_{wg} \theta \quad (78)$$

Donde $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ es el número de onda en el espacio libre, β_{wg} es la constante de propagación del modo de la guía de onda, y m es el orden del modo azimutal del resonador. Aparentemente, el radio efectivo de la guía de onda curva (R_{wg}) es mayor que el radio del disco ($R_{wg} = R_{disco} + g + \frac{W}{2}$). Suponiendo que el ancho de la guía de onda (W) y el espacio de acoplamiento (g) permanecen constantes a lo largo de la longitud de acoplamiento, el término dentro de los corchetes en la ecuación (77) es independiente de θ y puede escribirse como S , y k de ecuación (77) puede simplificarse como:

$$K = S \int_{-\theta_0}^{\theta_0} e^{j\theta(k_0 n_{wg} R_{wg} - m)} d\theta = 2\theta_0 S \text{sinc} \left[(k_0 n_{wg} R_{wg} - m) \frac{\theta_0}{\pi} \right] \quad (79)$$

Donde $\text{sinc}(u) = \sin(\pi u) / (\pi u)$.

Es evidente a que a partir de la ecuación (78) que el desajuste de fase ($\theta_0(k_0 n_{wg} R_{wg} - m)$) entre las dos estructuras puede reducir considerablemente el coeficiente de acoplamiento. Si se cumple la condición de fase (es decir, $k_0 n_{wg} R_{wg} = m$), el coeficiente de acoplamiento es una función lineal de la longitud de acoplamiento (que es proporcional a θ_0). Por el contrario, si el desajuste de fase alcanza un múltiplo de π , el acoplamiento desaparece sin importar que tan grande sea la superposición de los campos. Cabe destacar también que, que similar a los resultados obtenidos mediante el método de transformación conforme para modelar el acoplamiento entre guía de onda y micro resonador, la condición de fase depende del radio efectivo de la guía de onda R_{wg} . En la Figura 90 se puede apreciar un comparativo de resultados en cuestión de transmisión entre resonadores acoplado a una guía de onda recta y una guía de onda de polea se puede apreciar que los valores de transmisión en la segunda configuración es más fino.

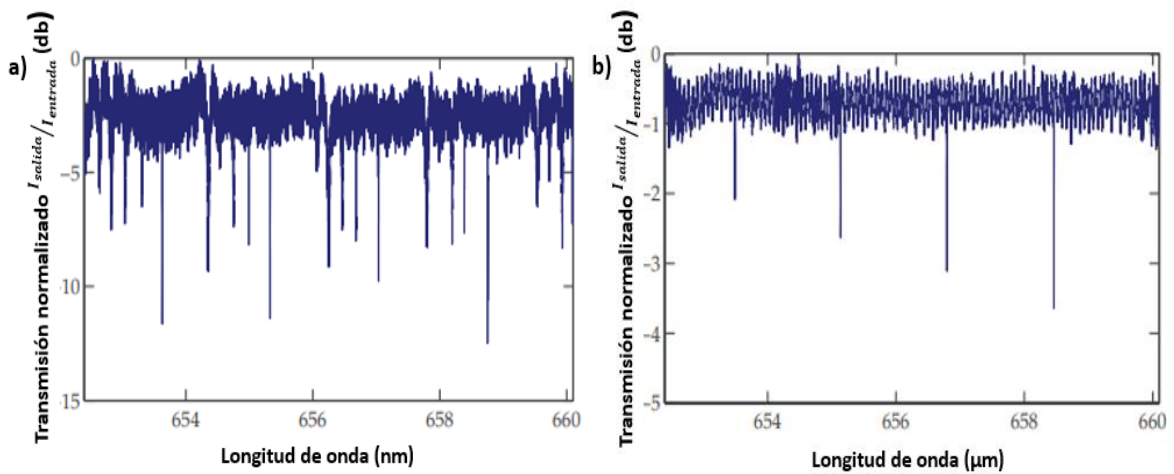


Figura 90. Esquema de los modos ópticos del resonador de anillo acoplado a una guía de onda a) recta y b) polea (Hosseini et al., 2010b).