

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



**Maestría en Ciencias
en Óptica
con orientación en Optoelectrónica**

Estudio de resonadores de anillo de guías de onda ópticas.

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

Presenta:

José Daniel Castro Toscano

Ensenada, Baja California, México
2019

Tesis defendida por
José Daniel Castro Toscano

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Heriberto Márquez Becerra
Director de tesis

Miembros del comité

Dra. Alma Georgina Navarrete Alcalá

Dr. Eder German Lizárraga Medina

Dr. Hugo Jesús Tizano Vázquez

Dr. Santiago Camacho López

Dr. Francisco Javier Esparza Hernández



Dr. Israel Rocha Mendoza
Coordinador del Posgrado en Ciencias en Óptica

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

José Daniel Castro Toscano © 2019

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

Resumen de la tesis que presenta **José Daniel Castro Toscano** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Óptica con orientación en Optoelectrónica.

Estudio de resonadores de anillo de guías de onda ópticas.

Resumen aprobado por:

Dr. Heriberto Márquez Becerra
Director de tesis

La óptica integrada es la aplicación y manipulación de fenómenos físicos de la luz para obtener la miniaturización de estructuras ópticas que pueden ser usadas en una diversidad de áreas. Una de estas estructuras son los resonadores de anillo ópticos, los cuales son dispositivos de suma importancia para el área de óptica integrada, por su aplicación de filtrado de señales ópticas en distancias micrométricas, como alternativa tecnológica a los métodos de resonancia y filtrado que ocupen un espacio grande (p.ej. dispositivo resonador de anillo de fibra óptica), siendo una gran propuesta para el desarrollo de componentes de óptica de alta integración. Por lo que, el objetivo consiste en el estudio del principio de operación y simulación de la propagación de luz en resonadores de anillo. Para la investigación de un diseño más compacto y funcional para la óptica integrada; se usó Software de simulación y propiedades ópticas de materiales dieléctricos con un índice de refracción alto: Al_2O_3 , SiN , Y_2O_3 , Si_3N_4 y TiO_2 ; en substratos de sílice (SiO_2), con cubiertas de aire y SiO_2 . El rango de longitudes de onda de operación empleado, es de 1530nm a 1570nm, es usado en comunicaciones ópticas. Los resultados presentados han sido calculados en plataformas programáticas como lo son COMSOL, MATLAB e Image J. Esta investigación cubre temas de alto interés para la comprensión y diseño de las componentes del resonador de anillo: guías de onda angostas tipo bus, resonadores circulares y finalmente su integración con el acoplamiento óptico de estos dos elementos. Además, se presentan los parámetros de diseño de diversos resonadores de anillo optimizados para operar a 1530nm – 1570nm basados en guías de onda de Al_2O_3 , SiN , Y_2O_3 , Si_3N_4 y TiO_2 .

Palabras clave: **Simulación de Guías de onda ópticas; Simulación de Resonador de anillo; Simulación de filtrado; Diseño.**

Abstract of the thesis presented by **José Daniel Castro Toscano** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Optics with orientation in Optoelectronics.

Study of optical ring resonators in optical waveguides.

Abstract approved by:

Dr. Heriberto Márquez Becerra
Thesis Director

Integrated optics is the application and manipulation of physical lighting phenomena for obtaining miniaturized of optical structures that can be used in myriad areas. One of these tools is the optical ring resonators, being devices of high importance in the area of integrated optics by the fact of filtering optical signals at micrometric distances, leaving behind filtering and resonance methods that need a large space (ex, ring resonators devices made of optical fiber), being a great bet for the development for optical components with high integration. The objective consists in the study, research and simulation of lighting propagation in the ring resonator. For the search of a more compact and functional design; using different Software for simulation and based on dielectric materials with high refractive index: Al_2O_3 , SiN , Y_2O_3 , Si_3N_4 and TiO_2 ; and substrates based on silice (SiO_2), with covers of air and SiO_2 . Working with wavelengths with a range of 1530nm to 1570 nm, being used in optical communications. The results have been obtained and calculated in software platforms that are COMSOL, Matlab and ImageJ. In itself comprising subjects that are important components for the total understanding of the ring resonator being: Channel Waveguide, Circular Resonators and finally the coupling of the two previous elements. Also, representing the design's parameters of a variety ring resonators optimized to work in 1530 - 1570nm based in waveguides of Al_2O_3 , SiN , Y_2O_3 , Si_3N_4 y TiO_2 .

Keywords: Simulation of optical waveguides; Simulation of Ring Resonator; Filtering Simulation; Design.

Dedicatoria

A mi mamá,
A mis hermanos,
A mi padre,
A mis amistades
Por su infinito apoyo

A Cristóbal.
A Celia.
A la Puggy

Agradecimientos

Agradezco a mi madre, a mi padre y a mis hermanos, que fueron pilares importantes en el transcurso del posgrado para que se pudiese cumplir mi objetivo en concluir mi grado de maestría, brindándome cariño y apoyo incondicional, en especial a mi madre Lydia Toscano Palomar el cual es mi modelo a seguir.

Al Dr. Heriberto Márquez Becerra y a los miembros del comité en especial al Dr. Eder Lizárraga Medina y a la Dra. Alma Georgina Navarrete Alcalá, que siempre estuvieron enseñándome, apoyándome y guiándome en todo el transcurso de este trabajo, de una manera académica, social e intelectual, los cuales nunca olvidare y mantendré en mi corazón.

A mis amistades de antaño de Mexicali que siempre me han estado apoyando tanto en las buenas como en las malas siendo integrantes importantes de mi vida, como igual a las nuevas amistades que logre hacer un lazo de confianza y cariño como si fuesen integrantes de mi familia. Entre mis nuevas amistades agradezco a Emilio Aguilar por darme una perspectiva diferente de las cosas en cuestión a temas particulares, por siempre darme tu apoyo para cualquier adversidad y por tu cálida compañía durante estos dos años. A Liliana Vargas por toda la amistad que me ofreciste, con cada plática logrando que me conociera más, a nuestras salidas que se iban como un respiro. A Sharon Ezrre por tu apoyo en la obtención de algunos resultados de esta tesis y recomendaciones; gracias por hacerme sentir como si estuviera en Mexicali. A Alejandro Montenegro por su sabiduría y recomendaciones ante aspectos de la vida. A David Rojas y David Martínez por sacarme una sonrisa en los momentos más frustrantes de la maestría. A Josué Álvarez, Ángela Teposte y Juan Castrillón por darme todo su apoyo en el ámbito académico y explicarme términos que no lograba familiarizar e igual de una increíble amistad. A Gabriel Mejía por toda tu comprensión y compasión que tuviste conmigo.

A Genoveva Maciel por darme alojamiento en el transcurso de la maestría y a su vez en darme todo el apoyo para que no existiera ninguna dificultad de vivir en Ensenada.

A esos seres queridos que se fueron del camino, que gracias a ellos obtuve un pensamiento y corazón lo suficientemente fuerte para lograr la meta de terminar mi maestría.

A los investigadores y trabajadores por enseñarme y apoyarme en esta nueva etapa académica la cual viví.

Al CICESE y a Ensenada por darme la oportunidad de aprender de ciencia y de la vida misma.

A CONACYT y al proyecto FORDECyT 272894.

Tabla de contenido

Resumen en español.....	ii
Resumen en ingles.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	ix
Lista de tablas.....	xii
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Hipótesis.....	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4 Organización del manuscrito:.....	4
Capítulo 2. Marco Teórico	5
2.1 Teoría de guías de onda:	5
2.1.1 Ecuación de Onda.....	7
2.1.2 Relación de dispersión	9
2.1.3 Distribución de la amplitud del campo eléctrico	12
2.1.4 Ancho efectivo y confinamiento.....	12
2.2 Análisis de resonancia:	14
2.2.1 Resonador Fabry-Perot:	14
2.2.2 Resonador de Gires Tournois:	15
2.3 Anillos resonantes	16
2.3.1 Anillo resonante pasa todo (All-Pass Ring Resonator):.....	16

2.3.2 Formalismo de la matriz de esparcimiento:	17
2.3.3 Características espectrales:	21
Capítulo 3. Metodología del Diseño del Resonador de Anillo.....	23
3.1 Materiales:	23
3.2 Estructura del dispositivo.....	24
3.3 COMSOL	25
3.3.1 Análisis de la sección transversal.	26
3.3.1.1 Índice efectivo	27
3.3.1.2 Factor de Confinamiento Modal.....	27
3.3.1.3 Onda Evanescente	28
3.3.2 Análisis del filtrado de resonancia.....	28
3.4 MATLAB.....	31
3.4.1 Modos Longitudinales:.....	31
3.4.2 FSR (Free Spectral Range):	33
3.4.3 Tiempo Transitorio de la Cavidad:.....	33
3.5 ImageJ	34
3.6 Fineza y Factor-Q.....	35
Capítulo 4. Resultados y discusión.....	36
4.1 Caracterización de la guía:.....	36
4.1.1 Índice efectivo:	36
4.1.2 Factor de Confinamiento:.....	43
4.1.3 Onda evanescente:.....	44
4.2 Modelo Teórico del resonador:	46
4.2.1 Modos longitudinales:.....	47

4.2.2 Rango espectral Libre (FSR):	51
4.2.3 Tiempo Transitorio en la Cavidad:	53
4.3 Filtrado de resonancia:	55
4.3.1 Estructura de Al_2O_3	56
4.3.2 Estructura de SiN	57
4.3.3 Estructura de Y_2O_3	58
4.3.4 Estructura de Si_3N_4	59
4.3.5 Estructuras de TiO_2	60
4.3.6 Comparación estructural de todos los materiales:	61
Capítulo 5. Conclusiones	67
Literatura citada	70
Anexos	72

Lista de figuras

Figura 1. Representación de la propagación de la luz respetando la ley de la reflexión total interna.	2
Figura 2. Fotografía de un resonador de anillo de guía de onda óptica. (Heebner, 2008)	2
Figura 3. Aplicaciones de resonadores de anillo. a) Filtrado. b) Inyectado. c) Detectado de señales.	3
Figura 4. Propagación de un haz luminoso en una guía.	5
Figura 5. Sección transversal de las guías de onda más comunes: a) Guía de onda plana, b) guía de onda canal y c) fibra óptica.....	6
Figura 6. Tipo de perfil en guías a) escalón asimétrico, b) escalón simétrico y c) gradiente.	7
Figura 7. Ancho efectivo por representación de trazo de rayos en guía de onda.	13
Figura 8. Esquemas de los diferentes tipos de resonadores de anillo y sus semejantes en espacio libre. .	16
Figura 9. Esquema del anillo resonante pasa todo (All-Pass Ring Resonator).....	17
Figura 10. Onda incidente TE representada en sistemas de bloque. Es necesario que la incidencia sea normal, a) Diagrama del Sistema. b) Diagrama esquemático.	18
Figura 11. Resonador de anillo con sus modos longitudinales (Hermannn, 2018).....	21
Figura 12. Parámetros espectrales característicos del resonador de anillo. (Bogaerts, et al. 50 p, 2012) .	21
Figura 13. Diagrama esquemático del Resonador de anillo, las letras “A” y “B” que se encuentran en el diagrama son respectivamente la entrada y salida de luz en nuestro dispositivo.	24
Figura 14. Diagrama de parámetros de las guías de onda.	25
Figura 15. Diagrama de obtención de resultados para valores de índice efectivos.	27
Figura 16. Sección transversal perteneciente al material Al_2O_3 , cubierta SiO_2 , con las dimensiones $2.00 \mu m \times 0.50 \mu m$	28
Figura 17. Transmitancia de la estructura perteneciente al material TiO_2 con las dimensiones ($1.00 \mu m \times 0.50 \mu m$) con una distancia de separación: $0.4 \mu m$, cubierta aire.	29
Figura 18. Diagrama de configuraciones para resultados de filtrado.....	30
Figura 19. Comparación de filtrados de la estructura perteneciente a la Figura 15. a) Simulación del resonador de anillo en el ancho de banda de $1.53 \mu m$, caso mínimo de filtraje. b) Simulación del resonador de anillo en el ancho de banda $1.554 \mu m$, caso máximo de filtraje.....	30
Figura 20. Gráfica ejemplo del radio de una estructura y material, necesaria para cada modo longitudinal.	32
Figura 21. Comparación modos longitudinales de resonador simulado y de teoría.	32

Figura 22. Gráfica ejemplo del rango espectral libre respecto al Radio de la estructura y material.	33
Figura 23. Gráfica ejemplo del Tiempo de tránsito en la cavidad respecto al radio de cada estructura y material.	34
Figura 24. a) Obtención de la distribución del campo eléctrico de la sección transversal. b) Pasar imagen a escalas de grises. C) Analizar tonalidades de escalas de grises en ImageJ.	34
Figura 25. Transmitancia de la estructura perteneciente al material TiO_2 con las dimensiones (1.00um x 0.50um) con una distancia de separación: 0.4um, cubierta aire. Indicador en rojo del FWHM a procesar en ImageJ.	35
Figura 26. Gráficas de Índices de refracción efectivos para el material Al_2O_3 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	37
Figura 27. Gráficas de Índices de refracción efectivos para el material SiN . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	38
Figura 28. Gráficas de Índices de refracción efectivos para el material Y_2O_3 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	39
Figura 29. Gráficas de Índices de refracción efectivos para el material Si_3N_4 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	40
Figura 30. Gráficas de Índices de refracción efectivos para el material TiO_2 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	41
Figura 31. Gráficas de propagación de la Onda evanescente para una sección transversal (1.00um x 0.50um). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	45
Figura 32. Gráficas de propagación de la Onda evanescente para una sección transversal (2.00um x 0.75um). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	45
Figura 33. Gráficas del radio del anillo respecto al número de modos longitudinales para una sección transversal (1.00um x 0.50um). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	47
Figura 34. Gráficas del radio del anillo respecto al número de modos longitudinales para una sección transversal (2.00um x 0.75um). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	48
Figura 35. Gráficas de rango espectral libre respecto al radio para una sección transversal (1.00um x 0.50um). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	51
Figura 36. Gráficas de rango espectral libre respecto al radio para una sección transversal (2.00um x 0.75um). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	51
Figura 37. Gráficas de tiempo transitorios de la cavidad respecto al radio para una sección transversal (1.00um x 0.50um). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	53
Figura 38. Gráficas de tiempo transitorios de la cavidad respecto al radio para una sección transversal (2.00um x 0.75um). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	54

Figura 39. Gráficas de filtrado de resonancia para el material Al_2O_3 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	56
Figura 40. Gráficas de filtrado de resonancia para el material SiN . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	57
Figura 41. Gráficas de filtrado de resonancia para el material Y_2O_3 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	58
Figura 42. Gráficas de filtrado de resonancia para el material Si_3N_4 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	59
Figura 43. Gráficas de filtrado de resonancia para el material TiO_2 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2	60
Figura 44. Gráfica de filtrado con ancho de banda completo para el material Al_2O_3 , con una sección transversal (2.00um x 0.75um), con cubierta de SiO_2 , una distancia de separación de 0.4um y un radio del anillo de 60um.....	62
Figura 45. Gráfica de filtrado con ancho de banda completo para el material SiN , con una sección transversal (1.00um x 0.75um), con cubierta de aire y con distancia de separación de 0.5um y un radio del anillo de 60um.....	63
Figura 46. Gráfica de filtrado con ancho de banda completo para el material Y_2O_3 , con una sección transversal (1.50um x 0.50um), con cubierta de aire y una distancia de separación de 0.4um y un radio de anillo de 60um.....	63
Figura 47. Gráfica de filtrado con ancho de banda completo para el material Si_3N_4 , con una sección transversal (1.00um x 0.50um), con cubierta de aire y una distancia de separación de 0.5um y un radio del anillo de 60um.....	64
Figura 48. Gráfica de filtrado con ancho de banda completo para el material TiO_2 , con una sección transversal (1.00um x 0.50um), con cubierta de aire y una distancia de separación de 0.4um y un radio del anillo de 60um.....	65
Figura 49. Esquema del juego de resonadores para fabricar en INAOE o Universidad de Dallas.....	72
Figura 50. Diseño y fabricación del resonador de anillo de Al_2O_3 . a) Diseño de la sección transversal de la guía de onda para modo fundamental TE. b) Imagen del resonador de anillo de Al_2O_3 tomada por microscopio óptico de luz. c) Imagen de la distancia de separación entre bus y anillo, tomado por microscopio de electrónico. d) Canal de microfluídica unido al anillo resonante de alúmina. (M de Goede, et al. 2018)	74
Figura 51. Caracterización espectral del resonador de anillo de alúmina (M de Goede, et al. 2018).	75

Lista de tablas

Tabla 1. Materiales involucrados en las estructuras con sus respectivos valores de índice de refracción.	24
Tabla 2. Índices efectivos. □ Cubierta de aire. ■ Cubierta de SiO_2 . ■ Valores en amarillo no existe confinamiento modal.	42
Tabla 3. Factores de confinamiento. □ Cubierta de aire. ■ Cubierta de SiO_2 . ■ Valores en amarillo no existe confinamiento modal.	43
Tabla 4. Modos Longitudinales respetando caso de límite. □ Cubierta de aire. ■ Cubierta de SiO_2 . ■ Valores en amarillo no existe confinamiento modal.	49
Tabla 5. Modos Longitudinales para radio 60um. □ Cubierta de aire. ■ Cubierta de SiO_2 . ■ Valores en amarillo no existe confinamiento modal.	50
Tabla 6. Rango espectral libre para radio 60um. □ Cubierta de aire. ■ Cubierta de SiO_2 . ■ Valores en amarillo no existe confinamiento modal.	52
Tabla 7. Tiempo Transitorio de la Cavidad para radio 60um. □ Cubierta de aire. ■ Cubierta de SiO_2 . ■ Valores en amarillo no existe confinamiento modal.	55
Tabla 8. Valores espectrales pertenecientes a la estructura de material Al_2O_3 , con una sección transversal (2.00um x 0.75um), con cubierta de SiO_2 , una distancia de separación de 0.4um y un radio del anillo de 60um.	62
Tabla 9. Valores espectrales pertenecientes a la estructura de material SiN , con una sección transversal (1.00um x 0.75um), con cubierta de aire, una distancia de separación de 0.5um y un radio del anillo de 60um.	63
Tabla 10. Valores espectrales pertenecientes a la estructura de material Y_2O_3 , con una sección transversal (1.50um x 0.50um), con cubierta de aire, una distancia de separación de 0.4um y un radio del anillo de 60um.	64
Tabla 11. Valores espectrales pertenecientes a la estructura de material Si_3N_4 , con una sección transversal (1.50um x 0.50um), con cubierta de aire, una distancia de separación de 0.5um y un radio del anillo de 60um.	65
Tabla 12. Valores espectrales pertenecientes a la estructura de material TiO_2 , con una sección transversal (1.00um x 0.50um), con cubierta de aire, una distancia de separación de 0.4um y un radio del anillo de 60um.	65
Tabla 13. Las mejores estructuras de cada material para el valor más alto de filtrado y sus valores espectrales.	66

Capítulo 1 Introducción

1.1 Antecedentes

Para el mundo de las telecomunicaciones siempre ha existido la demanda de transferencia de datos por lo que se ha tenido que mantener con un crecimiento constante la velocidad y la cantidad en el flujo de información, para que no exista un estancamiento tecnológico. En el mundo de la electrónica siempre se ha intentado estar en la vanguardia respecto a lo que la tecnología puede traer cada día, para obtener el mejor y más sofisticado dispositivo tecnológico del momento. Como ejemplo se puede mencionar el último lanzamiento del teléfono Smartphone Galaxy S10+, perteneciente a la compañía Samsung, el cual rompió record en venta anticipada en los países latinoamericanos, vendiendo un 60% más que a su predecesor el S9+ el cual salió en el año 2018 (Samsung, 2019).

Lo que la gente busca en sus dispositivos es que sean los más rápidos en cuestión de procesamiento de información y más compactos, esto pudo ser gracias a la invención del transistor y su aplicación en la electrónica integrada. En el año 1947 los científicos John Bardeen, Walter Brattain y William Schockely inventaron el transistor, siendo un dispositivo que es usado para amplificar y rectificar señales, desde este momento se dio una gran revolución en la tecnología, estando en velocidades de procesamiento de datos en los khz pasando a los MHz y llegando hoy en día hasta los GHz. En el año 1965 el Dr. Gordon Earl Moore conocido por ser cofundador de Intel promulgo la ley que lleva su nombre: "Ley Moore" en la cual anuncia que por cada 18 meses la cantidad de transistores en un área iba a aumentar al doble, siendo modificada a cada 2 años en el 1975 (Sieber, 2019).

Hoy en día se está llegando a los límites físicos de miniaturización, por lo que pudiera ocurrir un estancamiento en la tecnología debido a que el número de transistores no aumentaría y con eso la velocidad de procesamiento de información de los dispositivos electrónicos integrados se viera afectado. Una solución a esta problemática es la hibridación óptica y electrónica siendo conocida como óptica integrada. La óptica integrada es la integración de todos los componentes ópticos en un chip, reduciendo así el costo comparado a la óptica convencional e incrementando potencialmente el desempeño de los sistemas para una aplicación determinada, dichas aplicaciones son las siguientes: fuente de luz, para guiar luz, modulador y foto-detector; los cuales se han desarrollado gracias a la invención de las guías de onda, siendo propuesta la primera estructura en el año 1893 por el físico J.J. Thomson, comenzando con su investigación para guías de onda dieléctricas en la década de los 1920's como lo son las fibras y en la

década de los 1960's se comenzó a dar una mayor importancia para la industria como objeto indispensable para las telecomunicaciones (Packard, 1984). Las guías de onda son estructuras donde la luz es confinada y puede viajar de un punto a otro esto debido a la ley de la reflexión total interna, como se muestra en la figura 1.

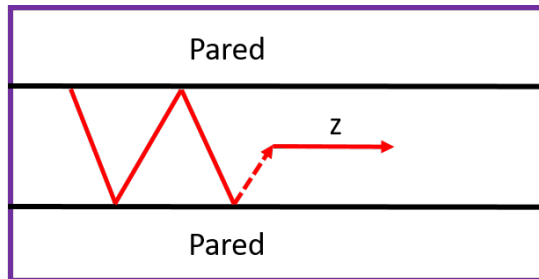


Figura 1. Representación de la propagación de la luz respetando la ley de la reflexión total interna.

En óptica integrada se encuentra un dispositivo de alta importancia el cual es conocido como resonador de anillo de guías de onda, dicha estructura es una gran apuesta para filtrar señales ópticas a distancias micrométricas, haciendo a un lado métodos de filtraje o de resonancia que ocupen espacio libre. A continuación, se muestra en la Figura 2 un resonador de anillo:

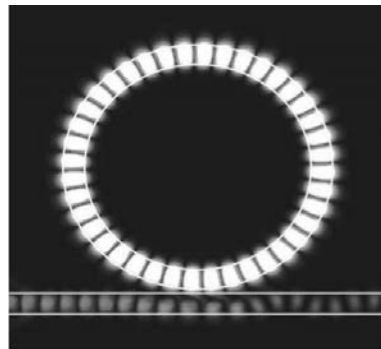


Figura 2. Fotografía de un resonador de anillo de guía de onda óptica. (Heebner, 2008)

El resonador de anillo tiene diferentes aplicaciones como filtrado, inyección y detección de señales, como se muestra en la figura 3:

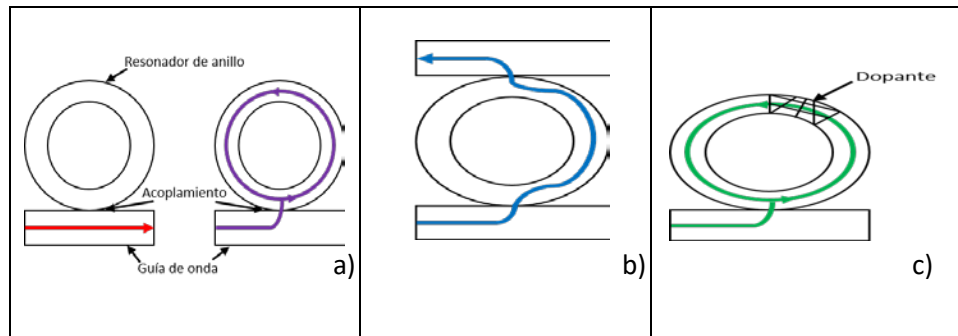


Figura 3. Aplicaciones de resonadores de anillo. a) Filtrado. b) Inyectado. c) Detectado de señales.

Aplicaciones de resonadores de anillo de guías de onda mas especificas son:

- Filtros espectrales y obturadores.
- Líneas de retardo óptico.
- Biosensores sin etiqueta.
- Cavidades opticas.

En este proyecto se usará el resonador de anillo en su configuración de filtro espectral, usando una longitud de onda del área de las telecomunicaciones a $1.55\mu\text{m}$, en diferentes materiales dieléctricos. Todo esto para dar hincapié al desarrollo de la nueva tecnología.

1.2 Hipótesis

Materiales con índice de refracción alto permiten la reducción de tamaño de la estructura de anillo resonador sin afectar su funcionalidad para aplicaciones en el área de telecomunicaciones.

1.3 Objetivos

Cumplir con los objetivos permitirá tener un catálogo amplio de estructuras funcionales para ser fabricadas en investigaciones posteriores y pueda funcionar este proyecto como pionero de futuras investigaciones; teniendo una fuerte aplicación para el área de óptica integrada con aplicaciones en telecomunicaciones, biología, sensores, etc.

1.3.1 Objetivo general

El objetivo principal de este proyecto es el estudio y diseño de resonadores ópticos de micro-anillo, para la obtención de un diseño más compacto y funcional para óptica integrada.

1.3.2. Objetivos específicos

- Investigación teórica del principio de funcionamiento y parámetros de diseño del micro resonador.
- Simulación de propiedades ópticas del micro-resonador a partir de optimizar la estructura del anillo, en Software especializados (COMSOL, ImageJ, MATLAB).
- Diseño de resonadores de anillo basados en materiales dieléctricos con alto índice de refracción como lo son: Al_2O_3 , SiN , Y_2O_3 , Si_3N_4 , TiO_2 ; y substratos basados en sílice SiO_2 , con cubiertas de diferentes materiales: SiO_2 y aire; operando en un rango de longitudes de onda (1.530um – 1.570um), perteneciente al área de las comunicaciones ópticas.

1.4 Organización del manuscrito:

La organización del trabajo constará de 5 capítulos, siendo el primero la introducción del proyecto, incluyendo su justificación, hipótesis y objetivos. El segundo capítulo comprende el marco teórico del resonador de anillo para entender el principio de operación de esta familia de dispositivos. El tercer capítulo lleva el nombre de metodología, en esta parte se describen todos los procedimientos usados para la obtención de resultados, justificando también la selección de diversos materiales ópticos de alto índice de refracción y del software empleado en el proyecto. El cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos, se explican los fenómenos ópticos obtenidos para las diferentes configuraciones. El quinto capítulo presenta las conclusiones de este proyecto, así como también el trabajo futuro de esta investigación.

Capítulo 2. Marco Teórico

Durante el desarrollo del proyecto de investigación se hizo un análisis teórico para poder comprender los fenómenos físicos involucrados en nuestro dispositivo, así como estudios físicos de los componentes utilizados. Por lo que en este capítulo se presentan de manera rápida y concisa la teoría electromagnética involucrada en las guías de onda ópticas, la relación de dispersión de las guías, distribución de la amplitud del campo eléctrico, confinamiento óptico, ancho efectivo. Por último, se presenta el principio de operación de un resonador de anillo y sus propiedades de filtrado óptico.

2.1 Teoría de guías de onda:

La óptica integrada es la tecnología que une varios dispositivos y componentes ópticos para la creación, propagación, aislamiento, modulación y detección de luz, todo esto en un simple sustrato chip, siendo posible gracias a las guías de onda ópticas.

La luz, siendo una onda electromagnética, puede viajar de un punto a otro de manera confinada con una dirección definida y guiada por la estructura física conocida como guía de onda óptica, y a la vez, cumpliendo con el principio de reflexión total interna (De los Reyes Cruz, 2016). Dicho principio óptico enuncia que cuando un rayo de luz viaja por un material o medio con un índice de refracción n_f , incidiendo con un ángulo θ' sobre una superficie de un medio de índice n_s y con un índice de cubierta n_c , siendo $n_f > n_s \geq n_c$, este puede reflejarse y propagarse totalmente en el medio que tiene el mayor índice de refracción. Esto sucede cuando el haz tiene un ángulo de incidencia mayor al ángulo crítico θ_c .

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_s}{n_f}\right), \quad (1)$$

El ángulo crítico sería la condición en la cual cada ángulo con el que se refleja dentro del sistema se debe respetar, y el haz de incidencia al sistema debe seguir el siguiente parámetro, así como se muestra en la figura 4:

$$\theta' \leq \sin^{-1}\left(\sqrt{n_f^2 - n_s^2}\right), \quad (2)$$

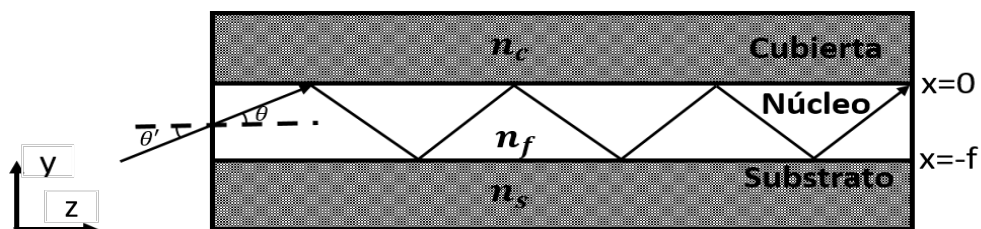


Figura 4. Propagación de un haz luminoso en una guía.

Las guías de onda están hechas de materiales dieléctricos con un valor específico de índice de refracción, el cual está definido como la velocidad de la luz en el vacío ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) entre la velocidad de la luz en el medio (v):

$$n = c/v \quad (3)$$

Existen diferentes tipos de guías de onda ópticas dependiendo de las dimensiones en que la luz es confinada respecto a su dirección y su estructura, como por ejemplo: las guías ópticas que confinan la luz en una sola dirección son conocidas como guías de ondas planas, mientras que las que confinan la luz en dos dimensiones son nombradas como guías de onda de canal, y por último, existe un caso particular de guía de onda de canal en las cuales son las cilíndricas, que están más relacionados a las conocidas fibras ópticas. En la figura 5 se presentan diferentes tipos de guías.

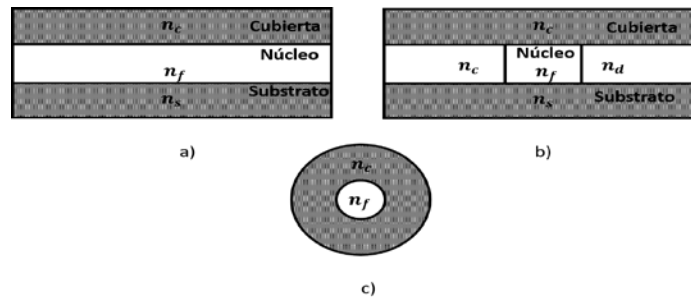


Figura 5. Sección transversal de las guías de onda más comunes: a) Guía de onda plana, b) guía de onda canal y c) fibra óptica.

Las guías planas y las de canal son utilizadas en el área de óptica integrada, mientras que las fibras ópticas son usadas en el área de las telecomunicaciones ópticas para transmitir información a largas distancias.

Dependiendo de la distribución del índice de refracción en toda la guía se pueden clasificar como guías con índice de perfil de escalón o gradiente. Las guías con índice de perfil escalonado están definidas solamente por dos índices de refracción diferentes, el del substrato y el del núcleo de la guía, pero en estas tienen otros dos tipos más, siendo simétricas y asimétricas. Para que sean simétricas se necesita que el índice n_s sea homogéneo a lo largo de la guía, mientras que para la asimétrica el índice de refracción varía a lo largo de donde la luz va propagándose. En las guías con índice gradiente, el índice de refracción varía respecto a la profundidad, por lo regular en la superficie se encuentra el índice mayor y comienza a decrecer hasta llegar al índice del substrato. En la figura 6 se presenta los tipos de perfil de guías de onda mencionados en este mismo párrafo.

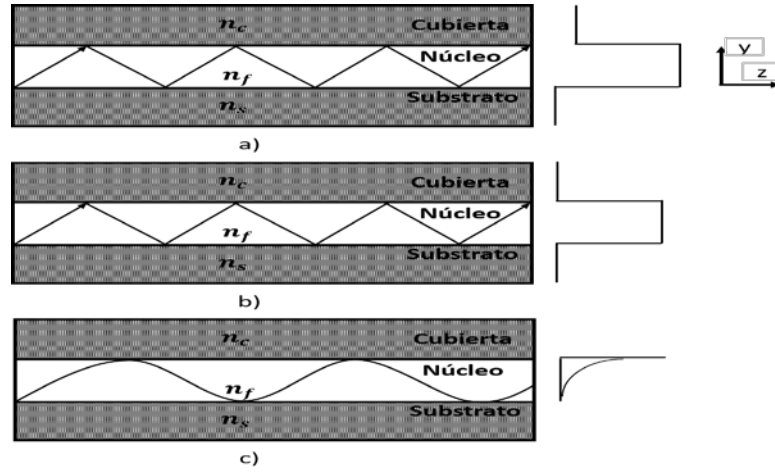


Figura 6. Tipo de perfil en guías a) escalón asimétrico, b) escalón simétrico y c) gradiente.

2.1.1 Ecuación de Onda.

Las ecuaciones de Maxwell, las cuales describen por completo los fenómenos y comportamientos de las ondas electromagnéticas en el vacío. Consideramos que el medio en el que se va a propagar la onda será en un dieléctrico, libre de cargas, con una permeabilidad magnética $\mu=1$, isotrópico, para una estructura homogénea (Lizárraga Medina, 2016). Las ecuaciones de Maxwell son descritas por:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0, \quad (4a)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0, \quad (4b)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (4c)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon_0 n_f^2 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (4d)$$

Siendo \vec{E} el vector del campo eléctrico, \vec{H} es el vector del campo magnético, μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío, ε_0 la permitividad del vacío, n_f es el índice de refracción del medio. Ahora si se aplica el operador vectorial rotacional en las ecuaciones 4(c) y 4(d) se logra obtener:

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

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{H}) = \varepsilon_0 n_f^2 \nabla \times \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (5b)$$

Utilizando la identidad vectorial $\nabla \times \nabla \times \equiv \nabla(\nabla \cdot) - \nabla^2$ para las ecuaciones 5a y 5b:

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu_0 \nabla \times \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (6a)$$

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} = \varepsilon_0 n_f^2 \nabla \times \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (6b)$$

para luego poner el operador rotacional por la derivada temporal en las ecuaciones 6a y 6b:

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{H}, \quad (7a)$$

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} = \varepsilon_0 n_f^2 \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{E}. \quad (7b)$$

Sustituyendo las ecuaciones 4(a) y 4(d) en la ecuación 7(a) y las ecuaciones 4(b) y 4(c) en la 7(b), y se obtiene la ecuación de onda descriptiva para medios homogéneos (en nuestro caso para una guía de onda escalonada):

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 n_f^2 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad (8a)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu_0 \varepsilon_0 n_f^2 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}. \quad (8b)$$

Se propone una solución de un campo electromagnético que tiene una sola frecuencia angular ω , esto debido a que las soluciones a las ecuaciones 8 a) y 8 b) son para ondas electromagnéticas que viaja en un medio n_f .

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0(\vec{r}) \cos(\omega t + \varphi(\vec{r})), \quad (9a)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}_0(\vec{r}) \cos(\omega t + \varphi(\vec{r})). \quad (9b)$$

A continuación, se presenta la notación compleja de los campos monocromáticos:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re}(\vec{E}(\vec{r}) e^{i\omega t}), \quad (10a)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \text{Re}(\vec{H}(\vec{r}) e^{i\omega t}), \quad (10b)$$

siendo $\vec{E}(\vec{r})$ y $\vec{H}(\vec{r})$ las amplitudes complejas de los campos, esto es necesario para simplificar el desarrollo matemático, esto debido a que las derivadas parciales respecto al tiempo dan un término de multiplicación directa a $i\omega$. Entonces se sustituyen las amplitudes complejas obtenidas por las ecuaciones de onda (8):

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}) + \mu_0 \varepsilon_0 n_f^2 \vec{E}(\vec{r}) = 0, \quad (11a)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}) + \mu_0 \varepsilon_0 n_f^2 \vec{H}(\vec{r}) = 0, \quad (11b)$$

Si tenemos que $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ entonces:

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}) + \frac{n_f^2}{c^2} \vec{E}(\vec{r}) = 0, \quad (12a)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}) + \frac{n_f^2}{c^2} \vec{H}(\vec{r}) = 0, \quad (12b)$$

ahora sabiendo que el número onda en el medio está dado por $k = k_0 n_f = \omega n_f / c = 2\pi n_f / \lambda_0$, y siendo k_0 y λ_0 respectivamente el número de onda y la longitud de onda en el vacío, se sustituye la relación de número de onda en el medio en la ecuación, y se obtiene ecuación de Helmholtz.

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}) + k^2 \vec{E}(\vec{r}) = 0, \quad (13a)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(\vec{r}) + k^2 \vec{H}(\vec{r}) = 0. \quad (13b)$$

2.1.2 Relación de dispersión

Tomando en cuenta las ecuaciones de Maxwell para un material (ecuaciones 4), sustituyendo la amplitud compleja de las ondas monocromáticas y realizando la expansión del operador vectorial obtenemos un grupo de 6 ecuaciones:

$$\frac{\partial E_z(\vec{r})}{\partial y} - \frac{\partial E_y(\vec{r})}{\partial z} = -i\omega\mu_0 H_x(\vec{r}), \quad (14a)$$

$$\frac{\partial E_x(\vec{r})}{\partial z} - \frac{\partial E_z(\vec{r})}{\partial x} = -i\omega\mu_0 H_y(\vec{r}), \quad (14b)$$

$$\frac{\partial E_y(\vec{r})}{\partial x} - \frac{\partial E_x(\vec{r})}{\partial y} = -i\omega\mu_0 H_z(\vec{r}), \quad (14c)$$

$$\frac{\partial H_z(\vec{r})}{\partial y} - \frac{\partial H_y(\vec{r})}{\partial z} = -i\omega\varepsilon_0 n_f^2 E_x(\vec{r}), \quad (14d)$$

$$\frac{\partial H_x(\vec{r})}{\partial z} - \frac{\partial H_z(\vec{r})}{\partial x} = -i\omega\varepsilon_0 n_f^2 E_y(\vec{r}), \quad (14e)$$

$$\frac{\partial H_z(\vec{r})}{\partial x} - \frac{\partial H_x(\vec{r})}{\partial y} = -i\omega\varepsilon_0 n_f^2 E_z(\vec{r}). \quad (14f)$$

Como la guía de onda es homogénea respecto al eje de propagación z , se puede reemplazar $\partial/\partial z$ por $i\beta$, que β es la constante de propagación perteneciente al número de onda de la componente en dirección z , además otra consideración a tomar es que se mantiene uniforme el eje y en toda la estructura y se puede asumir que $\partial/\partial z = 0$. Reduciendo las ecuaciones (14) a:

$$\beta E_y(x) = \omega\mu_0 H_x(x), \quad (15a)$$

$$i\beta E_x(x) - \frac{dE_z(x)}{dx} = -i\omega\mu_0 H_y(x), \quad (15b)$$

$$\frac{dE_y(x)}{dx} = -i\omega\mu_0 H_z(x), \quad (15c)$$

$$\beta H_y(x) = \omega\varepsilon_0 n_f^2 E_x(x), \quad (15d)$$

$$i\beta H_x(x) - \frac{dH_z(x)}{dx} = -i\omega\varepsilon_0 n_f^2 E_y(x), \quad (15e)$$

$$\frac{dH_y(x)}{dx} = -i\omega\varepsilon_0 n_f^2 E_z(x). \quad (15f)$$

Siguiendo con el desarrollo y considerando que la oscilación del campo eléctrico solamente se puede producir en el eje transversal $E_y \neq 0$ con $E_z = 0$, esto hace que la ecuación 15(f) sea $\partial H_y/\partial x = 0$; y se obtiene que $H_y = 0$. A su vez, la ecuación 15(d) se vuelve cero por que $E_x = H_y = E_y = 0$. Sustituyendo H_x y H_z (las ecuaciones 15(a) y 15(c)) en la ecuación 15(e) se obtiene como resultado la ecuación del campo eléctrico E_y o transversal eléctrico (TE) (Kawano y Kitoh, 2001):

$$\frac{dE_y(x)}{dx} + k^2(n_f^2 - n_{eff}^2)E_y(x) = 0, \quad (16)$$

Siendo $n_e = \beta/k_0 = n_f \sin(\theta)$ es el índice efectivo que está relacionado con la distribución del campo eléctrico que se propaga en la guía, también llamado modo de propagación. Teniendo θ y θ' la distribución del campo del eje E_y ($-f \leq x \leq 0$), está relacionada con una función oscilatoria:

$$E_y(x) = E_f \cos(k_f x + \phi), \quad (17)$$

donde E_f y ϕ son constantes a determinar, k_f es el número de onda transversal del núcleo, con la igualdad

$$k_f = k^2 \sqrt{n_f^2 - n_{eff}^2} \text{ y con un parámetro a cumplir } n_f^2 - n_{eff}^2 > 0.$$

Mientras en el sustrato ($x \leq -f$) se espera que el comportamiento del campo eléctrico E_y disminuya exponencialmente:

$$E_y(x) = E_s e^{k_s(x+f)}, \quad (18)$$

donde E_s es una constante a determinar y k_s el número de onda transversal del sustrato representada

$$\text{como } k_s = k^2 \sqrt{n_{eff}^2 - n_s^2}, \text{ el cual tiene que cumplir } n_{eff}^2 - n_s^2 > 0.$$

Esperando de igual manera, que el comportamiento del campo eléctrico en la cubierta de $n_{eff}^2 - n_c^2 > 0$ ($x > 0$) disminuya exponencialmente:

$$E_y(x) = E_c e^{-k_c(x)}, \quad (19)$$

igual que en las ecuaciones anteriores, E_c es una constante a determinar y k_c el número de onda

$$\text{transversal de la cubierta representada como } k_c = k^2 \sqrt{n_{eff}^2 - n_c^2}, \text{ el cual tiene un parámetro a cumplir.}$$

La continuidad de las componentes normales y tangenciales del campo eléctrico y magnético en las interfaces, conocida como las condiciones de frontera, que se cumple cuando E_x , E_y y H_z son valores continuos en las interfaces sustrato-núcleo ($x = -f$) y núcleo-cubierta ($x = 0$), ver figura 2. Las ecuaciones 15(a) y 15(c) H_x y H_z respectivamente son continuas si E_y y $dE_y(x)/dx$ son continuas. Por lo que se igualan las ecuaciones (17) y (18) y sus derivadas para la condición de frontera sustrato-núcleo.

$$E_f \cos(\phi - k_f f) = E_s, \quad (20)$$

$$-k_f E_f \sin(\phi - k_f f) = k_s E_s. \quad (21)$$

Con estas dos ecuaciones se puede obtener:

$$\tan(\phi - k_f f) = -\frac{k_s}{k_f}, \quad (22)$$

Y de la misma forma, se obtienen las condiciones de frontera núcleo-cubierta, igualando las ecuaciones (17) y (19):

$$E_f \cos(\phi) = E_c, \quad (23a)$$

$$-k_f E_f \sin(\phi) = k_c E_c. \quad (23b)$$

De nuevo, partiendo de estas dos ecuaciones se obtiene:

$$\tan(\phi) = \frac{k_c}{k_f}, \quad (24)$$

Uniendo las ecuaciones 21 y 23 se obtiene como resultado la ecuación de relación de dispersión para modos TE, conocida también como la ecuación de condición de resonancia transversal o de auto consistencia.

$$k_f f = \tan^{-1}\left(\frac{k_c}{k_f}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{k_s}{k_f}\right) + m\pi, \quad (25)$$

Siendo m un número entero. La ecuación (24) se satisface cuando la onda recorre el camino óptico $2m\pi$, esto quiere decir que la onda debió haber reflejado 2 veces en la cubierta y sustrato. Los números enteros m que satisfagan la condición de auto consistencia serán los modos de la guía que tendrían su propio valor de índice efectivo, por ende una distribución de campo eléctrico única, confinamiento. Ahora para obtener la relación de dispersión para los modos transversales magnéticos TM, se considera que el campo eléctrico se encuentra sobre el eje longitudinal y siguiendo un procedimiento casi idéntico realizado a partir de las ecuaciones (14), se llega a:

$$k_f f = \tan^{-1}\left(\frac{n_f^2 k_c}{n_c^2 k_f}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{n_f^2 k_s}{n_s^2 k_f}\right) + m'\pi. \quad (26)$$

Kogelink y Ramaswamy (1974) desarrollaron un conjunto de parámetros generalizados para el proceso de diseño de las guías de onda, esto debido a que no existe una solución analítica para las ecuaciones de dispersión para TE y TM, siendo las ecuaciones siguientes:

$$\gamma = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}, \quad (27a)$$

$$V = k_0 f \sqrt{n_f^2 - n_s^2}, \quad (27b)$$

$$b = \frac{n_c^2 n_f^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_s^2}, \quad (27c)$$

Donde γ es el factor de asimetría asociado al índice de refracción de la estructura, V es el parámetro de frecuencia normalizada o espesor del núcleo normalizado y b es el valor del índice efectivo normalizado. Con estos mismos parámetros desarrollados se puede obtener la relación de dispersión normalizada de TE:

$$V\sqrt{1-b} = \tan^{-1}\sqrt{\frac{\gamma+b}{1-b}} + \tan^{-1}\sqrt{\frac{b}{1-b}} + m\pi. \quad (28)$$

Igual que en la ecuación pasada se puede hacer la relación de dispersión normalizada TM pero se necesita introducir dos parámetros más $a = n_s^2/n_f^2$ y $d = n_c^2/n_f^2$:

$$V\sqrt{1-b} = \tan^{-1}\frac{1}{a}\sqrt{\frac{\gamma+b}{1-b}} + \tan^{-1}\frac{1}{d}\sqrt{\frac{b}{1-b}} + m'\pi. \quad (29)$$

2.1.3 Distribución de la amplitud del campo eléctrico

En esta subsección se presentan las ecuaciones para calcular la distribución de la amplitud del campo eléctrico para los modos TE de nuestra guía de onda. Tomando las ecuaciones obtenidas de las condiciones de frontera (ecuaciones (17), (18), (19)) y combinándolos con la relación de dispersión TE perteneciente a la ecuación (24), se puede expresar la distribución del campo eléctrico $E_y(x)$ en términos de la amplitud E_c (Lin, 2007).

$$E_y(x) = \begin{cases} E_c e^{-k_c x}, & x \geq 0 \\ E_c \left[\cos(k_f x) - \frac{k_c}{k_f} \sin(k_f x) \right], & -f \leq x \leq 0 \\ E_c \left[\cos(k_f f) - \frac{k_c}{k_f} \sin(k_f f) \right] e^{k_s(x+f)}. & x \leq -f \end{cases} \quad (30)$$

Expresando la distribución de la amplitud del campo eléctrico en términos de parámetros normalizados se obtiene:

$$E_y(x) = \begin{cases} E_c e^{-V\sqrt{\gamma+bx}/f}, & x \geq 0 \\ E_c \left(\cos\left(\frac{V\sqrt{1-bx}}{f}\right) - \sqrt{\frac{\gamma+b}{1-b}} \sin\left(\frac{V\sqrt{1-bx}}{f}\right) \right) x, & -f \leq x \leq 0 \\ E_c \left(\cos(V\sqrt{1-b}) + \sqrt{\frac{\gamma+b}{1-b}} \sin(V\sqrt{1-b}) \right) e^{V\sqrt{b[1+(x/f)]}}. & x \leq -f \end{cases} \quad (31)$$

2.1.4 Ancho efectivo y confinamiento

La potencia de la luz en una guía se puede obtener integrando el vector de Poynting de la misma (Lin, 2007):

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} E_y H_x^* dx = \left(\frac{\beta}{2\omega\mu_0} \right) \int_{-\infty}^{\infty} |E_y|^2 dx \\ &= \frac{\beta}{2\omega\mu_0} \left(\int_{-\infty}^{-f} E_s^2 e^{2k_s(x+f)} dx + \int_{-f}^0 E_f^2 \cos^2(k_f + \phi) dx + \int_0^{\infty} E_c^2 e^{-2k_c x} dx \right), \end{aligned} \quad (32)$$

Integrando y expresando las amplitudes en términos de E_F se tiene como resultado:

$$P = \frac{\beta E_f^2}{4\omega\mu_0} \left(f + \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_c} \right), \quad (33)$$

Donde el ancho efectivo de la guía de onda se puede definir de la siguiente manera:

$$w_{eff} = f + \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_c} = f + x_s + x_c, \quad (34)$$

Y como se puede observar en la figura 7 una representación del ancho efectivo.

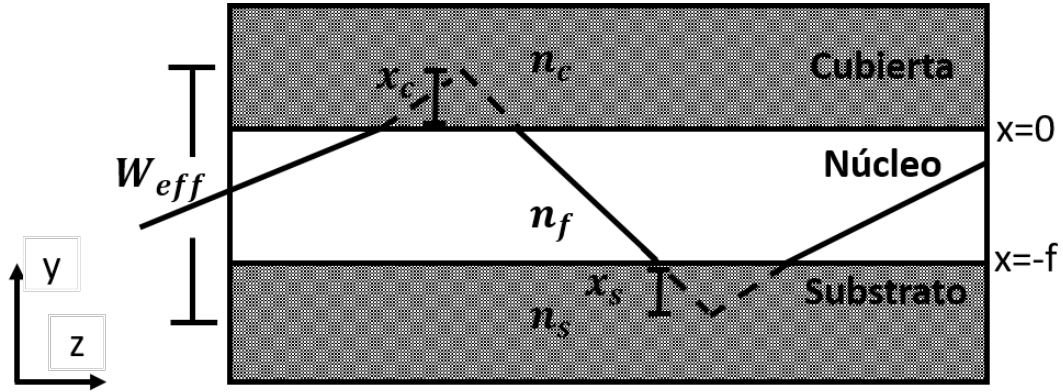


Figura 7. Ancho efectivo por representación de trazo de rayos en guía de onda.

Donde las constantes de propagación transversal están relacionadas con la distancia de penetración en el sustrato x_s y cubierta x_c , Desarrollando un análisis de óptica geométrica, en cada reflexión, la luz penetra una distancia al sustrato x_s y a la cubierta x_c , lo cual se introduce como un corrimiento de fase dados por:

$$\phi_s = \tan^{-1}\left(\frac{k_s}{k_f}\right), \quad (35)$$

$$\phi_c = \tan^{-1}\left(\frac{k_c}{k_f}\right), \quad (36)$$

Igual que en la sección anterior se pudo obtener una normalización al espesor efectivo, logrados por Kogelnik y Ramaswamy (1974), obteniendo una ecuación como la siguiente:

$$W = kw_{eff} \sqrt{n_f^2 - n_s^2}, \quad (37)$$

Ahora usando parámetros normalizados W queda como:

$$W = V + \frac{1}{\sqrt{a+b}} + \frac{1}{\sqrt{b}}, \quad (38)$$

Al tener el modo en una estructura específica, en este caso en un ancho efectivo, solo una parte de su potencia se propagará en el núcleo. Esta relación se define como el factor de confinamiento, Γ_f teniendo una relación de potencia en el núcleo respecto a la potencia total del modo:

$$\Gamma_f = \frac{P_{core}}{P} = \frac{1 + \frac{k_s}{k_f^2 + k_s^2} + \frac{k_c}{k_f^2 + k_c^2}}{f + \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_c}}, \quad (39)$$

Siendo el factor de confinamiento de potencia y el ancho efectivo parámetros muy importantes para el desarrollo de dispositivos de óptica integrada. Estos parámetros están relacionados 100% con el desarrollo de estructuras de guías de onda, pudiendo hacer comparaciones de tamaño de estructuras y materiales entre sí.

2.2 Análisis de resonancia:

La resonancia hace referencia a un conjunto de fenómenos relacionados con movimientos periódicos o casi-periódicos en que se produce reforzamiento de una oscilación (onda) al someter al sistema en oscilación de una frecuencia determinada. Para esto se debe analizar dos tipos de resonadores que existen el Fabry-Perot y el Gires Tornouis. (Heebner, 2008).

2.2.1 Resonador Fabry-Perot:

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 que dependen de muchas variables, por ejemplo, si la luz que incide en el resonador es temporalmente incoherente (blanca), entonces los coeficientes de reflexión y transmisión depende solo de las reflexiones del espejo. La potencia reflejada total consiste en la potencia reflejada desde el primer espejo más todas las reflexiones múltiples entre los espejos que contribuyen a la reflexión general. Por lo que la unión de estas contribuciones da la siguiente forma:

$$R = R_1 + T_1^2 R_2 \sum_{m=1}^{\infty} (R_1 R_2)^{m-1} = \frac{R_1 - 2R_1 R_2 + R_2}{1 - R_1 R_2} \xrightarrow{R_1=R_2=R} \frac{2R}{1+R}, \quad (40)$$

A su vez la potencia de la transmitancia está dada por:

$$T = T_1 T_2 \sum_{m=1}^{\infty} (R_1 R_2)^{m-1} = \frac{T_1 T_2}{1 - R_1 R_2} \xrightarrow{R_1=R_2=R} \frac{T^2}{1 - R^2} = \frac{1-R}{1+R}, \quad (41)$$

Sin embargo, si la luz que incide consiste en luz coherente (monocromático). Entonces la potencia reflejada será proporcional al cuadrado de la suma coherente de todos los campos reflejados. Debido a que los campos llevan información de fase además de su amplitud, la fracción de la luz reflejada y transmitida depende no solo de las reflexiones del espejo, sino también de la longitud de onda de excitación y el

espaciado de los espejos. La suma coherente de campos se maximiza cuando todos los campos interfieren constructivamente (en fase) y se minimiza cuando interfieren destructivamente (en desfase).

La fase se acumula con la distancia de propagación y a la interacción con los espejos. Las versiones coherentes de las ecuaciones 40 y 41 incluyen un factor de fase acumulado por viaje de ida y vuelta que esto debido al reflejo de los espejos, puede interpretarse como una desafinación normalizada, $\Phi = T_r w$, donde T_r es el tiempo de transito de la cavidad dado como $T_r = n_{eff} L/c$. Donde L la circunferencia y el n_{eff} el índice efectivo. En este caso r representa la reflectividad compleja:

$$\tilde{r} = r_1 - t_1^2 r_2 e^{im\Phi} \sum_{m=1}^{\infty} (r_1 r_2 e^{im\Phi})^{m-1} = \frac{r_1 - r_2 e^{i\Phi}}{1 - r_1 r_2 e^{i\Phi}} \xrightarrow{r_1 r_2 = r} \frac{r(1 - e^{i\Phi})}{1 - r^2 e^{i\Phi}}, \quad (42)$$

Y siendo t la transmitancia compleja,

$$\tilde{t} = t_1 t_2 e^{im\Phi/2} \sum_{m=1}^{\infty} (r_1 r_2 e^{im\Phi})^{m-1} = \frac{t_1 - t_2 e^{i\frac{\Phi}{2}}}{1 - r_1 r_2} \xrightarrow{r_1 r_2 = r} \frac{-(1 - r^2) e^{im\frac{\Phi}{2}}}{1 - r^2}, \quad (43)$$

El módulo cuadrado de estas cantidades complejas da como resultado los coeficientes de reflexión R y T de transmisión.

2.2.2 Resonador de Gires Tournois:

Un resonador Fabry-Perot sin perdidas con un espejo de $R=100\%$ constituye 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. Este dispositivo se le denomina como resonador Gires-Tournois siendo conocido también por el nombre "filtro de fase única". La reflectividad de este dispositivo se puede tomar como un caso límite de la ecuación 42:

$$\tilde{r} = r - t^2 e^{im\Phi} \sum_{m=1}^{\infty} (r e^{im\Phi})^{m-1} = \frac{r - e^{i\Phi}}{1 - r e^{i\Phi}}, \quad (43)$$

El modulo cuadrado de esta expresión es unitario para todos los valores del parámetro de desfasamiento de Φ . El argumento de fase de esta expresión es: (Arreglar)

$$\Phi = \pi + \Phi + 2 \arctan \frac{r \sin(\Phi)}{1 - r \cos(\Phi)}, \quad (44)$$

2.3 Anillos resonantes

Los resonadores Fabry-Perot y Gires-Tournois son dispositivos extremadamente versátiles que tienen aplicaciones como herramientas de espectroscopia, compensadores de dispersión, filtros y cavidades laser. Desafortunadamente estos dispositivos requieren de espacio libre entre los espejos enlazados por lo que crea una incompatibilidad con la tecnología integrada. (Heebner, 2008)

Los dispositivos que son equivalentes a estos resonadores se pueden construir en una guía de onda, logrando con esto una integración, esto debido al uso de una guía de ondas de anillo acoplado a una o dos guías de onda. Para estos resonadores de anillo las intensidades de acoplamiento juegan el papel análogo de los coeficientes de transmisión del espejo. La figura 8 muestra un esquema de estos dos dispositivos de resonador de anillo y sus semejantes de espacio libre.

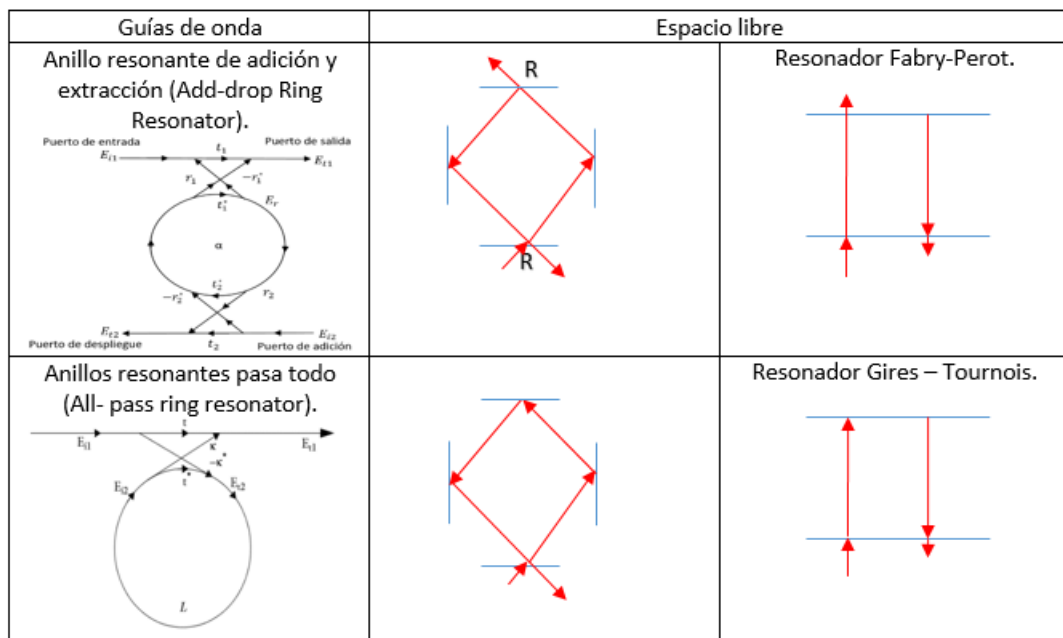


Figura 8. Esquemas de los diferentes tipos de resonadores de anillo y sus semejantes en espacio libre.

2.3.1 Anillo resonante pasa todo (All-Pass Ring Resonator):

Un anillo simple se crea tomando una salida de un acoplador direccional genérico y retroalimentando a la entrada como se muestra en la figura 9.

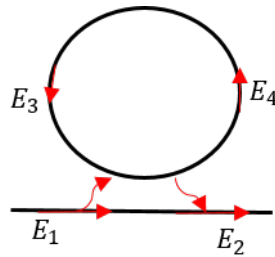


Figura 9. Esquema del anillo resonante pasa todo (All-Pass Ring Resonator).

El dispositivo presenta una resonancia de una cavidad periódica cuando la luz que atraviesa el anillo adquiere un desplazamiento de fase la cual corresponde a un múltiplo entero 2π radianes. El resonador se desarrolla de manera matemática partiendo de dos componentes, una fuerza de acoplamiento y una ruta de retroalimentación. Cuyo caso va contrario a las derivaciones de suma finita realizadas anteriormente para Fabry-Perot y Gires Tournois, esto es posible cuando se asume una operación de estados estacionarios y campos coincidentes. Aunque ambos métodos son igualmente aceptados, el método de coincidencia de campo tiene la ventaja por su facilidad y simplicidad. Las relaciones básicas entre el haz incidente E_1 , el E_2 que es el haz transmitido y los campos circulantes E_3 y E_4 pertenecientes a un resonador se derivan al combinar las relaciones del acoplador con la trayectoria óptica de realimentación. Ahora hablando del dominio espectral, los campos que salen en la región de acoplamiento están relacionados con los campos de entrada, esto explicado por el formalismo de la matriz de esparcimiento que se analiza en la siguiente sección.

2.3.2 Formalismo de la matriz de esparcimiento:

Desarrollamos el formalismo matricial de esparcimiento para ondas planas que pasan a través de lasos de medios ópticos. Supongamos que tenemos una onda plana que actúa, se transmite y se refleja desde dicho sistema figura 10. Si seleccionamos una polarización entonces las amplitudes de las ondas incidentes y reflejados en los planos de entrada y salida constituyen una descripción completa de la acción del sistema: un total de cuatro amplitudes de onda. Un sistema lineal relaciona linealmente las amplitudes de onda reflejadas con las amplitudes de onda incidente de manera que solo dos amplitudes de onda son independientemente especificables. Denote las amplitudes de onda incidente por a y las amplitudes de ondas reflejadas por b (Haus, 1984).

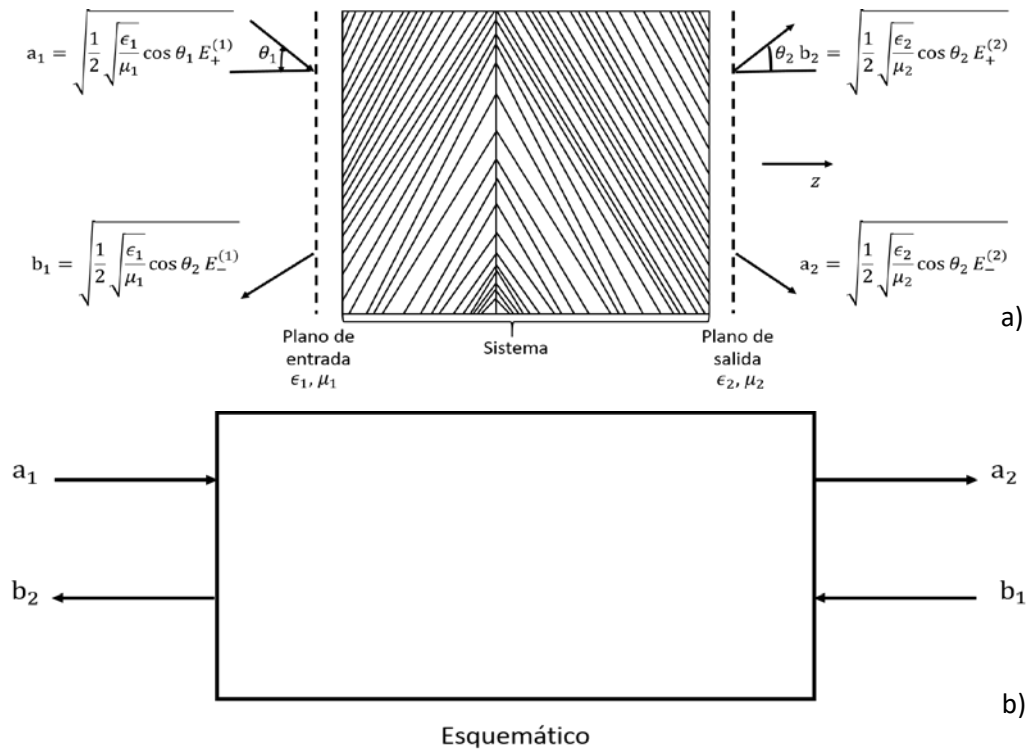


Figura 10. Onda incidente TE representada en sistemas de bloque. Es necesario que la incidencia sea normal, a) Diagrama del Sistema. b) Diagrama esquemático.

Normalizamos las amplitudes a_1 y b_1 de modo que la potencia por unidad de área incidente desde la izquierda viene dada por:

$$\frac{1}{2} \text{Re}[E x H^* \cdot \hat{z}] = |a_1|^2 - |b_1|^2, \quad (45)$$

Se usa una normalización análoga para las amplitudes a_2 y b_2 . La identificación de la igualdad de (45) con potencia es consistente con los resultados obtenidos en la ecuación de onda TE. Por lo que E_y se puede escribir de la forma:

$$E_y = \sqrt{2/Y_0^{(1)}} [a_1 + b_1] e^{-jk_x x}, \quad (46a)$$

$$H_x = \sqrt{2Y_0^{(1)}} [a_1 - b_1] e^{-jk_x x}. \quad (46b)$$

Donde:

$$a_1 = \sqrt{Y_0^{(1)}/2} E_+^{(1)} e^{-jk_z(1)x}, \quad (47a)$$

$$b_1 = \sqrt{Y_0^{(1)}/2} E_-^{(1)} e^{+jk_z(1)x}, \quad (47b)$$

Igualmente se puede hacer una identificación análoga para las ondas TM.

Volviendo al sistema de la Figura 9, tomamos ventaja del hecho de que a_1 y a_2 puede elegirse como variables independientes, y b_1 y b_2 como variables dependientes, siendo estas últimas funciones lineales.

El sistema se puede describir por la matriz de dispersión.

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2, \quad (48)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2, \quad (49)$$

Las ecuaciones (48) y (49) describen la dispersión de un sistema de “dos puertos” de salida con dos puertos de entrada. Lo cual aplica solamente para puertos de guías de onda ópticas o haces ópticos con sección transversal finita, no solo para ondas planas. En este caso $|a_i|^2$ y $|b_i|^2$ están normalizados para que den resultado de potencia.

La amplitud de las ondas normalizadas están dadas por (47) con un valor de $z=0$. Los elementos de la matriz de dispersión determinados de la siguiente manera:

$$S_{11} = \Gamma^{(1)} = \frac{Y_0^{(1)} - Y_0^{(2)}}{Y_0^{(1)} + Y_0^{(2)}}, \quad (50)$$

$$\begin{aligned} S_{12} = S_{21} &= \sqrt{Y_0^{(2)}} E_+^{(2)} / \sqrt{Y_0^{(1)}} E_+^{(1)} = (1 + \Gamma^{(1)}) \sqrt{\frac{Y_0^{(2)}}{Y_0^{(1)}}} \\ &= \frac{2Y_0^{(1)}}{Y_0^{(1)} + Y_0^{(2)}} \sqrt{\frac{Y_0^{(2)}}{Y_0^{(1)}}} \end{aligned} \quad (51)$$

El reemplazo de $E_+^{(2)}/E_+^{(1)}$ por $(1 + \Gamma^{(1)})$ seguida de la continuidad de la \mathbf{E} tangencial en la interfaz S_{22} se obtiene de (50) mediante un intercambio de índices 1 y 2.

$$S_{22} = -S_{11}, \quad (52)$$

El campo total del campo eléctrico en el medio 1 en el interfaz está relacionado con a_1 y b_1 por:

$$E_y^{(1)} = \sqrt{\frac{2}{Y_0^{(1)}}} (a_1 - b_1) e^{-jk_x x}, \quad (53)$$

El campo magnético tangencial es:

$$H_x^{(1)} = -\sqrt{\frac{Y_0^{(1)}}{2}} (a_1 - b_1) e^{-jk_x x}, \quad (54)$$

Tener en cuenta que la densidad de flujo de potencia promediada en el tiempo es igual a:

$$-\frac{1}{2} \text{Re} [E_y^{(1)} H_z^{(1)*}] = |a_1|^2 - |b_1|^2, \quad (55)$$

Y no contiene la característica de admitancia cuando se expresa en términos de a_1 y b_1 . Expresiones similares se obtienen para las ondas TM. Es conveniente convertir (58) y (59) en forma de matriz definiendo las dos matrices de columna:

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad (56)$$

Y la matriz de segundo orden

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}, \quad (57)$$

Con estas definiciones, la expresión compacta de las ecuaciones (48) y (49) será:

$$b = Sa, \quad (58)$$

Ahora que tenemos el formalismo de la matriz de esparcimiento ecuación (58), lo desarrollamos con los términos de la sección 2.3.1 hablando de los campos eléctricos incidentes, transmitidos y propagados en el anillo, quedando de la siguiente manera (Heebner, 2008):

$$\begin{pmatrix} E_4(\omega) \\ E_2(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r & it \\ it & r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_3(\omega) \\ E_1(\omega) \end{pmatrix}, \quad (59)$$

Donde se supone que los coeficientes de auto-acoplamiento y acoplamiento cruzado r y t son independientes de la frecuencia y satisfacen la relación. La ruta de retroalimentación (siendo la longitud $2\pi R$) conecta la salida del puerto 4 nuevamente con el puerto de entrada 3 donde el campo se puede expresar como:

$$E_3 = e^{-\frac{\alpha_{\text{anillo}}}{2}} e^{ik2\pi R} E_4 \equiv a e^{i\phi} E_4. \quad (60)$$

Donde a representa la amplitud de un solo paso de la transmisión y ϕ representa el cambio de fase de un solo paso. Debido que al sumar o restar el número entero m de 2π radianes del cambio de fase de un solo paso para todas las resonancias se define de modo que su valor sea cero para una resonancia de interés local. Además, debido a que el cambio de fase de un solo pasó está directamente relacionado con la frecuencia en radianes como $\phi = \omega T_R$, donde T_R es el tiempo transitorio del resonador y claramente es la representación de un desfaseamiento de una frecuencia normalizada.

2.3.3 Características espectrales:

Un punto importante a mencionar es para que el anillo sea resonante cuando la fase es un múltiplo de 2π , o cuando la longitud de onda de la luz sea un número entero de veces dentro de la longitud del anillo; esta cantidad de números enteros se le conoce como modos longitudinales (Bogaerts, et al 2012):

$$\lambda = \frac{n_{eff}L_c}{m}, \quad m = 1,2,3 \dots \quad (61)$$

En la figura 11 se presenta de manera esquemática la cantidad de modos longitudinales de un resonador de anillo, siendo un total de 15 modos:

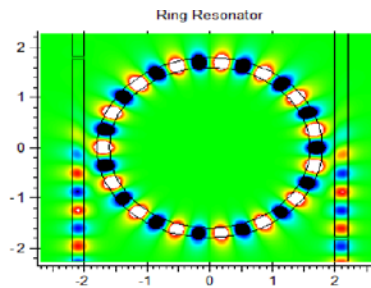


Figura 11. Resonador de anillo con sus modos longitudinales (Hermann, 2018).

Para cavidades ideales se necesita que tenga una atenuación nula, esto haría que la transmisión sea unitaria para todos los valores de desfase. Ahora los parámetros característicos espectrales más importantes para los resonadores de anillo se pueden observar en la figura 12:

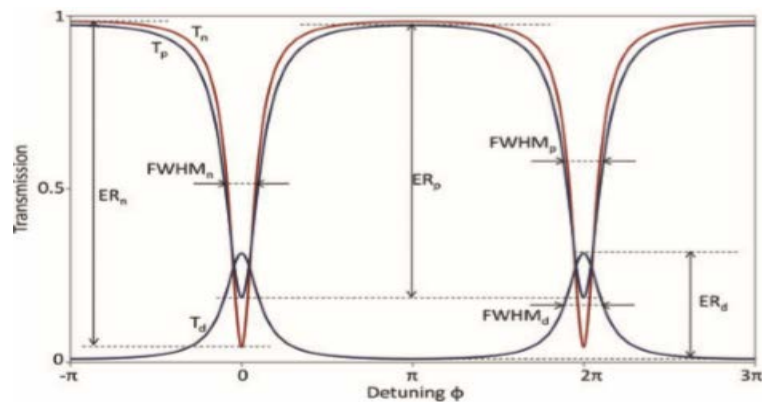


Figura 12. Parámetros espectrales característicos del resonador de anillo. (Bogaerts, et al. 50 p, 2012)

Estos parámetros dependen de coeficientes de acoplamiento y de pérdidas. Teniendo la primera ecuación de los parámetros espectrales siendo el FWHM "Full Width at Half Maximum" del espectro de resonancia para el anillo resonante pasa todo:

$$FWHM = \frac{(1-r\alpha)\lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{r\alpha}}, \quad (62)$$

Siendo r el coeficiente de auto acoplamiento y α el coeficiente de atenuación, ahora analizando el FWHM para la configuración del resonador de anillo de adición y extracción, se tiene que:

$$FWHM = \frac{(1-r_1 r_2 \alpha)\lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{r_1 r_2 \alpha}}, \quad (63)$$

En una aproximación de primer orden de la dispersión, el rango de longitud de onda entre dos resonancias, conocido también el rango espectral libre (FSR) en función de la longitud de onda es igual a:

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g L'}, \quad (64)$$

Donde L es la longitud de viaje de la longitud de onda por la cavidad. Ahora se puede observar que en el FWHM y FSR encontramos un denominador de índice de grupo, aclarando que no es el índice efectivo n_{eff} . El índice de grupo toma en cuenta la dispersión de la guía de onda el cual está definido como:

$$n_g = n_{eff} - \lambda_0 \frac{dn_{eff}}{d\lambda}. \quad (64)$$

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 (guía de onda). Para nuestro desarrollo el índice grupo va a ser igual al índice efectivo, esto debido en que las simulaciones de nuestra guía de onda de canal, es una guía de onda escalonada, esto quiere decir que el índice de efectivo de toda la estructura se va a mantener igual a la propagación del haz, siendo uniforme en toda la estructura, por lo que no hay cambio de índice de refracción al avanzar el haz en la estructura teniendo que $\frac{dn_{eff}}{d\lambda} = 0$. La fineza se le conoce cómo la relación de FSR y el ancho de resonancia:

$$Finesa = \frac{FSR}{FWHM}, \quad (65)$$

Por lo tanto, la fineza es una medida de los pulsos de resonancia respecto a su espacio. El factor de calidad (Q-factor) es una medida de fineza de la resonancia en relación con su frecuencia central:

$$Q - factor = \frac{\lambda_{res}}{FWHM}. \quad (66)$$

El significado físico de la fineza y del Q factor está relacionado con el número de viajes de ida y vuelta realizados por la luz en el resonador antes de perderse, debido a la pérdida interna, correspondiente a la guía de onda o mejor dicho del bus.

Capítulo 3. Metodología del Diseño del Resonador de Anillo

En este capítulo se va a presentar todas las características que se tomaron en cuenta para el diseño y caracterización del resonador de anillo. Como se habló en el capítulo 2 el resonador de anillo está conformado por una guía de onda de canal acoplada a un resonador de anillo. Por lo que el análisis se enfocaría en que la guía de onda de canal que tiene un soporte estructural monomodal para el transversal eléctrico (TE), sin presencia de pérdidas de propagación y teniendo un índice de refracción estable en toda la estructura del dispositivo, lo que se conoce como guías “pasivas”, teniendo un análisis de acoplamiento entre canal y anillo resonante por análisis de onda evanescente. Por último, se presenta la explicación de cómo se hizo el estudio del anillo resonante; analizando el fenómeno de resonancia en la estructura, y sobre todo explicando el porqué de los materiales y del software utilizado.

3.1 Materiales:

Una parte muy importante para empezar a diseñar un dispositivo opto-electrónico es la consideración de los materiales que se van a tomar en cuenta en el diseño y la posible viabilidad de fabricación. En nuestro caso se optó por materiales dieléctricos para el diseño del dispositivo.

Los materiales ópticos presentan las siguientes propiedades (Bass, M., & Optical Society of America (Eds.), 1995):

- Muy poca dispersión y por ende se tiene una baja pérdida de propagación de la luz en el material.
- Estructura de partículas homogéneas compuestas de óxido de bajo peso atómico, por lo tanto, no transmitirán más allá de la longitud de onda de 2.5 μ m.
- Alta conductividad térmica o alta dureza y resistencia, especialmente a altas temperaturas.
- Facilidad y bajo costo de fabricación.
- Alto uso en el área de las telecomunicaciones ópticas, longitud de onda: 1550nm.
- Gran variedad de índices de refracción.

A continuación, se presenta en la tabla 1 los materiales dieléctricos que se usaron para el proyecto, considerando sus propiedades ópticas en particular su transmitancia espectral alta para las regiones del espectro visible e infrarrojo cercano:

Tabla 1. Materiales involucrados en las estructuras con sus respectivos valores de índice de refracción.

Material (cubierta)	Índice de refracción	Material (para sustrato)	Índice de refracción	Material (para núcleo)	Índice de refracción
Aire	1.00	SiO_2	1.44	Al_2O_3	1.6267
				SiN	1.876
				Y_2O_3	1.8973
				Si_3N_4	2.00
				TiO_2	2.085

- ❖ Índices de refracción de SiO_2 , Al_2O_3 y Y_2O_3 ; obtenidos por elipsómetro de la UNAM Ensenada.
- ❖ Índice de refracción de TiO_2 , obtenido por elipsómetro del instituto UABC
- ❖ Índice de refracción de Si_3N_4 , clasificado por el INAOE.

El índice de refracción está relacionado con las propiedades del material y a la longitud de onda en el cual está propagándose por el material. Los materiales Al_2O_3 , Y_2O_3 y TiO_2 fueron considerados para este proyecto porque actualmente han sido sintetizados en colaboración con CNYN-UNAM y CICESE. Se han adquirido obleas de silicio con una cubierta de SiO_2 para el desarrollo de dispositivos de óptica de integrada pertenecientes al grupo. Por último el Si_3N_4 fue considerado por que es un material disponible comercialmente en forma de guías de onda planas en obleas de silicio.

3.2 Estructura del dispositivo.

El resonador de anillo está construido de guías de onda ópticas, la luz está siendo propagada de un punto a otro conocido como **bus**, en una determinada sección se encuentra otra guía de onda la cual tiene forma de **anillo**, por lo que la luz pasa de una guía a otra por acoplamiento óptico, por parte del campo evanescente y la luz que se encuentra viajando dentro de la cavidad resonante, como se muestra en la figura 13.



Figura 13. Diagrama esquemático del Resonador de anillo, las letras “A” y “B” que se encuentran en el diagrama son respectivamente la entrada y salida de luz en nuestro dispositivo.

El siguiente diagrama representa las diferentes variantes estructurales que se van a tener para cada dispositivo (figura 14).

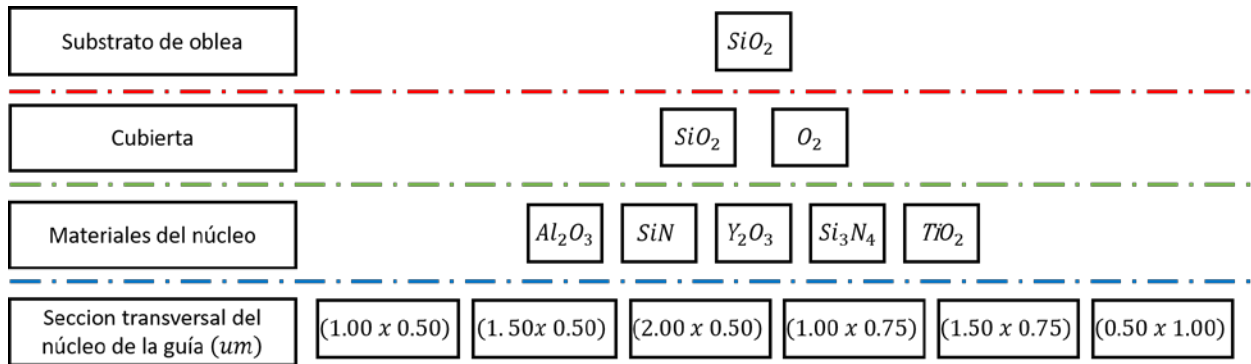


Figura 14. Diagrama de parámetros de las guías de onda.

El total de combinaciones que se van a tener serían de 60 configuraciones diferentes, para el análisis del dispositivo. Estas variantes aplican para el bus y el anillo. Las variables que van a quedar fijas para las 60 muestras serían las siguientes:

- Largo de la guía Bus: 128 μm .
- Radio del anillo: 60 μm .

3.3 COMSOL

La mayor parte del análisis de este trabajo de tesis fue realizada en el software COMSOL Multiphysics. COMSOL es un software de simulación multiplataforma enfocado a aplicaciones de ingeniería y física que usa el elemento finito para procesamiento de resultados.

Se optó por usar COMSOL por el hecho de ser un software muy amigable con el usuario, contando con un gran servicio de tutoriales y aplicaciones pre-instaladas en la librería del mismo software, además de que CICESE cuenta con la licencia original para estudiantes e investigadores (siendo la versión 5.3 la que se usó en este proyecto). Aclarando también que este fue el primer proyecto en usar COMSOL para el grupo de trabajo, siendo una ventaja muy importante para que futuras tesis usen este software.

Este software tiene la posibilidad de hacer diseños en una, dos y tres dimensiones; éste se utilizó para hacer análisis en la sección transversal de la guía de onda de canal, análisis de filtrado de resonancia, todos estos usando un modelo de 2 dimensiones para la obtención de resultados. COMSOL maneja dos asistentes de modelo para las aplicaciones ópticas, siendo: Ray Optics y Wave Optics.

La subrutina “Ray Optics” es el asistente de modelo que contiene interfaces de óptica Geométrica, siendo usado para modelar propagación de ondas electromagnéticas solo cuando la longitud de onda que se va a usar para el cálculo es mucho más pequeña que cualquier identidad geométrica usada en el modelo (COMSOL, 2019).

Mientras que la subrutina “Wave Optics” es usado para modelar campos eléctricos y magnéticos para sistemas donde la longitud de onda empleada es comparable o mucho menor que cualquier geometría perteneciente al dispositivo o sistema. Dicho por las mismas instrucciones de COMSOL que esta interfaz es la recomendada para modelar guías de onda y fibras, por este motivo esta fue la interfaz que se usó para el análisis de la sección transversal y filtrado.

La subrutina “Wave Optics” consta de varias interfaces para realizar diferentes tareas, las cuales se van a explicar en los siguientes estudios donde se usaron.

3.3.1 Análisis de la sección transversal.

Como se mencionó con anterioridad el modelo dimensional que se utiliza para el estudio de la sección transversal de la guía fue el de 2D, el asistente de modelo usado fue “Wave Optics” y la interfaz usada del modelo es conocido por “Electromagnetic Waves, Frequency Domain” (ewfd) siendo esta interfaz la que se usó para resolver distribuciones del campo eléctrico (COMSOL, 2019).

El punto mencionado anteriormente es de suma importancia por los resultados que se quieren obtener del análisis de la sección transversal de la guía. Dichos resultados son los siguientes:

1. Índice efectivo.
2. Factor de Confinamiento Modal.
3. Onda evanescente

Nota: Nosotros usaremos el término factor de confinamiento modal como la distribución del campo eléctrico en la guía.

Como se sabe el factor de confinamiento modal de una muestra depende del índice efectivo del dispositivo mientras que el índice efectivo depende de las dimensiones y materiales empleados en la estructura.

3.3.1.1 Índice efectivo

Para el primer punto se calculó el índice efectivo para saber la tendencia del fenómeno físico, usando una longitud de onda fija de 1.55 μm (longitud de onda de la ventana de las telecomunicaciones) y haciendo barridos respecto a la anchura con el siguiente parámetro:

- Valor de inicio: 0.50 μm .
- Resolución del barrido: 0.10 μm .
- Valor Final 3.0 μm .

Haciendo lo anterior para un barrido de espesores con los siguientes parámetros:

- Valor de inicio: 0.15 μm .
- Resolución del barrido: 0.15 μm .
- Valor Final: 1.35 μm .

Teniendo 26 valores de índice efectivo para cada valor de espesor, siendo 10 espesores para cada material y esto teniendo una cubierta diferente de aire o SiO_2 . Como se muestra en el siguiente diagrama (figura 15):

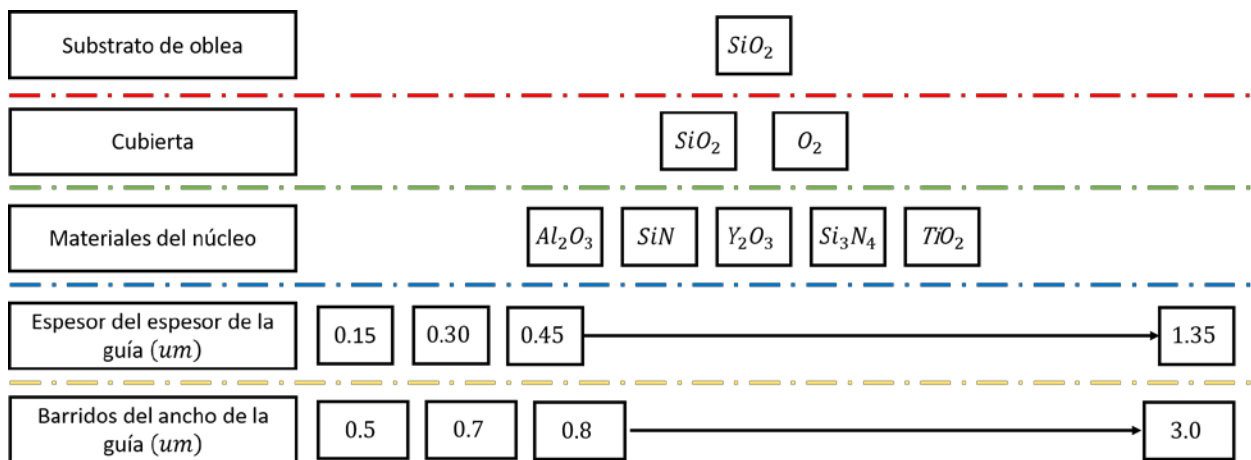


Figura 15. Diagrama de obtención de resultados para valores de índice efectivos.

Siendo 2600 valores de índice efectivo para todas las combinaciones posibles, en el siguiente capítulo de Resultados y discusiones se hablará de su interpretación y como fueron expresados dichos datos.

3.3.1.2 Factor de Confinamiento Modal

Respecto al segundo punto "Factor de Confinamiento Modal", se tomaron solamente los valores de la distribución del campo eléctrico de las estructuras que se mencionan en el punto 3.2 "Estructura del

dispositivo”, presentando los resultados de manera de porcentajes respecto de la distribución del campo eléctrico, respecto al substrato, núcleo de la guía y cubierta del dispositivo.

3.3.1.3 Onda Evanescente

Por último, el tercer punto “onda evanescente”, el cual está relacionado con el punto anterior, dicho fenómeno habla de que la onda viaja de manera gaussiana por la guía, pero una parte no se encuentra confinada en la guía, por lo que parte de la gaussiana se encuentra afuera del núcleo, pero sigue viajando a la misma dirección que la del haz confinado dentro de la guía, esto es conocido como onda evanescente como se observa en la figura 16. Con esto se intenta explicar que tanto porcentaje de la onda evanescente respecto a la onda gaussiana confinada en el núcleo se encuentra en las estructuras y a su vez que tanta distancia puede alcanzar esta misma. Aclarando que para la obtención de resultados se usó el software de multi-física COMSOL como ImageJ, en la sección 3.5 se hablara de este último software.

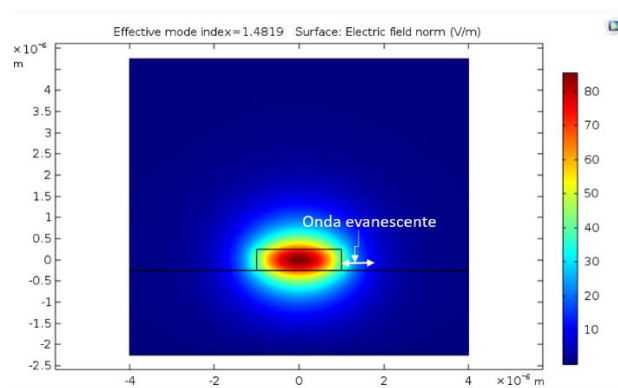


Figura 16. Sección transversal perteneciente al material Al_2O_3 , cubierta SiO_2 , con las dimensiones $(2.00 \mu m \times 0.50 \mu m)$.

3.3.2 Análisis del filtrado de resonancia.

Para el estudio del filtrado de resonancia se decidió optar por un modelo de dos dimensiones, un asistente de modelo “Wave Optics” igual que en el análisis de la sección transversal, pero teniendo la diferencia de que le interfaz es conocida como: “Wave Optics, Electromagnetic Waves, Beam Envelopes”. Dicho interfaz es usado para simular la propagación unidireccional o bidireccional de haces electromagnéticos, este interfaz se adecua para el análisis de filtrado de resonancia, por el hecho de que la luz pasa de un punto a otro, esta interfaz se adecua para este trabajo (COMSOL, 2019).

Para la obtención de resultados de este punto se optó por declarar un barrido de longitudes de onda que van a pasar por el dispositivo teniendo cumpliendo con los siguientes parámetros:

- Valor de inicio: 1.530um.
- Resolución del barrido: 1nm.
- Valor final: 1.570um.

Teniendo una gráfica con 40 puntos, la cual representará la transmitancia de longitudes de onda (luz) que está pasando del punto "A" al "B" que se muestran en la Figura 13, siendo esto una sección del filtrado de resonancia para un determinado ancho de banda, como se puede ver en la siguiente Gráfica calculada por COMSOL.

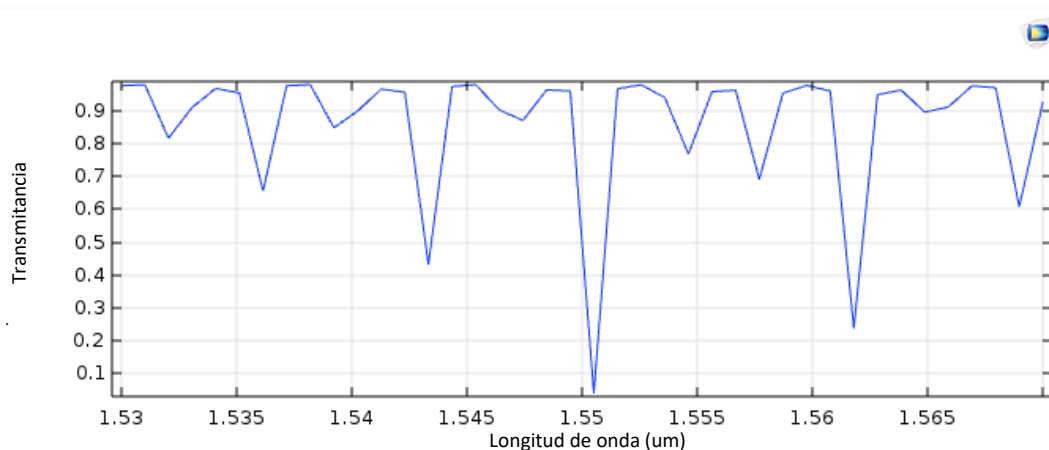


Figura 17. Transmitancia de la estructura perteneciente al material TiO_2 con las dimensiones (1.00um x 0.50um) con una distancia de separación: 0.4um, cubierta aire.

En la descripción de la gráfica anterior se menciona un término conocido como distancia de separación, el cual es la separación entre el bus y el anillo siendo un término de suma importancia porque es el espacio donde se acoplará la luz del Bus al anillo, pero ese espacio debe ser un valor muy exacto para cada estructura, por lo que se decidió tomar como una variable movable para el análisis de resultados finales.

Se decidió hacer un barrido de la distancia de separación con los siguientes parámetros:

- Valor inicial: 0um.
- Resolución del barrido 0.1um.
- Valor final. 1.0um.

Nota: En las simulaciones se consideraron distancias de separación de hasta 1.5um, pero sus valores de eficiencia de acoplamiento son despreciables por ser una separación grande para la guía y el resonador de anillo por lo que se decidió dejar hasta 1.0um.

Para cada valor de separación entre el Bus y el anillo se hacía un barrido de filtrado de resonancia, esto mismo para cada estructura. Haciendo solamente una pequeña actualización al diagrama de trabajo que se vio en el punto 3.2 con el siguiente (figura 18):

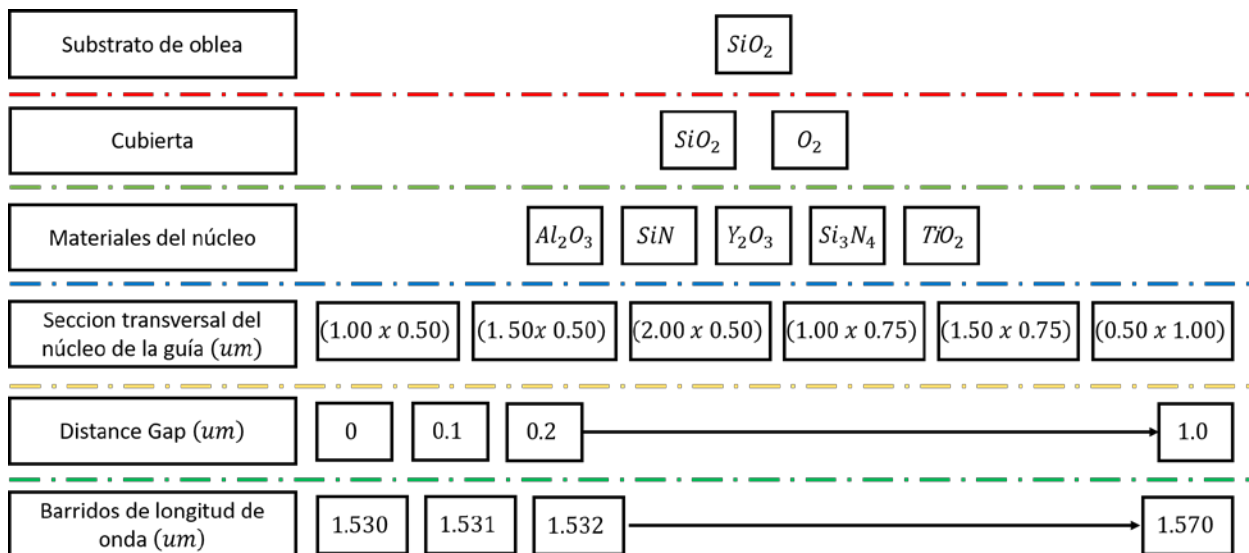


Figura 18. Diagrama de configuraciones para resultados de filtrado.

Como muestra el diagrama anterior, se simularon 660 combinaciones de filtrado de resonancia para cubrir todas las combinaciones estructurales posibles sin despreciar alguna.

En la sección de resultados se presentarán el porcentaje de mayor filtrado logrado por cada estructura para una distancia determinada en todo el barrido de la longitud de onda. Siendo la variable independiente el porcentaje de transmisión y la variable dependiente el espaciado entre bus y el anillo.

A continuación, se presentan una comparación del funcionamiento óptico el cual demuestra los valores mínimos y máximos de la transmisión de la señal que está siendo filtrada al resonador de anillo, que sería la representación simulada de la figura 19.

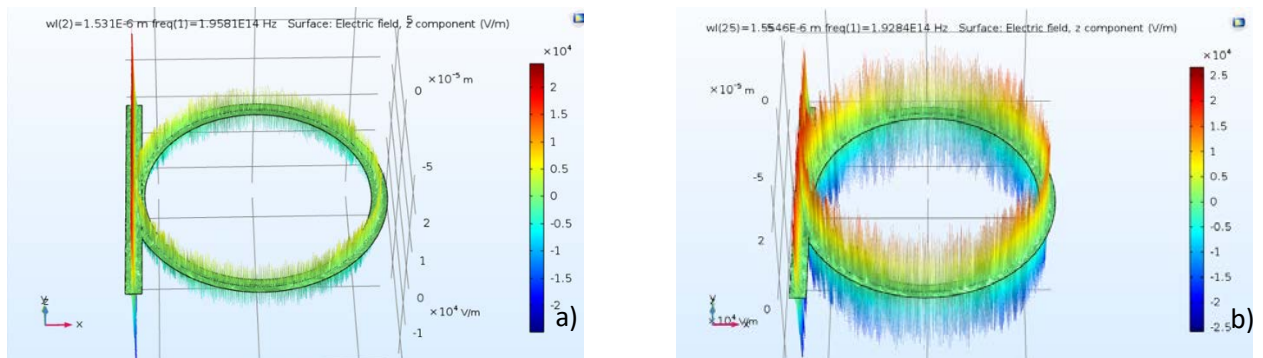


Figura 19. Comparación de filtrados de la estructura perteneciente a la Figura 15. a) Simulación del resonador de anillo en el ancho de banda de 1.53um, caso mínimo de filtraje. b) Simulación del resonador de anillo en el ancho de banda 1.554um, caso máximo de filtraje.

Los picos de intensidad que se pueden observar en la figura 19 dentro del anillo son la representación de los modos longitudinales, la cual ya fueron mencionados en el capítulo 2 y en la siguiente sección MATLAB.

3.4 MATLAB

MATLAB es un programa de lenguaje computacional de alto rendimiento. Usado por tener un lenguaje de programación sencillo, entendible y rápido para resolver ecuaciones declarados por los mismos usuarios (MATLAB, 2019).

Se utilizó en este proyecto para la obtención teórica de los siguientes parámetros:

1. Modos longitudinales.
2. FSR (Free Spectral Range).
3. Tiempo Transitorio en la cavidad.

Nota: Se quiere aclarar que los resultados para los 3 puntos mencionados, van a ser solamente de los materiales y estructuras aclaradas en la sección 3.2.

Además, por consideraciones recomendadas de fabricación del resonador de anillo (Rekha, 2011) se tomaron como limitantes que el radio del anillo, sea por lo menos de 5 veces la longitud de onda que está transmitiendo y hasta un máximo de 500 veces de la misma longitud, por lo que esto pudiera explicar que algunas Gráficas no comienzan desde cero en su eje x.

3.4.1 Modos Longitudinales:

Como se describió en el capítulo 2, subsección 2.3.3 los modos longitudinales son una forma única de las ondas estacionarias creadas por el confinamiento de ondas en una cavidad. La cavidad sería en nuestro caso el anillo. Por lo que se utilizó en MATLAB la ecuación número (64) pero con la consideración de la estructura de la guía de onda de canal es uniforme:

$$\lambda = \frac{n_{eff}L_c}{m}$$

- λ : la longitud de onda que va a poder soportar la estructura para hacer. (1.55 μm).
- n_{eff} : índice efectivo calculado por COMSOL y explicado capítulo 2 y la sección 3.31.1.
- r : es el radio del anillo.
- L_c : La longitud de la cavidad, en este caso sería la longitud del anillo o bien la longitud de circunferencia de un círculo. Siendo la siguiente igualdad:

$$L = 2\pi r, \tag{67}$$

- m : Número de modos longitudinales.

Usando la igualdad la longitud de circunferencia la ecuación queda como la siguiente:

$$\lambda = \frac{n_{eff} 2\pi r}{m}, \quad (68)$$

Un ejemplo de cómo se van a representar los resultados se puede observar en la figura 20.

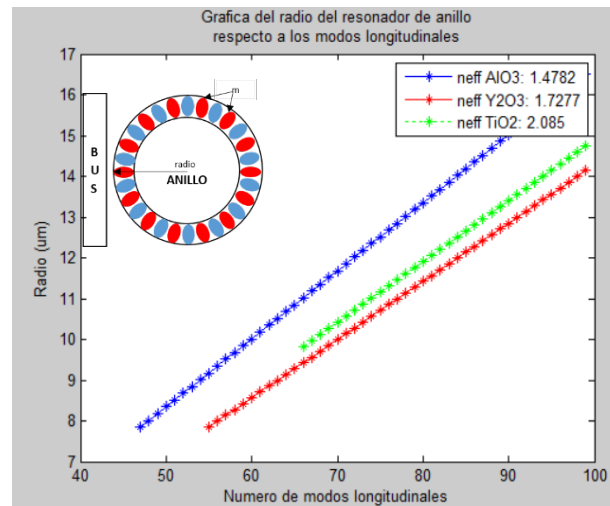


Figura 20. Gráfica ejemplo del radio de una estructura y material, necesaria para cada modo longitudinal.

En las simulaciones de COMSOL en la subsección 3.3.2 “Análisis de filtrado de resonancia” se menciona sobre la percepción de los modos longitudinales en las simulaciones, debe de existir una relación entre la cantidad de modos simulados con los calculados, para confiar en la plataforma. En la figura 21 se observan la cantidad de modos longitudinales de la simulación que coinciden con los valores teóricos.

Simulación.	Teoría.
	<p>Parámetros</p> <ul style="list-style-type: none"> • $n_{eff} = 1.9209$ • $L = 2 * \pi * (6.2\mu m)$ • $\lambda = 1.55\mu m$ <p>Modos longitudinales calculados por fórmula teórica: 48.</p> <p>Cantidad de picos rojos contados en el resonador de anillo simulado: 48.</p>

Figura 21. Comparación modos longitudinales de resonador simulado y de teoría.

3.4.2 FSR (Free Spectral Range):

El rango espectral libre es el parámetro relacionado entre la separación entre pulsos generados por un filtro, como se ha mencionado con anterioridad el resonador de anillo es conocido también como filtro de resonancia, por lo que este parámetro es muy importante en el filtraje. En el capítulo 2 subsección 2.2.3 se explica de manera más detallada el FSR. En la obtención de resultados se tomó la ecuación cambiando el n_g por n_{eff} por la homogeneidad de la guía:

$$FSR = \frac{\lambda}{n_{eff}L_C}$$

Un ejemplo de cómo se van a representar los resultados se puede observar en la figura 22.

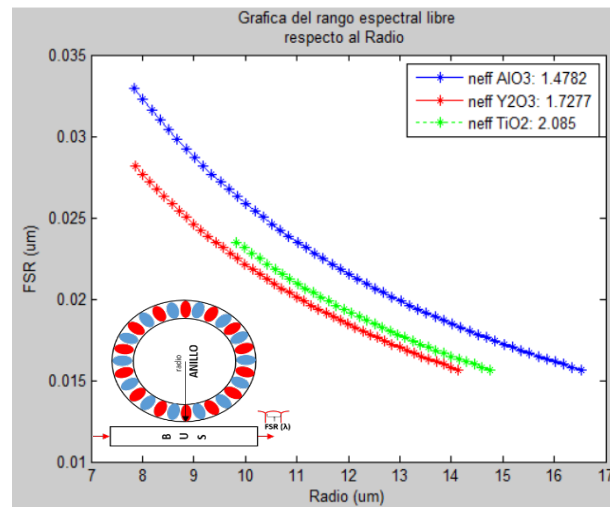


Figura 22. Gráfica ejemplo del rango espectral libre respecto al Radio de la estructura y material.

3.4.3 Tiempo Transitorio de la Cavity:

Como su nombre lo dice el tiempo transitorio de la cavity es el tiempo que tarda un pulso en viajar por toda la cavity en una sola vuelta. Dicha ecuación se habló de ella en la subsección 2.2.1, volviéndose a escribir con la consideración de n_{eff} en vez de n_g :

$$TR = \frac{n_{eff}L_C}{m}$$

Un ejemplo de cómo se van a representar los resultados se puede observar en la figura 23.

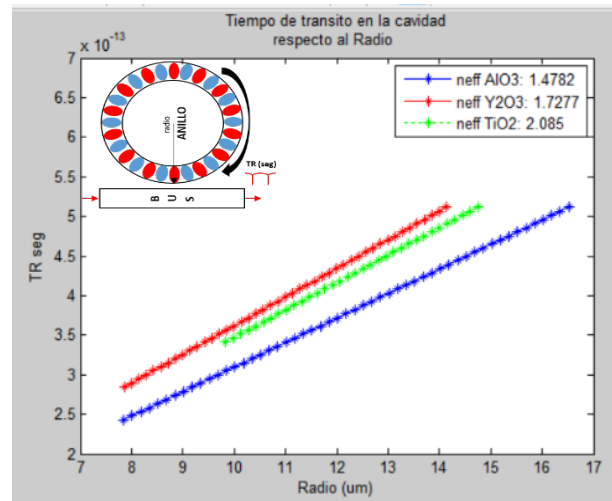


Figura 23. Gráfica ejemplo del Tiempo de tránsito en la cavidad respecto al radio de cada estructura y material.

3.5 ImageJ

ImageJ es un programa usado para el procesamiento de imágenes digitales de librería pública o arquitectura abierta diseñado por la NIH (National Institutes of Health) (Schneider, 2012). El cual puede procesar, analizar, editar y guardar imágenes de 8 bits – 32 bits. En este proyecto fue necesario este software para el procesamiento de las imágenes de las secciones transversales generadas por COMSOL (sección 3.31.3). Primeramente, en COMSOL se necesitó pasar la imagen de la sección transversal que tiene información de la distribución del campo eléctrico, a escalas de grises para luego ser procesada en el software ImageJ y obtener los valores de la distribución gaussiana, como se observa en la figura 24.

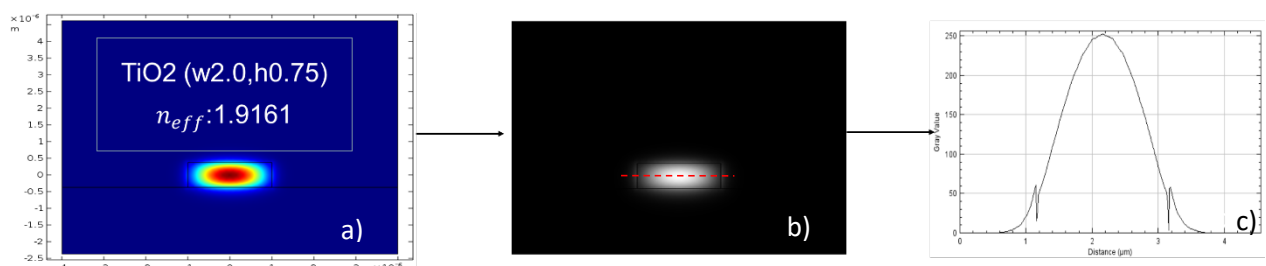


Figura 24. a) Obtención de la distribución del campo eléctrico de la sección transversal. b) Pasar imagen a escalas de grises. c) Analizar tonalidades de escalas de grises en ImageJ.

La figura 24 c) se pudo obtener gracias a que ImageJ analiza cada pixel de la imagen partiendo de una referencia, y la referencia es la sección transversal. El análisis de la gráfica toma como valor máximo (255) el blanco y como cero el negro, y así se obtiene una conducta gaussiana esperada. Se puede observar en la gráfica una pequeña discontinuidad en la curva gaussiana, esto es debido a que llega a la frontera de la

guía de onda de canal, por lo que después de esta frontera es donde se puede encontrar la onda evanescente, mencionando en la sección 3.31.3.

También se quiere aclarar que de igual manera se usó el software ImageJ para obtener los valores de FWHM, pero solamente se logró obtener este parámetro ya tomando la mejor combinación estructural de filtrado para cada material, tomando el pico más alto de filtrado y tomando la distancia del pulso a la mitad, como se muestra en la figura 25.

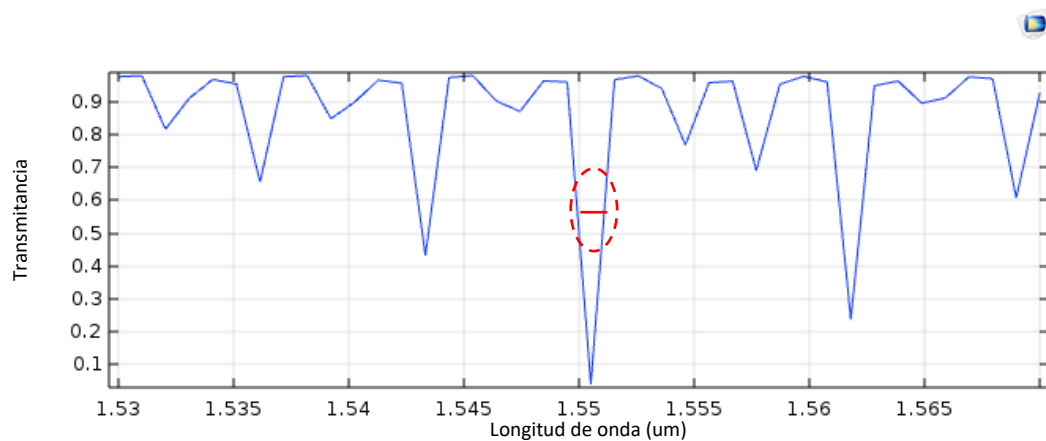


Figura 25. Transmancia de la estructura perteneciente al material TiO_2 con las dimensiones (1.00um x 0.50um) con una distancia de separación: 0.4um, cubierta aire. Indicador en rojo del FWHM a procesar en ImageJ.

3.6 Fineza y Factor-Q

Ya obteniendo el valor de FSR por parte de MATLAB y FWHM por parte de COMSOL e ImageJ, ya se puede calcular otras variables espectrales de filtrado importante como la fineza y el factor de calidad, los cuales se analizaron en el capítulo 2 en la subsección 2.3.3 volviendo a mencionar las ecuaciones (65),(66).

$$Fineza = \frac{FSR}{FWHM}$$

$$Q - factor = \frac{\lambda_{res}}{FWHM}$$

Aclarando que estos dos parámetros se calcularon directamente de las ecuaciones y solamente para las estructuras seleccionadas con el mayor valor filtrado para cada material, y se presentan en el Capítulo 4 de resultados y discusión, en la subsección 4.3.6.

Capítulo 4. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de esta investigación, respetando el orden de los temas en que se abordaron en el capítulo 3:

1. Caracterización de la guía.
 - Índice efectivo.
 - Factor de Confinamiento Modal.
 - Onda evanescente.
2. Modelo Teórico del resonador:
 - Modos Longitudinales.
 - Rango espectral Libre (FSR).
 - Tiempo Transitorio en la Cavidad.
3. Filtrado de resonancia
 - Estructuras de Al_2O_3 .
 - Estructuras de SiN .
 - Estructuras de Y_2O_3 .
 - Estructuras de Si_3N_4 .
 - Estructuras de TiO_2 .
 - Comparación estructural de todos los materiales.

4.1 Caracterización de la guía:

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

4.1.1 Índice efectivo:

A continuación, se presentan las gráficas de los barridos para cada uno de los materiales (figuras 26, 27, 28, 29 y 30), con sus diferentes cubiertas representando, sus barridos de espesor y ancho para cada uno para la obtención de sus índices de refracción efectivos. Obteniendo un total de 10 Gráficas, incluyendo en sus tablas un análisis breve de cada una:

Nota: Hay dos líneas que se mantienen de manera constante dentro de las 10 Gráficas, el índice de refracción del substrato y el índice del material, que son dos indicadores muy importantes para las gráficas.

Para que exista confinamiento modal se necesita que el n_{eff} sea mayor que el índice del sustrato y a su vez el n_{eff} nunca podrá ser mayor que el índice de refracción del material.

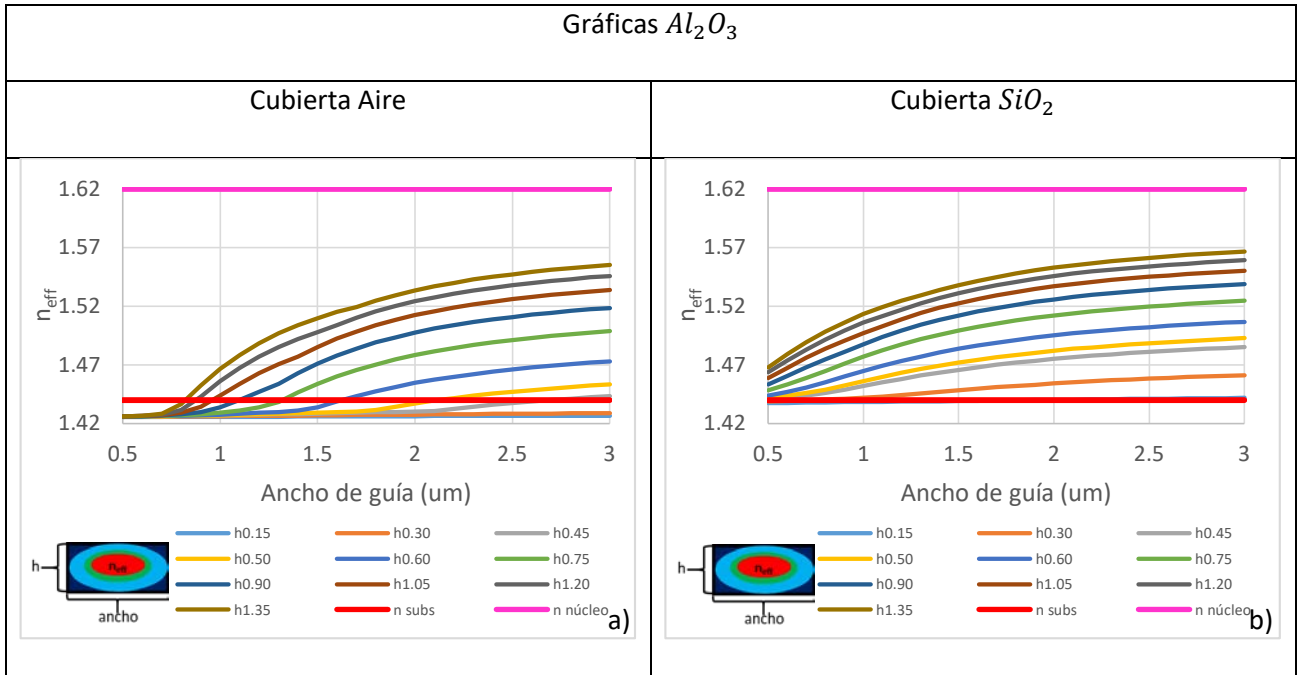


Figura 26. Gráficas de Índices de refracción efectivos para el material Al_2O_3 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

Se puede observar que en las estructuras que tienen cubierta de aire para el material Al_2O_3 , ninguna estructura comienza superando el índice del sustrato, respecto a su n_{eff} . El valor máximo de n_{eff} para la estructura más grande fue de 1.5551. Para las estructuras con cubierta SiO_2 desde el espesor 0.45 μm comienza superando el índice del sustrato, respecto a su n_{eff} , mientras el valor máximo de n_{eff} para la estructura más grande fue de 1.5664.

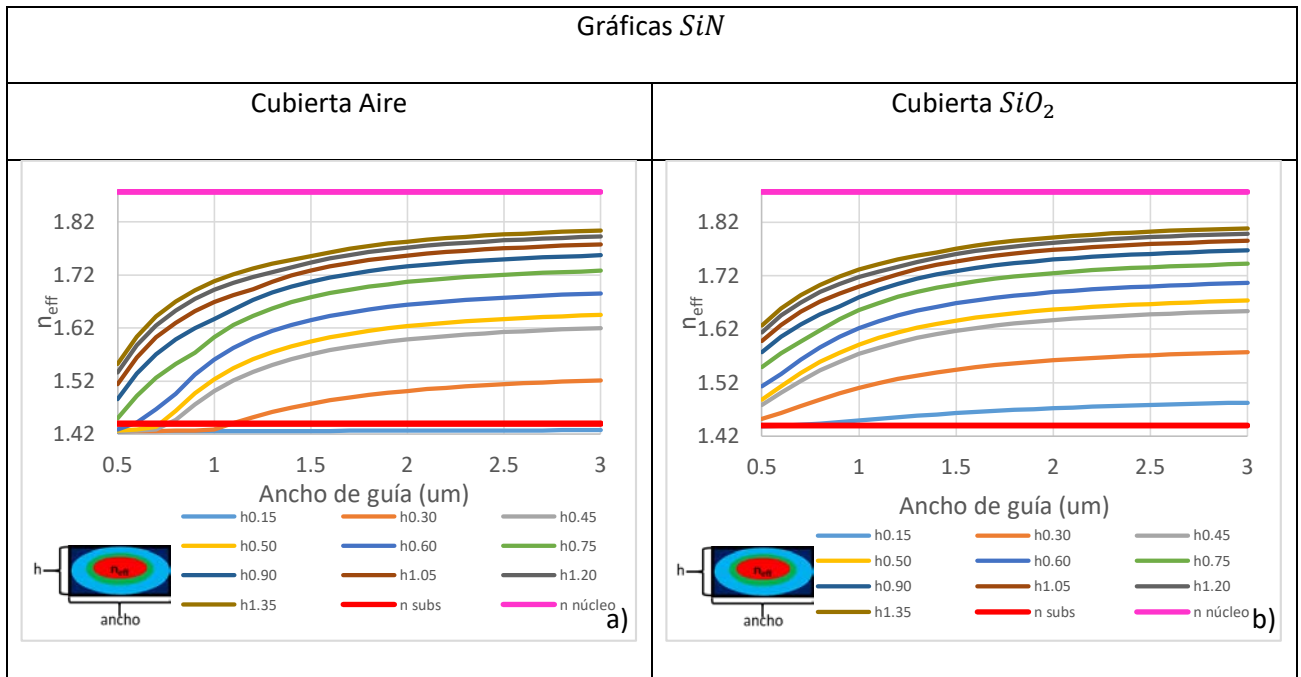


Figura 27. Gráficas de Índices de refracción efectivos para el material SiN . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

En las estructuras que tienen cubierta de aire para el material SiN , se comienza apreciar que para el espesor $0.75\mu m$ se comienza superando el índice del subtrado, respecto a su n_{eff} y teniendo un valor máximo de n_{eff} para la estructura mas grande de 1.8036 .

Para la estructuras con cubierta SiO_2 desde el espesor $0.30\mu m$ comienza superando el índice del substrato, respecto a su n_{eff} y teniendo un valor máximo de n_{eff} para el area mas grande de 1.8086 .

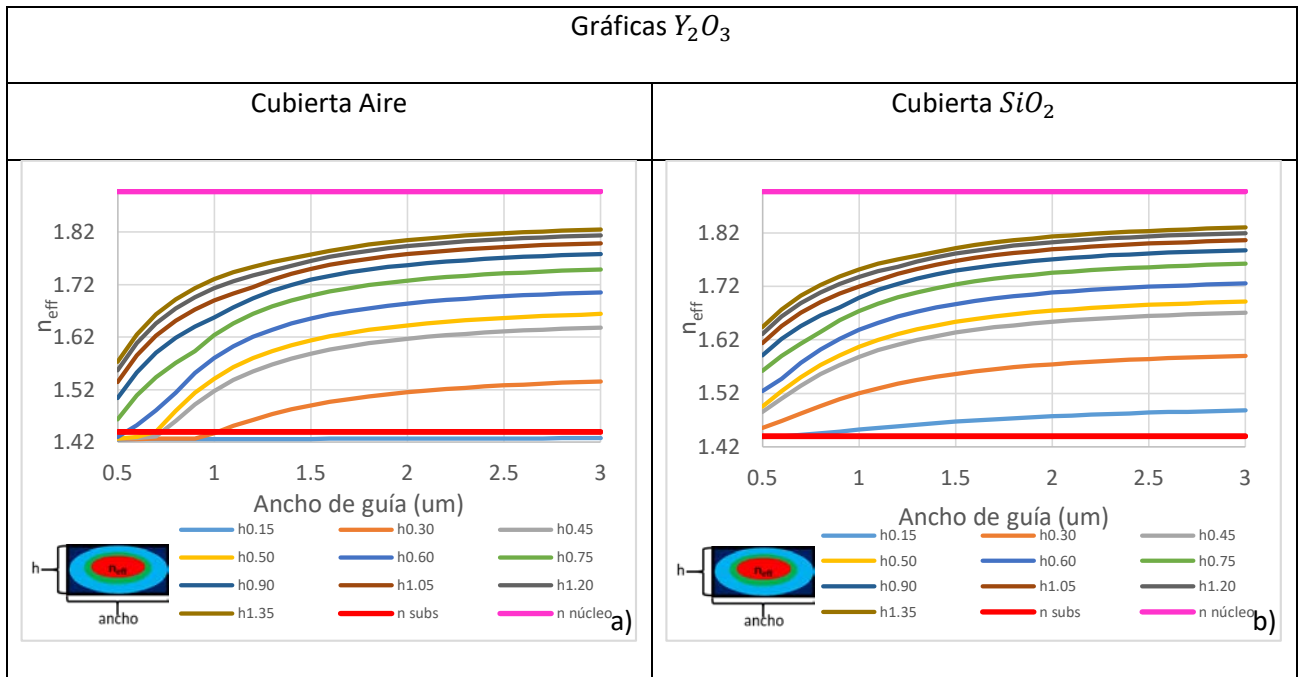


Figura 28. Gráficas de Índices de refracción efectivos para el material Y_2O_3 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

Para el material Y_2O_3 las estructuras con cubierta de aire se puede presenciar que desde el espesor $0.75\mu m$ el valor de índice efectivo comienza superando al índice del substrato y para el valor máximo de n_{eff} perteneciente al área de la guía se logró un valor de 1.8252.

Para las estructuras que tiene cubierta de SiO_2 , desde el espesor de $0.30\mu m$ el valor de índice efectivo comienza superando el valor del índice del substrato y el valor de índice efectivo más alto que se presenta para el área más grande la guía es de 1.8298.

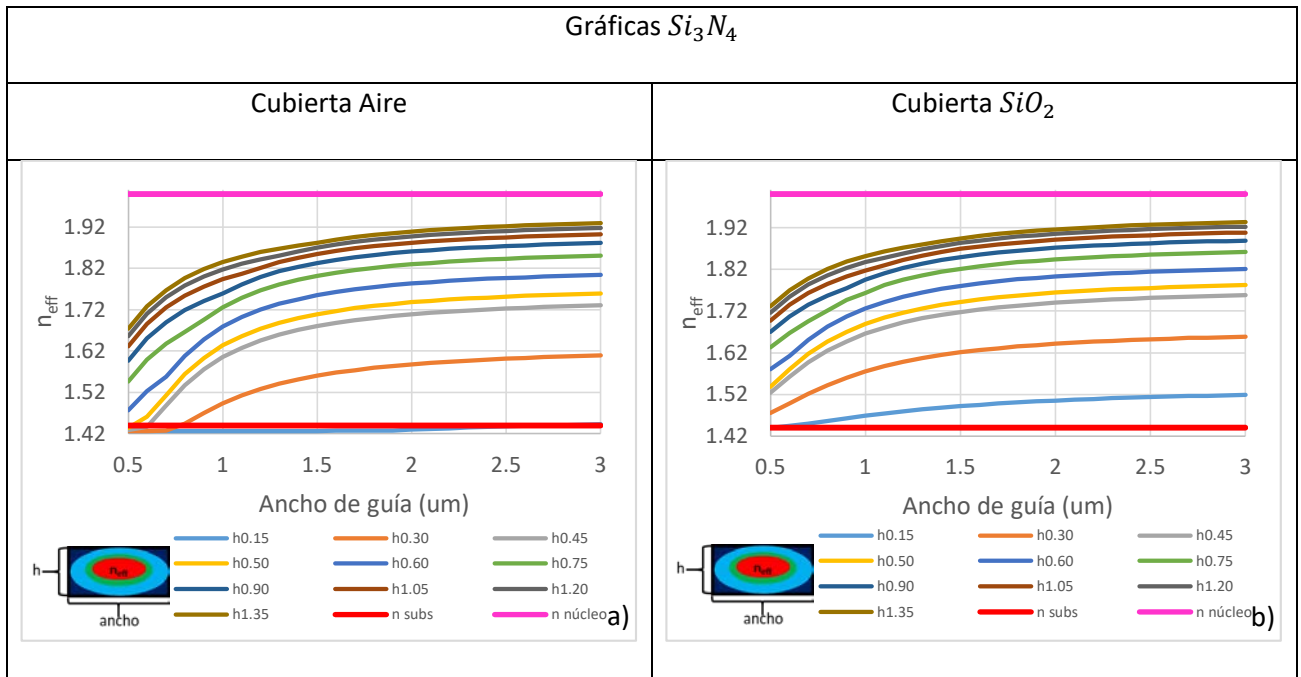


Figura 29. Gráficas de Índices de refracción efectivos para el material Si_3N_4 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

Para el material Si_3N_4 las estructuras con cubierta de aire se puede observar que desde 0.60um de espesor el valor de índice efectivo comienza superando al índice del sustrato y para el valor máximo de n_{eff} perteneciente al área mas grande de la guía se logró un valor de 1.9293. Mientras para las estructuras que tiene cubierta de SiO_2 , se puede observar que desde 0.30um de espesor valor de índice efectivo comienza superando el valor del índice del sustrato y el valor de índice efectivo más alto es de 1.9329 para la estructura mas grande.

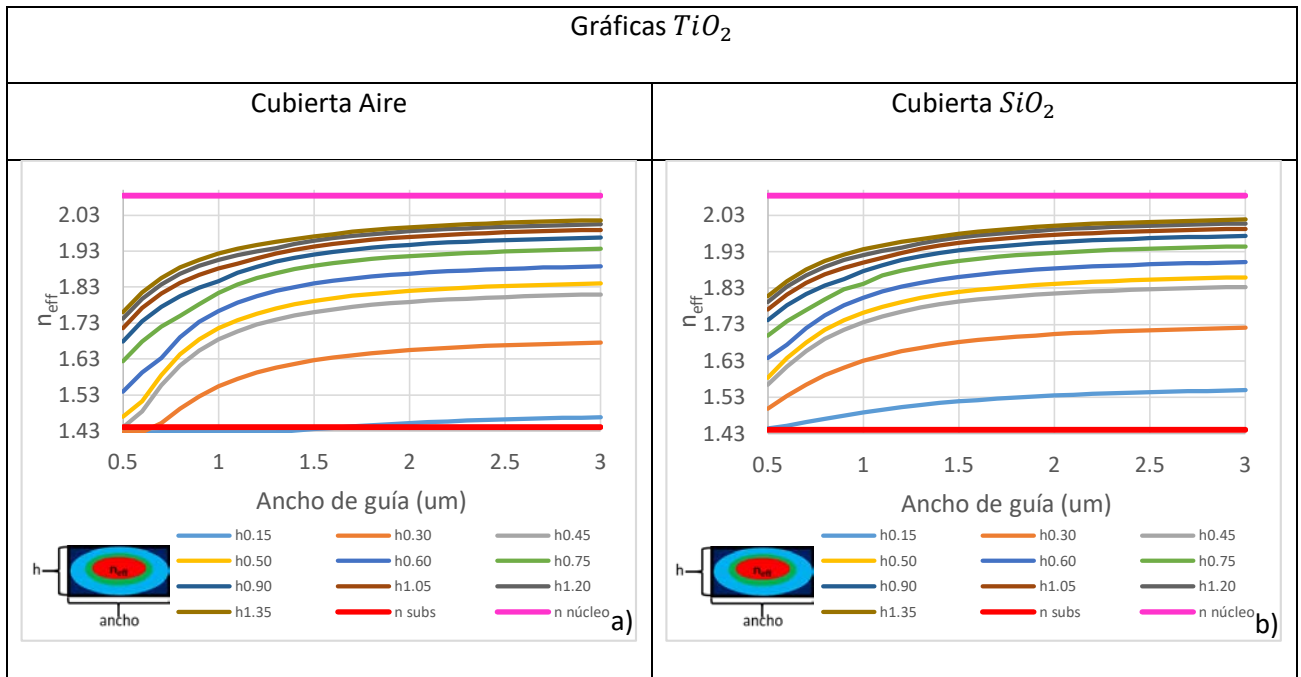


Figura 30. Gráficas de Índices de refracción efectivos para el material TiO_2 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

Para el material TiO_2 las estructuras con cubierta de aire obtienen a partir de el espesor 0.50 μm , donde el valor de índice efectivo comienza superando al índice del sustrato y para el valor máximo de n_{eff} perteneciente al área de la guía se logró un valor de 1. Mientras para las estructuras que tiene cubierta de SiO_2 , todos los espesores con sus valores de índice efectivo comienza superando el valor del índice del sustrato y el valor de índice efectivo más alto es de 2.0186 para la estructura mas grande.

Se puede observar en todas las gráficas que el índice efectivo va en aumento conforme aumenta el área de la sección transversal, teniendo un crecimiento rápido al inicio para después estabilizarse tener un crecimiento constante lineal, respetando lo que se dijo en la nota.

En la tabla 2 se muestran los valores de índices efectivos obtenidos de las 10 gráficas anteriores para las estructuras principales que se habían descrito en el capítulo 3 sección 3.2, de los cuales:

Tabla 2. Índices efectivos. □ Cubierta de aire. ■ Cubierta de SiO_2 . ■ Valores en amarillo no existe confinamiento modal.

Índice efectivo						
Materiales	(1.00 um x 0.50 um)	(1.50 um x 0.50 um)	(2.00 um x 0.50 um)	(1.00 um x 0.75 um)	(1.50 um x 0.75 um)	(2.00 um x 0.75 um)
Al_2O_3	1.4269	1.4291	1.4369	1.4292	1.4573	1.4782
Al_2O_3	1.4561	1.4718	1.4819	1.4769	1.4992	1.512
SiN	1.5232	1.5951	1.6234	1.6026	1.6781	1.7067
SiN	1.5914	1.6362	1.6566	1.6554	1.7039	1.7249
Y_2O_3	1.541	1.6141	1.6426	1.6234	1.6992	1.7177
Y_2O_3	1.6071	1.6536	1.6744	1.6739	1.7236	1.745
Si_3N_4	1.6334	1.7095	1.738	1.7263	1.8022	1.8301
Si_3N_4	1.6889	1.7349	1.7641	1.7638	1.8214	1.8438
TiO_2	1.7151	1.7916	1.8198	1.8138	1.8888	1.9161
TiO_2	1.7626	1.8191	1.8421	1.8418	1.9047	1.9274

Los valores que se encuentra en amarillo son índices efectivos que no superan al valor de índice de refracción del substrato, por ende, no existe confinamiento modal en el núcleo de la guía por lo que no se va a existir propagación de luz en la guía.

Nota: Se toma directamente la comparación del n_{eff} respecto al índice de refracción del substrato sin importar de la cubierta, esto debido que cuando se encuentra sumergido la cubierta seria del mismo material del substrato, ahora cuando se habla de una estructura que tiene cubierta de aire, como el índice de refracción del aire es menor que el del substrato se toma más comparación al índice del substrato que es más grande. Pero la comparación debe de ser la siguiente para que exista confinamiento modal:

$$n_{eff} \geq n_{subs} \geq n_{cubierta}$$

Se puede observar que el orden en que se presentaron los resultados en cuestión de los materiales del núcleo fue en orden de menor a mayor índice de refracción teniendo a su vez un mismo orden proporcional con la obtención de resultados de índice efectivo.

Se puede presenciar que en las estructuras que tienen cubierta de SiO_2 tienen un valor de n_{eff} mayor que las que tienen una cubierta de aire, es por esto que se tiene un mejor confinamiento modal en el núcleo de la guía, esto no se puede dar totalmente por hecho hasta que se vea en la siguiente sección de resultados. Teniendo a su vez un valor mayor de n_{eff} cuando el área de la sección transversal aumenta.

4.1.2 Factor de Confinamiento:

Los resultados que se muestran a continuación están presentados por porcentajes de la distribución del campo eléctrico respecto a la sección transversal de la guía, en este caso solamente se tomaron el porcentaje que tiene el núcleo de la guía (tabla 3).

Tabla 3. Factores de confinamiento. □ Cubierta de aire. ■ Cubierta de SiO_2 . ■ Valores en amarillo no existe confinamiento modal.

Factor de Confinamiento						
Materiales	(1.00 um x 0.50 um)	(1.50 um x 0.50 um)	(2.00 um x 0.50 um)	(1.00 um x 0.75 um)	(1.50 um x 0.75 um)	(2.00 um x 0.75 um)
Al_2O_3	2%	4%	24%	6%	36%	45%
Al_2O_3	10%	17%	22%	20%	31%	37%
SiN	35%	47%	51%	53%	63%	67%
SiN	31%	41%	46%	45%	57%	62%
Y_2O_3	37%	48%	53%	53%	64%	68%
Y_2O_3	33%	43%	47%	47%	58%	63%
Si_3N_4	43%	54%	58%	58%	68%	72%
Si_3N_4	40%	49%	53%	52%	64%	68%
TiO_2	49%	58%	61%	62%	71%	75%
TiO_2	45%	54%	57%	58%	67%	71%

Como se puede ver la tabla de factor de confinamiento está relacionada con la tabla de índice efectivo, los valores que se encuentran en amarillo hacen relación en la sección pasada que eran valores menores al índice de refracción del substrato por lo que no podía existir confinamiento modal en la guía, se puede observar que los porcentajes de la distribución del campo eléctrico que contiene son valores muy bajos respecto en la estructura total.

El factor de confinamiento igual que el n_{eff} aumenta si el área de la sección transversal de la guía es más grande. El factor de confinamiento es más grande si el índice de refracción del material es mayor y a su vez, si se encuentra sumergido.

Siendo insuficiente un 24% de toda la distribución del campo eléctrico para que exista confinamiento modal, esto solo aplica para estructuras que tienen cubierta de aire. Mientras para una estructura que se

encuentre sumergida en SiO_2 , los porcentajes de factor de confinamiento en el núcleo pueden bajar hasta 10% y puede seguir existiendo confinamiento modal.

4.1.3 Onda evanescente:

En esta subsección se presentan los valores de la onda evanescente normalizados, respecto al valor total de la onda gaussiana que se encuentra propagándose por la guía, a continuación, se encuentra la logística en la cual se representan los resultados:

- 4 Gráficas que representan los valores normalizados de la onda evanescente:
 - 2 Gráficas pertenecientes a la estructura con menor área y cubiertas diferentes.
 - 2 Gráficas pertenecientes a la estructura con mayor área y cubiertas diferentes.
- Tabla de valores exactos de las gráficas.

Todo esto para presenciar el fenómeno de la onda evanescente en los casos extremos en todos los materiales, para discutir y relacionar estos resultados con la última sección de este capítulo “Filtrado de resonancia”.

Los parámetros que representan dichas Gráficas serán los siguientes:

- Variable dependiente: (0 -1 .00um) con un paso de 0.1um, representando esto la distancia en um después del ancho de la guía.
- Variable independiente: (0-1.00), esta representa valor de la onda evanescente normalizado respecto al punto de valor máximo de la onda gaussiana.

Nota: Los valores de onda evanescente tomados fueron a partir del punto centro de la guía donde se encuentra el valor mayor de intensidad del modo fundamental. Haciendo solamente un análisis unidimensional.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las figuras 31 y 32.

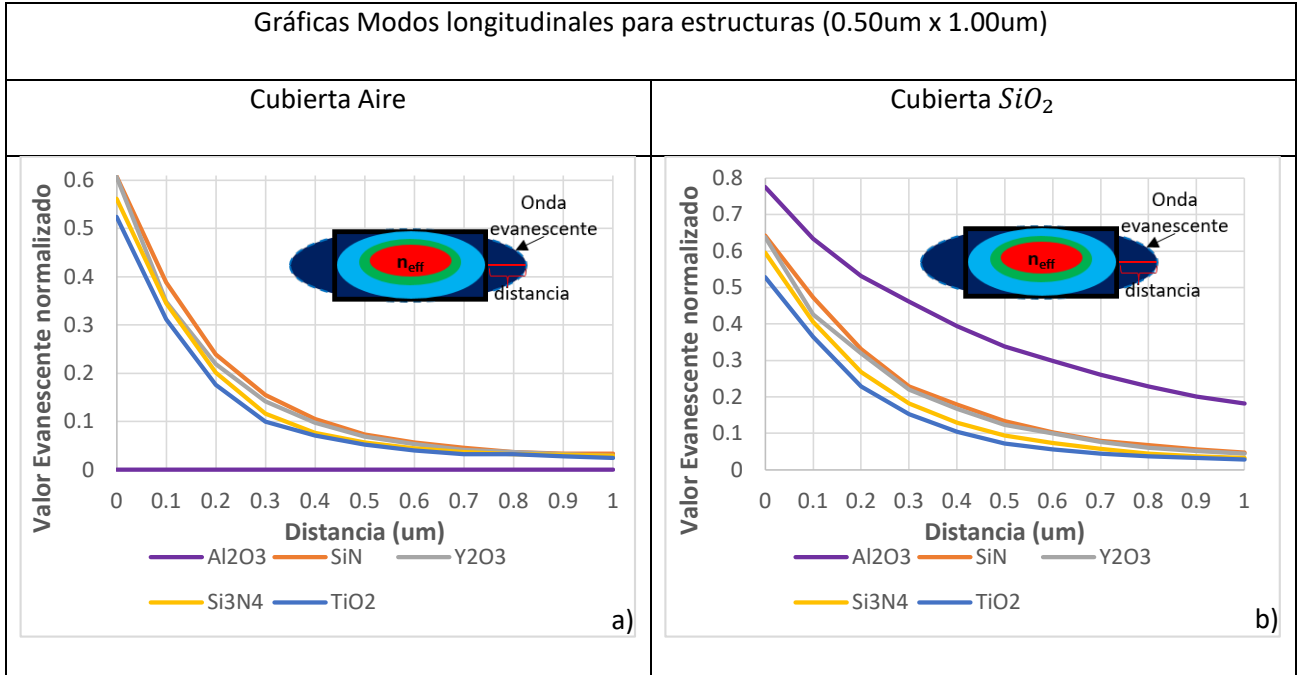


Figura 31. Gráficas de propagación de la Onda evanescente para una sección transversal (1.00um x 0.50um). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

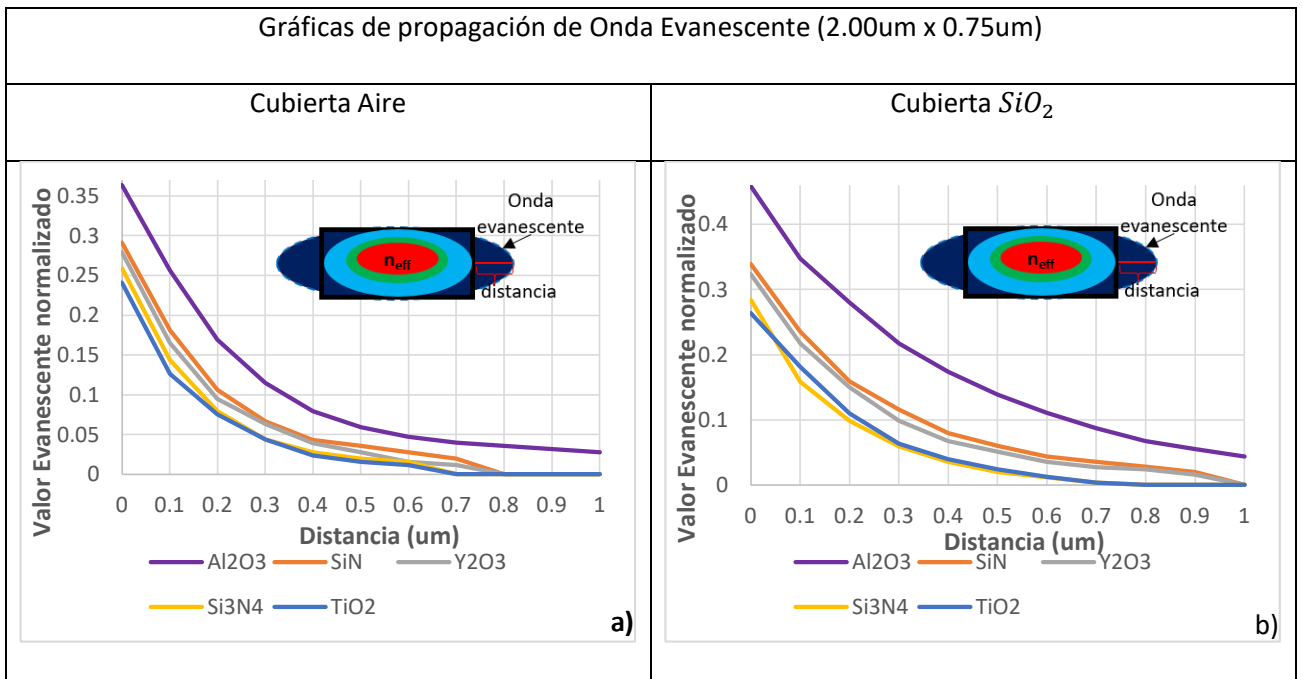


Figura 32. Gráficas de propagación de la Onda evanescente para una sección transversal (2.00um x 0.75um). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

Primero se debe aclarar que en la figura 29 sección a), se puede observar que en la alúmina es cero esto debido a que no existe confinamiento modal por lo que la estructura no propaga de la manera deseada para el análisis de onda evanescente.

Se observa que en las cuatro gráficas se tiene una función de hipérbola en decrecimiento. Al aumentar la distancia, el valor de la onda evanescente normalizado comienza a disminuir. Respecto a los materiales que tienen un índice de refracción bajo, el campo evanescente presenta una mayor distancia de propagación y a su vez un valor más grande del campo en comparación con los materiales de índice de refracción mayor.

Se puede observar que todavía existe una presencia del campo evanescente para el valor máximo de distancia que es 1 μ m, para las estructuras (1.00 μ m x 0.50 μ m), para todos los materiales y cubiertas, para el caso que exista confinamiento modal. Mientras que en las estructuras (2.00 μ m x 0.75 μ m), se puede observar la presencia de que el campo evanescente es nulo para una distancia determinada de cada material y cubierta.

Las estructuras que tienen una cubierta de SiO_2 alcanzan valores más altos del campo evanescente respecto a la distancia de la propagación de dicho campo, a comparación de las estructuras que tienen cubierta de aire.

Ahora hablando del área de la sección transversal de la guía, el dispositivo que tenga un área menor presenta un mayor campo evanescente y a su vez se tiene una distancia de propagación más larga a comparación de las secciones transversales con un área mayor.

Aclarando que en las guías que tienen un mayor índice de refracción efectivo presentan un valor del campo evanescente menor que con esto conlleva una distancia de propagación menor de la onda, pero esto solo aplica cuando se compara con los dispositivos que tienen una misma cubierta.

4.2 Modelo Teórico del resonador:

En esta sección se presentan los resultados teóricos analizados en el capítulo 2 y 3 de esta tesis, siendo Modos longitudinales, Rango espectral libre y Tiempo de resonancia de la cavidad, la manera en que se presentarán los resultados de esta sección serán los siguientes:

- 4 Gráficas por resultado teórico:
 - 2 Gráficas pertenecientes a la estructura con la menor área y cubiertas diferentes.
 - 2 Gráficas pertenecientes a la estructura con la mayor área y cubiertas diferentes.

- Tabla de valores exactos para las estructuras de prioridad

Nota: Las gráficas no empezaran desde 0 esto debido a que se tomó como medida limite, el radio del resonador de anillo debe ser por lo menos 5 veces mayor a la longitud de onda que se está propagando y hasta un máximo de 500 veces mayor a la longitud de onda (Rekha, 2011).

4.2.1 Modos longitudinales:

En las siguientes gráficas se presentan la cantidad de los modos longitudinales como variable independiente que se encuentran en cada material respecto a un radio específico, siendo el radio la variable dependiente, para cada material, índice efectivo y dimensión de estructura (figura 33 y 34):

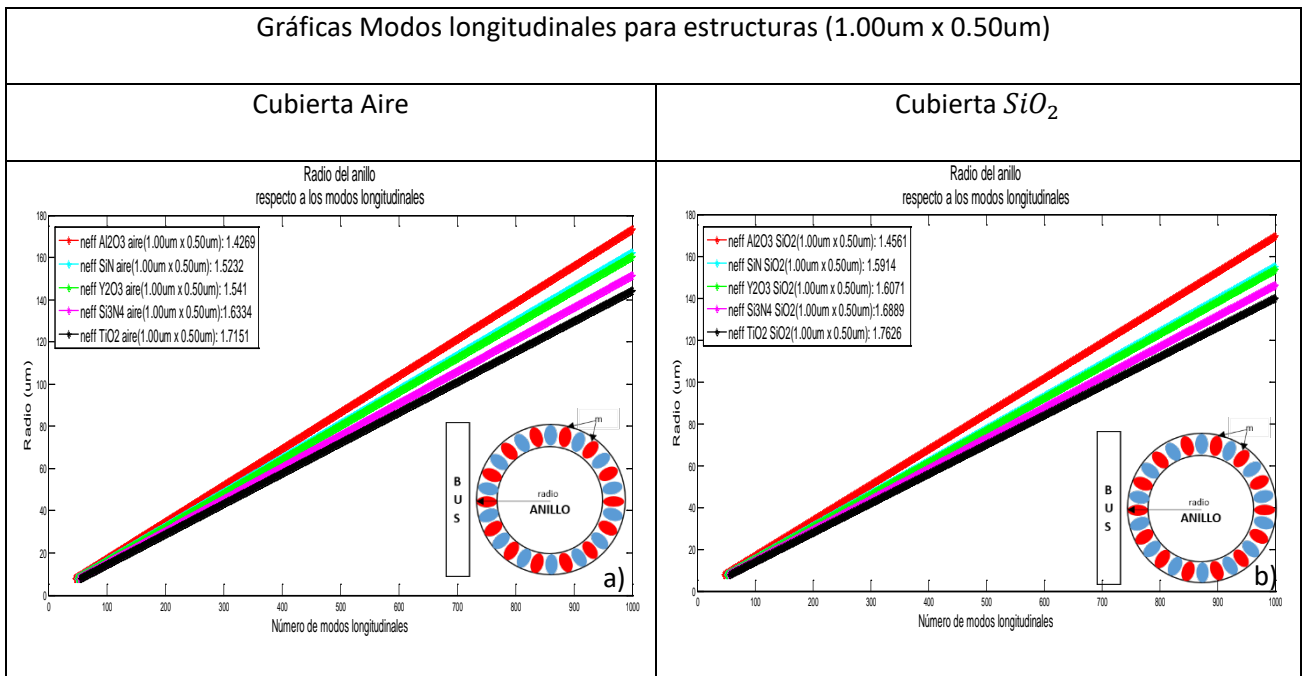


Figura 33. Gráficas del radio del anillo respecto al número de modos longitudinales para una sección transversal (1.00um x 0.50um). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

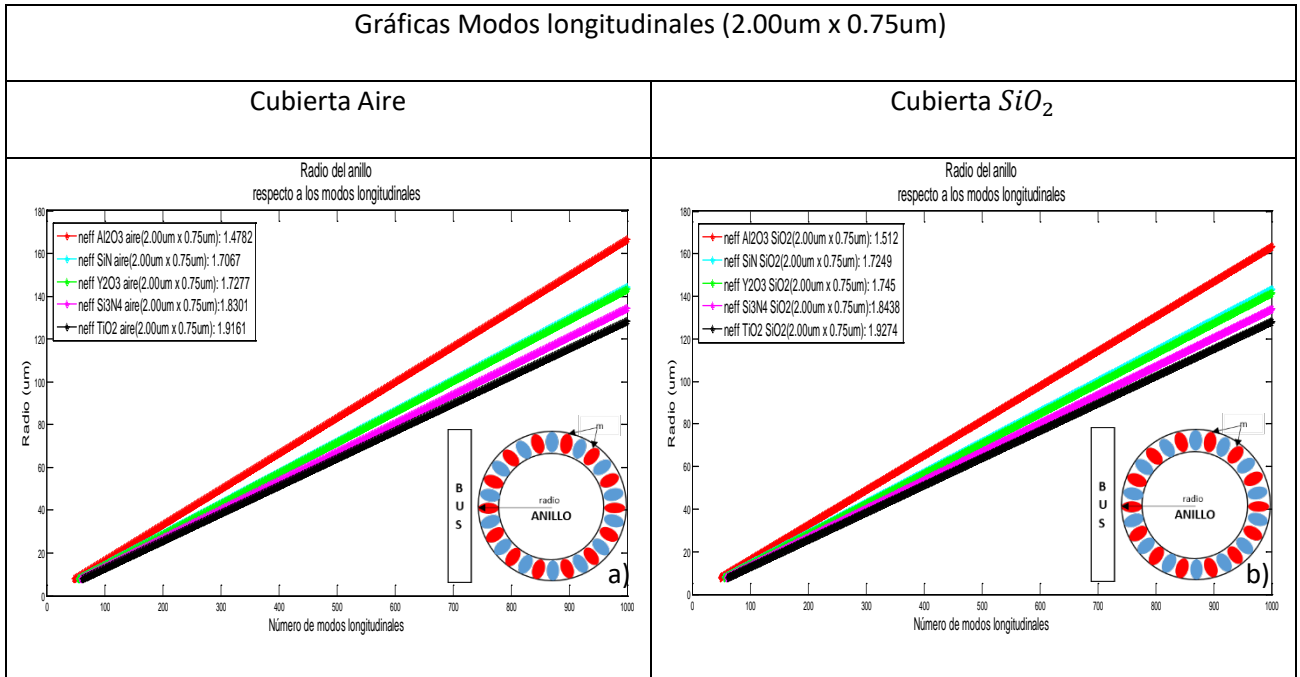


Figura 34. Gráficas del radio del anillo respecto al número de modos longitudinales para una sección transversal (2.00 μ m x 0.75 μ m). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

Se puede observar en las gráficas que mientras más grande sea el índice efectivo se necesita un menor radio para poder soportar un número mayor de modos longitudinales. Esto significa que en las estructuras que tienen una cubierta de SiO_2 , un índice de refracción grande y un área transversal mayor, pueden propagar más modos longitudinales respecto a los que tienen una cubierta de aire, un índice de refracción pequeño y un área transversal menor.

A su vez mientras más grande sea el radio del resonador de anillo más modos longitudinales se podrán propagar en la estructura.

A continuación, se encuentra la tabla 4 con el mínimo de modos longitudinales que pueden propagarse, respetando la condición límite impuesta en el capítulo 3, la cual dice que el radio debe de ser 5 veces mayor a la longitud de onda que está viajando en la cavidad, esto para cada sección transversal primordial:

Tabla 4. Modos Longitudinales respetando caso de límite. □ Cubierta de aire. ■ Cubierta de SiO_2 . ■ Valores en amarillo no existe confinamiento modal.

Número de Modos Longitudinales para caso limite						
Materiales	(1.00 um x 0.50 um)	(1.50 um x 0.50 um)	(2.00 um x 0.50 um)	(1.00 um x 0.75 um)	(1.50 um x 0.75 um)	(2.00 um x 0.75 um)
Al_2O_3	45	45	46	45	46	47
Al_2O_3	46	47	47	47	48	48
SiN	48	51	52	51	53	54
SiN	50	52	53	53	54	55
Y_2O_3	49	51	52	52	54	54
Y_2O_3	51	52	53	53	55	55
Si_3N_4	52	54	55	55	57	58
Si_3N_4	54	55	56	56	58	58
TiO_2	54	57	58	57	60	61
TiO_2	56	58	58	58	60	61

El rango de valores que se obtienen de modos longitudinales, para el caso límite del radio el cual es 7.75um y respetando que exista confinamiento modal en la guía son de 46 – 61 modos longitudinales.

La tabla 5 se presenta la cantidad de modos longitudinales para cada valor de sección transversal, teniendo un valor fijo para el radio de 60um, definido en el capítulo 3:

Tabla 5. Modos Longitudinales para radio 60um. □ Cubierta de aire. ■ Cubierta de SiO_2 . ■ Valores en amarillo no existe confinamiento modal.

Número de Modos Longitudinales						
Materiales	(1.00 um x 0.50 um)	(1.50 um x 0.50 um)	(2.00 um x 0.50 um)	(1.00 um x 0.75 um)	(1.50 um x 0.75 um)	(2.00 um x 0.75 um)
Al_2O_3	348	348	356	348	356	364
Al_2O_3	356	364	364	364	372	372
SiN	372	394	402	395	410	418
SiN	387	403	410	410	418	425
Y_2O_3	379	394	403	403	418	418
Y_2O_3	395	403	410	410	426	426
Si_3N_4	402	418	426	426	441	449
Si_3N_4	418	425	433	433	449	449
TiO_2	418	441	449	441	465	472
TiO_2	434	449	449	449	465	472

El rango de valores que se obtienen de modos longitudinales, para un radio del resonador de anillo de 60um discutida en el capítulo 3 y a su vez que en la misma guía de onda exista confinamiento modal son de 356 – 472 modos longitudinales.

Como se había mencionado en el párrafo anterior, mientras más grande sea el índice efectivo más modos longitudinales podrán soportar la estructura y necesitaran un radio menor para propagar dichos modos.

4.2.2 Rango espectral Libre (FSR):

A continuación, se presentan las gráficas rango espectral libre respecto a la longitud de onda (figura 35 y 36) como variable independiente se tiene el radio del resonador de anillo en unidades de micrómetros y como variable dependiente el FSR, esta para cada material.

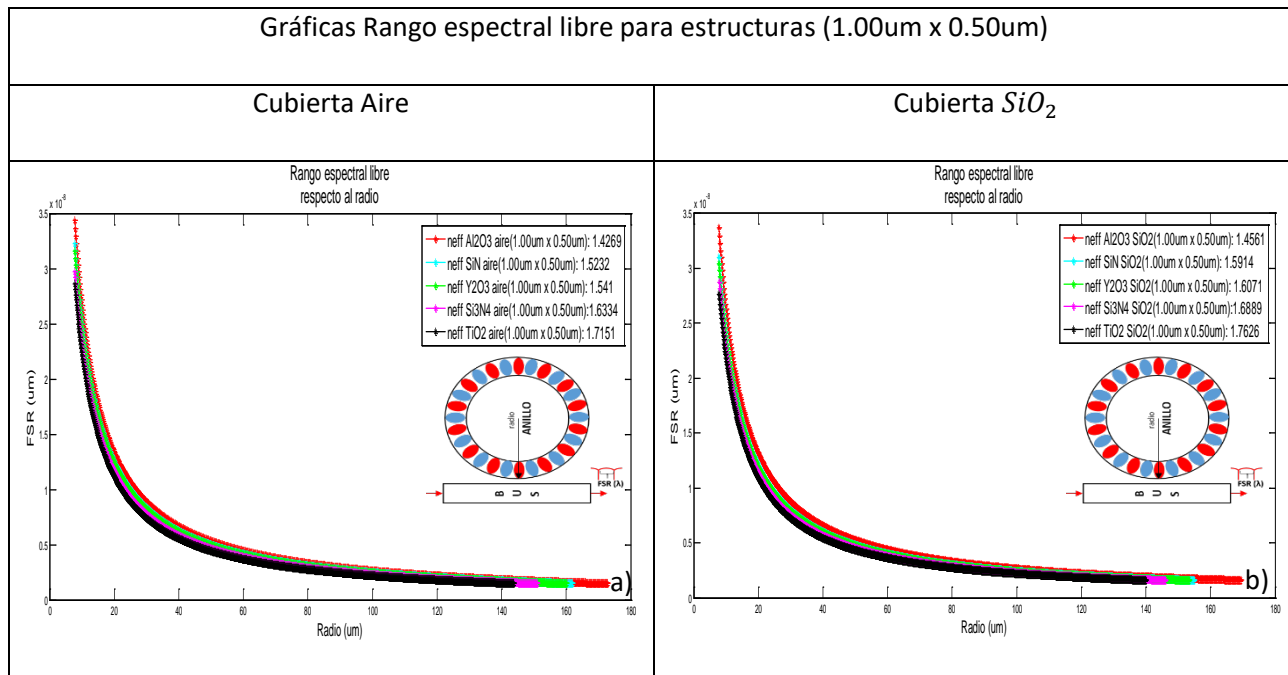


Figura 35. Gráficas de rango espectral libre respecto al radio para una sección transversal (1.00um x 0.50um). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

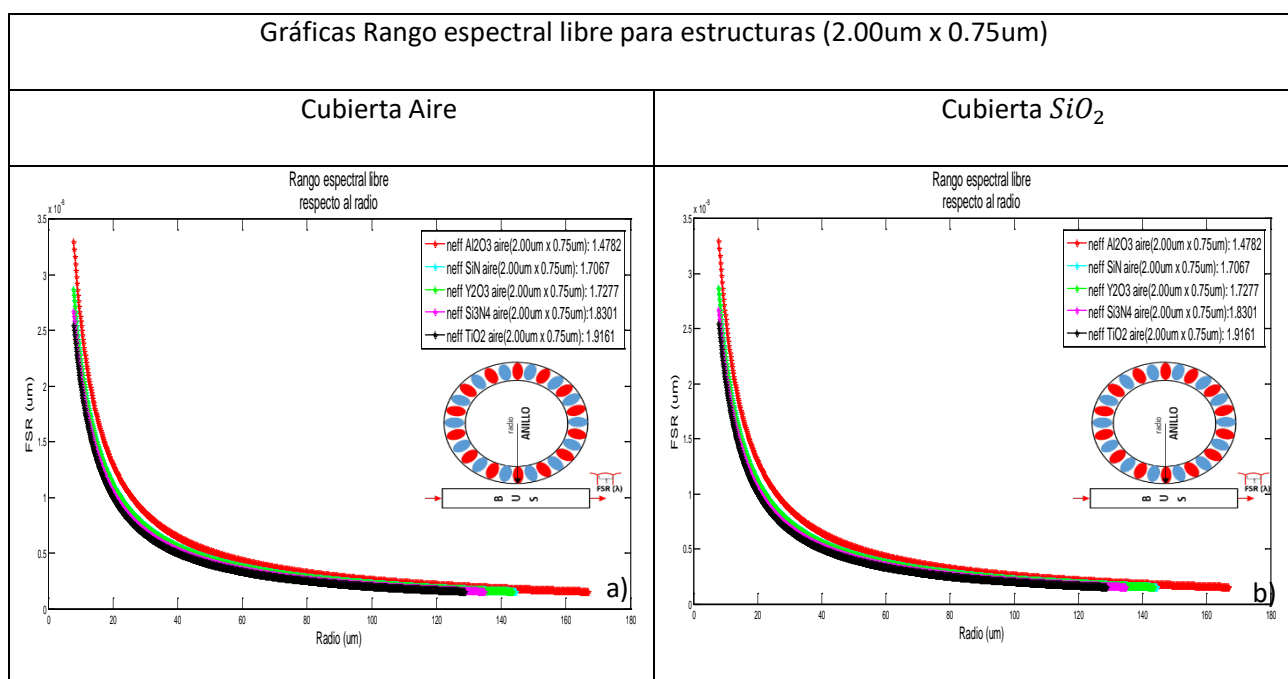


Figura 36. Gráficas de rango espectral libre respecto al radio para una sección transversal (2.00um x 0.75um). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

En las cuatro Gráficas se puede observar que tiene una tendencia de hipérbola de decremento, al aumentar el radio el FSR comienza a disminuir. Se puede observar en las gráficas en los casos extremos de los materiales de índice de refracción menor y mayor en este caso Al_3O_2 y TiO_2 , la tendencia de los valores del Al_3O_2 , están más dispersos en comparación de los de TiO_2 , pero al aumentar el índice efectivo de estos dos materiales, los puntos están menos dispersos. Entonces los materiales que tienen un índice de refracción menor, presentan un rango espectral libre en términos de longitud de onda mayor a los que tienen un índice de refracción mayor.

Los materiales sumergidos en SiO_2 presentan igual un radio menor para alcanzar un FSR menor a comparación de las estructuras que se encuentran con cubierta de aire. Haciendo una comparación igual en las estructuras que presentan un área de sección de transversal mayor proveniente de la guía, tienen un FSR menor respecto a las estructuras con un área transversal menor.

Por lo que al aumentar el índice de refracción efectivo se necesita un radio menor para tener un valor de FSR chico en comparación de las estructuras que presentan un índice de refracción efectiva menor. A continuación, se presenta el valor exacto de FSR para cada sección transversal, para un radio de 60um en la tabla 6:

Tabla 6. Rango espectral libre para radio 60um. □ Cubierta de aire. ■ Cubierta de SiO_2 . ■ Valores en amarillo no existe confinamiento modal.

Rango espectral libre en longitud (m)						
Materiales	(1.00 um x 0.50 um)	(1.50 um x 0.50 um)	(2.00 um x 0.50 um)	(1.00 um x 0.75 um)	(1.50 um x 0.75 um)	(2.00 um x 0.75 um)
Al_2O_3	4.466E-9	4.593E-9	4.436E-9	4.459E-9	4.373E-9	4.311E-9
Al_2O_3	4.376E-9	4.330E-9	4.300E-9	4.315E-9	4.250E-9	4.214E-9
SiN	4.183E-9	3.995E-9	3.925E-9	3.976E-9	3.797E-9	3.734E-9
SiN	4.004E-9	3.894E-9	3.846E-9	3.849E-9	3.740E-9	3.694E-9
Y_2O_3	4.135E-9	3.948E-9	3.879E-9	3.925E-9	3.750E-9	3.710E-9
Y_2O_3	3.956E-9	3.853E-9	3.806E-9	3.807E-9	3.697E-9	3.652E-9
Si_3N_4	3.901E-9	3.727E-9	3.668E-9	3.691E-9	3.536E-9	3.482E-9
Si_3N_4	3.773E-9	3.673E-9	3.459E-9	3.613E-9	3.498E-9	3.456E-9
TiO_2	3.715E-9	3.557E-9	3.501E-9	3.513E-9	3.374E-9	3.325E-9
TiO_2	3.615E-9	3.503E-9	3.459E-9	3.460E-9	3.345E-9	3.306E-9

El rango de valores que se obtienen del FSR en términos de longitud de onda, para un radio del resonador de anillo de 60 μm presentada en el capítulo 3 y a su vez para que en la misma guía de onda exista confinamiento modal son de (3.306nm – 4.373nm). En esta última tabla se puede observar que el rango espectral libre, va ser menor con estructuras que tengan un índice de refracción efectivo mayor para un radio fijo, siendo las estructuras con la mayor área transversal, sumergidas en SiO_2 y en materiales con un índice de refracción alto a comparación del sustrato y la cubierta.

4.2.3 Tiempo Transitorio en la Cavity:

En las siguientes gráficas se presentan el radio como variable independiente que se encuentran en cada material respecto a un tiempo transitorio en la cavity específico, siendo el tiempo la variable dependiente, para cada material, índice efectivo y dimensión de estructura (figura 37 y 38):

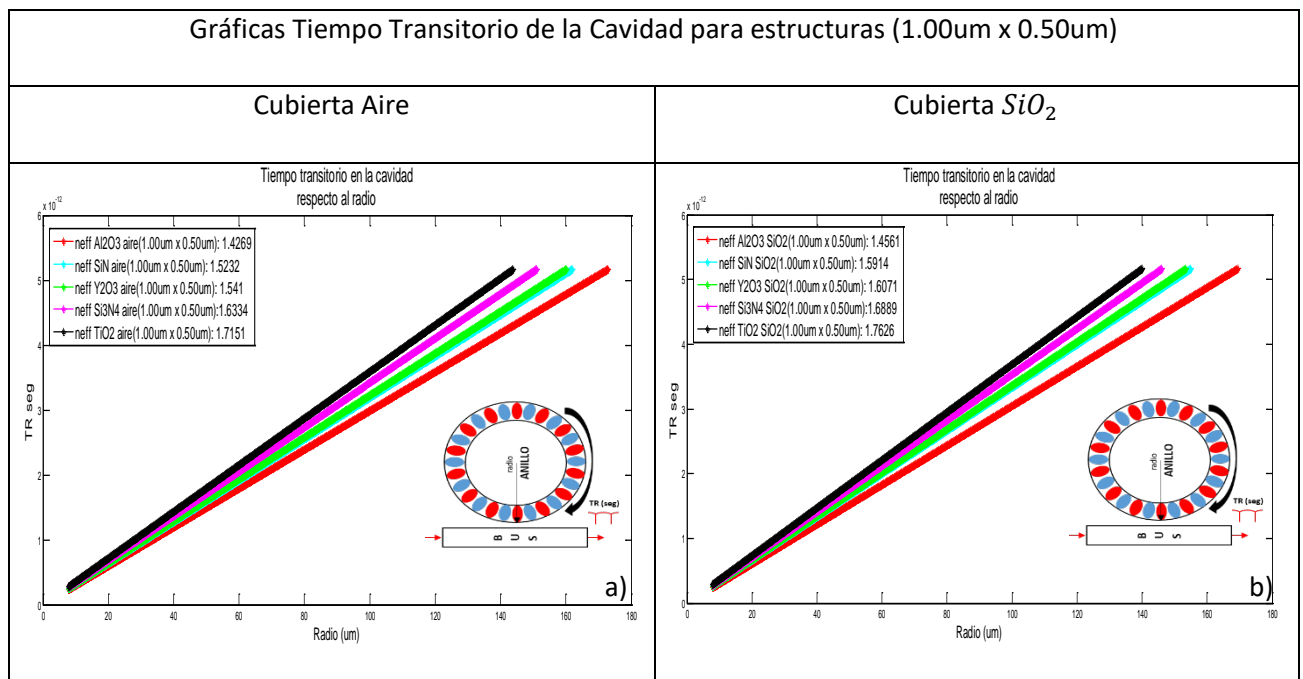


Figura 37. Gráficas de tiempo transitorios de la cavity respecto al radio para una sección transversal (1.00 μm x 0.50 μm). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

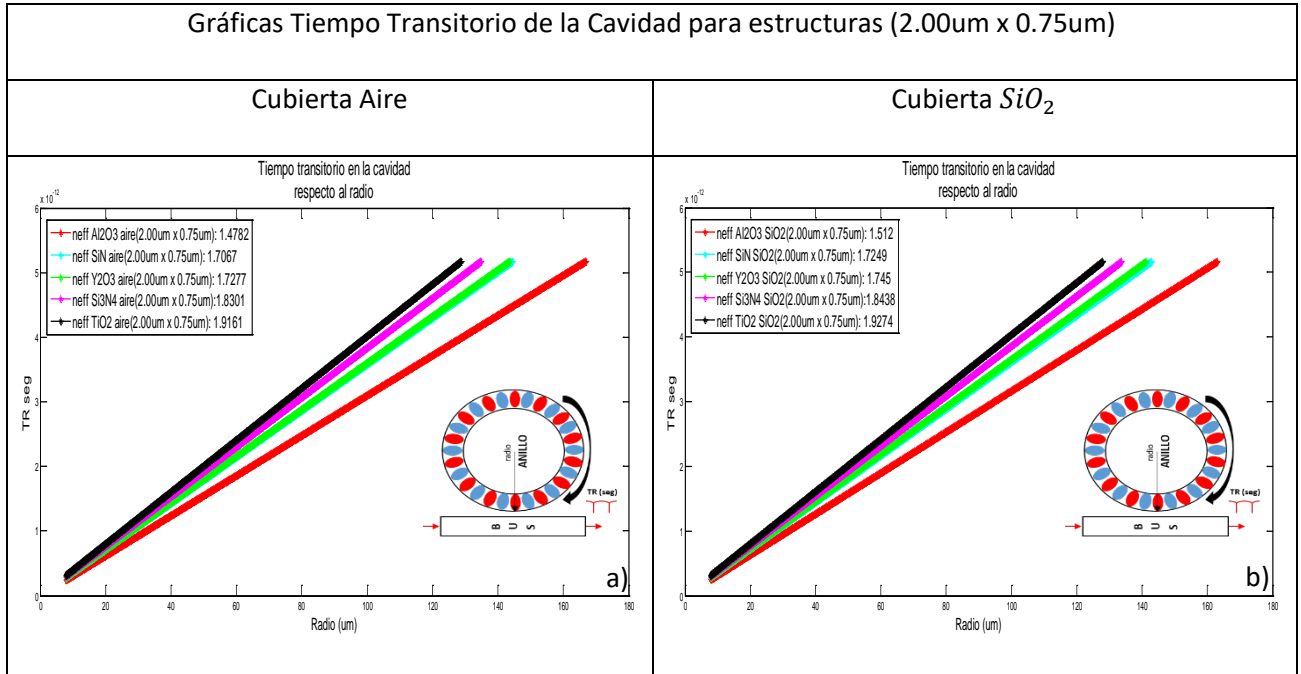


Figura 38. Gráficas de tiempo transitorios de la cavity respecto al radio para una sección transversal (2.00 μ m x 0.75 μ m). a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO₂.

En las gráficas se puede observar que tienen un comportamiento lineal al aumentar el radio de la cavity resonante, esto provoca que exista un TR mayor. Las guías que se encuentran sumergidas en SiO₂ tienen un TR mayor a los que tienen una cubierta de aire.

Las estructuras que tienen un índice de refracción mayor necesitan de un radio de anillo menor para tener un tiempo de resonancia de cavity menor, en comparación de los materiales que tienen un índice de refracción menor. Al momento de aumentar las dimensiones transversales de la guía aumenta el TR de la cavity. A continuación, se presenta el valor exacto del TR para cada sección transversal, respetando los mismos parámetros mencionados en las secciones pasadas (tabla 7):

Tabla 7. Tiempo Transitorio de la Cavity para radio 60um. □ Cubierta de aire. ■ Cubierta de SiO_2 . ■ Valores en amarillo no existe confinamiento modal.

Tiempo Transitorio de la Cavity (seg)						
Materiales	(1.00 um x 0.50 um)	(1.50 um x 0.50 um)	(2.00 um x 0.50 um)	(1.00 um x 0.75 um)	(1.50 um x 0.75 um)	(2.00 um x 0.75 um)
Al_2O_3	1.793E-12	1.7959E-12	1.8057E-12	1.7960E-12	1.8313E-12	1.8576E-12
Al_2O_3	1.8298E-12	1.8495E-12	1.8622E-12	1.8559E-12	1.8840E-12	1.9000E-12
SiN	1.9141E-12	2.0045E-12	2.0400E-12	2.0139E-12	2.1088E-12	2.1447E-12
SiN	1.9998E-12	2.0561E-12	2.0817E-12	2.0802E-12	2.1412E-12	2.1676E-12
Y_2O_3	1.9365E-12	2.0283E-12	2.0642E-12	2.0400E-12	2.1353E-12	2.1585E-12
Y_2O_3	2.0195E-12	2.0780E-12	2.1041E-12	2.1035E-12	2.1659E-12	2.1928E-12
Si_3N_4	2.0526E-12	2.1482E-12	2.184E-12	2.1693E-12	2.2647E-12	2.2998E-12
Si_3N_4	2.1223E-12	2.1801E-12	2.2168E-12	2.2165E-12	2.2888E-12	2.3170E-12
TiO_2	2.1553E-12	2.2514E-12	2.2869E-12	2.2793E-12	2.3735E-12	2.4078E-12
TiO_2	2.2149E-12	2.2859E-12	2.3149E-12	2.3145E-12	2.3935E-12	2.420E-12

En la tabla se puede observar que las estructuras que tienen un área transversal mayor y a su vez un índice de refracción mayor con una cubierta de SiO_2 tienen un tiempo de resonancia mayor en comparación de las estructuras con un área e índice de refracción menor y cubierta de aire.

4.3 Filtrado de resonancia:

En esta sección de resultados se hablará del filtrado de resonancia, es aquí donde se analiza la funcionalidad del dispositivo completo, acoplando el bus y el anillo para tener como resultado un filtrado de la señal. A continuación, se presenta como será la logística de la presentación de resultados:

- Serán un total de 10 gráficas para la sección de filtrado de resonancia, representadas por 5 tablas:
 - Cada tabla será del material del núcleo, siendo 5 materiales.
 - Aportando dos Gráficas cada materiales haciendo la comparación entre cubierta de aire y SiO_2 .

Los parámetros que representan dichas gráficas serán los siguientes:

- Variable independiente: (0 -1 .00um) con un paso de 0.1um, representando esto la variable conocida como distancia de separación.

- Variable dependiente: (0-1.00), conocido como variable de transmisión, es la variable que indica la relación en la que el haz fue filtrado del bus al anillo.

Nota: En la sección 4.1.3 se analizó la distancia en que el campo evanescente puede viajar, ahora esta distancia será relacionada como la distancia de separación. Es importante aclarar en este punto que, aunque se calculó y se esquematizó en las gráficas un rango de (0-1.00 μm) para la distancia de separación, el análisis de los resultados será a partir de las 0.4 μm esto debido a que este valor se encuentra como una limitante teórica respecto a la resolución en la fotolitografía (Girault, et al., 2015).

También se puede observar que las gráficas de filtrado coinciden con los resultados obtenidos para las estructuras analizadas en la sección 4.1.3 onda evanescente.

4.3.1 Estructura de Al_2O_3

A continuación se presentan en la figura 39 los resultados de filtrado obtenidos en todas las estructuras pertenecientes al Al_2O_3 :

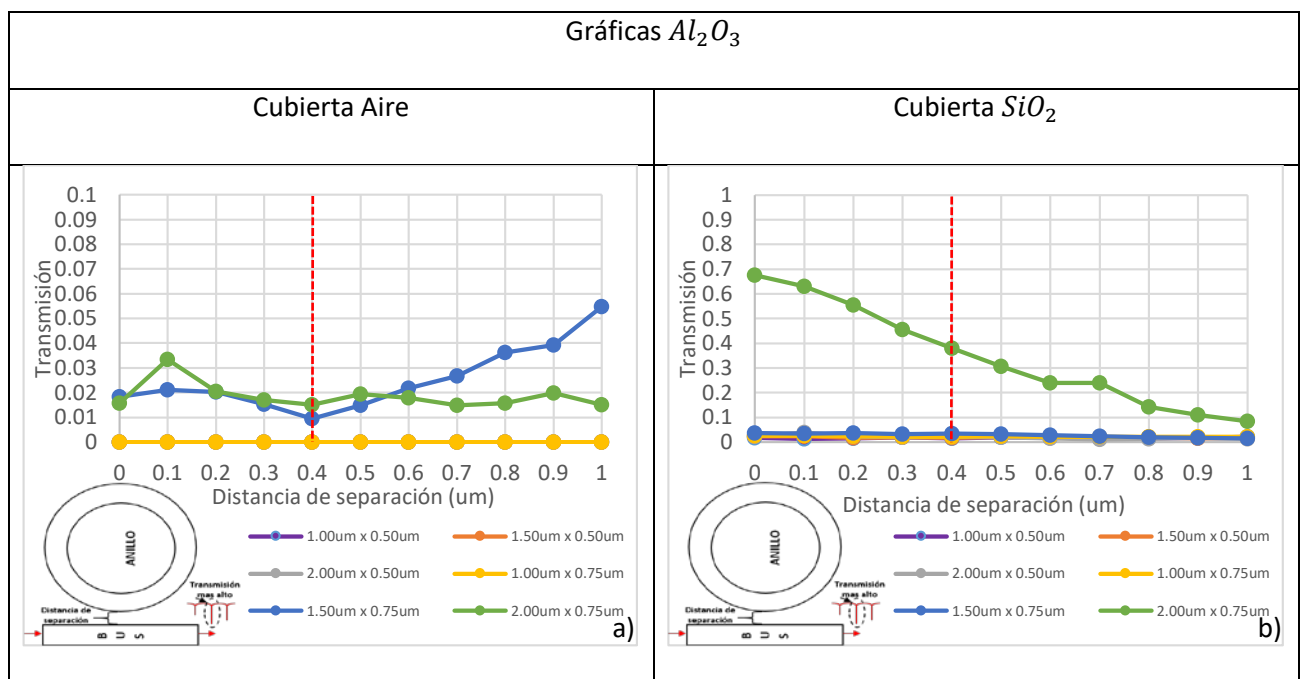


Figura 39. Gráficas de filtrado de resonancia para el material Al_2O_3 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

Para las guías de Al_2O_3 en cuestión de las estructuras con cubierta de Aire, ninguna estructura nos salió óptima, partiendo primero de que solamente las últimas dos estructuras con área transversal más grande

podía existir confinamiento modal en la guía. Pero igualmente se puede observar que en toda la distancia de separación entre el resonador de anillo y el bus de canal no se logra obtener un valor óptimo de filtrado.

Respecto al dispositivo que se encuentra sumergido no se presentó ningún valor de filtrado, hasta que no se analizó la estructura con el área más grande, alcanzando valores de filtrado de hasta el 70%, para una distancia de separación de 0um, de ahí comenzando a disminuir la transmitancia, al aumentar la separación de resonador y del bus, debido a las consideraciones fotolitográficas solo se alcanza a tener un 38% de la transmisión al resonador de anillo, por lo que la Alúmina no es conveniente en ninguna de las combinaciones estructurales para un resonador de anillo con radio de 60um.

4.3.2 Estructura de SiN

A continuación se presentan en la figura 40 los resultados de filtrado obtenidos en todas las estructuras pertenecientes al material *SiN*:

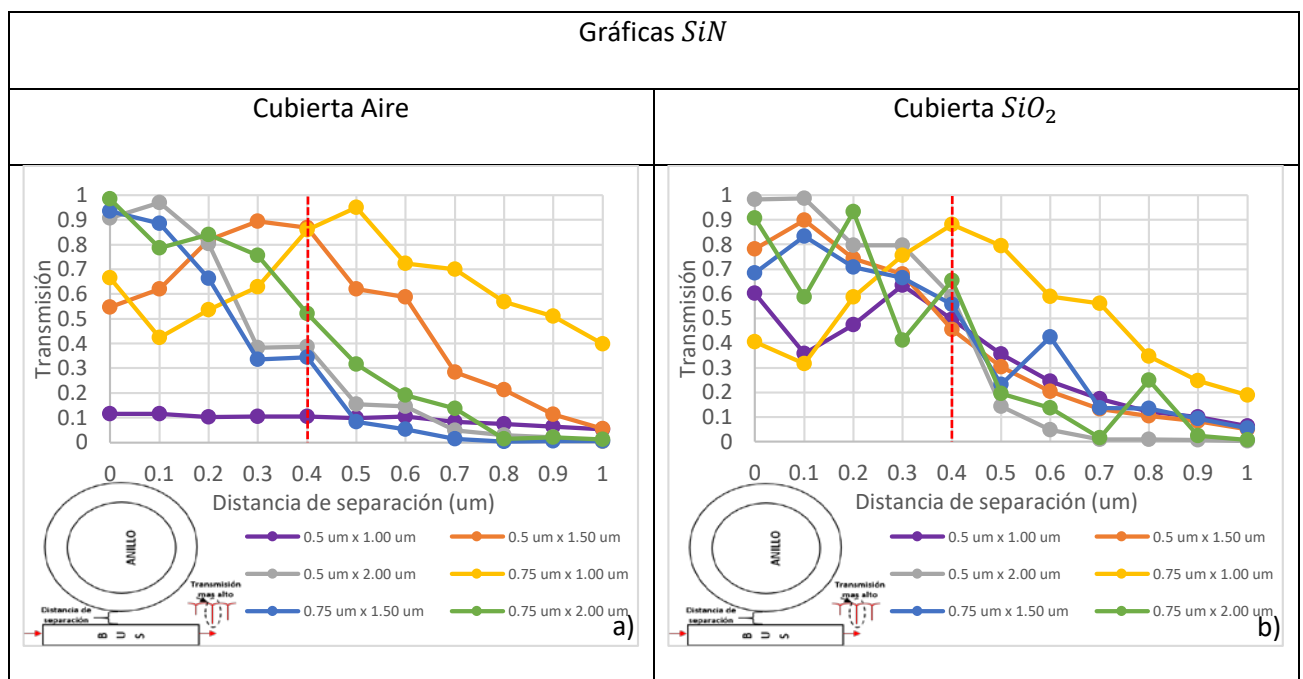


Figura 40. Gráficas de filtrado de resonancia para el material *SiN*. a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

Se puede observar que en el material de *SiN* en la mayoría de sus estructuras, se tienen valores óptimos de filtrado. A continuación se presentan las 3 mejores estructuras que tuvieron el mayor porcentaje de transmisión al resonador de anillo pertenecientes al material *SiN*, aclarando que el análisis es respetando el parámetro límite perteneciente a la fotolitografía:

1. La estructura que logró tener el mejor resultado de filtrado fue la estructura perteneciente a la sección transversal (1.00um x 0.75um), con cubierta de aire, con una distancia de separación 0.50um logrando un 95% de trasmisión.
2. En segundo lugar se encuentra la guía de onda de canal con la misma sección transversal en el punto anterior pero con cubierta SiO_2 y con una separación de 0.40um para tener un 89% de trasmisión.
3. En el tercer puesto se tiene la guía de onda de canal con la sección transversal (1.50um x 0.50um), con cubierta de aire y con una separación de 0.40um para tener una trasmisión del 86.5%, teniendo un valor casi igual de trasmisión la estructura (0.75um x 1.00um) con cubierta de aire.

Se puede observar que para este material la estructura que se mantiene con una trasmisión alta y constante es la estructura (1.00um x 0.75um) sin importar que se tenga una cubierta de aire o SiO_2 .

4.3.3 Estructura de Y_2O_3

A continuación se presentan la figura 41 los resultados de filtrado obtenidos en todas las estructuras pertenecientes al Y_2O_3 :

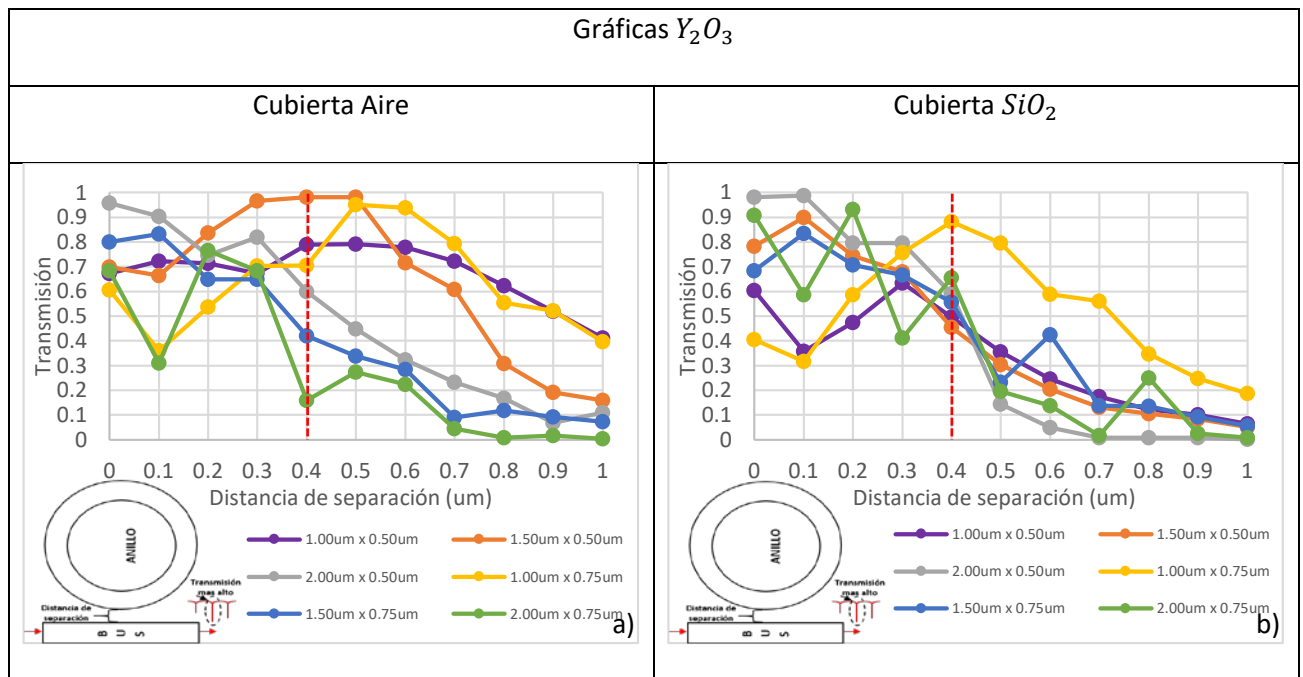


Figura 41. Gráficas de filtrado de resonancia para el material Y_2O_3 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

Ahora analizando las estructuras de Y_2O_3 se puede apreciar una cantidad mayor de estructuras que comparten un efecto mayor de filtrado en estructuras que tienen un área menor de sección transversal de área. A continuación, se presentarán las estructuras con el mayor filtrado de señal al anillo resonante:

1. La configuración con la sección transversal (1.50um x 0.5um) con cubierta de aire con una distancia de separación de 0.4um ocupa el primer lugar con el mejor valor de filtrado, obteniendo un 98% de transmisión.
2. En segundo lugar, de filtrado con un valor del 96 % de filtrado lo tiene la misma estructura que la de primer lugar, solo que difiere en una distancia de separación de 0.4um.
3. En tercer lugar, con un valor de filtrado del 95% lo tiene la guía de onda de canal que tiene una sección transversal (1.00um x 0.75um), con cubierta de aire y una distancia de separación de 0.5um.

Para este material la cubierta que obtuvo un mejores resultados de filtrado fue la del aire a comparación del SiO_2 . Lo que se puede hablar que el porcentaje más alto de transmisión alcanzado por una estructura con cubierta SiO_2 sería la guía de onda que tiene una sección transversal de (1.00um x 0.75um) y una distancia de separación de 0.4um logrando un 89% de filtrado. En general siendo las mejores estructuras (1.50um x 0.5um) y (1.00um x 0.75um), presentando una tendencia más estable para la cubierta Aire y para SiO_2 sería la estructura de (1.00um x 0.75um).

4.3.4 Estructura de Si_3N_4

A continuación se presentan en la figura 42 los resultados de filtrado obtenidos en todas las estructuras pertenecientes al Si_3N_4 :

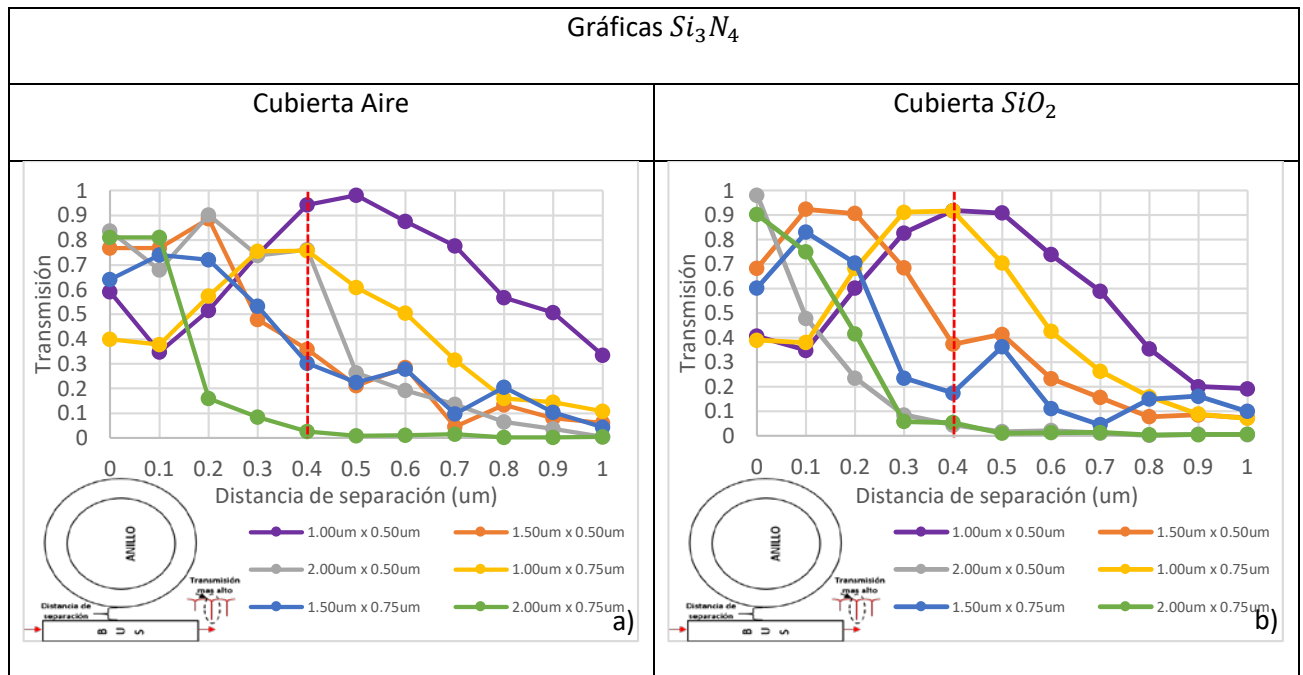


Figura 42. Gráficas de filtrado de resonancia para el material Si_3N_4 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

En este material se puede observar que la distribución de las gráficas ha cambiado, sabiendo que el índice de refracción del compuesto es de 2.00 en la longitud de onda de 1.55 μm . A continuación, se presentan las 3 estructuras con las mejores transmisiones:

1. En primer lugar, se encuentra la guía de onda de canal que tiene una sección transversal de (1.00 μm x 0.50 μm) con cubierta de aire, con una distancia de separación de 0.50 μm representando una transmisión al resonador de anillo del 98%.
2. En el segundo lugar se encuentra la misma guía de onda de canal que en el primer lugar, pero con la diferencia que tiene una distancia de separación de 0.40 μm con un valor de filtrado del 94%.
3. Para el tercer lugar se encuentra con un empate de dos estructuras la cual tienen una sección transversal de (1.00 μm x 0.50 μm) y (1.00 μm x 0.75 μm) siendo lo único que difiere entre las estructuras, ya que ambas presentan una cubierta de SiO_2 y una distancia de separación de 0.4 μm teniendo una transmisión del 92%.

Se puede observar que para este material la estructura que más transmisión tiene como resultado fue la guía de onda de canal con una sección transversal de (0.50 μm x 1.00 μm), siendo a su vez la gráfica de la estructura con el mejor valor estable de filtrado, esto para una estructura sumergida y no sumergida.

4.3.5 Estructuras de TiO_2

Por último en la figura 43 los resultados de filtrado obtenidos en todas las estructuras pertenecientes al TiO_2 :

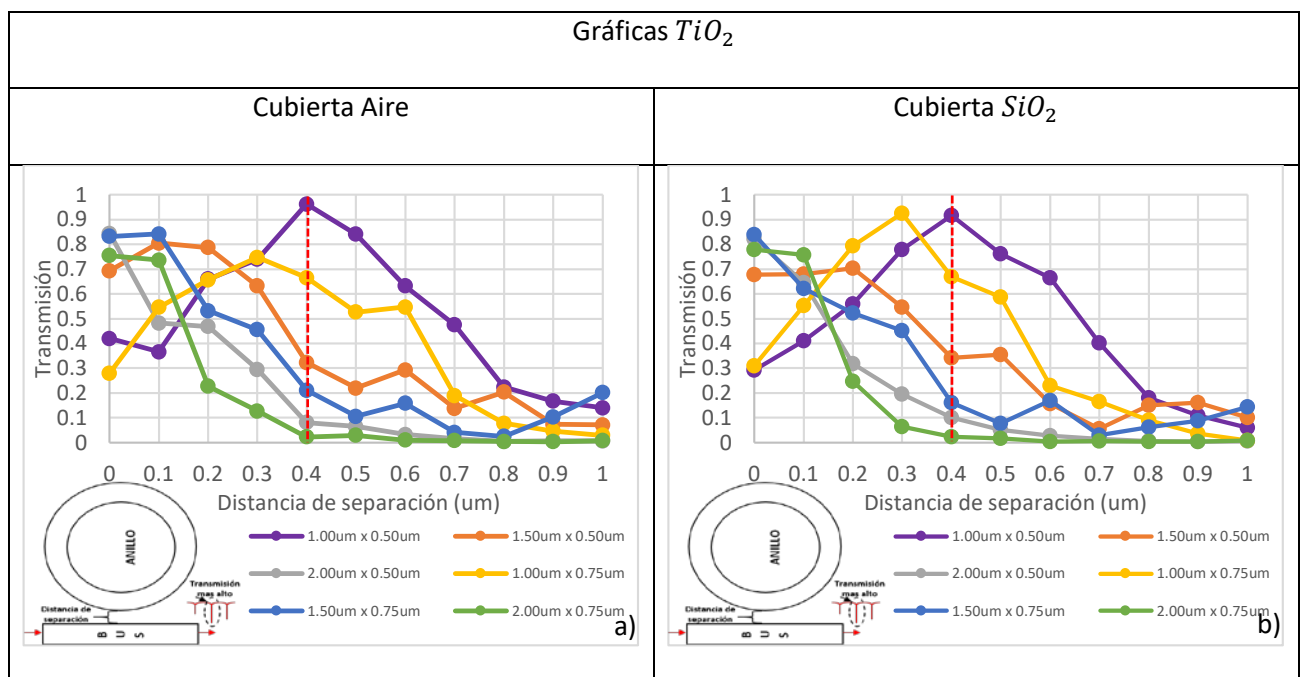


Figura 43. Gráficas de filtrado de resonancia para el material TiO_2 . a) Estructuras con cubierta de aire. b) Estructuras con cubierta de SiO_2 .

Por último tenemos las estructuras de TiO_2 que tienen un valor de índice de refracción de 2.085, siendo el compuesto con el índice de refracción más alto analizado en este trabajo. Igual que en las subsecciones pasadas se analizará las 3 combinaciones estructurales que dieron los valores más altos de transmisión:

1. Teniendo el primer puesto la estructura con una sección transversal de (1.0um x 0.50um) con cubierta de aire y una distancia de separación de 0.4um, logrando un valor de transmisión del 96%.
2. En segundo lugar se encuentra la estructura que tiene una sección transversal igual que la del primer puesto, teniendo una cubierta de SiO_2 y una distancia de separación igual, logrando un valor de transmisión del 92%.
3. En tercer lugar, se encuentra la estructura con la misma sección transversal que la de los dos puestos anteriores, teniendo una cubierta de aire y una distancia de separación del 0.5um, logrando un valor de transmisión del 85%.

Se puede observar que en los 3 primeros puestos la estructura que tiene la sección transversal más pequeña se lleva los valores de mejor transmisión de todas y a su vez la que tiene la distancia de separación más pequeña respetando el caso limite, es la que tiene el mejor filtrado de todas combinaciones. Coincidiendo de que el material con el mayor valor de índice de refracción permitirá tener una estructura con una mejor miniaturización para un valor alto de filtrado, para los casos de sumergido y no sumergido.

4.3.6 Comparación estructural de todos los materiales:

A continuación, se presentan los resultados de filtrado completos para las estructuras que tuvieron mejor transmisión para el material analizado, esto quiere decir que se hablara del valor de filtrado respecto a todo el ancho de banda completo (1.530um-1.570um) suministrado al dispositivo.

A continuación se muestra el análisis del dispositivo para el material Al_2O_3 , con su Gráfica de filtrado (figura 44)

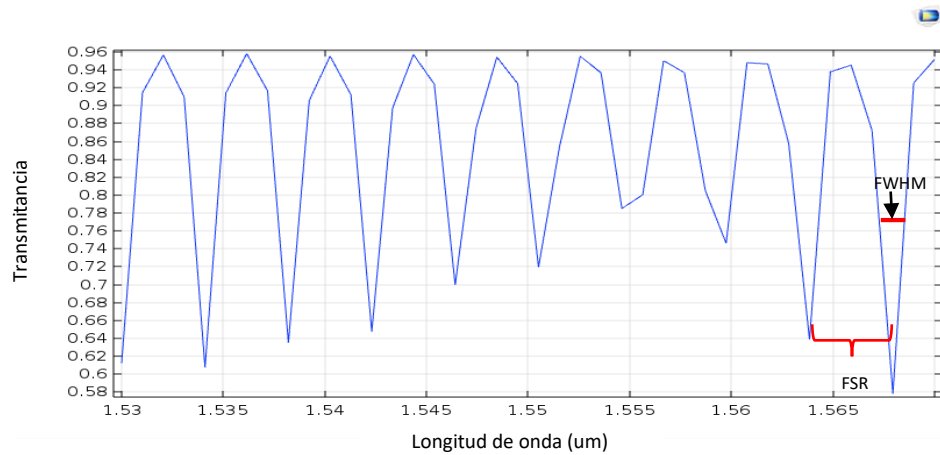


Figura 44. Gráfica de filtrado con ancho de banda completo para el material Al_2O_3 , con una sección transversal ($2.00\mu m \times 0.75\mu m$), con cubierta de SiO_2 , una distancia de separación de $0.4\mu m$ y un radio del anillo de $60\mu m$.

Para el Al_2O_3 se pueden observar 10 picos de filtrado con un valor de transmisión similar para cada pico. En donde se encuentra el pico de filtrado con mayor valor de transmisión es en la longitud de onda de $1.567\mu m$, logrando un valor del 38% de transmisión. A continuación, se presentan los valores espectrales de esta estructura pertenecientes a la tabla 8:

Tabla 8. Valores espectrales pertenecientes a la estructura de material Al_2O_3 , con una sección transversal ($2.00\mu m \times 0.75\mu m$), con cubierta de SiO_2 , una distancia de separación de $0.4\mu m$ y un radio del anillo de $60\mu m$.

Valores espectrales			
FSR	FWHM	Fineza	Q-factor
4.214nm	1.40nm	3.010	1119.28

La siguiente estructura a analizar es para el material SiN (figura 45).

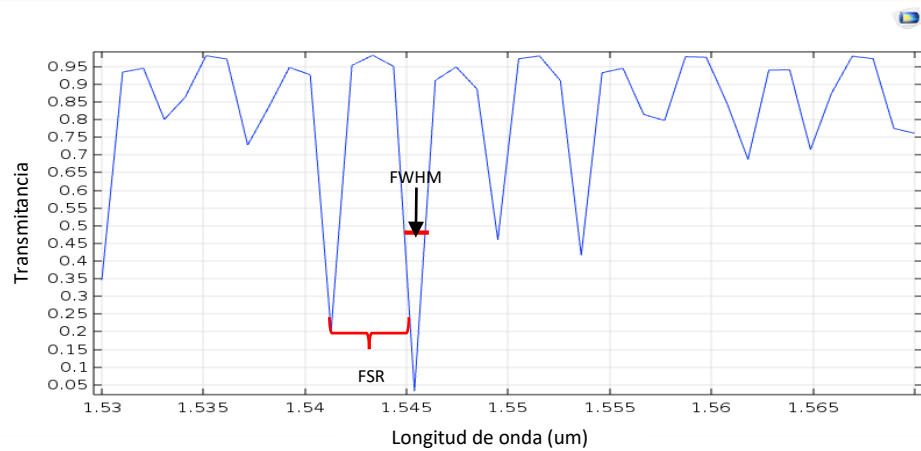


Figura 45. Gráfica de filtrado con ancho de banda completo para el material SiN , con una sección transversal ($1.00\mu m \times 0.75\mu m$), con cubierta de aire y con distancia de separación de $0.5\mu m$ y un radio del anillo de $60\mu m$.

Para la estructura perteneciente a SiN se puede observar 11 picos de filtrado, con diferentes valores de transmisión cada pico. En la longitud de onda donde se encuentra el pico más pronunciado es de $1.546\mu m$, logrando un 95% de transmisión. En la tabla 9 se aprecian los valores espectrales de esta estructura:

Tabla 9. Valores espectrales pertenecientes a la estructura de material SiN , con una sección transversal ($1.00\mu m \times 0.75\mu m$), con cubierta de aire, una distancia de separación de $0.5\mu m$ y un radio del anillo de $60\mu m$.

Valores espectrales			
FSR	FWHM	Fineza	Q- factor
3.976nm	1.03nm	3.8601	1500

Ahora se puede analizar el dispositivo perteneciente al material Y_2O_3 y su Gráfica (figura 46).

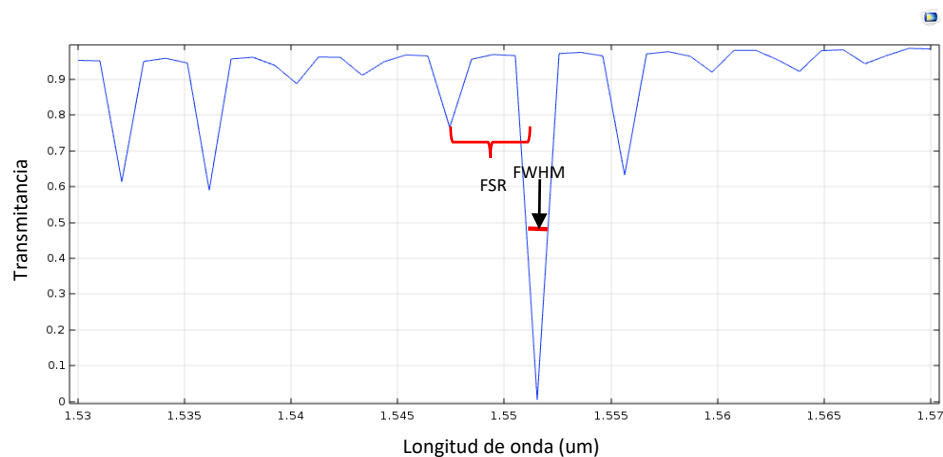


Figura 46. Gráfica de filtrado con ancho de banda completo para el material Y_2O_3 , con una sección transversal ($1.50\mu m \times 0.50\mu m$), con cubierta de aire y una distancia de separación de $0.4\mu m$ y un radio de anillo de $60\mu m$.

Se pueden apreciar 10 picos de transmisión, pero la mayoría de los picos no tienen un valor tan alto de transmisión como en los otros dos materiales. En la longitud de onda en la que se encuentra el pico con el valor más alto de filtrado es en 1.552 μm , con un valor del 98% de transmisión al anillo. La tabla 10 hablar de los valores espectrales pertenecientes a la estructura.

Tabla 10. Valores espectrales pertenecientes a la estructura de material Y_2O_3 , con una sección transversal (1.50 μm x 0.50 μm), con cubierta de aire, una distancia de separación de 0.4 μm y un radio del anillo de 60 μm .

Valores espectrales			
FSR	FWHM	Fineza	Q-factor
3.948nm	0.95nm	4.155	1633

A continuación se presenta la estructura perteneciente al material Si_3N_4 y su Gráfica (figura47).

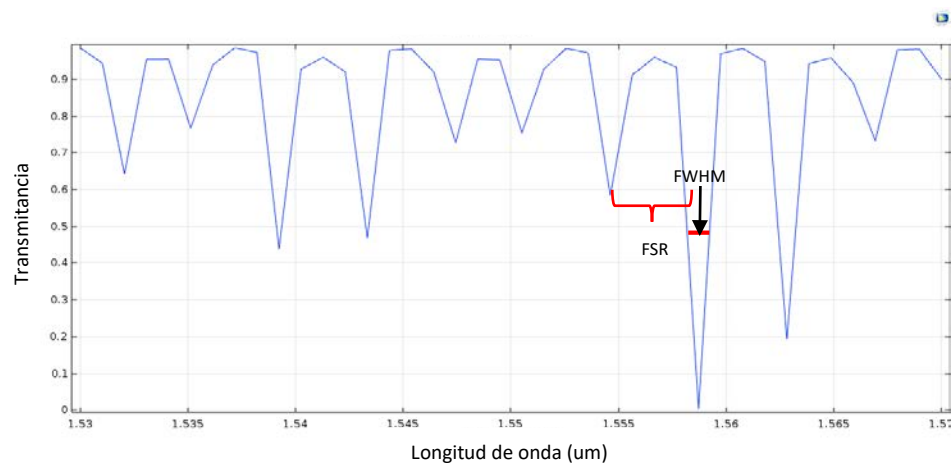


Figura 47. Gráfica de filtrado con ancho de banda completo para el material Si_3N_4 , con una sección transversal (1.00 μm x 0.50 μm), con cubierta de aire y una distancia de separación de 0.5 μm y un radio del anillo de 60 μm .

Para este material se puede apreciar 10 picos de filtrado en todo el ancho de banda, a comparación del Y_2O_3 , aquí se puede apreciar que los demás picos de filtrado tienen valores más altos de transmisión. La señal filtrada con mayor valor de transmisión siendo un 98% se encuentra en la longitud de onda de 1.558 μm . La tabla 11 contiene los valores espectrales de esta configuración.

Tabla 11. Valores espectrales pertenecientes a la estructura de material Si_3N_4 , con una sección transversal (1.50 μ m x 0.50 μ m), con cubierta de aire, una distancia de separación de 0.5 μ m y un radio del anillo de 60 μ m.

Valores espectrales			
FSR	FWHM	Fineza	Factor de calidad
3.901nm	0.93nm	4.194	1675

Por último se presenta el análisis de la configuración perteneciente al TiO_2 y su Gráfica (figura 48).

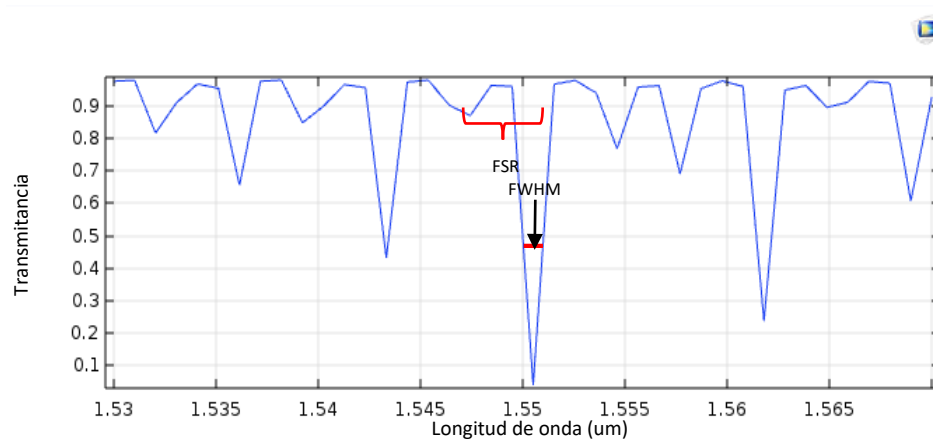


Figura 48. Gráfica de filtrado con ancho de banda completo para el material TiO_2 , con una sección transversal (1.00 μ m x 0.50 μ m), con cubierta de aire y una distancia de separación de 0.4 μ m y un radio del anillo de 60 μ m.

Se pueden apreciar 11 secciones donde comienza existir presencia de filtrado de la señal. El pulso de filtrado más pronunciado tiene un valor del 96% de transmisión y se encuentra ubicado en la longitud de onda de 1.556 μ m. A continuación se presentan los valores espectrales del material TiO_2 en la tabla 12.

Tabla 12. Valores espectrales pertenecientes a la estructura de material TiO_2 , con una sección transversal (1.00 μ m x 0.50 μ m), con cubierta de aire, una distancia de separación de 0.4 μ m y un radio del anillo de 60 μ m.

Valores espectrales			
FSR	FWHM	Fineza	Factor de calidad
3.715nm	0.91nm	4.082	1709.89

A continuación, se presentan en la tabla 13 las mejores estructuras para cada uno de los materiales, respetando el caso límite de la fotolitografía propuesto en la misma subsección y a su vez una recopilación de los valores espectrales calculados con anterioridad:

Tabla 13. Las mejores estructuras de cada material para el valor más alto de filtrado y sus valores espectrales.

Material	Índice de refracción	Ancho	Espesor	Cubierta	Separación	Transmisión	FSR (nm)	FWHM(nm)	Fineza	Q-factor
Al_2O_3	1.6267	2.00um	0.75um	SiO_2	0.4um	38%	4.214	1.40	3.010	1119
SiN	1.876	1.00um	0.75um	Aire	0.5um	95%	3.976	1.03	3.860	1500
Y_2O_3	1.8973	1.50um	0.50um	Aire	0.4um	98%	3.948	0.95	4.155	1633
Si_3N_4	2.00	1.00um	0.50um	Aire	0.5um	98%	3.901	0.93	4.194	1675
TiO_2	2.085	1.00um	0.50um	Aire	0.4um	96%	3.715	0.91	4.082	1709

Se puede observar que mientras más grande sea el índice de refracción a un radio del resonador fijo, el FSR y el FWHM son mayor, a su vez representa que la fineza y el factor de calidad sean menor.

El material Al_2O_3 presenta los peores valores de transmisión teniendo solamente un 38% de la señal, teniendo un valor de FSR y FWHM mayor, una fineza menor y un factor de calidad menor, lo que estos últimos dos indicadores son de suma importancia porque indica lo delgado que es el pulso, cuyo objetivo principal de un filtro es que el pulso sea lo más delgado “fino” y que presente un calidad el pulso, por lo que la alúmina es el material menos recomendado para un diseño de un resonador de anillo, para las condiciones que se tomaron en este trabajo de investigación.

Al subir el valor de índice de refracción se puede observar que el área de la sección transversal comienza a disminuir para obtener un valor alto de filtrado de la señal, siendo TiO_2 el material con el espesor, el ancho y una distancia de separación más corta de todas con un valor del 96 % del filtrado, logrando también que tenga los valores espectrales más sobresalientes, teniendo el menor FSR, el menor FWHM ocasionando esto que tenga una fineza alta y el factor de calidad más alto de todos los materiales.

Capítulo 5. Conclusiones

En esta tesis se estudió la simulación de diferentes estructuras de resonadores de anillos ópticos de guías de onda ópticas, usando diferentes materiales de índice de refracción que se han sintetizado en las instalaciones CNYN-UNAM, CICESE y a su vez de manera comercial. El trabajo comprendió del análisis de las guías de onda canal, análisis de la distribución del campo evanescente del Bus, un estudio de las características espectrales del anillo resonador y por último la simulación óptica de filtrado para cada una de las estructuras. Por lo que las conclusiones del presente trabajo son:

1. Para guías de onda de canal:

La tendencia del índice efectivo igual que el Factor de Confinamiento Modal para una guía de onda de canal es aumentar en cuestión de materiales que tengan un índice de refracción alto, a su vez de que el dispositivo se encuentre sumergido y de incrementar el ancho y el espesor de la guía, en otras palabras, al aumentar el área de la sección transversal, logrando con todo esto una mejor miniaturización para las guías de onda canal en nuestro dispositivo. Siendo la guía de onda de canal con las dimensiones (2.00um x 0.75 um) de TiO_2 con cubierta de SiO_2 la combinación con el índice de refracción efectiva y factor de confinamiento mayor a comparación de los demás dispositivos. Para trabajo futuro sería bueno en hacer simulaciones de rugosidad, en estructuras basados en materiales policristalinos e impurezas orgánicas de carbono para generar pautas para pruebas de laboratorio.

2. Para la distribución del campo evanescente:

Como opuesto al punto anterior, existe mayor presencia de onda evanescente en las estructuras que tienen un área de sección trasversal menor, que las guías sean de materiales con índices de refracción bajos pero la cubierta tiene que seguir siendo de SiO_2 , pero en la estructura debe seguir existiendo la consideración de confinamiento modal. Entonces la guía de onda de canal con las dimensiones (1.00um x 0.50um), de material Al_2O_3 y sumergidas en SiO_2 es la estructura que más propagación de onda evanescente tiene de todas las combinaciones de los dispositivos. Para futuros trabajos sería importante hacer el análisis de la onda evanescente en toda área donde se encuentra la onda evanescente y no solamente de una sola dimensión.

3. Teoría de resonancia:

3.1 Para modos longitudinales:

A mayor índice de refracción del material se podrá soportar más modos para un radio menor perteneciente del anillo a comparación de materiales que tengan un índice de refracción menor. Las

estructuras sumergidas tienen un aumento de modos longitudinales en un radio específico a comparación de las cubiertas que tienen aire, provocando esto que en las cubiertas de SiO_2 necesiten un menor radio para abarcar más modos longitudinales. Mientras más grande sea el resonador de anillo más modos longitudinales podrá propagar la estructura. Esto significa que en sí los materiales que tengan un índice efectivo mayor necesita una menor área para propagar más modos longitudinales. Los rangos de valores de modos longitudinales son de 46 – 61 para un radio de anillo de 60um, para las secciones transversales propuestas y que cumplan con un factor de confinamiento modal.

3.2 Rango espectral libre (FSR):

Mientras más chico sea FSR, se va a obtener mayores pulsos de filtrado en un ancho de banda. A mayor índice de refracción menor será el FSR, obteniendo este que existan más pulsos del filtrado para un flujo de ancho de banda. Para un área de sección transversal mayor se va a obtener un FSR menor a comparación de un área de sección transversal chica. El rango de valores del FSR son de (3.306nm – 4.373nm) para un radio de anillo de 60um, esto aplica en las secciones transversales propuestas y que exista factor de confinamiento modal.

3.3 Tiempo Transitorio de la Cavity (TR):

Si se aumenta el radio de la cavidad resonante “el anillo”, se va a obtener un TR mayor. Los dispositivos que sean de un material con un índice de refracción mayor tendrán un TSR mayor. Estructuras sumergidas en SiO_2 tienen TR mayor a las guías que tienen una cubierta de aire. El aumentar el área de la sección transversal trae consigo un mayor retardo del pulso en avanzar por la cavidad. Por lo tanto, las guías que tienen un índice de refracción efectiva mayor van a tener un tiempo de resonancia en la cavidad mayor a comparación de las guías que tienen un índice efectivo menor. El Rango de valores del TR son de ($1.829E - 12 \text{ seg} - 4.42E - 12 \text{ seg}$) para un radio de anillo de 60um, esto aplica en las secciones transversales propuestas y que exista factor de confinamiento modal.

3.4 Para FWHM:

Los materiales que tienen un índice de refracción bajo y poco valor de transmisión en la filtración se van a tener un FWHM mayor, buscando materiales con índices de refracción altos en el resonador de anillo para que el pulso de filtrado no pierda su integridad de pulso y sea más delgado dicho pulso. Para trabajo futuro sería bueno poder calcular de manera teórica el FWHM en la plataforma COMSOL y/o en MATLAB, para poder coincidir los valores teóricos con los valores simulados o fabricados. Para los mejores estructuras de cada material dio un rango de (1.40nm -0.91nm) para el FWHM, siendo pulsos muy delgados en general, pero llevándose el FWHM más pequeño el material TiO_2 .

3.6 Para Fineza y Factor de Calidad (Q-factor):

La fineza y el factor de calidad son parámetros muy importantes para el resonador de anillo, esto indica que tan delgado va ser el pulso filtrado, que es el mayor objetivo para dispositivos de filtrado, que cada pulso sea lo más fino y el factor de calidad indica igual la calidad de la señal de filtrada. La fineza y el factor de calidad son grandes cuando el material del índice de refracción es alto, llevándose en esta categoría los mejores valores de fineza y de calidad el TiO_2 y siendo la alúmina el menor. Dando un rango de Fineza de (3.010-4.194) y de factor de calidad (1119-1709), siendo buenos valores de factor de calidad comparando que los resonadores con los valores más altos de factor de calidad andan rondando 5200 (Cheng, et al. 2017), con radios mucho más grandes a comparación del radio empleado de 60um para este trabajo de diseño. Para trabajo futuro sería bueno emplear radios más grandes, para poder observar como varia los valores espectrales del resonador de anillo de una manera más amplia.

4. Para Filtrado de resonancia:

El material que presento valores menores de filtrado fue el Al_2O_3 , siendo el material con el menor índice de refracción siendo no adecuado de analizar debido a que gran parte de sus estructuras ni si quiera existía el confinamiento modal. Al ir analizando cada material representando un orden ascendente respecto al índice de refracción, se logró la presencia que al aumentar el índice de refracción se obtenían mejores resultados de transmisión en áreas de sección transversal menores y una separación entre anillo y bus más pequeña, siendo el TiO_2 el material con la relación mejor de miniaturización y desempeño de filtrado. Para futuros trabajos se necesita la fabricación obligatoria del dispositivo para coincidir resultados teóricos con resultados de aplicación, fabricación y experimentación.

Durante el presente trabajo de tesis se encontró viable el diseño de resonadores de anillo de guías de onda ópticas basadas en materiales dieléctricos, siendo el SiN , Y_2O_3 , Si_3N_4 y TiO_2 materiales buenos para ser fabricados en resonadores de anillo, el único que se puede exceptuar sería Al_2O_3 . De todos los materiales analizados se puede decir que el mejor fue TiO_2 esto debido a que es el material que presenta el mayor índice de refracción de los seleccionados, desempeñando una miniaturización mejor valores espectrales mejores que el del resto, por lo que se tiene una alta viabilidad de desarrollo teniendo un gran potencial en el área de telecomunicaciones ópticas dentro de micro-dispositivos. Por lo que este trabajo de tesis cumplió con el objetivo de diseñar resonadores de anillo ópticos de guías de onda ópticas, todo esto para abrir la ventana de una posible fabricación en futuros trabajos, sirviendo esta investigación como un pilar fundamental para futuras aplicaciones e innovaciones.

Literatura citada

- Bass, M., 1995. Handbook of optics. Optical Society of America (Eds.) (2nd ed). New York: McGraw-Hill, 33.3-33.5.
- Bogaerts, W. De Heyn, P. Van Vaerenbergh, T. et al. 2012 Silicon Microring resonators. Laser Photonics Rev. VOL.6, (1), 47-73.
- Cheng, X. Hong, J. Spring, A. Yokoyama, S. 2017. Fabrication of a high-Q factor ring resonator using LSCVD deposited Si_3N_4 . OPTICAL MATERIALS EXPRES. Vol 7, (7), 2182-2187.
- COMSOL, 2019. Introduction to COMSOL Multiphysics (COMSOL 5.5). 33-96.
- De los Reyes Cruz, H. 2016. Estudio de guías de onda angostas por multi-implantación de iones de plata. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 5-7.
- Giraul, P. Lorrain, N. Poffo, L. Guendouz, M. Lemaitre, J. et al. 2015. Integrated polymer micro-ring resonators for optical sensing applications. Journal of Applied Physics, American Institute of Physics (AIP), 117, (10), 12.
- Haus, H. 1984. Waves and Fields in Optoelectronics Hermann A Haus, Prentice-Hall, EEUU, 56-59.
- Heebner, J. Grover, R. Ibrahim, T. 2008 Optical Microresonators Theory, Fabrication and Applications. Springer Science & Business Media, London, 71-75.
- Hermann, D. 2018 Custom PDK: Ring Resonator PIC. SYNOPSIS Silicon to software. Diapositiva 13.
- Kawano, K., Kitoh, T. 2001. Introduction to optical waveguide analysis. John Wiley & Sons, Inc, New York, 13-18.
- Kogelnik, H. Ramaswamy, V. 1974. Scaling rules for thin-film optical waveguides, Applied Optics 13(8), 1857-1862.
- Lin, C., 2007. Foundations for guided-wave optics. John Wilery & Sons, Inc, Hoboken, 25-4.
- Lizarraga Medina, E. 2016. Estudio de guías de onda ópticas de SiO_x . Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 6-23.
- M. de Goede, M. Dijkstra, R. Obregón Núñez, E. Martínez, S. M. García-Blanco. 2018. High quality factor Al_2O_3 microring resonators for on-chip sensing applications. Proc. SPIED 10535, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXII. Vol. 10435, (04), 1-7.

- MATLAB, 2019. Mathworks. What is MATLAB? Recuperado de: <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- Packard, K. (1984). The Origin of Waveguides: A Case of Multiple Rediscovery. IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. MTT-32, (9), 961- 969.
- Rekha, R. et al. 2011. Design of MOEM Vibration Sensor Using Optical MicroRing Resonator and MicroCantilever Beam. IEEE, 978-4577-0255-6, 11, 747-751.
- Samsung. 2019. Samsung Newsroom Latinoamérica. Galaxy S10 rompe el record de ventas anticipadas en América Latina. Recuperado de: <https://news.samsung.com/latin/galaxy-s10-rompe-el-record-de-ventas-anticipadas-en-america-latina>.
- Schneider, C. Rasband, W. Eliceiri, K. 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nat Methods. 9, (7): 671-675. Doi: 10.1038/nmeth.2089.
- Sieber, T. 2012 What Is Moore's Law, And What Does It Have To Do With You? Recuperado de: <https://www.makeuseof.com/tag/what-is-moores-law-and-what-does-it-have-to-do-with-you-makeuseof-explains/>.

Anexos

Servicios solicitados al INAOE y Universidad de Dallas:

El objetivo principal de este trabajo de investigación abarcaba solamente el estudio y el diseño óptimo y miniaturizado de un resonador de anillo usando diferentes materiales, pero durante un tiempo se buscó la alternativa de poder fabricar una de las estructuras diseñadas en este trabajo de tesis, se intentó comunicar a varios lugares con poco éxito hasta que se llegó a comunicar con el INAOE y la Universidad de Texas. El equipo de trabajo se puso en contacto con ambas instituciones para encontrar una viabilidad en fabricar un juego de resonadores de anillo. Dicho esquema que se mandó a ambas instituciones es el siguiente (figura 49):

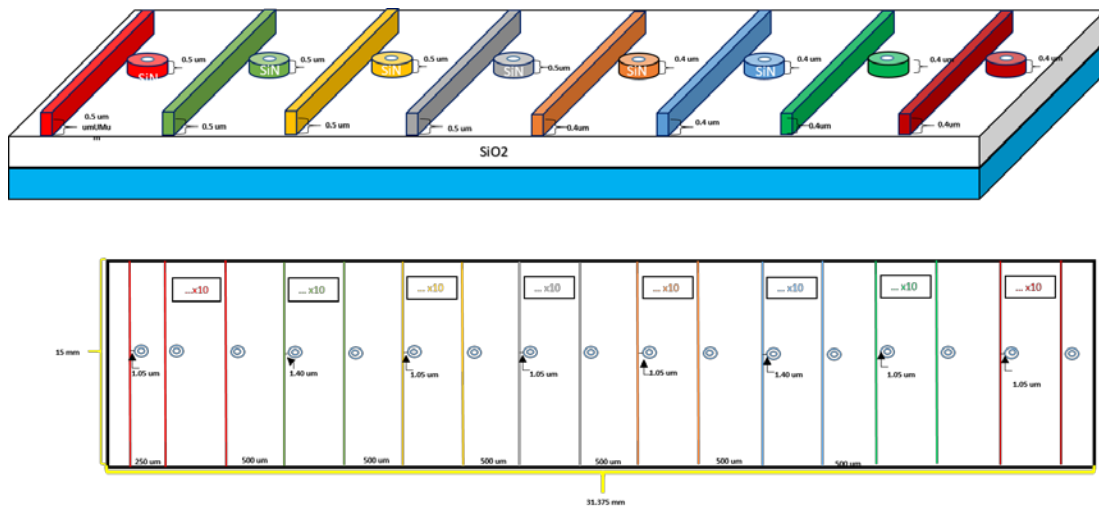


Figura 49. Esquema del juego de resonadores para fabricar en INAOE o Universidad de Dallas.

Las consideraciones del diseño eran las siguientes:

- **Familia A** – 10 resonadores ópticos: Guía angosta recta con ancho 1.10um, altura 0.5um y largo 15mm. Radio del anillo 60um, ancho del anillo 1.10um y una distancia de separación de 1.05um. La separación entre resonadores es de 250um.
- **Familia B** – 10 resonadores ópticos: Guía angosta recta con ancho 1.10um, altura 0.5um y largo 15mm. Radio de anillo 60um, ancho de anillo 1.10um y una distancia de separación de 1.40um. La separación entre resonadores es de 250um.
- **Familia C** – 10 resonadores ópticos: Guía angosta recta con ancho 1.10um, altura 0.5um y largo 15mm. Radio de anillo 50um, ancho de anillo 1.10um y una distancia de separación de 1.05um. La separación entre resonadores es de 250um. Arreglado

- **Familia D- 10** resonadores ópticos: Guía angosta recta con ancho 1.10um, altura 0.5um y largo 15 mm, Radio del anillo 60um, ancho del anillo 1.35um y una distancia de separación de 1.05um. La separación entre resonadores es de 250um.
- **Familia E** – 10 resonadores ópticos: Guía angosta recta con ancho 1.00um, altura 0.4um y largo 15mm. Radio de anillo 60um, ancho de anillo 1.00um y una distancia de separación de 1.05um. La separación entre resonadores es de 250um.
- **Familia F** – 10 resonadores ópticos: Guía angosta recta con ancho 1.00um, altura 0.4um y largo 15mm. Radio de anillo 60um, ancho de anillo 1.00um y una distancia de separación de 1.40um. La separación entre resonadores es de 250um. Rectas:
- **Familia G** – 10 resonadores ópticos: Guía angosta recta con ancho 1.00um, altura 0.4um y largo 15mm. Radio de anillo 50um, ancho de anillo 1.00um y una distancia de separación de 1.05um. La separación entre resonadores es de 250um.
- **Familia H** – 10 resonadores ópticos: Guía angosta recta con ancho 1.00um altura 0.4um y largo 15 mm, Radio del anillo 60um, ancho del anillo 1.35um y una distancia de separación de 1.05um. La separación entre resonadores es de 250um.

Nota: La separación entre familias es de 500um.

Se desarrolló este grupo especial de familia para que existiera filtrado a una distancia de separación hasta de 1.00um pero modificando la sección transversal, siendo valores diferentes a las estructuras que se vieron en este trabajo de tesis. Para la mala suerte esa distancia de separación diseñada era demasiado pequeña para el equipo que contaba instituciones, nos pedían que si pudiera ser esa distancia de separación de mínimo 2.0um, cuya distancia era demasiado y no existiera la presencia de onda evanescente en los análisis que el equipo de trabajo realizado, por lo que fue imposible fabricar este diagrama de resonadores para las instituciones.

Actualmente se está buscando fabricar dentro del CICESE, teniendo el equipo garantizado para dicha tarea que sería el equipo de litografía micro maquinado, perteneciente al mismo taller que tiene el mismo nombre, se cuenta con el equipo, pero apenas se está aprendiendo a usar por lo que pudiera llevar un poco de tiempo.

Solución al material Al_2O_3

Por parte de esta investigación se descubrió que el Al_2O_3 fue el material que tuvo menos desempeño espectral para nuestras estructuras propuestas en el equipo de trabajo, pero eso no hace que la alúmina

sea un material inservible para diseñar resonadores de anillo. El investigador M de Goede y su grupo de trabajo en el año 2018, publicaron un artículo sobre usar el resonador de anillo como una aplicación de sensado, hablando de una manera más específica para sensores libres de etiquetado. Usaron una guía de onda de canal monomodal TE, manejando una longitud de onda de 1550nm igual que en nuestro trabajo de investigación e importante en el área de las telecomunicaciones ópticas, además que la alúmina fue el material del núcleo de la guía, una sección transversal de (2.00um x 0.75um), con un substrato de SiO_2 , y una cubierta de agua, teniendo un radio de 200um, con una distancia de separación de 0.8um. Logrando un valor de factor de calidad de 3200 sin estar sumergido el dispositivo y 4500 estando sumergido en agua, siendo ambos valores superiores a nuestra mejor estructura teniendo 1700 perteneciente al TiO_2 . En la figura 50 se presenta el diseño y la fabricación del resonador de anillo hecho por el M. de Goede y su equipo de trabajo:

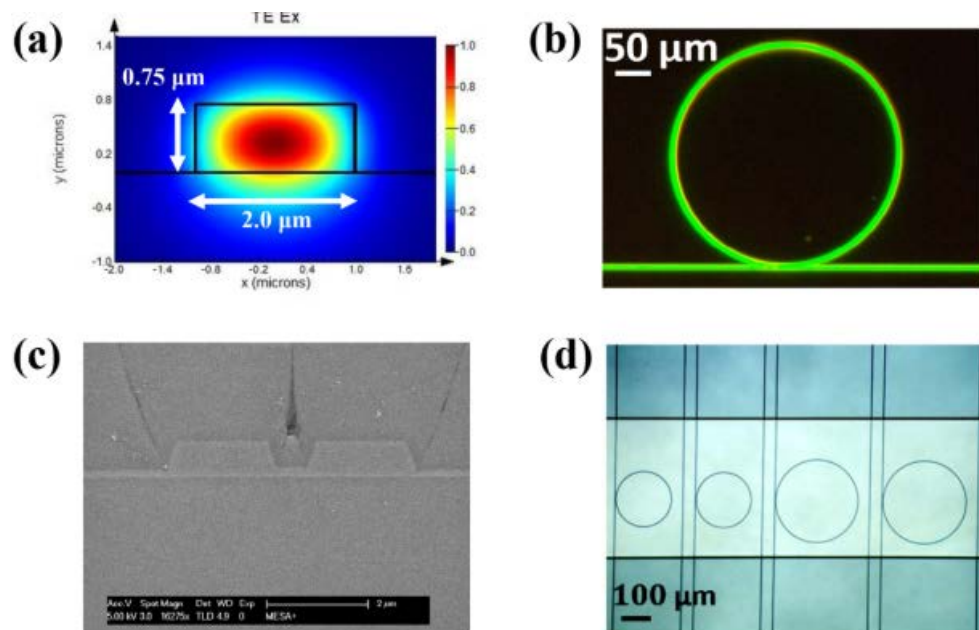


Figura 50. Diseño y fabricación del resonador de anillo de Al_2O_3 . a) Diseño de la sección transversal de la guía de onda para modo fundamental TE. b) Imagen del resonador de anillo de Al_2O_3 tomada por microscopio óptico de luz. c) Imagen de la distancia de separación entre bus y anillo, tomado por microscopio de electrónico. d) Canal de microfluídica unido al anillo resonante de alúmina. (M de Goede, et al. 2018)

En la figura 51 se puede observar las características espectrales del resonador de anillo del equipo de trabajo de M. de Goede. En el cual se puede observar muy buenos resultados de transmisión para el ancho de banda con el rango 1550nm – 1570nm. Apreciando 18 picos de filtrado.

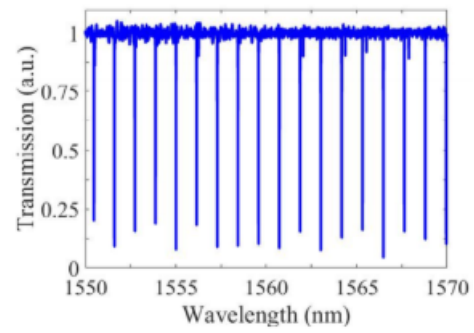


Figura 51. Caracterización espectral del resonador de anillo de alúmina (M de Goede, et al. 2018).

Entonces mientras más grande sea el radio del resonador de anillo va a tener un mejor desempeño espectral en cuestión de filtrado y haciendo que la alúmina tenga un buen desempeño de filtrado para el resonador de anillo.