

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



**Maestría en Ciencias
en Óptica con orientación en Óptica Física**

**Diseño y fabricación de acopladores ópticos integrados para
aplicaciones de procesamiento de información**

Tesis

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

Presenta:

Ferney Castro Simanca

Ensenada, Baja California, México

2021

Tesis defendida por

Ferney Castro Simanca

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Francisco Antonio Domínguez Serna

Codirector de tesis

Dr. Wencel De La Cruz Hernández

Codirector de tesis

Dra. Karina Garay Palmett

Dra. Patricia Juárez Camacho

Dr. Raúl Rangel Rojo

Dr. Anatoly Khomenko



Dra. Karina Garay Palmett

Coordinadora del Posgrado en Óptica

Dr. Pedro Negrete Regagnon

Director de Estudios de Posgrado

Ferney Castro Simanca © 2021

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 Ferney Castro Simanca como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Óptica con orientación en Óptica Física.

Diseño y fabricación de acopladores ópticos integrados para aplicaciones de procesamiento de información

Resumen aprobado por:

Dr. Francisco Antonio Domínguez Serna

Codirector de tesis

Dr. Wencel De La Cruz Hernández

Codirector de tesis

En este trabajo se estudian acopladores ópticos integrados de nitruro de silicio (Si_3N_4) sobre dióxido de silicio (SiO_2) y en un sustrato de silicio (Si) que pueden ser utilizados como divisores de potencia y separadores o mezcladores de frecuencia. Se desarrollan módulos de diseño utilizando herramientas de cómputo basadas en diferencias finitas y con éstos se estudia el efecto de las dimensiones geométricas de las guías, la longitud de onda y el contraste dieléctrico en los diseños de los acopladores. Los resultados de estos estudios muestran que son necesarias dimensiones submicrométricas de las guías de onda y la separación entre las guías, para que los acopladores puedan ser empleados en aplicaciones de fotónica integrada. Con ayuda de los módulos de diseño, se definen condiciones geométricas para las cuales las guías de onda son monomodales, bimodales y multimodales. Además, se estudian las pérdidas de potencia por propagación debidas a la curvatura de los brazos del acoplador y al acoplamiento entre modos espaciales y de polarización. De este estudio, se demuestra que se pueden escoger radios de curvatura de los brazos, para los cuales se garantice que el modo de interés llegue a la parte central del acoplador y al mismo tiempo se generen bajas pérdidas de potencia. Adicionalmente, se diseñan dos divisores de potencia 50 : 50 para una longitud de onda de $0.826 \mu\text{m}$ y un separador (mezclador) de frecuencias para las longitudes de onda $0.826 \mu\text{m}$ y $1.550 \mu\text{m}$ y se demuestra su funcionamiento simulando la propagación de luz por los dispositivos diseñados con ayuda de paquetes de Lumerical. En cuanto a la parte experimental, se desarrolla una metodología que permite fabricar estructuras de guías de onda con dimensiones submicrométricas en el Laboratorio Nacional de Nanofabricación (LaNNAFab) del Centro de Nanociencias y Nanofabricación (CNyN) que pertenece a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Por último, se fabrican acopladores ópticos integrados en fotorelina y se caracteriza su morfología con microscopía óptica y microscopía de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés). Esta caracterización muestra que los acopladores fabricados tienen dimensiones submicrométricas.

Palabras clave: Acoplador direccional, nitruro de silicio, circuito fotónico integrado

Abstract of the thesis presented by Ferney Castro Simanca as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Optics with orientation in Physical Optics.

Design and fabrication of integrated optical couplers for information processing applications

Abstract approved by:

Dr. Francisco Antonio Domínguez Serna

Thesis Co-Director

Dr. Wencel De La Cruz Hernández

Thesis Co-Director

In this work, we study integrated optical couplers of silicon nitride (Si_3N_4) on silicon dioxide (SiO_2) and on a silicon substrate (Si) that can be used as beam splitters and frequency demultiplexors or multiplexors. Design modules are developed using finite difference-based computational tools and with these, the effect of waveguide geometrical dimensions, wavelength, and dielectric contrast on the coupler designs are studied. The results of these studies show that submicrometer dimensions of the waveguides and the spacing between the waveguides are necessary for couplers to be used in integrated photonics applications. With the help of the design modules, geometrical conditions are defined for which the waveguides behave as single-mode, bimodal and multimodal. In addition, propagation power losses due to the curvature of the coupler arms and the coupling among different spatial and polarization modes are studied. From this study, it is shown that it is possible to choose arm curvature radii that guarantee that the mode of interest reaches the central part of the coupler and at the same time experiences low power losses. Additionally, two 50 : 50 beam splitters are designed at a $0.826 \mu\text{m}$ wavelength and a frequency demultiplexor (multiplexor) for $0.826 \mu\text{m}$ and $1.555 \mu\text{m}$ wavelengths and their operation is demonstrated by simulating the propagation of light through the designed devices with the help of Lumerical packages. Regarding the experimental part, a methodology is developed to fabricate waveguide structures with submicrometer dimensions in the Laboratorio Nacional de Nanofabricación (LaNNAFab) of the Centro de Nanociencias y Nanofabricación (CNYN) that belongs to the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Finally, photoresist-integrated optical couplers are fabricated and their morphology is characterized by optical microscopy and Atomic Force Microscopy (AFM). This characterization shows that the fabricated couplers have submicrometer dimensions.

Keywords: Directional coupler, silicon nitride, photonic integrated circuit

Dedicatoria

A mi familia

Agradecimientos

A Dios porque siempre está a mi lado y me ayuda en cada situación de la vida.

A mi madre por su incondicional apoyo y confianza en cada decisión que he tomado en la vida. Por darme ánimos cada vez que se presentaron problemas en este trabajo de tesis. Por ser el motor de mi vida. A mi hermano por ser un gran apoyo en mi vida. A mi padre por confiar en mí y por lo que me enseña sobre la vida. A la señora Doris por sus valiosos consejos sobre la vida.

A Karen Pastrana, por su incondicional apoyo y por tenerme tanta paciencia a lo largo de este trabajo de tesis.

A mis directores de tesis, el Dr. Wencel De La Cruz Hernández y el Dr. Francisco Antonio Domínguez Serna, por sus enseñanzas y sugerencias a lo largo de este trabajo. Por su apoyo y total disposición cuando los necesité. A la Dra. Karina Garay Palmett por sus consejos y por su respaldo académico a lo largo de estos dos años de maestría.

A mis sinodales, por sus valiosos comentarios para mejorar este trabajo de tesis. Ellos son: El Dr. Raúl Rangel Rojo, la Dra. Patricia Juárez Camacho, el Dr. Anatoly Khomenko y la Dra. Karina Garay Palmett.

A los integrantes de los Grupos LINOC y NANODID por sus comentarios y sugerencias en las reuniones de grupo sobre mi trabajo de tesis.

A mis amigos por los buenos momentos vividos. A Josué Escalante y a Memo por brindarme una verdadera amistad y estar siempre presentes cuando los necesité.

Al proyecto fronteras FORDECYT-PRONACES 194758, titulado “Estudio de interacciones no lineales de tercer orden para la implementación de compuertas cuánticas en circuitos fotónicos integrados”.

Al Laboratorio Nacional de Nanofabricación (LaNNaFab), al proyecto PAPIIT-IT101021, y al proyecto Conacyt No. 194758 por el financiamiento de este trabajo de tesis.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por abrirme las puertas para desarrollarme profesionalmente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xiii
Capítulo 1. Introducción	
1.1. Objetivo general	4
1.2. Objetivos específicos	4
1.3. Estructura de la tesis	5
Capítulo 2. Guías de onda ópticas integradas y teoría de modos acoplados	
2.1. Introducción	7
2.2. Guías de onda	7
2.3. Ecuaciones de Maxwell	9
2.3.1. Propiedades de los modos ópticos	12
2.3.2. Guías de onda tipo cresta	13
2.4. Teoría de modos acoplados	15
2.4.1. Acoplador óptico integrado funcionando como divisor de potencia y separador (mezclador) de frecuencias.	19
Capítulo 3. Diseño de acopladores ópticos integrados basados en Si_3N_4	
3.1. Introducción	22
3.2. Métodos numéricos	22
3.3. Estudio de convergencia	24
3.4. Cálculo numérico de la longitud de acoplamiento	28
3.5. Búsqueda de condiciones monomodo	30
3.6. Cuatro configuraciones para la parte central del acoplador	32
3.7. Longitud de acoplamiento en función de parámetros geométricos y de la longitud de onda	34
3.8. Diagnóstico de errores de fabricación	35
3.9. Estudio de pérdidas de potencia debido a la curvatura de los brazos del acoplador ..	36
Capítulo 4. Diseño de divisores de potencia y separadores (mezcladores) de frecuencias basados en acopladores ópticos integrados	
4.1. Diseño de divisores de potencia 50 : 50 para $\lambda = 0.826 \mu m$	40
4.1.1. Primera propuesta de diseño	42
4.1.2. Segunda propuesta de diseño	45
4.2. Diseño de un separador (mezclador) de frecuencias para $\lambda_1 = 0.826 \mu m$ y $\lambda_2 = 1.555 \mu m$	46

Tabla de contenido (continuación)

Capítulo 5. Fabricación de estructuras con resoluciones submicrométricas	
5.1. Propuesta de proceso de fabricación	50
5.2. Depósito de fotoresina	52
5.3. Escritura láser	53
5.4. Revelado	55
5.5. Rebaba	56
5.6. Depósito de cromo	57
5.7. Remoción de fotoresina	58
5.8. Resultados de la fabricación	58
Capítulo 6. Conclusiones	
6.1. Trabajo a futuro	65
Literatura citada	67

Lista de figuras

Figura	Página
1. Partes de un acoplador direccional.	2
2. Aplicaciones de un acoplador direccional como divisor de potencia y separador (mezclador) de frecuencias.	3
3figure.caption.10	
4. Tres tipos de guías de onda. En azul se observa el núcleo de cada guía de onda.	8
5. Esquema de un modo de propagación y su respectivo campo evanescente.	8
6. Polarización de los modos de propagación en guías de onda plana y guías de onda tipo cresta. a) Modos TE y TM para una guía de onda plana. b) Modos con tendencia TE y TM en guías de onda tipo cresta.	13
7. Perfil de índices de refracción para una guía de onda de Si_3N_4 sobre SiO_2 y en sustrato de Si	14
8. Modos fundamentales TE y TM que soporta una guía de onda como la que se muestra en la figura 7, para $\lambda = 0.8 \mu m$ y $\lambda = 1.5 \mu m$	15
9. a) Esquema de un acoplador óptico integrado. b) Esquema de como sería el intercambio de potencia entre las guías de onda de un acoplador óptico integrado.	16
16figure.caption.17	
11. a) Potencia normalizada en función de la distancia de propagación para $F = 1$ y b) para $F = 0.35$	18
12. Esquema de un acoplador óptico integrado funcionando como un divisor de potencia 50 : 50.	20
13. Esquema de un acoplador óptico integrado funcionando como a) separador de frecuencias y b) mezclador de frecuencias.	21
14. Esquema de una guía de onda enmallada a) bidimensionalmente y b) tridimensionalmente.	23
15. Dispersión de los materiales base de las guías de onda. Cub. inferior es la abreviatura para cubierta inferior.	24
16. a) Mallas externa e interna para el estudio de convergencia. b) Notación de los parámetros geométricos de la guía de onda y de las mallas. An_{Mext} y Al_{Mext} son el ancho y la altura de la malla externa; An_{Mint} y Al_{Mint} representan el ancho y la altura de la malla interna; el ancho y la altura del Si_3N_4 son $An_{Si_3N_4}$ y $Al_{Si_3N_4}$, respectivamente; An_{SiO_2} y Al_{SiO_2} son el ancho y la altura del SiO_2 ; y por último, An_{Si} y Al_{Si} representan el ancho y la altura del Si . c) Perfil transversal del modo fundamental TE para $\lambda = 0.826 \mu m$. d) Perfil transversal del modo fundamental TE para $\lambda = 1.555 \mu m$	25
17. Resultados del estudio de convergencia para el modo fundamental TE. a) Índice efectivo en función de las resoluciones en Y y Z para $\lambda = 0.826 \mu m$. b) Gradiente de índices efectivos en función de las resoluciones en Y y Z para $\lambda = 0.826 \mu m$. c) Índice efectivo en función de las resoluciones en Y y Z para $\lambda = 1.555 \mu m$. b) Gradiente de índices efectivos en función de las resoluciones en Y y Z para $\lambda = 1.555 \mu m$	26

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
18. Esquema de las mallas externa, interna y de la malla-brecha.	27
19. Perfil transversal del a) modo fundamental TE par y b) modo fundamental TE impar. . . .	27
20. Esquema del acoplador utilizado para comparar los cuatro métodos de solución. Vista a) en perspectiva y b) frontal.	28
21. Resultados de la longitud de acoplamiento por cuatro métodos diferentes. a) FDE más TMA. b) FDE más <i>propagate</i> . c) VarFDTD. d) FDTD.	29
22. Gráfica del número de modos en función de la altura y el ancho de la guía de onda. . . .	31
23. Cuatro configuraciones diferentes para la parte central del acoplador.	33
24. Longitud de acoplamiento en función del índice de refracción de la cubierta para las cuatro configuraciones para cubrir el acoplador.	33
25. a) Longitud de acoplamiento en función del ancho y la separación de las guías de onda. b) Longitud de acoplamiento en función de la longitud de onda y de la altura de las guías de onda.	34
26. a) Esquema del acoplador óptico integrado empleado para hacer el diagnóstico de errores de fabricación. b) Variación en la longitud de acoplamiento con respecto a posibles errores de fabricación en el ancho y la separación entre las guías para un valor fijo $Al_{Si_3N_4} = 0.495 \mu m$ y $\lambda = 0.826 \mu m$	35
27. a) Curva paramétrica tipo Bézier y posición de los polos. b) Esquema del brazo <i>s-bend</i> comparado con dos secciones circulares unidas.	37
28. Transmitancia de los modos soportados por una guía de onda y porcentaje de pérdidas de potencia en función del radio de curvatura del brazo. En esta gráfica, Fund es la forma de abreviar fundamental y exc es la forma de abreviar excitado.	38
29. Índice efectivo del modo fundamental TE calculado para tres casos diferentes: guía de onda recta y guía de onda con radios de curvatura de $R = 4 \mu m$, $R = 6 \mu m$ y $R = 10 \mu m$. . .	39
30. a) Esquema de diseño del divisor de potencia 50 : 50 para $\lambda = 0.826 \mu m$ con ITO como cubierta superior. b) Gráfica de pérdidas de potencia y transmitancia de los modos que soporta la guía de onda en función del radio de curvatura.	42
31. Propagación a lo largo del acoplador con ITO como cubierta superior, para una longitud central de $L = 13.860 \mu m$	42
32. Dispersión del SiO ₂ de la cubierta superior y el SiO ₂ que está por debajo del núcleo (cubierta inferior). Cub. inferior es la abreviatura para cubierta inferior y Cub. superior es la abreviatura para cubierta superior.	43

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
33. a) Esquema del primer diseño de divisor de potencia 50 : 50 para $\lambda = 0.826 \mu m$. b) Gráfica de pérdidas de potencia y transmitancia de los modos que soporta la guía de onda en función del radio de curvatura.	44
34. Propagación a lo largo del acoplador del primer diseño con una longitud central de a) $L = 11.385 \mu m$ y b) $L = 10.500 \mu m$	45
35. a) Esquema del segundo diseño de divisor de potencia 50 : 50 para $\lambda = 0.826 \mu m$. b) Gráfica de pérdidas de potencia y transmitancia de los modos que soporta la guía de onda en función del radio de curvatura.	45
36. Propagación a lo largo del acoplador del segundo diseño con una longitud central de $L = 93.863 \mu m$	46
37. Parámetros η y η_0 en función del ancho del núcleo.	48
38. Gráfica de pérdidas de potencia y transmitancia de los modos que soporta la guía de onda en función del radio de curvatura para a) $\lambda = 0.826 \mu m$ y b) $\lambda = 1.555 \mu m$	48
39. Potencia a lo largo del acoplador funcionando como separador de frecuencias en a) $\lambda_1 = 0.826 \mu m$ y b) $\lambda_2 = 1.555 \mu m$. Potencia a lo largo del acoplador funcionando como mezclador de frecuencias en c) $\lambda_1 = 0.826 \mu m$ y d) $\lambda_2 = 1.555 \mu m$	49
40. Esquema de la propuesta de fabricación.	51
41. Equipo PICOTrack PCT 100 RREEI empleado para depositar HMDS	52
42. a) Equipo MIDAS Spin-3000TD. b) Depósito de fotoresina con una jeringa y un filtro. Depósito de fotoresina c) sin filtro y d) con filtro.	53
43. Sustrato con fotoresina depositada.	53
44. a) Equipo MicroWriter ML3 para escritura directa. b) Ejemplo de un patrón que se carga en el software de la escritora láser. c) Esquema del arreglo de patrones distribuidos por el sustrato. Todos los recuadros tienen el mismo patrón pero con una combinación de dosis y foco diferentes.	54
45. a) Sustrato sumergido en el revelador. b) Enjuague del sustrato con agua. c) Patrones escritos en fotoresina.	55
46. a) Equipo PE-50 para decapar con plasma. b) Plasma de Oxígeno.	56
47. Grosor de la fotoresina en función del tiempo de decapado. Simbología: Datos experimentales (puntos rojos), ajuste lineal (línea azul).	56
48. Fotografía del sistema empleado para depositar Cr por medio de la técnica de erosión iónica.	57
49. a) Equipo de ultrasonido empleado para remover la fotoresina. b) Sustrato sumergido en acetona.	58

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
50. Fotografías que muestran errores de fabricación por a) falta de adhesión de la fotoresina a la superficie del sustrato, b) mayor tiempo de revelado del necesario y c) valores de dosis y foco inadecuados.	59
51. Oblea de <i>Si</i> después de la etapa de rebaba.	60
52. Imágenes de microscopio óptico de a) guías rectas de fotoresina, b) anillo con guía recta próxima, c) acoplador negativo con brazos <i>s-bend</i> y d) acoplador positivo con brazos <i>s-bend</i>	61
53. Imágenes de microscopio óptico de a) acoplador negativo con brazos <i>s-bend</i> y b) acoplador positivo con brazos <i>s-bend</i> , después del depósito de Cr y la remoción de fotoresina.	61
54. a) Topografía 3D de la región central del acoplador negativo tomada con AFM. b) Perfil transversal de la topografía 3D de la región central del acoplador negativo. c) Topografía 3D de la región central del acoplador positivo tomada con AFM. d) Perfil transversal de la topografía 3D de la región central del acoplador positivo.	62

Lista de tablas

Tabla		Página
1.	Índices efectivos par e impar del modo fundamental TE determinados con dos conjuntos de resoluciones diferentes.	28
2.	Longitud de acoplamiento calculada por cuatro métodos numéricos diferentes. . .	30
3.	Diferentes materiales que se pueden fabricar en el LaNNaFab y sus respectivos índices de refracción para $\lambda = 0.826\mu m$	34
4.	Parámetros de interés para el primer diseño propuesto del divisor de potencia 50 : 50. L_c es la longitud de acoplamiento, $L_{50:50}$ es la longitud mínima a la cual el divisor de potencia es 50 : 50, L es la longitud central del acoplador y L_{corr} es la longitud central del acoplador después de hacer la corrección debida a los brazos.	44
5.	Parámetros de interés para el segundo diseño propuesto del divisor de potencia 50 : 50.	46
6.	Especificaciones del equipo MicroWriter ML3.	54
7.	Parámetros del proceso de rebaba.	57
8.	Condiciones experimentales para depositar la película de Cr por medio de la técnica de erosión iónica.	58

Capítulo 1. Introducción

Con el paso de los años, la tecnología ha desempeñado un papel importante en la historia de la humanidad. Un ejemplo de esto, fue el desarrollo del computador y la internet, los cuales desencadenaron una revolución tecnológica en la segunda mitad del siglo XX. Actualmente, se está llevando a cabo una nueva revolución tecnológica. Esta revolución consiste en desarrollar tecnologías cuánticas, manipulando propiedades mecánico-cuánticas, tales como el entrelazamiento y la superposición, para codificar, transmitir y procesar información (Nielsen y Chuang, 2010). Dentro de estas tecnologías cuánticas se encuentran la computación cuántica, la metrología cuántica y la comunicación cuántica (Acín *et al.*, 2018). La computación cuántica permite modelar todo proceso físico en una computadora cuántica; la cual, a su vez, promete simular dichos procesos en tiempos menores cuando es comparado con la computación clásica (Deutsch, 1985). Como resultado, se pasa de tiempos exponenciales a polinomiales en algunos casos, como por ejemplo, en la factorización de Shor. Por otro lado, la metrología cuántica ofrece medidas de alta precisión por debajo del límite de ruido de disparo (shot-noise, en inglés) (Giovannetti *et al.*, 2011); mientras que, la comunicación cuántica brinda mayor seguridad en la transmisión de información (Lo *et al.*, 2014). Diferentes gobiernos y empresas como Google, IBM y Microsoft, invierten un porcentaje de su capital en desarrollar estas tecnologías cuánticas, y con esto, ganar la supremacía tecnológica (Riedel *et al.*, 2017; Mohseni *et al.*, 2017).

Se han implementado tecnologías cuánticas basadas en superconductores (Houck *et al.*, 2012), fotónica (O'brien *et al.*, 2009), sistemas de estado sólido (Pfaff *et al.*, 2014), y trampa de iones (Blatt y Roos, 2012). Si bien no hay un consenso respecto a cual de éstas será la base definitiva de las tecnologías cuánticas, es aceptado, de forma general, que la fotónica formará parte fundamental de esa aplicación (O'brien *et al.*, 2009; Silverstone *et al.*, 2016; Elshaari *et al.*, 2020). Dado que la fotónica estudia la generación, manipulación y detección de fotones; entre sus ventajas se encuentran la baja decoherencia (poca interacción de los fotones con su ambiente), alta velocidad de transmisión de información y fácil manipulación de fotones (Pavesi *et al.*, 2016).

Diferentes estudios han demostrado propiedades cuánticas de los fotones, entre los que se destaca, la observación de interferencia cuántica de fotones en 1987 con el experimento de Hong-Ou-Mandel (HOM) (Hong *et al.*, 1987) y la primera demostración experimental del entrelazamiento entre fotones (Aspect *et al.*, 1981). No obstante, estos experimentos se hicieron en bulto, y por lo tanto, su escalabilidad exige integrarlos en dispositivos de tamaños micrométricos y nanométricos, lo cual es necesario en la aplicación de nuevas tecnologías. Recientemente, la fotónica integrada ha surgido para solucionar el problema de escalabilidad (Politi *et al.*, 2008). Este nuevo enfoque aprovecha métodos estándar de

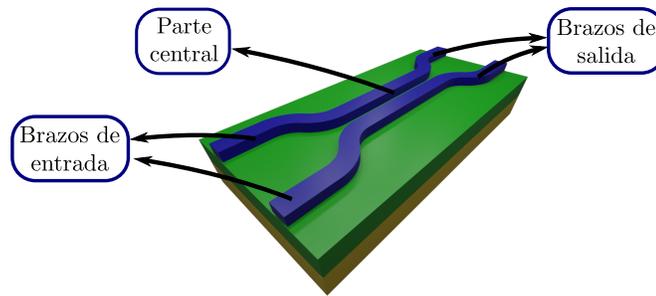


Figura 1. Partes de un acoplador direccional.

micro y nanofabricación, y al mismo tiempo, propiedades de las guías de onda hechas de diversos materiales, como por ejemplo Si (Lu *et al.*, 2015), SiO₂ (Politi *et al.*, 2008), arseniuro de galio (GaAs) (Wang *et al.*, 2014) y nitruro de galio (GaN) (Zhang *et al.*, 2011) para fabricar las componentes ópticas que constituyen la base de los circuitos fotónicos. Entre estos dispositivos se encuentran los acopladores direccionales que se componen por una parte central, caracterizada por dos guías de onda cercanas, y por brazos de entrada y de salida en donde las guías de onda se encuentran más separadas (ver figura 1).

Los acopladores direccionales tienen aplicaciones en óptica y en telecomunicaciones como divisores de potencia, separadores (mezcladores) de frecuencias (figura 2), y como separadores (mezcladores) de modos. Por esta razón, en la segunda mitad del siglo XX y comienzos del presente siglo, diferentes trabajos (Yariv, 1973; Cheng y Ramaswamy, 1991; Januar y Mickelson, 1993; Yamada *et al.*, 2005; Pierre *et al.*, 1994; Tosi *et al.*, 2020) estudiaron el comportamiento de la luz en dichos acopladores direccionales, fabricados con diferentes materiales y con distintos tipos de guías de onda. Además, se ha demostrado que se pueden diseñar y fabricar acopladores direccionales independientes de la longitud de onda (Gupta *et al.*, 2017) y de la polarización (Fujisawa y Koshiba, 2006; Kaplan *et al.*, 2020), en un cierto intervalo de longitudes de onda. La aplicación de este dispositivo se extiende incluso a la biología, en donde se ha empleado como biosensor (Luff *et al.*, 1996; Uchiyama *et al.*, 2015). Aunque estos trabajos se hicieron en el régimen de fuentes de luz coherentes, en el año 2008 se demostró la importancia de los acopladores direccionales (basados en guías de onda rectangulares) en el procesamiento de información con fuentes de luz de fotón individual (Politi *et al.*, 2008).

En este trabajo de tesis se diseñan acopladores ópticos integrados de Si₃N₄ sobre SiO₂, ambos crecidos sobre una oblea de Si y se estudia su funcionamiento como divisores de potencia así como separadores (mezcladores) de frecuencias en el régimen de fuentes de luz intensas. El Si₃N₄ se utiliza como medio de propagación de la luz porque presenta entre sus ventajas un alto coeficiente no lineal, es transparente para longitudes de onda visibles y de infrarrojo cercano, presenta bajas pérdidas (Blu-

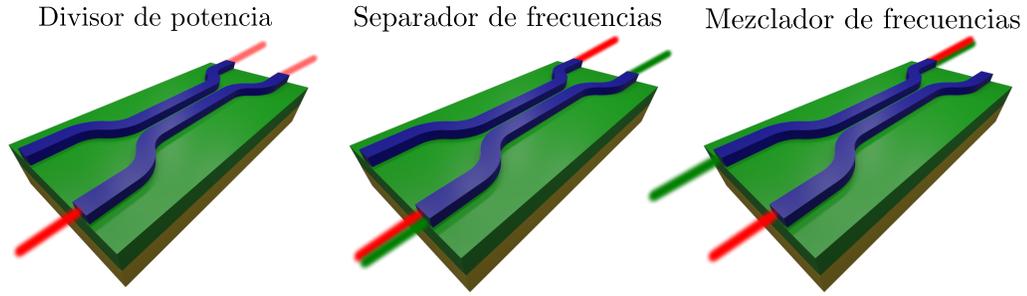


Figura 2. Aplicaciones de un acoplador direccional como divisor de potencia y separador (mezclador) de frecuencias.

menthal *et al.*, 2018; Levy, 2011) y además, se puede fabricar en el LaNNAFab, al cual se tiene acceso por parte del grupo de trabajo.

El estudio de este tipo de acopladores es parte fundamental de un proyecto a largo plazo del Laboratorio de Interacciones No Lineales y Óptica Cuántica (LINOC) en conjunto con el grupo de Nanociencias para el Desarrollo e Implementación de Dispositivos (NANODID), encaminado a desarrollar una plataforma para aplicaciones en el procesamiento de información. En este proyecto, se busca implementar operaciones de cómputo cuántico en circuitos fotónicos integrados y los acopladores ópticos integrados constituyen una pieza fundamental para el funcionamiento de dichos dispositivos. Este tipo de acopladores permitirán, que en un futuro cercano, los grupos LINOC y NANODID desarrollen filtros espectrales, divisores de potencia, separadores (mezcladores) de frecuencias, anillos resonadores, e interferómetros tipo Hong-Ou-Mandel y Mach-Zehnder.

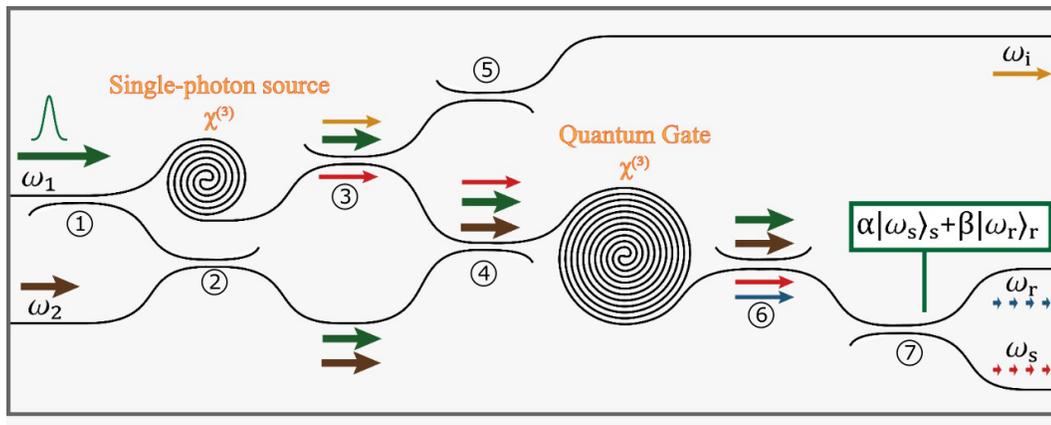


Figura 3. Esquema de una propuesta para el procesamiento cuántico de información en un circuito fotónico integrado. Imagen tomada y adaptada de la referencia (Aguayo-Alvarado *et al.*, 2020).

En la figura 3 se puede ver el esquema de una propuesta de un circuito fotónico que se tiene planeado fabricar en los grupos LINOC y NANODID (Aguayo-Alvarado *et al.*, 2020). Este circuito está compuesto por dos etapas; una etapa de generación de fotones individuales anunciados (Silverstone

et al., 2014) y otra etapa de procesamiento de información basada en una compuerta cuántica. Las dos etapas están basadas en procesos no lineales de tercer orden; la generación de fotones individuales se hace con mezclado de cuatro ondas espontáneo, y la compuerta cuántica por medio de diferencia de frecuencias. Para poder realizar estas etapas, es necesario dividir potencia, separar y mezclar frecuencias con ayuda de acopladores integrados y es en esta parte en donde radica la importancia de este trabajo de tesis. En total, el circuito fotónico contiene siete acopladores direccionales y cada uno se debe diseñar teniendo en cuenta características de la fuente de fotones y de la compuerta cuántica.

1.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es estudiar acopladores ópticos integrados de Si_3N_4 sobre SiO_2 y en un sustrato de Si, con potenciales aplicaciones en procesamiento de información, tales como separadores de frecuencias y divisores de haz.

Este estudio se hace desde un enfoque teórico-numérico y también desde un enfoque experimental. Desde el enfoque teórico-numérico se desarrollan módulos que permiten proponer diseños de acopladores ópticos que puedan ser integrados en circuitos fotónicos y que tengan características idóneas para ser utilizados en procesamiento de información. Mientras que, desde el enfoque experimental, se desarrolla una metodología para la fabricación de estructuras de guías de onda con dimensiones menores a $1 \mu\text{m}$ en el LaNNAFab.

1.2. Objetivos específicos

Con el fin de cumplir el objetivo general propuesto en este trabajo de tesis, los objetivos específicos planteados son:

- Desarrollar módulos que permitan estudiar la propagación de modos de luz en acopladores ópticos integrados de Si_3N_4 sobre SiO_2 en un sustrato de Si utilizando métodos de diferencias finitas.
- Estudiar teóricamente la tolerancia en el proceso de fabricación de acopladores ópticos integrados en el diseño de divisores de potencias y separadores de frecuencias y su régimen de operación monomodal.
- Estudiar teóricamente las pérdidas de potencia debidas al acoplamiento, propagación y curvatura de los brazos del acoplador en los acopladores ópticos previamente diseñados.

- Desarrollar una metodología que permita la fabricación de estructuras de guías de onda con tamaños menores a $1 \mu m$ en el LaNNAFab.

1.3. Estructura de la tesis

Este trabajo de tesis está organizado de la siguiente forma:

En el capítulo 2 se introducen las principales características de las guías de onda, y en particular, se describen las características de las guías de onda tipo cresta que son las de interés para este trabajo de tesis. Además, se utilizan las ecuaciones de Maxwell para estudiar los modos que puede soportar una guía de onda y se introduce la teoría de modos acoplados. Por último, se describe el funcionamiento de los acopladores ópticos integrados como divisores de potencia y separadores (mezcladores) de frecuencias.

En el capítulo 3 se presentan resultados de diseños de acopladores ópticos integrados. Para esto, inicialmente se hace un estudio de convergencia con las paqueterías numéricas utilizadas en este trabajo de tesis. Este estudio de convergencia permite disminuir tiempos de cómputo y al mismo tiempo tener confianza en los resultados numéricos obtenidos. En segundo lugar, se calcula la longitud de acoplamiento por cuatro métodos diferentes y se comparan los resultados obtenidos. Con esto, se compara el funcionamiento y validez de los cuatro métodos y se describen las ventajas y desventajas de cada uno. Después, se analizan condiciones para las cuales las guías de onda que componen el acoplador son monomodales, bimodales o multimodales. Posteriormente, se estudia el comportamiento de la longitud de acoplamiento para cuatro configuraciones diferentes del acoplador, y para una de las configuraciones, se analiza la longitud de acoplamiento en función de la longitud de onda y de diferentes parámetros geométricos de la estructura. Luego, se simulan errores de fabricación en las dimensiones de las guías de onda y se analiza su efecto en el diseño de los acopladores. Finalmente, en este capítulo, se simula la propagación de luz mediante el método de solución de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo Variacional (VarFDTD, por sus siglas en inglés) implementado por la paquetería MODE Solutions de Lumerical, para estudiar pérdidas de potencia y transmitancia de los modos que soportan las guías de onda, en función del radio de curvatura de los brazos del acoplador.

En el capítulo 4 se presentan dos diseños específicos de divisores de potencia para la longitud de onda $\lambda = 0.826 \mu m$. Además, en este capítulo, se muestra el diseño de un acoplador óptico funcionando como separador (mezclador) de frecuencias. En particular, el separador (mezclador) de frecuencias se diseña para las longitudes de onda de $\lambda = 0.826 \mu m$ y $\lambda = 1.555 \mu m$.

En el capítulo 5, se presenta la metodología desarrollada y los resultados obtenidos de la fabricación de estructuras con tamaños submicrométricos que se llevó a cabo en el LaNNAFab.

Por último, en el capítulo 6, se presentan las principales conclusiones y el trabajo a futuro que se desprende de esta tesis.

Capítulo 2. Guías de onda ópticas integradas y teoría de modos acoplados

2.1. Introducción

Los circuitos ópticos integrados están compuestos por elementos que generan, manipulan y detectan luz. Entre estos elementos se encuentran los acopladores ópticos que tienen aplicaciones como divisores de potencia, así como separadores (mezcladores) de frecuencias. Si bien estos acopladores pueden estar formados por diversas geometrías de guías de onda, para este trabajo son de particular interés los acopladores ópticos integrados basados en guías de onda tipo cresta (conocida en inglés como *ridge*). En este capítulo se presentan las principales características de las guías de onda, en particular, se presenta la condición que se debe cumplir para que se propague luz por el núcleo de éstas, se detallan tres tipos de guías de onda diferentes, y se mencionan algunos materiales empleados para fabricar guías de onda. Adicionalmente, desde el enfoque de la teoría electromagnética, se estudia la propagación de luz por guías de onda, y se presentan algunos modos de propagación que soporta una guía de onda tipo cresta. Por último, se introduce la teoría de modos acoplados, y se describe como puede ser utilizada para diseñar divisores de potencia y separadores (mezcladores) de frecuencias.

2.2. Guías de onda

En general, como su nombre lo indica, una guía de onda es una estructura que permite el guiado de ondas, específicamente ondas electromagnéticas. En el campo de la óptica se estudian guías de onda que propagan ondas de luz. Este tipo de guías de onda están hechas de materiales dieléctricos, como por ejemplo de sílice, y tienen aplicaciones en campos tan variados como las telecomunicaciones (Saleh y Teich, 2007), sensores (Lee, 2003; Huang *et al.*, 2014) y dispositivos optoelectrónicos (He *et al.*, 2012). Las guías de onda están conformadas por un núcleo (medio con índice de refracción n_{nu}) rodeado por una cubierta (medio con índice de refracción n_{cu}), y para que se pueda propagar luz por el núcleo por reflexión total interna, se debe cumplir que $n_{nu} > n_{cu}$.

En la figura 4 se muestran tres tipos de guías de onda. La guía de onda plana confina luz en una sola dirección (eje Y) y propaga luz en la dirección del eje Z. Se le llama guía de onda plana simétrica siempre que se tenga el mismo material por encima y por debajo del núcleo; en caso contrario, se dice que es antisimétrica. La guía de onda tipo cresta confina luz en dos dimensiones (plano XY) y propaga luz en la dirección del eje Z. En este caso, se clasifica como guía de onda tipo cresta simétrica

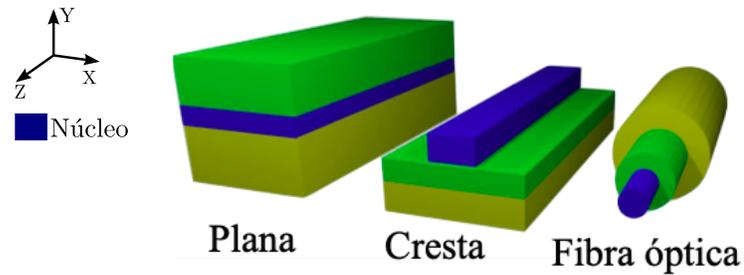


Figura 4. Tres tipos de guías de onda. En azul se observa el núcleo de cada guía de onda.

y antisimétrica teniendo en cuenta cada dirección de confinamiento. Así, por ejemplo, la guía de onda tipo cresta mostrada en la figura 4 es simétrica en el eje X pero antisimétrica en el eje Y. Este tipo de guía es ampliamente utilizado en circuitos ópticos integrados, porque en un mismo circuito se pueden fabricar diferentes estructuras de forma análoga a como sucede en circuitos electrónicos. Por último, la fibra óptica, al igual que la guía de onda tipo cresta, confina luz en dos dimensiones (plano XY) y propaga luz en la dirección del eje Z. Las fibras ópticas tienen una gran variedad de aplicaciones, entre ellas en telecomunicaciones; donde es necesario enviar información a kilómetros de distancia.

Típicamente, la luz se propaga por el núcleo como un modo o una superposición de modos, siendo el modo un campo electromagnético que mantiene tanto su distribución transversal como su polarización a medida que se propaga por la guía de onda (Saleh y Teich, 2007). Cada modo que soporta la guía tiene asociada una velocidad de grupo v_g y una constante de propagación β que es la componente en la dirección de propagación del vector de onda. Tanto v_g como β dependen de la geometría de la estructura y de la longitud de onda. En la figura 5 se muestra el esquema de un modo que soporta una guía de onda, visto desde la frontal y la lateral de la guía. Como se observa, la gran mayoría de la luz se confina en el núcleo, pero una parte queda por fuera. La luz que queda por fuera recibe el nombre de campo evanescente y tiene aplicaciones, por ejemplo, en el sensado de gases (Huang *et al.*, 2014) y en el campo de la óptica integrada, en donde, dispositivos como acopladores ópticos integrados y anillos resonadores lo utilizan para su funcionamiento.

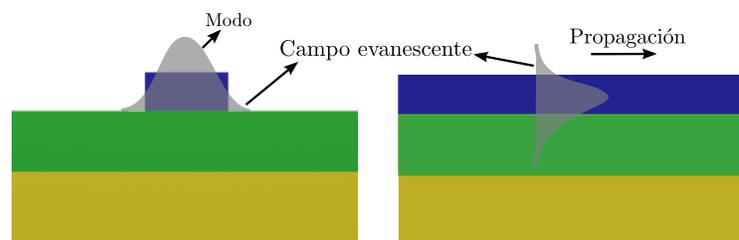


Figura 5. Esquema de un modo de propagación y su respectivo campo evanescente.

El campo evanescente depende de los materiales que componen la guía de onda, de la longitud de onda de trabajo, del contraste dieléctrico entre el núcleo y la cubierta, que se define como $(n_{nu} - n_{cu})/n_{nu}$ (Saleh y Teich, 2007), y de las dimensiones del núcleo. Mayor longitud de onda, menor contraste dieléctrico y menores dimensiones del núcleo generan mayor campo evanescente.

Los materiales empleados para fabricar estas guías de onda dependen de su aplicación. Por ejemplo, la sílice se utiliza como núcleo de fibras ópticas en telecomunicaciones porque presenta bajas pérdidas de potencia para las longitudes de onda con las que se envía información ($\lambda = 1.3 \mu m$ y $\lambda = 1.5 \mu m$). El Si y el Si_3N_4 tienen un alto coeficiente no lineal, por esta razón, se utilizan como núcleo en guías de onda que tienen aplicaciones, por ejemplo, en la implementación de fuentes de parejas de fotones basadas en procesos no lineales.

En general, la respuesta de cada material al interactuar con una onda electromagnética depende de la frecuencia de dicha onda. Cuando esto sucede, se dice que el material presenta dispersión cromática y su índice de refracción depende de la frecuencia ω . Esta dependencia se puede aproximar por la ecuación de Sellmeier que es empírica y matemáticamente viene dada por la ecuación (1) (Agrawal, 2013)

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2}, \quad (1)$$

en donde ω_j es la frecuencia de resonancia propia del material y B_j es el peso de la j -ésima resonancia.

2.3. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell rigen el comportamiento de las ondas electromagnéticas en la materia, y en su forma general, vienen dadas por las ecuaciones (2)-(5) (Yariv y Yeh, 2007):

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (5)$$

en donde \mathbf{E} es el vector campo eléctrico, \mathbf{D} es el vector desplazamiento, \mathbf{B} es el vector de inducción magnética, \mathbf{H} es el vector campo magnético, \mathbf{J} es el vector densidad de corriente y ρ es la densidad de

carga. Como complemento de las ecuaciones (2)-(5), los vectores \mathbf{D} , \mathbf{E} , \mathbf{B} y \mathbf{H} vienen relacionados por las llamadas ecuaciones constituyentes, las cuales se expresan matemáticamente como se muestra en las ecuaciones (6) y (7):

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (6)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M}, \quad (7)$$

en donde \mathbf{P} y \mathbf{M} son los vectores de polarización y magnetización respectivamente, ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío y μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío.

Si el medio es lineal e isótropo, $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e^{(1)} \mathbf{E}$ y $\mathbf{M} = \chi_m^{(1)} \mathbf{H}$, en donde $\chi_e^{(1)}$ y $\chi_m^{(1)}$ son la susceptibilidad eléctrica y magnética, respectivamente. Éstas susceptibilidades se representan por campos tensoriales para medios anisótropos, pero se reducen a campos escalares en medios isótropos. Con esto, las ecuaciones (6) y (7), se pueden escribir como las ecuaciones (8) y (9)

$$\mathbf{D} = \epsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E} \quad (8)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu(\mathbf{r})} \mathbf{B}, \quad (9)$$

en donde $\epsilon(\mathbf{r})$ y $\mu(\mathbf{r})$ son la permitividad eléctrica del medio y la permeabilidad magnética del medio, respectivamente. Además, para un medio dieléctrico, en ausencia de cargas externas, se cumple que $\rho = 0$, $\mathbf{J} = 0$, y las ecuaciones de Maxwell quedan como en las ecuaciones (10)-(13)

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (11)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (12)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mu(\mathbf{r}) \epsilon(\mathbf{r}) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (13)$$

En este punto, es conveniente definir el índice de refracción como la relación entre la velocidad de propagación de la luz en el material y la velocidad de propagación de la luz en el vacío. En la ecuación (14) se muestra matemáticamente la definición del índice de refracción

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\mu(\mathbf{r}) \epsilon(\mathbf{r})}{\mu_0 \epsilon_0}}. \quad (14)$$

Aquí c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz en el medio. Para medios no

magnéticos, $\mu(\mathbf{r}) = \mu_0$ y el índice de refracción se reduce a $n = \sqrt{\epsilon(\mathbf{r})/\epsilon_0}$. Para ondas monocromáticas, las soluciones generales para el campo eléctrico y el campo magnético obtenidas a partir de las ecuaciones (10)-(13) vienen dadas por las ecuaciones (15) y (16):

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})e^{i\omega t} \quad (15)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(\mathbf{r})e^{i\omega t}, \quad (16)$$

en donde ω es la frecuencia angular de la onda electromagnética. En las ecuaciones (15) y (16), la amplitud del campo eléctrico y la amplitud del campo magnético dependen de la posición. Adicionalmente, si el índice de refracción depende solo de las coordenadas x y y , esto es $n = n(x, y)$, y la coordenada z se escoge como la dirección de propagación de la onda electromagnética, las soluciones se pueden escribir como

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

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

donde β es la constante de propagación de la onda y $\mathbf{E}(x, y)$ y $\mathbf{H}(x, y)$ son las distribuciones transversales de los campos eléctrico y magnético, respectivamente. Al reemplazar las ecuaciones (17) y (18) en las ecuaciones (12) y (13) se obtiene, para el campo eléctrico, la ecuación (19) que involucra solo coordenadas espaciales (Yariv y Yeh, 2007)

$$\nabla_t^2 \mathbf{E}(x, y) + \left[\left(\frac{\omega}{c} \right)^2 n^2(x, y) - \beta^2 \right] \mathbf{E}(x, y) = 0, \quad (19)$$

en donde $\nabla_t = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$. La ecuación (19) se puede ver como una ecuación de eigenvalores, siendo $\mathbf{E}(x, y)$ las eigenfunciones y β^2 los eigenvalores (Yariv y Yeh, 2007). Por lo tanto, conocer la distribución de índice de refracción $n(x, y)$, la longitud de onda de trabajo y las dimensiones de la estructura, permite determinar la distribución transversal del campo eléctrico $\mathbf{E}(x, y)$ y sus respectivas constantes de propagación β . Adicionalmente, para que las soluciones tengan sentido físico, en las fronteras se debe cumplir que las componentes tangenciales del campo eléctrico y sus primeras derivadas deben ser continuas; mientras que, en el infinito, el campo eléctrico debe ser cero.

2.3.1. Propiedades de los modos ópticos

En general, la ecuación (19) puede tener más de una solución. Dicho de otra forma, una guía de onda puede soportar más de un modo de propagación, y éstos forman una base ortogonal y completa. Esto significa que si la estructura es homogénea a lo largo de la dirección de propagación, cualquier campo de entrada a la estructura, se puede escribir como una combinación lineal de los modos que soporta la guía. Cada modo de propagación que soporta la guía, se caracteriza por su constante de propagación β y se relaciona con el índice efectivo n_{eff} , mediante la relación

$$n_{eff}(\omega) = \frac{c\beta(\omega)}{\omega}. \quad (20)$$

Al índice efectivo se le conoce también como constante de propagación normalizada y como se ve, depende de la frecuencia y del modo.

Otro parámetro importante de los modos de propagación es su polarización. En guías de onda plana (ver figura 6a), las polarizaciones de los modos se clasifican de dos formas: modo Transversal Eléctrico (TE, por sus siglas en inglés) y modo Transversal Magnético (TM, por sus siglas en inglés). Se llaman modos TE porque el campo eléctrico permanece completamente en el plano normal a la dirección de propagación (plano XY). Por otro lado, los modos TM son aquellos para los cuales el campo magnético únicamente tiene componente en el plano normal a la dirección de propagación (Yariv y Yeh, 2007).

En el caso de guías de onda tipo cresta, las polarizaciones dejan de ser modos TE y TM puros. Sin embargo, se presentan dos familias de modos; unos con tendencia a polarización TE (modos quasi-TE) y otros con tendencia a polarización TM (modos quasi-TM) (Lifante, 2003; Coldren *et al.*, 2012). En los modos quasi-TE el campo eléctrico permanece casi por completo en el plano perpendicular a la dirección de propagación (plano XY), y en los modos quasi-TM el campo magnético permanece casi por completo en el plano perpendicular a la dirección de propagación (ver figura 6b). Por esta razón, en este trabajo se hablará, para guías de onda tipo cresta, de modos TE y TM.

Es posible calcular el flujo de potencia del modo confinado en el núcleo de la guía de onda, integrando la componente del vector de Poynting que va en la dirección de propagación, de acuerdo con la ecuación (21) (Yariv y Yeh, 2007)

$$P = \frac{1}{2} \int \int_A (\mathbf{E} \times \mathbf{H})_z dA, \quad (21)$$

en donde A representa el área del núcleo. Si esta misma expresión se integra en todo el espacio, se obtiene el flujo de potencia del modo completo.

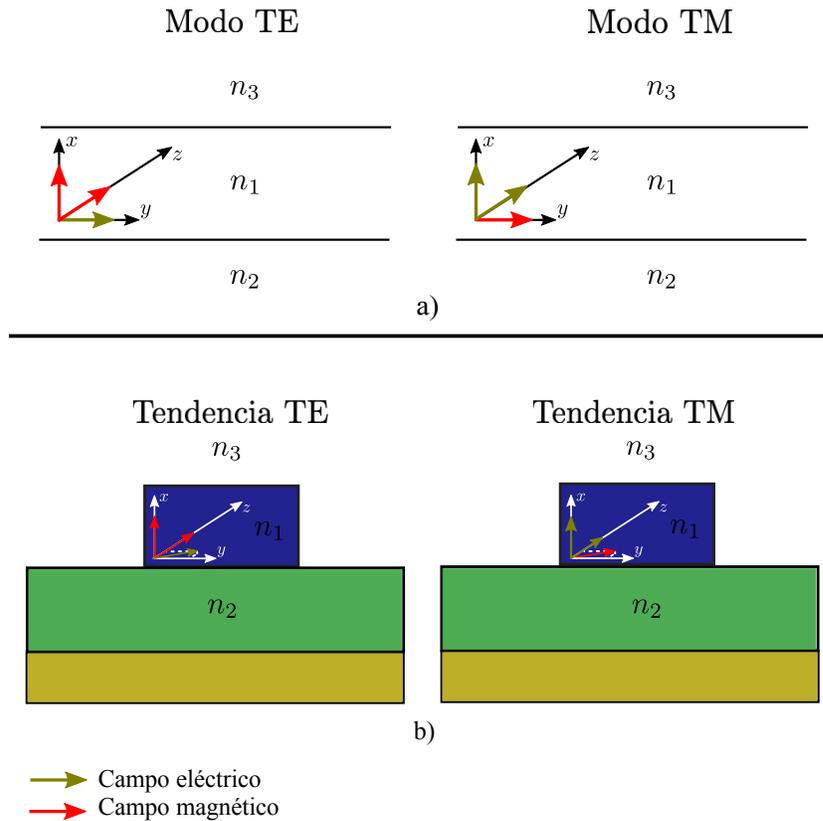


Figura 6. Polarización de los modos de propagación en guías de onda plana y guías de onda tipo cresta. a) Modos TE y TM para una guía de onda plana. b) Modos con tendencia TE y TM en guías de onda tipo cresta.

2.3.2. Guías de onda tipo cresta

Cada tipo de guía de onda mencionado en la sección 2.2 sirve para guiar luz, no obstante, soluciones analíticas de la ecuación (19) se obtienen para algunos casos particulares, como por ejemplo, para guías de onda planas. Esto no sucede en el caso de las guías de onda tipo cresta, en las cuales se deben determinar los modos que soporta la guía con ayuda de métodos numéricos.

En este trabajo se tiene particular interés en el diseño y la fabricación de acopladores con la factibilidad de hacerlos en las instalaciones del LaNNAFab. En estas instalaciones se pueden hacer guías de onda planas y tipo cresta, sin embargo, este trabajo se centra en las tipo cresta por su aplicación en circuitos ópticos integrados. Las guías de onda tipo cresta que se utilizan en este trabajo están hechas de un núcleo de Si_3N_4 sobre SiO_2 y en un sustrato de Si.

En la figura 7 se muestra el perfil de índices de refracción de la guía de onda, en donde $n_{\text{Si}_3\text{N}_4}$,

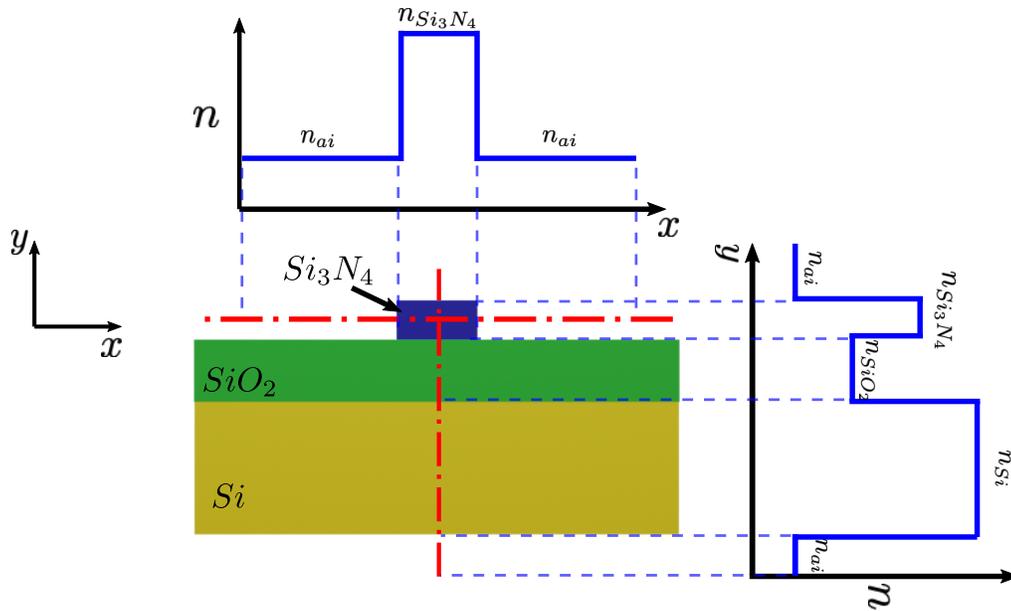


Figura 7. Perfil de índices de refracción para una guía de onda de Si_3N_4 sobre SiO_2 y en sustrato de Si .

n_{SiO_2} , n_{Si} y n_{ai} son los índices de refracción del Si_3N_4 , SiO_2 , Si y aire, respectivamente. En la gráfica de la derecha de la figura 7 se tiene el perfil de índices de refracción en la región que atraviesa la línea punteada vertical, mientras que, en la gráfica superior se ve el perfil de índices de refracción en la región que atraviesa la línea punteada horizontal. El Si se utiliza como sustrato por su abundancia y porque es ampliamente empleado en circuitos electrónicos. El SiO_2 cumple la tarea de separar el Si_3N_4 del Si . El Si tiene un índice de refracción mayor que el Si_3N_4 , y si los dos materiales se juntan, la luz se propagaría por el Si .

En la figura 8 se muestran los modos fundamentales TE y TM que soporta una guía de onda como la que se muestra en la figura 7, para las longitudes de onda $\lambda = 0.8 \mu m$ y $\lambda = 1.5 \mu m$. Para una misma longitud de onda, el campo evanescente del modo fundamental TE es mayor en la dirección horizontal que en la dirección vertical. Lo contrario sucede para el modo fundamental TM. Además, para una misma polarización, se observa que a mayor longitud de onda, mayor campo evanescente. La magnitud al cuadrado del campo eléctrico $|E|^2$, que se define como $|E|^2 = |E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$, se normaliza tal que $|E|^2 / |E|_{max}^2$, en donde $|E|_{max}^2$ es el máximo valor de $|E|^2$. Las distribuciones transversales de los modos fundamentales TE y TM que se muestran en la figura 8 se calcularon con la paquetería MODE Solutions de Lumerical, la cual se describirá brevemente en la sección 3.2.

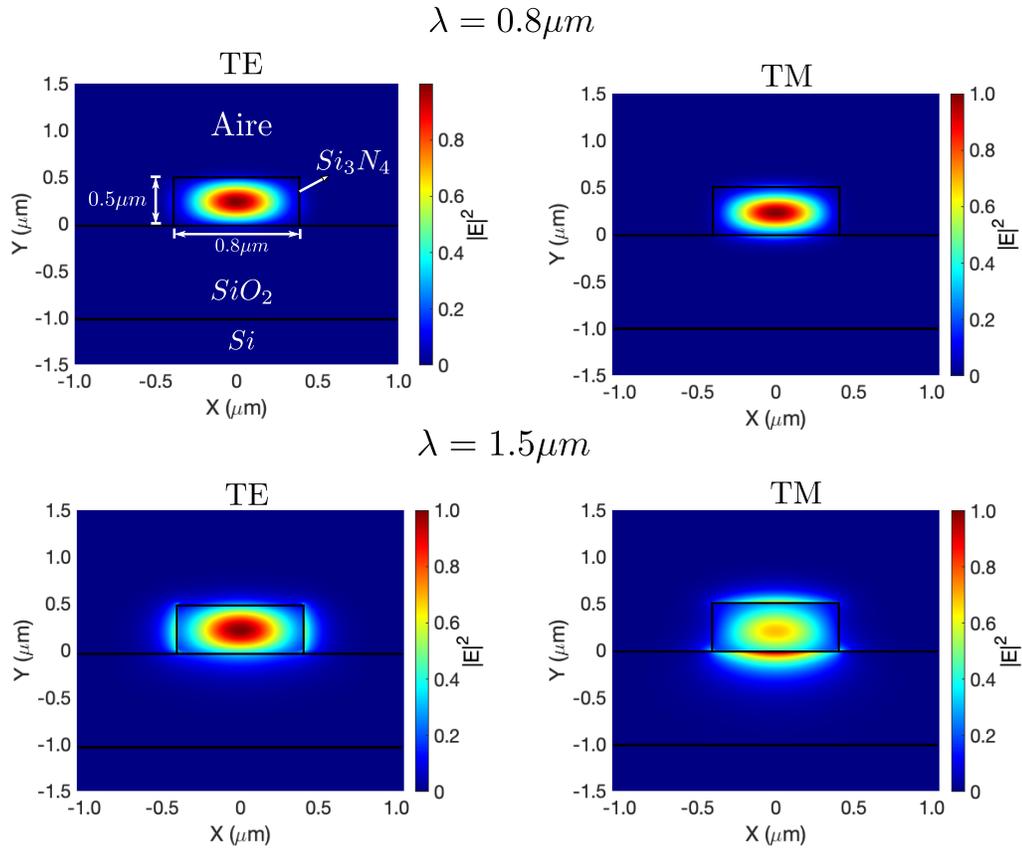


Figura 8. Modos fundamentales TE y TM que soporta una guía de onda como la que se muestra en la figura 7, para $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ y $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$.

2.4. Teoría de modos acoplados

Hasta este punto, se ha estudiado la propagación de luz en una guía de onda homogénea en la dirección de propagación. Sin embargo, los acopladores ópticos integrados que se estudiaron en este trabajo de investigación están compuestos por dos guías de onda tal como se observa en la figura 9a. Un acoplador óptico integrado está formado por una parte central de longitud L y por cuatro brazos: dos brazos de entrada y dos brazos de salida. Los brazos del acoplador están separados lo suficiente como para que los campos evanescentes de los modos que soporta cada guía no se solapen. Por el contrario, en la parte central del acoplador, las guías de onda se acercan lo suficiente para permitir el solapamiento de los campos evanescentes de los modos. Como consecuencia, se produce un acoplamiento entre los modos y se genera un intercambio de potencia entre las dos guías de onda (figura 9b). En esta sección, se estudia el comportamiento de la luz en la parte central del acoplador con ayuda de la teoría de modos acoplados (TMA).

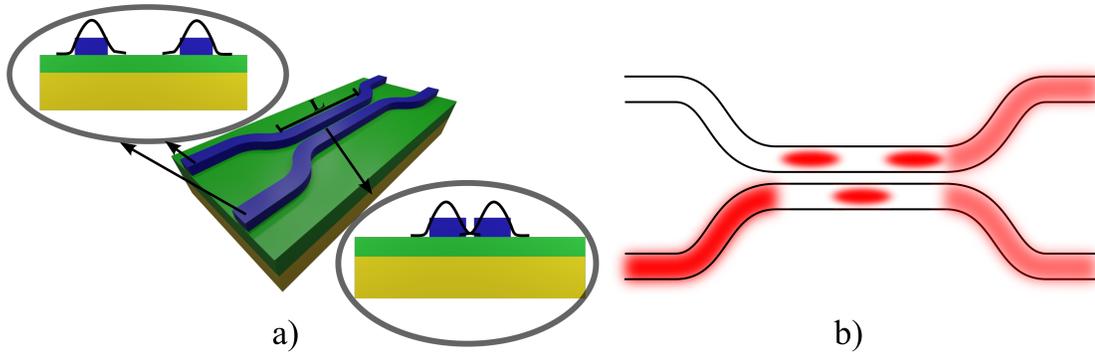


Figura 9. a) Esquema de un acoplador óptico integrado. b) Esquema de como sería el intercambio de potencia entre las guías de onda de un acoplador óptico integrado.

La TMA estudia la propagación de luz en una guía de onda que ha sufrido una perturbación, para lo cual utiliza los modos normales correspondientes a la estructura sin perturbar. En la figura 10 se observan dos guías de onda (guía 1 y guía 2), las cuales soportan un modo cada una.

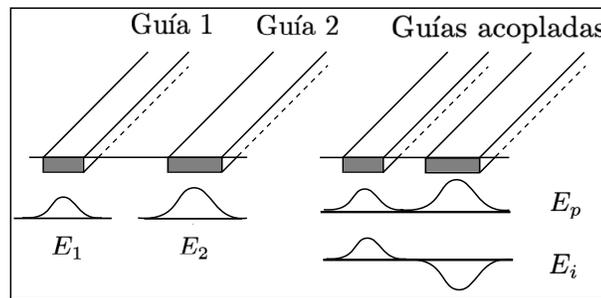


Figura 10. Esquema de modos acoplados para pequeñas separaciones de las guías de onda. Tomada y adaptada de la referencia (Lifante, 2003).

Cuando estas guías se encuentran lo suficientemente separadas, de tal forma que no se solapen los campos evanescentes de los modos, cada guía de onda se puede tratar independientemente y la parte escalar de los modos de propagación se puede escribir por las ecuaciones (22) y (23):

$$E_1(x, y, z, t) = A_0 \mathbb{E}_1(x, y) e^{-i\beta_1 z} e^{i\omega t} \quad (22)$$

$$E_2(x, y, z, t) = B_0 \mathbb{E}_2(x, y) e^{-i\beta_2 z} e^{i\omega t}, \quad (23)$$

donde $\mathbb{E}_1(x, y)$ y $\mathbb{E}_2(x, y)$ son las distribuciones transversales de los modos soportados por las guías 1 y 2, respectivamente; β_1 es la constante de propagación del modo de la guía de onda 1 y β_2 es la constante de propagación asociada al modo de la guía de onda 2; ω es la frecuencia angular de la luz y por último A_0 y B_0 son constantes asociadas a las amplitudes de los campos.

Por otro lado, cuando las guías de onda se acercan y los campos evanescentes se solapan, el problema se puede ver como un sistema de dos guías de onda acopladas y los modos soportados se pueden escribir matemáticamente como:

$$E_1(x, y, z, t) = A(z)\mathbb{E}_1(x, y)e^{-i\beta_1 z}e^{i\omega t} \quad (24)$$

$$E_2(x, y, z, t) = B(z)\mathbb{E}_2(x, y)e^{-i\beta_2 z}e^{i\omega t}. \quad (25)$$

Como se observa, cuando las guías de onda forman un sistema acoplado, A_0 y B_0 dejan de ser constantes y se convierten en funciones dependientes de la dirección de propagación. Para encontrar $A(z)$ y $B(z)$, se deben solucionar las ecuaciones acopladas (26) y (27) (Lifante, 2003)

$$\frac{dA(z)}{dz} = -i\kappa B(z)e^{-i2\Delta\beta z} \quad (26)$$

$$\frac{dB(z)}{dz} = -i\kappa A(z)e^{i2\Delta\beta z}, \quad (27)$$

en donde el parámetro κ se conoce como la constante de acoplamiento y está relacionada con la cantidad de solapamiento espacial de los modos y el parámetro $\Delta\beta = (\beta_1 - \beta_2)/2$ es el desempatamiento de fases. Cuando $\Delta\beta \neq 0$, el intercambio de potencia entre las guías de onda es incompleto, mientras que, si $\Delta\beta = 0$, se dice que hay empatamiento de fases y es posible un intercambio de potencia completo entre las guías de onda. El sistema acoplado de guías de onda, visto como un conjunto, soporta modos de propagación que son una combinación lineal de los modos de propagación de cada guía de onda. Estos modos del conjunto acoplado se conocen como modo par E_p y modo impar E_i , los cuales están dados por las ecuaciones (28) y (29)

$$E_p(x, y, z, t) = E_1(x, y, z, t) + E_2(x, y, z, t) \quad (28)$$

$$E_i(x, y, z, t) = E_1(x, y, z, t) - E_2(x, y, z, t). \quad (29)$$

Los modos par e impar poseen constantes de propagación β_p y β_i dadas por las ecuaciones (30) y (31)

$$\beta_p = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} + \gamma \quad (30)$$

$$\beta_i = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} - \gamma, \quad (31)$$

los cuales están relacionados con sus respectivos índices efectivos por la ecuación (20). De las ecuaciones (30) y (31) se observa que las constantes de propagación β_p y β_i están ligeramente desintonizadas

del promedio $(\beta_1 + \beta_2)/2$ por el parámetro γ que viene dado por la ecuación (32)

$$\gamma = \pm \sqrt{\kappa^2 + \Delta\beta^2}, \quad (32)$$

y la desintonización se mantiene incluso cuando $\Delta\beta = 0$ ($\beta_1 = \beta_2$).

Como ya se mencionó, E_1 y E_2 son modos de propagación de las guías de onda 1 y 2, respectivamente, cuando se considera cada guía de onda independientemente. Si éstas dos guías de onda se encuentran acopladas, E_1 y E_2 dejan de ser modos propios de cada guía de onda, y en su lugar, los modos de propagación del sistema acoplado son E_p y E_i . Éstos modos E_p y E_i pueden ser excitados simultáneamente, y como tienen constantes de propagación diferentes (ver ecuaciones (30) y (31)), se propagan con velocidades diferentes a lo largo del acoplador. Mientras se propagan, interfieren, y como consecuencia, se produce una transferencia de potencia periódica de una guía de onda a la otra.

Para el caso particular cuando se inyecta luz por una de las guías de onda en $z = 0$, se cumple que $A(0) = A_0$ y $B(0) = 0$ y la solución de las ecuaciones acopladas (26) y (27) dan como resultado (Lifante, 2003)

$$P_1 = \frac{|A(z)|^2}{|A_0|^2} = 1 - F \sin^2(\gamma z) \quad (33)$$

$$P_2 = \frac{|B(z)|^2}{|A_0|^2} = F \sin^2(\gamma z), \quad (34)$$

en donde

$$F = \frac{1}{1 + (\Delta\beta/\kappa)^2} = \left(\frac{\kappa}{\gamma}\right)^2. \quad (35)$$

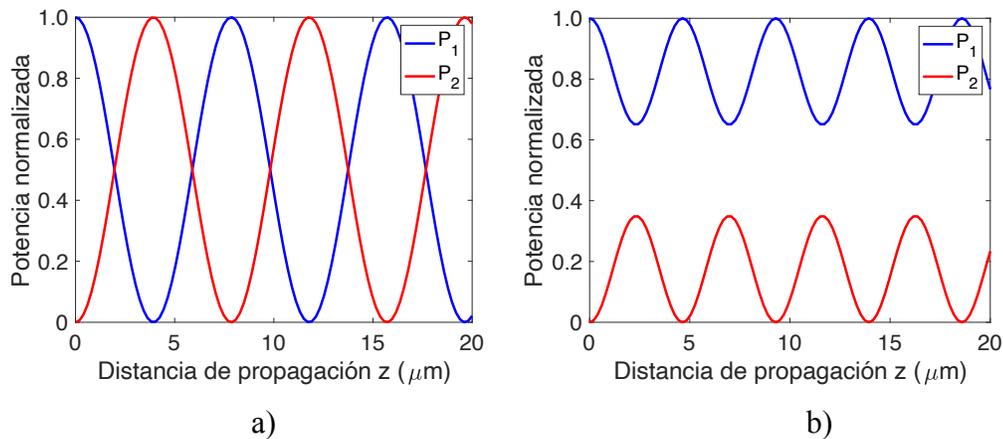


Figura 11. a) Potencia normalizada en función de la distancia de propagación para $F = 1$ y b) para $F = 0.35$.

Las ecuaciones (33) y (34), describen el comportamiento de la potencia en función de la distancia de propagación en la parte central del acoplador, lo cual se puede ver gráficamente en la figura 11. Como se observa, este comportamiento es oscilatorio y cuando $F = 1$, que es equivalente a decir que $\Delta\beta = 0$, hay completa transferencia de potencia (figura 11a). Cuando $F \neq 1$, no hay transferencia completa de potencia entre las guías a ninguna distancia de propagación (figura 11b).

Por último, la longitud mínima a la cual se transfiere toda la potencia de una guía de onda a la otra se conoce como longitud de acoplamiento y vienen dada por la ecuación (36)

$$L_c = \frac{\pi}{2\gamma} = \frac{\lambda}{2\Delta n}, \quad (36)$$

en donde Δn es la diferencia de índices efectivos de los modos par e impar como se muestra en la ecuación (37)

$$\Delta n = neff_p - neff_i, \quad (37)$$

y los índices efectivos par $neff_p$ e impar $neff_i$ se relacionan con las constantes de propagación β_p y β_i por la ecuación (20).

2.4.1. Acoplador óptico integrado funcionando como divisor de potencia y separador (mezclador) de frecuencias.

Uno de los objetivos de este trabajo de investigación es diseñar divisores de potencia y separadores (mezcladores) de frecuencias. Para hacer estos diseños, es fundamental calcular la longitud de acoplamiento y conocer el comportamiento de esta variable en función de los parámetros geométricos y de la longitud de onda.

En la figura 12 se ilustra el funcionamiento de un acoplador óptico como divisor de potencia. En dicho divisor se puede ver, que si se envía luz de cierta potencia por uno de los brazos de entrada, la potencia inicial se distribuye entre los dos brazos de salida. Modificando tanto L_c como la longitud central del acoplador L , se pueden obtener diferentes proporciones de potencia a la salida del acoplador. Despejando z de la ecuación (34) y γ de la ecuación (36) en función de L_c , se obtiene

$$z = \frac{2L_c}{\pi} \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{P_2(z)}{F}} \right). \quad (38)$$

A la salida de la parte central del acoplador se cumple que $z = L$ y con esto, la ecuación (38) se reduce

a la ecuación (39)

$$L = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{P_2(L)}{F}} \right) L_c. \quad (39)$$

Con ayuda de la ecuación (39) se puede determinar la longitud central L que debe tener el acoplador para que se obtenga una potencia de salida $P_2(L)$ en el brazo 2. Aquí se debe recordar, que por la ecuación (34), se cumple que $0 \leq P_2(L) \leq 1$. Más aún, si $F = 1$, como es el caso en este trabajo de tesis, la ecuación (39) se reduce a

$$L = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\sqrt{P_2(L)} \right) L_c. \quad (40)$$

Así por ejemplo, en la figura 12 se muestra el caso cuando $P_2(L) = 0.5$, en donde el divisor de potencia se puede llamar 50 : 50, porque se obtiene la misma cantidad de potencia en los dos brazos de salida.

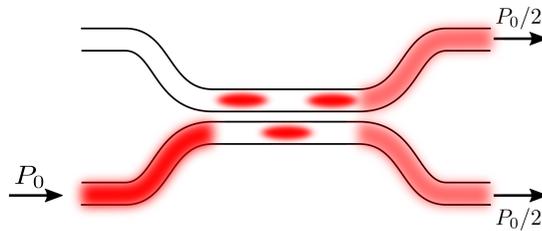


Figura 12. Esquema de un acoplador óptico integrado funcionando como un divisor de potencia 50 : 50.

Otra aplicación de los acopladores ópticos es la de separadores y mezcladores de frecuencias. En la figura 13a se ve el esquema de un acoplador óptico funcionando como un separador de frecuencias: dos haces de luz con frecuencias diferentes entran por uno de los brazos de entrada, pero cada frecuencia sale por un brazo diferente. Para que esto suceda, se debe cumplir que una de las frecuencias cambie de guía de onda un número impar de veces mientras que la otra frecuencia debe hacer un número par de cambios de guía de onda. Matemáticamente, se deben cumplir las condiciones establecidas en las ecuaciones (41) y (42):

$$L = (2m)L_{c1} = (2m + 1)L_{c2}, \quad (41)$$

$$L = (2m - 1)L_{c1} = (2m)L_{c2}, \quad (42)$$

en donde L_{c1} y L_{c2} son las longitudes de acoplamiento asociadas a las longitudes de onda λ_1 y λ_2 , respectivamente y m es un entero que puede tomar los valores $m = 1, 2, 3, \dots$. En las ecuaciones (41) y (42) se asume que $\lambda_2 > \lambda_1$ y por la ecuación (36) se cumple $L_{c2} < L_{c1}$. En la ecuación (41), el campo de longitud de onda λ_1 cambia un número par de veces de guía de onda, mientras que, el campo de longitud de onda λ_2 hace un número impar de cambios de guía de onda. El proceso contrario se da en

la ecuación (42). El proceso inverso también es posible, esto es, cada longitud de onda puede entrar por un brazo diferente y ambas salen por el mismo brazo. En este proceso se dice que el acoplador funciona como un mezclador de frecuencias (figura 13b).

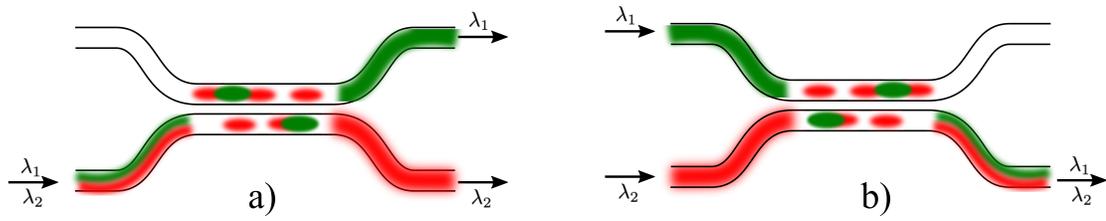


Figura 13. Esquema de un acoplador óptico integrado funcionando como a) separador de frecuencias y b) mezclador de frecuencias.

Capítulo 3. Diseño de acopladores ópticos integrados basados en Si_3N_4

3.1. Introducción

Para desarrollar los diseños de divisores de potencia y separadores (mezcladores) de frecuencias que se presentan en este trabajo de tesis, es necesario: 1) calcular de forma confiable la longitud de acoplamiento, 2) garantizar que solo el modo de interés sea el que se propague por el acoplador, 3) comprender el comportamiento de la longitud de acoplamiento en función de la longitud de onda y de parámetros geométricos de las guías de onda, 4) entender el comportamiento de la longitud de acoplamiento cuando el acoplador se cubre con algún material y 5) conocer los mecanismos por los cuales ocurren pérdidas de potencia.

Teniendo esto presente, este capítulo está organizado de la siguiente forma: En la sección 3.2 se describen los métodos numéricos empleados en este trabajo para calcular los índices efectivos de los modos y propagar luz por las estructuras. En la sección 3.3 se hace un estudio de convergencia para determinar resoluciones en las mallas de cálculo que generen resultados confiables y tiempos de cómputo razonables. En la sección 3.4 se compara la longitud de acoplamiento, calculada por cuatro métodos numéricos diferentes, y se discuten algunas ventajas y desventajas de cada método. Las condiciones geométricas de las guías de onda que determinan regiones en donde sean monomodales, bimodales o multimodales, se exploran en la sección 3.5. En la sección 3.6 se analiza el comportamiento de la longitud de acoplamiento cuando el acoplador se cubre de tres formas diferentes en su parte central, y se compara con el caso de un acoplador sin cubrir. La sección 3.7 describe el comportamiento de la longitud de acoplamiento en función de la longitud de onda y de parámetros geométricos de las guías de onda. En la sección 3.8 se describe un proceso para diagnosticar los efectos de posibles errores de fabricación sobre la longitud de acoplamiento. Por último, en la sección 3.9 se presentan resultados de la dependencia de las pérdidas de potencia y de la transmitancia de los modos soportados por las guías de onda en función del radio de curvatura de los brazos del acoplador.

3.2. Métodos numéricos

Las ecuaciones de Maxwell son la base para estudiar el comportamiento de la luz en un medio material. Sin embargo, en muchos casos, la solución analítica de estas ecuaciones es difícil o no se puede encontrar. Como una alternativa, las ecuaciones de Maxwell se pueden resolver con métodos numéricos. Además, hay paqueterías que se encargan de solucionarlas numéricamente y de forma

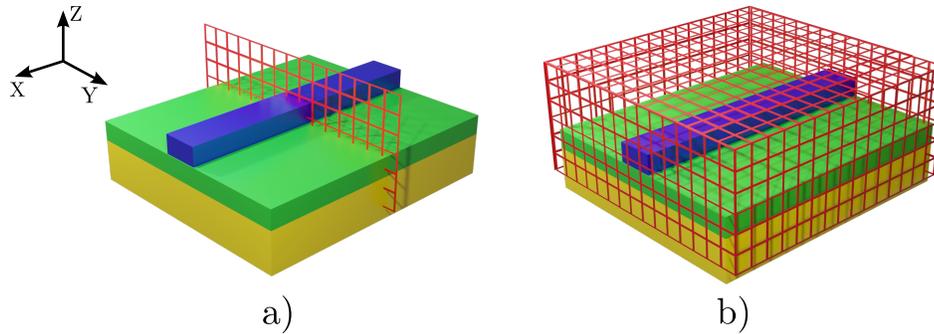


Figura 14. Esquema de una guía de onda enmallada a) bidimensionalmente y b) tridimensionalmente.

eficiente. En este trabajo, se utilizan paqueterías de Lumerical, las cuales están basadas en métodos de diferencias finitas. Estos métodos solucionan las ecuaciones de Maxwell discretizando el espacio ya sea en dos dimensiones (figura 14a) o en tres dimensiones (figura 14b), y se utilizan para calcular el perfil de los modos, sus respectivos índices efectivos, y para simular la propagación de modos de luz a lo largo de guías de onda. A continuación se describe brevemente cada método de solución utilizado:

- **Diferencias finitas de modos propios implementado por MODE Solutions de Lumerical:** Este método de solución, conocido como FDE (por sus siglas en inglés) se utiliza para calcular el perfil transversal y los índices efectivos de los modos que soportan las estructuras de guías de onda. El método consiste en enmallar la sección transversal de la estructura y resolver en cada punto las ecuaciones de Maxwell. Para más detalles ver (Ansys/Lumerical, 2021b).
- **Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo implementado por FDTD de Lumerical:** Este método de solución, conocido como FDTD (por sus siglas en inglés) se utiliza para simular la propagación de luz en las estructuras de guías de onda. El método discretiza el tiempo, enmalla la estructura tridimensionalmente y soluciona las ecuaciones de Maxwell para cada componente del campo en lugares ligeramente diferentes de cada celda de la malla. El vector de Poynting complejo, la transmisión y reflexión de la luz, son obtenidos con este método. Para más detalles ver (Ansys/Lumerical, 2021a).
- **Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo Variacional implementado por MODE Solutions de Lumerical:** De la misma forma que el método anterior, este método, también llamado VarFDTD (por sus siglas en inglés) se utiliza para simular la propagación de luz en las estructuras de guías de onda. Sin embargo, en este método, se reduce una geometría 3D a una geometría 2D y se utiliza el método de FDTD 2D. Si bien este método es más rápido que el FDTD, es un método aproximado y, por lo tanto, es menos preciso. Para más detalles ver (Ansys/Lumerical,

2021c).

3.3. Estudio de convergencia

El eje X se escoge en este y todos los siguientes estudios como la dirección de propagación (ver figura 14). La discretización del espacio se hace por medio de mallas que a su vez están compuestas por celdas. Mientras más celdas posea la malla, el resultado obtenido es más cercano al valor verdadero, pero el tiempo de cómputo aumenta porque se deben solucionar un número mayor de ecuaciones. Un estudio de convergencia permite escoger un número de celdas adecuado, tal que proporcione confianza en el resultado obtenido y al mismo tiempo evite que el tiempo de cómputo aumente excesivamente. Dicho estudio consiste en aumentar el número de celdas de la malla, y en cada variación, calcular el parámetro de interés. Se dice que hay convergencia cuando el parámetro tiende a un mismo valor. En esta sección se estudia la convergencia del índice efectivo del modo fundamental TE que soporta una guía de onda de Si_3N_4 sobre SiO_2 y en un sustrato de Si. La dispersión de estos materiales se muestra en la figura 15. Estas dispersiones se obtuvieron de materiales fabricados en el LaNNAFab, se midieron por la técnica de elipsometría y son las que se utilizan para las simulaciones presentadas en este trabajo de tesis.

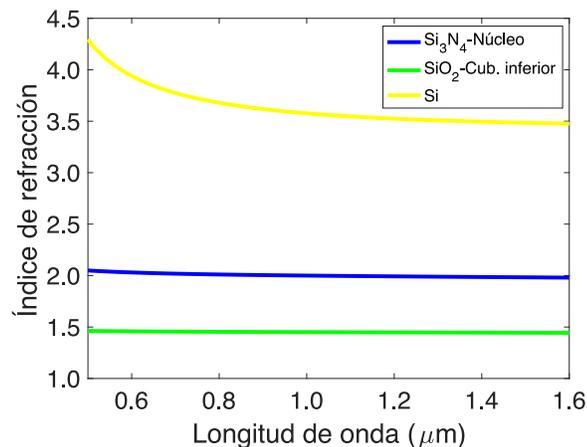


Figura 15. Dispersión de los materiales base de las guías de onda. Cub. inferior es la abreviatura para cubierta inferior.

Para determinar los modos que soporta una guía de onda y sus características, es suficiente conocer la sección transversal de la estructura. Por esta razón, en este estudio se emplea el método FDE con el cual se discretiza la estructura en el plano YZ, como se aprecia en la figura 16. El estudio de convergencia se concentra en el núcleo y en sus alrededores, ya que toda la luz de los modos de propagación permanece en estas regiones. Por lo tanto, se utilizan dos mallas (figura 16a); una malla

externa cuya resolución (número de celdas por micra) en Y y en Z es constante, y una malla interna con resoluciones en Y y Z variables. Las resoluciones de la malla interna que se escogen son aquellas a partir de las cuales se mantienen constantes las tres primeras cifras decimales del índice efectivo.

En todos los estudios en los que se utilice el método FDE, las resoluciones en Y y Z de la malla externa se fijan en $Re_y = 10 \text{ cel}/\mu\text{m}$ y $Re_z = 11.11 \text{ cel}/\mu\text{m}$, respectivamente. En este estudio de convergencia, una vez fijos estos valores, se calcula el índice efectivo del modo fundamental TE en función de las resoluciones en Y y Z de la malla interna. En la figura 16b se observa la notación utilizada desde ahora para los parámetros geométricos de la guía de onda y de las mallas: las alturas de SiO_2 y Si tienen un valor de $Al_{\text{SiO}_2} = 1.0 \mu\text{m}$ y $Al_{\text{Si}} = 2.0 \mu\text{m}$, respectivamente; los anchos del SiO_2 , Si, Si_3N_4 y de las mallas interna y externa son $An_{\text{SiO}_2} = An_{\text{Si}} = 10 \mu\text{m}$, $An_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 1 \mu\text{m}$, $An_{M_{int}} = 2 \mu\text{m}$ y $An_{M_{ext}} = 5 \mu\text{m}$, respectivamente; las alturas del Si_3N_4 y de las mallas interna y externa son $Al_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 0.5 \mu\text{m}$, $Al_{M_{int}} = 1.5 \mu\text{m}$ y $Al_{M_{ext}} = 4.5 \mu\text{m}$. Las figuras 16c y 16d muestran los perfiles transversales del modo fundamental TE para las longitudes de onda $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$ y $\lambda = 1.555 \mu\text{m}$ empleadas para la geometría anteriormente descrita.

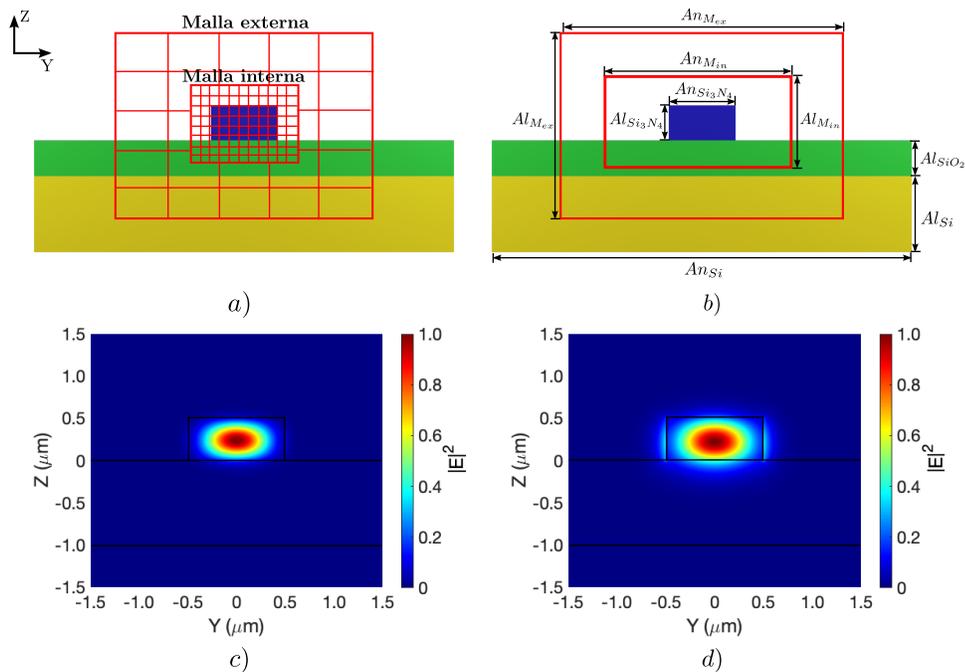


Figura 16. a) Mallas externa e interna para el estudio de convergencia. b) Notación de los parámetros geométricos de la guía de onda y de las mallas. $An_{M_{ext}}$ y $Al_{M_{ext}}$ son el ancho y la altura de la malla externa; $An_{M_{int}}$ y $Al_{M_{int}}$ representan el ancho y la altura de la malla interna; el ancho y la altura del Si_3N_4 son $An_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ y $Al_{\text{Si}_3\text{N}_4}$, respectivamente; An_{SiO_2} y Al_{SiO_2} son el ancho y la altura del SiO_2 ; y por último, An_{Si} y Al_{Si} representan el ancho y la altura del Si. c) Perfil transversal del modo fundamental TE para $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$. d) Perfil transversal del modo fundamental TE para $\lambda = 1.555 \mu\text{m}$.

En las figuras 17a y 17b, se observan los resultados del estudio de convergencia para la estructura de la figura 16b y $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$. En la figura 17a se grafica el índice efectivo del modo fundamental TE

en función de las resoluciones en Y y Z de la malla interna. Se puede ver que a mayor resolución en ambas direcciones, el índice efectivo tiende a un mismo valor. En concreto, para resoluciones en Y y Z de la malla interna $Ri_y \geq 50 \text{ cel}/\mu\text{m}$ y $Ri_z \geq 55 \text{ cel}/\mu\text{m}$, el índice efectivo del modo fundamental TE mantiene constante sus tres primeras cifras decimales y tiene un valor de $neff = 1.873$. Además, en la figura 17b se grafica el gradiente de índices efectivos en función de la resolución de la malla interna. Se observa como, para mayores resoluciones de la malla interna, el gradiente de índices efectivos tiende a cero, lo que quiere decir que hay convergencia a un mismo valor. De la misma forma, en las figuras 17c) y 17d) se muestra el índice efectivo y el gradiente de índices efectivos, respectivamente en función de las resoluciones de la malla interna para $\lambda = 1.555 \mu\text{m}$. En este caso, $neff = 1.628$, $Ri_y \geq 175 \text{ cel}/\mu\text{m}$ y $Ri_z \geq 25 \text{ cel}/\mu\text{m}$.

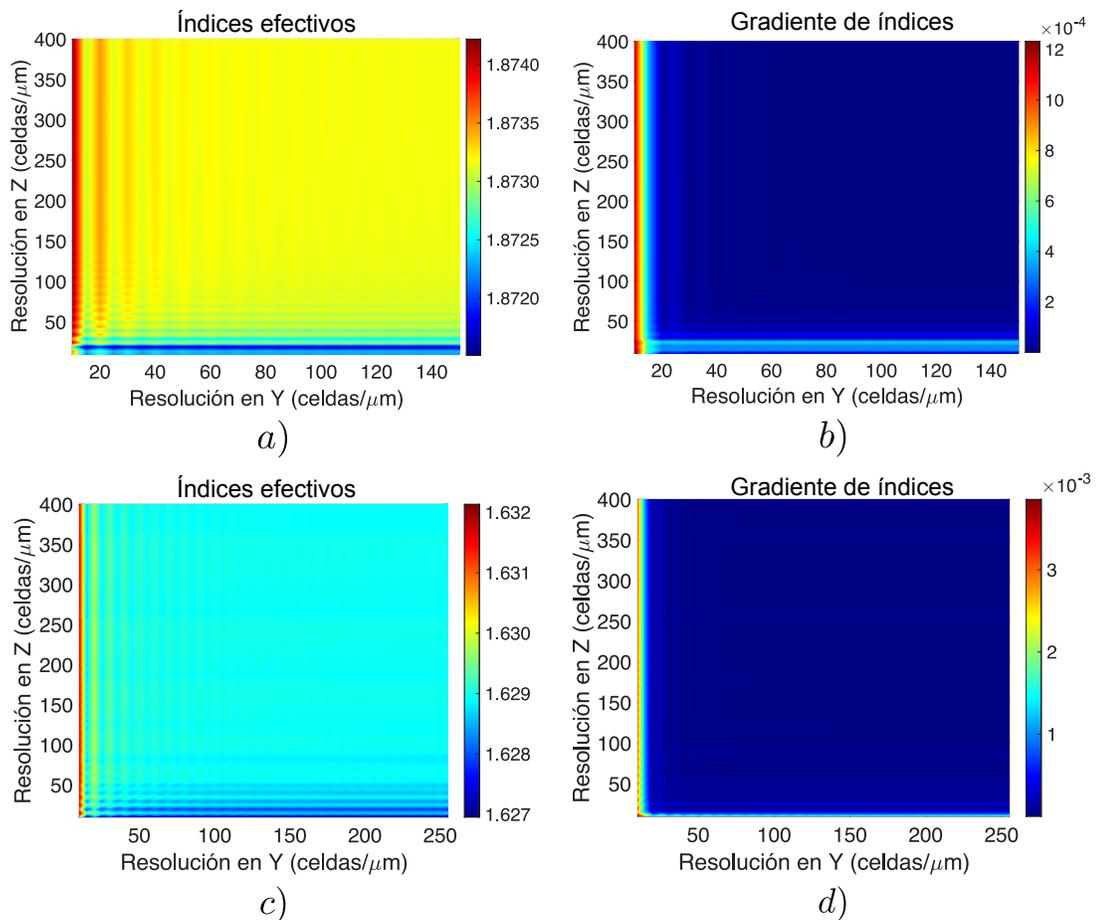


Figura 17. Resultados del estudio de convergencia para el modo fundamental TE. a) Índice efectivo en función de las resoluciones en Y y Z para $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$. b) Gradiente de índices efectivos en función de las resoluciones en Y y Z para $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$. c) Índice efectivo en función de las resoluciones en Y y Z para $\lambda = 1.555 \mu\text{m}$. b) Gradiente de índices efectivos en función de las resoluciones en Y y Z para $\lambda = 1.555 \mu\text{m}$.

En la parte central de un acoplador, en donde hay dos guías de onda cercanas, los campos evanescentes de los modos que soporta cada guía de onda se solapan. Por esta razón, para acopladores

ópticos integrados se utiliza una tercera malla (a la que se le llama desde ahora malla-brecha) con resoluciones Rb_y y Rb_z mayores que las de las mallas externa e interna. La malla-brecha tiene un ancho igual a la separación entre las guías y una altura igual a la de las guías de onda (figura 18). A partir de aquí, y teniendo en cuenta los resultados de convergencia para las dos longitudes de onda de interés, se utilizarán las resoluciones $Ri_y = 200 \text{ cel}/\mu\text{m}$, $Ri_z = 100 \text{ cel}/\mu\text{m}$, $Rb_y = 220 \text{ cel}/\mu\text{m}$ y $Rb_z = 120 \text{ cel}/\mu\text{m}$.

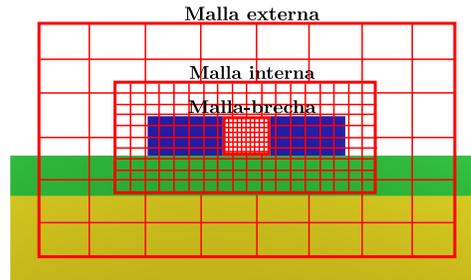


Figura 18. Esquema de las mallas externa, interna y de la malla-brecha.

En la tabla 1 se comparan los índices efectivos par e impar del modo fundamental TE calculados con dos conjuntos de resoluciones diferentes; el conjunto de resoluciones escogidas de acuerdo al estudio de convergencia (caso 1) y un conjunto con resoluciones mayores (caso 2). Para este análisis $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$, y el acoplador está basado en dos guías de onda con las mismas dimensiones que en la figura 16b y separadas entre ellas $An_b = 0.250 \mu\text{m}$. Los perfiles transversales de los modos fundamentales TE par e impar se muestran en las figuras 19b y 19c, respectivamente. En la tabla 1 se observa que para mayores resoluciones, se siguen manteniendo igual las primeras tres cifras decimales de los índices efectivos y se mantienen igual incluso las cuatro primeras cifras decimales.

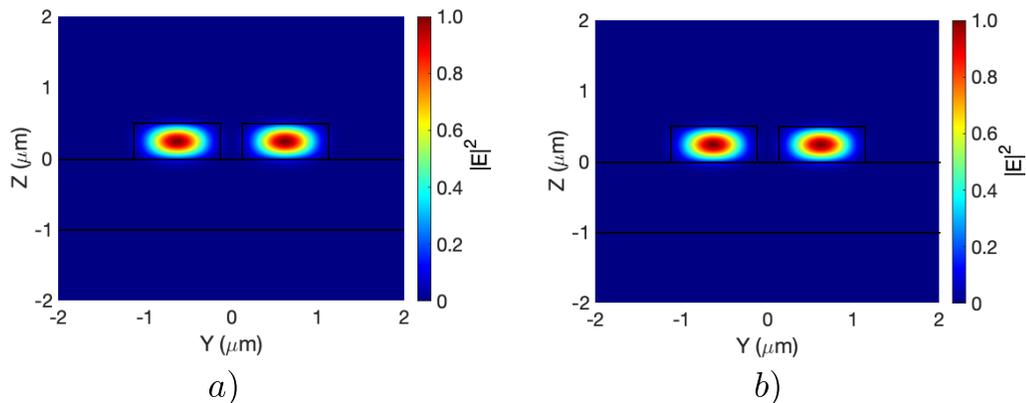


Figura 19. Perfil transversal del a) modo fundamental TE par y b) modo fundamental TE impar.

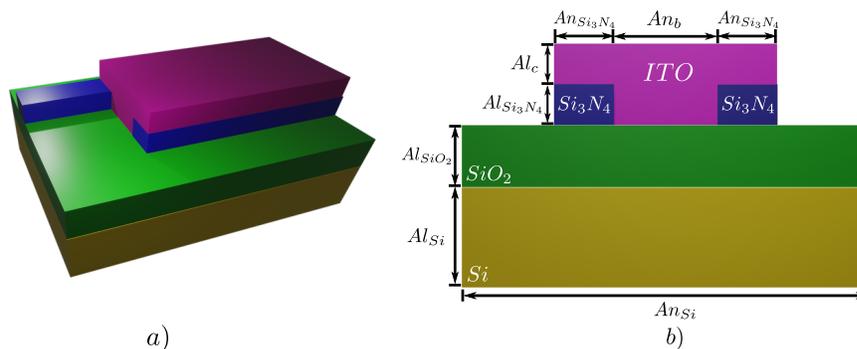
Tabla 1. Índices efectivos par e impar del modo fundamental TE determinados con dos conjuntos de resoluciones diferentes.

	Caso 1	Caso 2
$Ri_y(vel/\mu m)$	200	300
$Ri_z(vel/\mu m)$	100	200
$Rb_y(vel/\mu m)$	220	350
$Rb_z(vel/\mu m)$	120	250
$neff_p$	1.856200	1.856278
$neff_i$	1.855868	1.855946

3.4. Cálculo numérico de la longitud de acoplamiento

Con las paqueterías MODE Solutions y FDTD de Lumerical se puede calcular la longitud de acoplamiento por métodos diferentes. Estos métodos tienen similitudes pero al mismo tiempo presentan notables diferencias. Una forma de poner a prueba algunos de los diferentes métodos es calcular, con cada uno de ellos, la longitud de acoplamiento para un acoplador con condiciones de acoplamiento fuerte. Esta condición de fuerte acoplamiento se da cuando un conjunto específico de parámetros (anchos de las guías, longitud de onda, entre otros) genera una rápida transferencia de potencia entre las guías de onda del acoplador.

La comparación de los métodos de solución se hace para $\lambda = 1.555 \mu m$ y el modo fundamental TE para un acoplador como el que se muestra en la figura 20a. Como se observa, está compuesto por un brazo recto por donde se inyecta la luz y por la región en donde se produce la transferencia de potencia. Esta última región está cubierta con óxido de Indio y Estaño (ITO, por sus siglas en inglés), tanto en la separación entre las guías como en la parte superior de las mismas. La vista frontal de la estructura y la notación para algunos parámetros geométricos se muestran en la figura 20b. En particular, para esta comparación, se utiliza la siguiente geometría: $Al_{Si_3N_4} = 0.450 \mu m$, $An_{Si_3N_4} = 0.600 \mu m$ y $An_b = 0.100 \mu m$. Adicionalmente, $Al_c = 0.500 \mu m$ es la altura de la cubierta de ITO por encima de las guías.

**Figura 20.** Esquema del acoplador utilizado para comparar los cuatro métodos de solución. Vista a) en perspectiva y b) frontal.

La longitud de acoplamiento se calcula por cuatro métodos diferentes. Estos métodos son: 1) FDE más TMA, 2) FDE más el comando *propagate* de MODE Solutions, 3) VarFDTD y 4) FDTD. Los últimos tres métodos son totalmente numéricos, mientras que el primer método es semianalítico. Esto se debe a que, en el primer método, se calculan los índices efectivos de los modos fundamentales TE par e impar con FDE, y su diferencia, se reemplaza en la ecuación (36) que es resultado de la TMA.

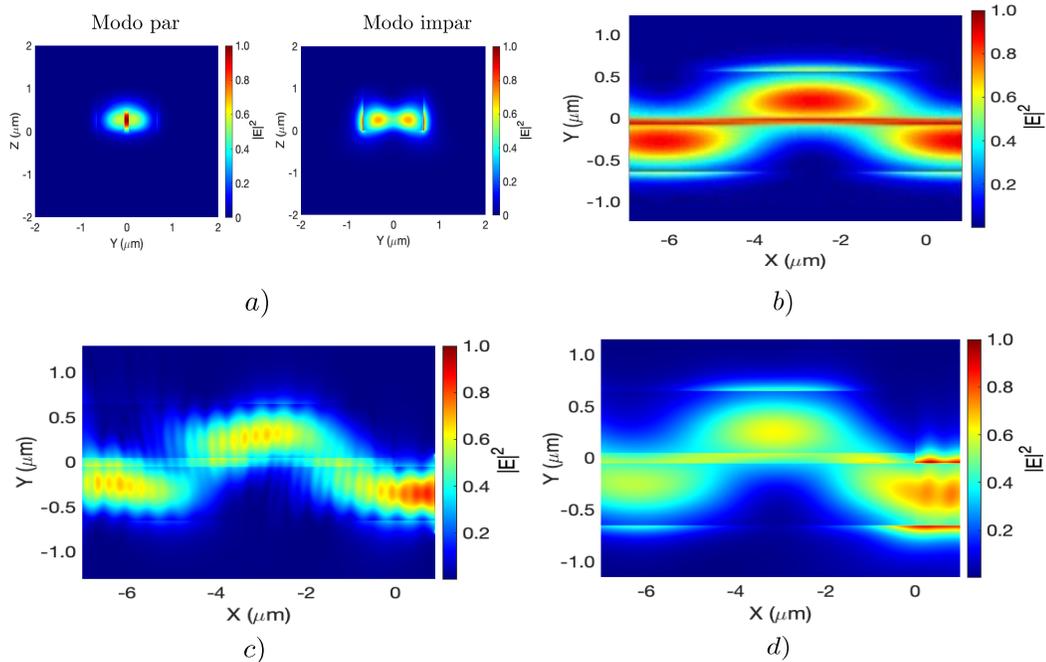


Figura 21. Resultados de la longitud de acoplamiento por cuatro métodos diferentes. a) FDE más TMA. b) FDE más *propagate*. c) VarFDTD. d) FDTD.

Los modos par e impar obtenidos por FDE más TMA se muestran en la figura 21a y sus respectivos índices efectivos son $neff_p = 1.6877$ y $neff_i = 1.4427$. Con estos valores, se obtiene $L_c = 3.18 \mu m$. En el método FDE más *propagate*, con FDE se descompone el modo fundamental TE (que se envía por el brazo) en los modos soportados por el acoplador en la región de acoplamiento y estos modos se propagan por la estructura utilizando el comando *propagate*. Por último, a lo largo de la dirección de propagación, se suman coherentemente los modos para obtener el perfil del modo resultante. La gráfica de la magnitud al cuadrado del campo eléctrico $|E|^2$, en función de X y Y se muestra en la figura 21b. Aquí $L_c = 3.14 \mu m$ y se obtiene determinando la distancia que hay entre máximos de lóbulos consecutivos.

En las figuras 21c y 21d se presentan las gráficas de $|E|^2$ en función de X y Y obtenidas con los métodos VarFDTD y FDTD. Para ambos métodos la longitud de acoplamiento se calcula de la misma forma que para FDE más *propagate*. Por VarFDTD, $L_c = 3.35 \mu m$ y por FDTD se obtiene $L_c = 3.14 \mu m$.

Tabla 2. Longitud de acoplamiento calculada por cuatro métodos numéricos diferentes.

Método	Longitud de acoplamiento (μm)
FDE+TMA	3.18
FDE+Propagate	3.14
VarFDTD	3.35
FDTD	3.14

Las gráficas de la figura 21 se normalizan tal que $|E|^2/|E|_{max}^2$, y todos los resultados se resumen en la tabla 2.

Las longitudes de acoplamiento calculadas por los cuatro métodos son valores muy cercanos. La longitud de acoplamiento calculada con FDTD es más confiable, ya que este método enmalla la estructura tridimensionalmente. Sin embargo, esto hace que sea por mucho, el método que emplea más tiempo de cómputo (que puede ser de varios días). El método FDE más TMA es el más rápido, ya que el cálculo demora alrededor de un minuto. Sin embargo, se dificulta hacer un estudio de pérdidas de potencia porque no permite simular la propagación de la luz. Con el método FDE más *propagate*, la duración del cálculo es del orden de unos pocos minutos. Si bien esto es una ventaja, la propagación no se puede hacer en estructuras curvas y esto dificulta el incluir los brazos del acoplador para hacer un diseño completo. Por último, el método VarFDTD tiene la desventaja de ser menos exacto que el FDTD, pero tiene entre sus ventajas que el cálculo dura unas pocas horas, se puede hacer propagación en estructuras curvas y se puede hacer un estudio de pérdidas de potencia utilizando monitores de potencia tal como en FDTD. Por estas razones, en lo que sigue en este trabajo de tesis, se utilizarán los métodos FDE más TMA y VarFDTD para los estudios de interés.

3.5. Búsqueda de condiciones monomodo

En la sección 2.4 se obtuvieron las principales ecuaciones de la TMA. Para esto, se asumió que las guías de onda que componen el acoplador son monomodales. Cuando las guías de onda soportan más de un modo de propagación, cada modo tiene asociado una longitud de acoplamiento diferente. Si este es el caso y el acoplador se diseña utilizando, por ejemplo el modo fundamental TE, y experimentalmente se excita un modo no deseado, el acoplador funciona diferente con respecto al diseño esperado. Una de las formas de evitar este problema es encontrar las dimensiones para la cual la guía de onda sea monomodal en la longitud de onda de interés. Otra alternativa es que la estructura sea bimodal, de tal forma que, solo soporte los modos fundamentales TE y TM, y experimentalmente se garantice que se excita a la entrada del acoplador el modo de interés.

Teniendo en cuenta lo anterior, en esta sección se hace un estudio del número de modos que soporta la guía de onda en función de su ancho y altura para $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$ (figura 22a) y $\lambda = 1.555 \mu\text{m}$ (figura 22b).

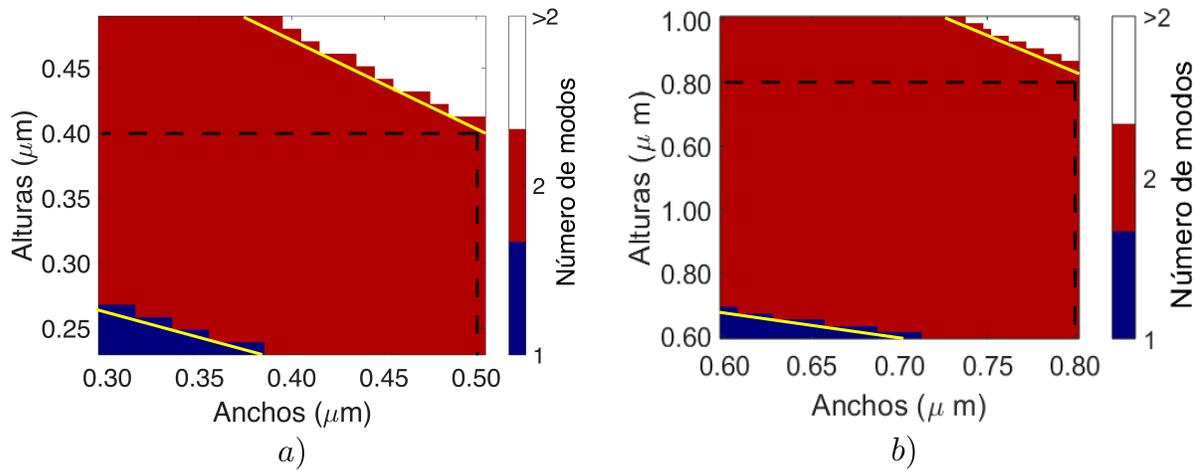


Figura 22. Gráfica del número de modos en función de la altura y el ancho de la guía de onda.

Como se observa en las figuras 22a y 22b, el número de modos que soporta la guía de onda aumenta con incrementos en el ancho y la altura del núcleo. Sin embargo, para $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$, las dimensiones para que la guía de onda sea monomodal deben ser menores que para $\lambda = 1.555 \mu\text{m}$. Asimismo, se observa que para $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$, con alturas menores a $0.40 \mu\text{m}$ y anchos menores a $0.50 \mu\text{m}$ (región por debajo de las líneas punteadas), la guía de onda soporta como máximo los modos fundamentales TE y TM. Esto mismo sucede para $\lambda = 1.555 \mu\text{m}$, siempre que las alturas y anchos se mantengan por debajo de $0.80 \mu\text{m}$ (región por debajo de las líneas punteadas). Más aún, como se observa en las dos gráficas, las fronteras monomodal-bimodal y bimodal-multimodal se pueden aproximar por funciones lineales (líneas amarillas). De esta forma, para $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$, la guía de onda es monomodal cuando $Al_{Si_3N_4}$ y $An_{Si_3N_4}$ cumplen con la ecuación (43)

$$Al_{Si_3N_4} \leq -0.429An_{Si_3N_4} + 0.389, \quad (43)$$

bimodal cuando

$$-0.429An_{Si_3N_4} + 0.389 \leq Al_{Si_3N_4} \leq -0.833An_{Si_3N_4} + 0.817, \quad (44)$$

y multimodal cuando se cumple con la ecuación (45)

$$Al_{Si_3N_4} \geq -0.833An_{Si_3N_4} + 0.817. \quad (45)$$

De forma análoga, para $\lambda = 1.555 \mu m$, la guía de onda es monomodal si $Al_{Si_3N_4}$ y $An_{Si_3N_4}$ cumplen con la ecuación (46)

$$Al_{Si_3N_4} \leq -0.8An_{Si_3N_4} + 1.16, \quad (46)$$

bimodal si cumple

$$-0.8An_{Si_3N_4} + 1.16 \leq Al_{Si_3N_4} \leq -2.5An_{Si_3N_4} + 2.8, \quad (47)$$

y multimodal cuando se cumple la ecuación (48)

$$Al_{Si_3N_4} \geq -2.5An_{Si_3N_4} + 2.8. \quad (48)$$

Las ecuaciones (43)-(48) son válidas siempre que las alturas y anchos se encuentren en el intervalo de valores mostrados en la figura 22. Para $\lambda = 0.826 \mu m$, $0.300 \mu m \leq An_{Si_3N_4} \leq 0.500 \mu m$ y $0.230 \mu m \leq Al_{Si_3N_4} \leq 0.500 \mu m$, mientras que para $\lambda = 1.555 \mu m$, $0.600 \mu m \leq An_{Si_3N_4} \leq 0.800 \mu m$ y $0.600 \mu m \leq Al_{Si_3N_4} \leq 1.00 \mu m$.

3.6. Cuatro configuraciones para la parte central del acoplador

El diseño de un acoplador óptico integrado se debe hacer de tal forma que sea lo suficientemente pequeño para ser integrado en un circuito fotónico. Por otra parte, como ya se mencionó en la sección 2.4.1, la longitud central del acoplador depende de la longitud de acoplamiento; a mayor longitud de acoplamiento mayor longitud central del acoplador. Una de las estrategias para disminuir la longitud de acoplamiento es disminuyendo el contraste dieléctrico entre el núcleo y la cubierta. Con este propósito, en esta sección se estudian cuatro configuraciones diferentes para la parte central del acoplador, las cuales se pueden ver en la figura 23. En la configuración sin cubrir, la parte superior y la brecha entre las guías están constituidas por aire. En la configuración todo cubierto, hay material en la brecha entre las guías y también a los lados y en la parte superior de éstas. En la configuración parcialmente cubierto, hay material en la brecha entre las guías y en la parte superior de las guías. Por último, en la configuración brecha cubierta, como su nombre lo indica, hay material solo en la brecha entre las guías.

En la figura 24 se muestra la gráfica de la longitud de acoplamiento en función del índice de refracción del material de la cubierta para $\lambda = 0.826 \mu m$. En este caso, las dimensiones de los materiales son $Al_{Si_3N_4} = 0.495 \mu m$, $An_{Si_3N_4} = 0.800 \mu m$, $An_b = 0.500 \mu m$ y $Al_c = 0.500 \mu m$. Con FDE se calcularon los índices efectivos par e impar del modo fundamental TE y su diferencia se reemplazó en la

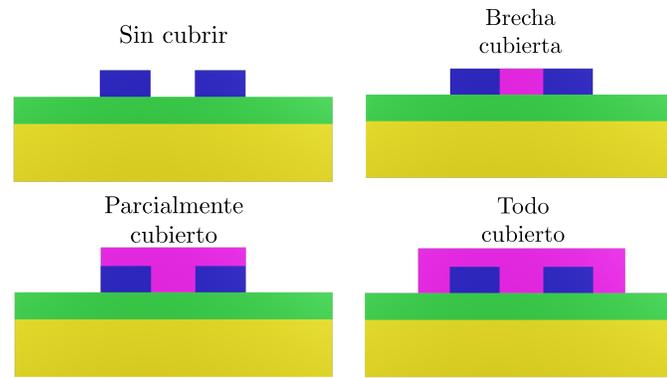


Figura 23. Cuatro configuraciones diferentes para la parte central del acoplador.

ecuación (36) derivada de la TMA. Como se observa en la figura 24, para todas las configuraciones excepto para la configuración sin cubrir, la longitud de acoplamiento disminuye cuando el índice de la cubierta aumenta (menor contraste dieléctrico). Además, la configuración parcialmente cubierto es la que presenta menores longitudes de acoplamiento. La configuración sin cubrir corresponde al valor de índice de refracción de la cubierta $n = 1$, el cual presenta la mayor longitud de acoplamiento de todas.

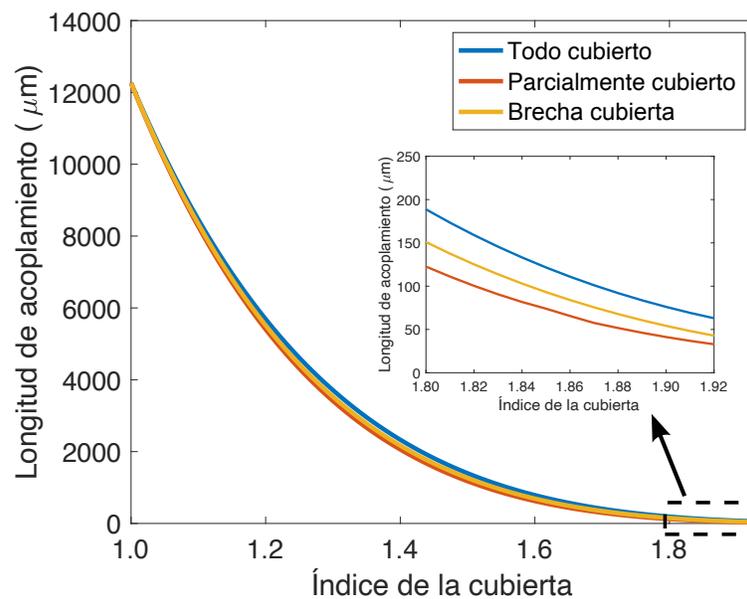


Figura 24. Longitud de acoplamiento en función del índice de refracción de la cubierta para las cuatro configuraciones para cubrir el acoplador.

Para tener en cuenta, la tabla 3 muestra diferentes materiales que se pueden fabricar en el LaNNA-Fab y pueden ser utilizados como cubierta. En esta tabla también se presentan los índices de refracción de dichos materiales para $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$.

Tabla 3. Diferentes materiales que se pueden fabricar en el LaNNAFab y sus respectivos índices de refracción para $\lambda = 0.826\mu\text{m}$.

Materiales	Índice de refracción del material a $\lambda = 0.826\mu\text{m}$
Parileno	1.4864
ZrO_2	1.8595
ZnO	1.8687
ITO	1.9163
SiO_2	1.4580
Si_3N_4	1.9933

3.7. Longitud de acoplamiento en función de parámetros geométricos y de la longitud de onda

Conocer el comportamiento de la longitud de acoplamiento en función ya sea de parámetros geométricos de las guías o de la longitud de onda es parte fundamental del diseño de un acoplador óptico integrado. En esta dirección, para un acoplador con geometría como la mostrada en la figura 20b, y con valores fijos $Al_{Si_3N_4} = 0.495\mu\text{m}$, $Al_c = 0.500\mu\text{m}$ y $\lambda = 0.826\mu\text{m}$, en la figura 25a se puede ver la longitud de acoplamiento en función del ancho de las guías y de la separación entre las mismas. Como se muestra, la longitud de acoplamiento aumenta con incrementos en el ancho de las guías y la separación entre éstas. Por otro lado, la longitud de acoplamiento aumenta conforme la altura de las guías también aumenta, pero disminuye cuando la longitud de onda se incrementa (figura 25b). Para este último caso, los parámetros que se dejaron fijos en la geometría son $An_{Si_3N_4} = 0.800\mu\text{m}$, $Al_c = 0.500\mu\text{m}$ y $An_b = 0.500\mu\text{m}$.

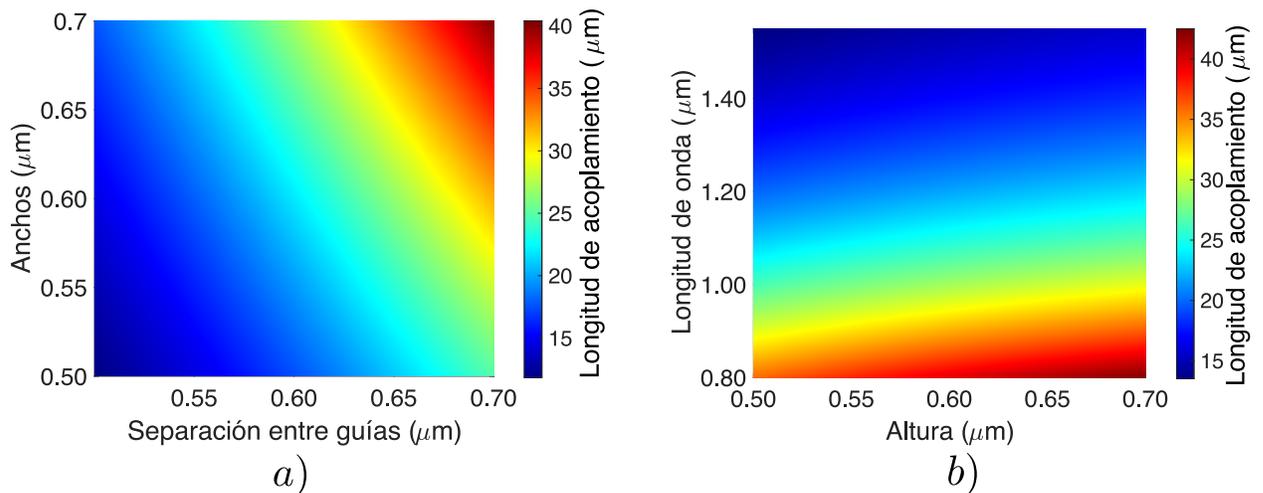


Figura 25. a) Longitud de acoplamiento en función del ancho y la separación de las guías de onda. b) Longitud de acoplamiento en función de la longitud de onda y de la altura de las guías de onda.

De acuerdo con estos resultados, divisores de potencia y separadores (mezcladores) de frecuencias diseñados para longitudes de onda más hacia el visible, tienden a tener mayor tamaño que los diseñados para longitudes de onda en el infrarrojo. Además, se puede ver en estas gráficas que longitudes de acoplamiento como máximo de $43 \mu m$ se obtienen para parámetros geométricos con valores menores a $1 \mu m$, lo cual favorece la integración de los acopladores en un circuito fotónico integrado.

3.8. Diagnóstico de errores de fabricación

Como se observó en la sección 3.7, la longitud de acoplamiento depende de parámetros geométricos de las guías de onda y de la longitud de onda, y a su vez, el diseño de divisores de potencia y separadores (mezcladores) de frecuencias depende de la longitud de acoplamiento. Adicionalmente, en el proceso de fabricación de un acoplador óptico integrado, se producen errores en las dimensiones de las estructuras, y como resultado, el acoplador funciona de forma diferente a como fue diseñado. Para tener en cuenta estas variaciones con respecto al diseño propuesto, se puede hacer un diagnóstico de los errores que se pueden dar en la fabricación. Una forma es estudiar la variación de la longitud de acoplamiento en función de los errores de fabricación con una aproximación lineal como la que se muestra en la ecuación (49)

$$\Delta L_c = \left. \frac{\partial L_c}{\partial (An_{S_{i_3N_4}})} \right|_a \Delta An_{S_{i_3N_4}} + \left. \frac{\partial L_c}{\partial (Al_{S_{i_3N_4}})} \right|_b \Delta Al_{S_{i_3N_4}} + \left. \frac{\partial L_c}{\partial (An_b)} \right|_c \Delta An_b. \quad (49)$$

Con la ecuación (49), es suficiente conocer las derivadas parciales de L_c con respecto a las dimensiones geométricas, alrededor de las dimensiones $An_{S_{i_3N_4}} = a$, $Al_{S_{i_3N_4}} = b$ y $An_b = c$, para generar un diagnóstico de errores de fabricación.

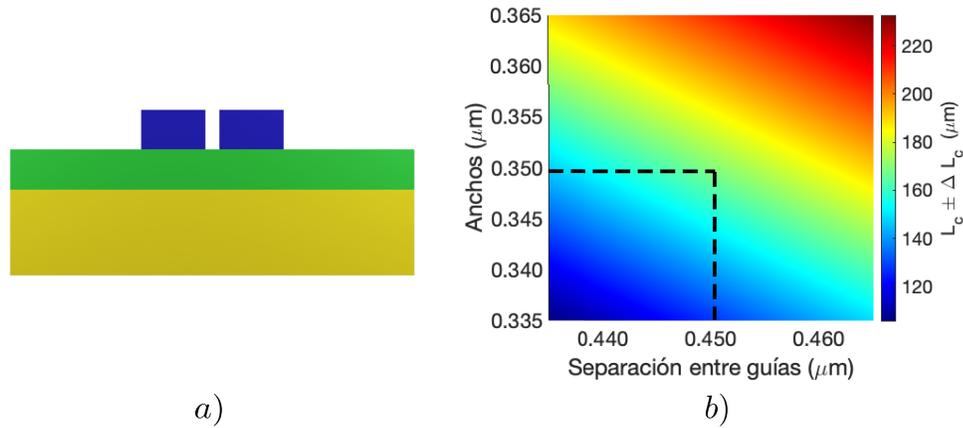


Figura 26. a) Esquema del acoplador óptico integrado empleado para hacer el diagnóstico de errores de fabricación. b) Variación en la longitud de acoplamiento con respecto a posibles errores de fabricación en el ancho y la separación entre las guías para un valor fijo $Al_{S_{i_3N_4}} = 0.495 \mu m$ y $\lambda = 0.826 \mu m$.

Por ejemplo, para un acoplador con sección transversal como se muestra en la figura 26a, con dimensiones $An_{S_{i_3N_4}} = 0.350 \mu m$, $Al_{S_{i_3N_4}} = 0.495 \mu m$, $An_b = 0.450 \mu m$ y longitud de onda $\lambda = 0.826 \mu m$; un diagnóstico debido a errores en el ancho y la separación entre las guías se muestra en la figura 26b. En estos resultados se observa como errores de $\Delta An_{S_{i_3N_4}} = \pm 0.015 \mu m$ y $\Delta An_b = \pm 0.015 \mu m$ producen variaciones en la longitud de acoplamiento de $\Delta L_c = \pm 63.534 \mu m$. Estos resultados muestran que las variaciones en la longitud de acoplamiento son altamente sensibles a variaciones en las dimensiones de las guías de onda en el proceso de fabricación, lo cual afecta el funcionamiento de los acopladores. En la práctica, una forma de compensar éstas variaciones en la longitud de acoplamiento es fabricar muchos acopladores de diferentes longitudes sobre un mismo sustrato, y así se puede escoger aquel que funcione como fue previsto inicialmente. Además, ésta metodología del diagnóstico de los errores se puede implementar a la inversa, es decir, obtener experimentalmente la longitud de acoplamiento y a partir de ésta, estimar las fuentes de error que pueden existir. Por último, se debe aclarar que el diagnóstico presentado en esta sección es aproximado, y se puede mejorar calculando la longitud de acoplamiento para todo el conjunto de separaciones y anchos de las guías de onda; sin embargo, ésto llevaría un tiempo de cómputo mucho mayor.

3.9. Estudio de pérdidas de potencia debido a la curvatura de los brazos del acoplador

Hasta este punto, se han estudiado propiedades de los acopladores ópticos integrados considerando solo su parte central. No obstante, los brazos del acoplador juegan un papel importante por tres razones principales. En primer lugar, en las regiones en donde las guías de onda se empiezan a juntar (o separar), se produce acoplamiento entre modos y esto hace que la longitud de acoplamiento se vea afectada. Por lo que, un acoplador en donde se tienen en cuenta los brazos tiene una longitud de acoplamiento ligeramente diferente de un acoplador en donde no se incluyan los brazos. En segundo lugar, las curvaturas de los brazos generan pérdidas de potencia. En tercer lugar, para acopladores que soporten más de un modo de propagación, la transmitancia de los modos que soporta el acoplador está relacionada con el radio de curvatura de los brazos. Por estas dos últimas razones, en esta sección se hace un estudio de la transmitancia de los modos que soporta el acoplador y de las pérdidas de potencia en función del radio de curvatura de los brazos.

La forma de los brazos que se utiliza en este trabajo de tesis son los llamados *s-bend* (Gupta *et al.*, 2017). Este tipo de brazo se forma siguiendo una curva tipo Bézier cuya ecuación paramétrica viene

dada por (para más detalles ver (Ansys/Lumerical, 2021d):

$$\mathbf{B}(t) = (1 - t)^3 \mathbf{P}_0 + 3t(1 - t)^2 \mathbf{P}_1 + 3t^2(1 - t) \mathbf{P}_2 + t^3 \mathbf{P}_3, \quad (50)$$

en donde $0 \leq t \leq 1$ y los puntos \mathbf{P}_0 , \mathbf{P}_1 , \mathbf{P}_2 y \mathbf{P}_3 se conocen como polos y su posición se puede ver en la figura 27a. Si bien los brazos *s-bend* utilizados siguen la curva paramétrica de la ecuación (50), estos pueden ser aproximados a dos secciones circulares unidas, y su longitud y radio de curvatura vienen dados como se muestra en la figura 27b.

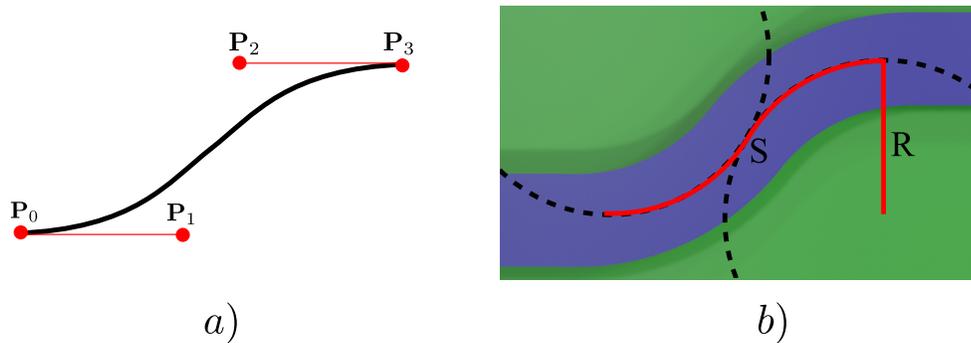


Figura 27. a) Curva paramétrica tipo Bézier y posición de los polos. b) Esquema del brazo *s-bend* comparado con dos secciones circulares unidas.

Para hacer este estudio, se utilizó VarFDTD para simular la propagación de luz a una longitud de onda de $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$. El modo fundamental TE se excitó en la entrada del brazo del acoplador y se ubicó un monitor de potencia al final del brazo. Este monitor registra la transmitancia que está definida como la razón entre la potencia medida en el monitor y la potencia emitida por la fuente. En particular, es de interés para esta parte del trabajo medir la transmitancia total T_t (suma de la transmitancia de todos los modos que soporta la guía) a la salida del brazo y la transmitancia de cada modo que soporta la guía de onda. Con la transmitancia total se calcula el porcentaje de pérdidas de potencia con la expresión $(1 - T_t) * 100$.

En la figura 28 se grafican la transmitancia de los modos soportados por una guía de onda y el porcentaje de pérdidas de potencia en función del radio de curvatura del brazo. En este análisis la geometría transversal de la guía de onda es como la mostrada en la figura 16b y con los parámetros geométricos fijos $An_{Si_3N_4} = 0.650 \mu\text{m}$, $Al_{Si_3N_4} = 0.495 \mu\text{m}$. Adicionalmente, el modo fundamental TE es el que se inyecta en la guía de onda. Como se observa, dependiendo del radio de curvatura, la transmitancia del modo fundamental TE varía, mientras que, los modos TM no son excitados. En particular, se ve que la transmitancia del modo fundamental TE se mantiene por encima de 0.97 para radios de

curvatura mayores a $6 \mu\text{m}$. Adicionalmente, el porcentaje de pérdidas de potencia disminuye con el incremento del radio de curvatura. Se puede ver que el porcentaje de pérdidas de potencia es menor a 0.5% para radios de curvatura mayores a $6 \mu\text{m}$ (línea punteada). Ahora bien, radios de curvatura mayores hacen que los brazos tiendan a ser cada vez más rectos, y esto ocasiona acoplamiento entre las guías a lo largo de la longitud de los brazos. Como consecuencia, la longitud de acoplamiento cambia con respecto a la predicha por la TMA, y el diseño no funciona como se espera. Esta gráfica brinda una idea del radio de curvatura que se puede escoger para que, en la parte central, se excite el modo fundamental TE y para que las pérdidas de potencia sean bajas.

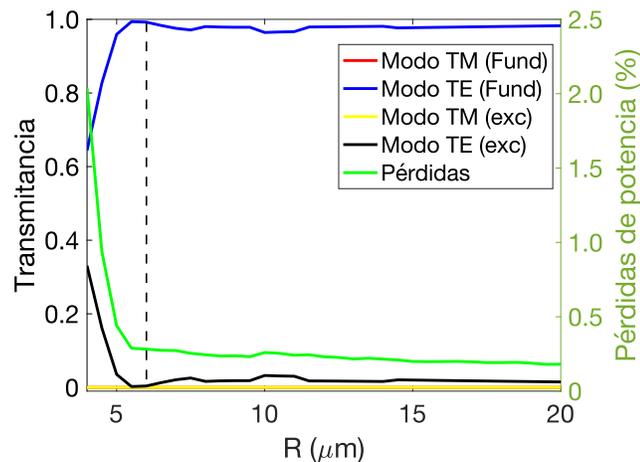


Figura 28. Transmitancia de los modos soportados por una guía de onda y porcentaje de pérdidas de potencia en función del radio de curvatura del brazo. En esta gráfica, Fund es la forma de abreviar fundamental y exc es la forma de abreviar excitado.

En la figura 28 se observa una transferencia de potencia en dos modos de una misma guía de onda, en particular, entre el modo fundamental TE (línea azul) y el siguiente modo TE excitado (línea negra). A esta transferencia de potencia se le llama acoplamiento modal y es menor para radios de curvatura más grandes. El acoplamiento modal se produce cuando la guía de onda se modifica a lo largo de la dirección de propagación (Lifante, 2003), tal como sucede en los brazos del acoplador y, por lo tanto, cambian las propiedades de los modos que soporta la estructura. Esto último se puede ver en la figura 29, en donde se toma el modo fundamental TE como ejemplo y se grafica su dispersión alrededor de $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$. En esta gráfica se compara la dispersión del modo fundamental TE soportado por la guía de onda recta y la guía de onda con diferentes radios de curvatura y se observa que la curvatura de la guía hace que cambie la dispersión del modo. Además, para radios de curvatura mayores, la dispersión tiende a la dispersión de la guía de onda recta. Las dispersiones graficadas en la figura 29 se calcularon con el método de solución FDE de MODE Solutions, el cual permite introducir radios de curvatura a la guías de onda.

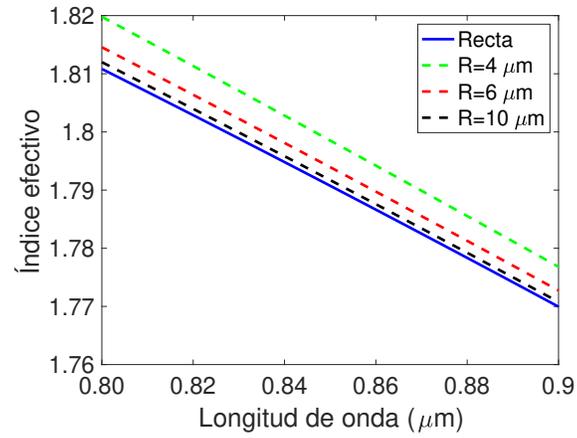


Figura 29. Índice efectivo del modo fundamental TE calculado para tres casos diferentes: guía de onda recta y guía de onda con radios de curvatura de $R = 4 \mu\text{m}$, $R = 6 \mu\text{m}$ y $R = 10 \mu\text{m}$.

Capítulo 4. Diseño de divisores de potencia y separadores (mezcladores) de frecuencias basados en acopladores ópticos integrados

Hasta este punto, se está en la capacidad de diseñar acopladores ópticos integrados basados en Si_3N_4 (ver capítulo 3). En particular, se puede analizar el comportamiento de la longitud de acoplamiento en función de la longitud de onda, dimensiones de las guías, separación entre las guías, contraste dieléctrico, y las pérdidas de potencia en función del radio de curvatura de los brazos del acoplador. Adicionalmente, se pueden seleccionar dimensiones de las guías y radios de curvatura de los brazos que permitan la propagación del modo de interés por el acoplador. Estas herramientas, combinadas con la teoría presentada en la sección 2.4.1, posibilitan el diseño de divisores de potencia y separadores (mezcladores) de frecuencias.

En este capítulo se proponen diseños de divisores de potencia y separadores (mezcladores) de frecuencias. En concreto, se presentan dos diseños de divisores de potencia 50 : 50 para $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$; un divisor de potencia con cubierta superior y uno sin cubierta. Por otra parte, se presenta un diseño de separador de frecuencias para $\lambda_1 = 0.826 \mu\text{m}$ y $\lambda_2 = 1.555 \mu\text{m}$, y se demuestra que este mismo diseño, funciona como mezclador de frecuencias. En todos los diseños mostrados aquí, se fija el parámetro $Al_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 0.495 \mu\text{m}$ porque, de acuerdo con resultados preliminares obtenidos en los grupos LINOC y NANODID, esta altura de las guías de onda es óptima para los diseños de la fuente de fotones y la compuerta cuántica que también hacen parte del circuito fotónico (Aguayo-Alvarado *et al.*, 2020). Por último, se debe mencionar que todos los diseños se ponen a prueba simulando la propagación de luz por las estructuras con ayuda de VarFDTD.

Este capítulo está organizado como sigue: En la sección 4.1 se presentan las dos propuestas de diseño de divisores de potencia 50 : 50 para $\lambda_1 = 0.826 \mu\text{m}$. En la sección 4.2 se presenta la propuesta de diseño de un separador de frecuencias para $\lambda_1 = 0.826 \mu\text{m}$ y $\lambda_2 = 1.555 \mu\text{m}$ y se demuestra que esta propuesta también funciona como un mezclador de frecuencias para las mismas longitudes de onda.

4.1. Diseño de divisores de potencia 50 : 50 para $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$

De acuerdo con resultados de la figura 25a, para $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$, $Al_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 0.495 \mu\text{m}$, $0.500 \mu\text{m} \leq An_{\text{Si}_3\text{N}_4} \leq 0.700 \mu\text{m}$, $0.500 \mu\text{m} \leq An_b \leq 0.700 \mu\text{m}$, y la parte central del acoplador cubierta con ITO, las longitudes de acoplamiento se mantienen por debajo de $43.000 \mu\text{m}$. De esta forma, la estructura

puede ser integrada en el circuito fotónico. Sin embargo, para ésta altura y este intervalo de anchos, cada guía de onda que compone al acoplador es multimodal (ver figura 22a), y de acuerdo con la ecuación (43), a una altura de $Al_{Si_3N_4} = 0.495 \mu m$ no hay un ancho para el cual las guías de onda sean monomodales. Por otra parte, de acuerdo con la ecuación (44), la guía es bimodal para esta altura, si $0.300 \mu m \leq An_{Si_3N_4} \leq 0.381 \mu m$.

En este diseño se establece $An_{Si_3N_4} = 0.380 \mu m$, con lo cual cada guía de onda del acoplador soporta los modos fundamentales TE y TM. Con este valor de ancho y $An_b = 0.700 \mu m$, los índices efectivos de los modos par e impar asociados al modo fundamental TE son $neff_p = 1.8764$ y $neff_i = 1.8317$, respectivamente. Con esto, se obtiene $L_c = 9.240 \mu m$ (ecuación (36)) y por la ecuación (40), la longitud central que debe tener el acoplador para que la mitad de la potencia salga por el brazo contrario, es decir, $P_2(L) = 0.5$, es $L_{50:50} = 4.620 \mu m$ o un múltiplo impar de este valor. Para este diseño en específico, se fija la longitud central del acoplador en $L = 3 * L_{50:50} = 13.860 \mu m$ por conveniencia.

El esquema completo del acoplador se muestra en la figura 30a. La transmitancia, definida en el capítulo 3 como la razón entre la potencia medida por el monitor y la potencia emitida por la fuente, se muestra en la figura 30b. En particular, se grafica la transmitancia de los modos fundamentales TE y TM en el brazo del acoplador y el porcentaje de pérdidas de potencia, en función del radio de curvatura de los brazos. Desde estos resultados, se escoge un radio de curvatura de $R = 10.000 \mu m$, ya que a partir de este radio, la transmitancia del modo fundamental TE se mantiene por encima de 0.97 y el porcentaje de pérdidas de potencia se mantiene por debajo del 2.92 %. Se debe resaltar que los brazos del acoplador tienen ITO por encima del material del núcleo para que su estructura sea transversalmente la misma que en la parte central del acoplador. De ésta forma, el modo excitado en los brazos traslapa máximamente con los modos soportados en la parte central del acoplador. Esto se hace para garantizar que el modo fundamental TE, que se inyecta por el brazo del acoplador, excite los modos fundamentales TE par e impar en el centro de la estructura.

En la figura 31 se muestra la potencia a lo largo del acoplador en función de las coordenadas X (dirección de propagación) y Y. En esta figura, los monitores de salida registran transmitancias de 0.0489 y 0.0322 para los brazos inferior y superior, respectivamente, lo cual corresponde a una proporción de salida de 60.30 % : 39.70 %. Esto demuestra, en primer lugar, que el acoplador no funciona como 50 : 50 tal como predice la TMA, y en segundo lugar, que casi toda la potencia se pierde antes de llegar a los monitores de potencia. La razón de esto es que el bajo contraste dieléctrico entre el ITO y el Si_3N_4 del núcleo, ocasiona que el acoplador, en su parte central, sea equivalente a una sola guía de onda multimodal, de tal forma que entre los modos de ésta guía de onda equivalente se puede dar un

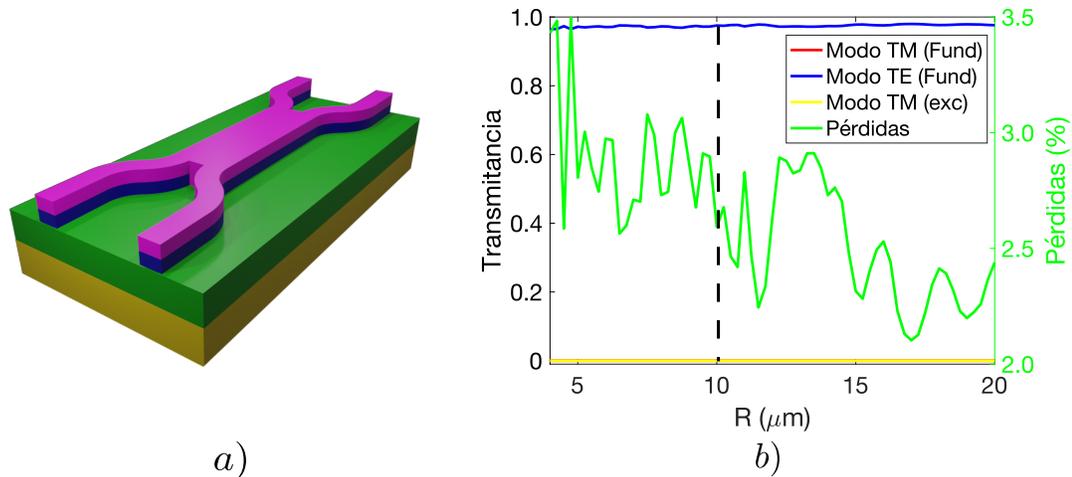


Figura 30. a) Esquema de diseño del divisor de potencia 50 : 50 para $\lambda = 0.826\mu\text{m}$ con ITO como cubierta superior. b) Gráfica de pérdidas de potencia y transmitancia de los modos que soporta la guía de onda en función del radio de curvatura.

intercambio de potencia y como consecuencia, el acoplador es ineficiente. En la figura 31 la potencia P se normaliza tal que P/P_f , en donde P_f es la potencia que inyecta la fuente al acoplador.

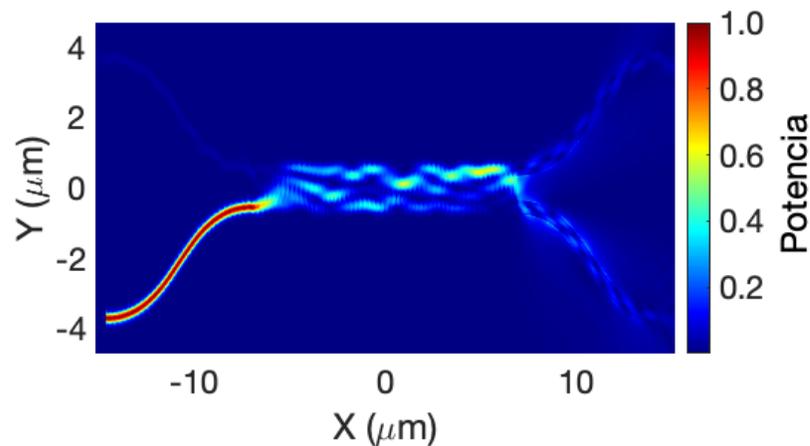


Figura 31. Propagación a lo largo del acoplador con ITO como cubierta superior, para una longitud central de $L = 13.860\mu\text{m}$.

4.1.1. Primera propuesta de diseño

Las reflexiones que se presentan en las interfaces Si_3N_4 -cubierta superior y Si_3N_4 -material entre guías, pueden disminuir al cambiar el material de la cubierta por uno de menor índice de refracción. En particular, esta estrategia consiste en confinar más el modo en el núcleo, aumentando el contraste dieléctrico entre éste y la cubierta. De esta forma, disminuye el campo evanescente, y al mismo tiempo, disminuye la cantidad de luz que se propaga por el material de la cubierta. Pensando en esto, un diseño alternativo para el acoplador consiste en considerar SiO_2 como material entre las guías y como cubierta

superior.

En la figura 32 se observa que el SiO_2 de la cubierta superior tiene una dispersión ligeramente menor al SiO_2 posicionado por debajo del núcleo (cubierta inferior). La dispersión de la cubierta superior se obtuvo restando 0.03 en cada punto de la dispersión de la cubierta inferior. Esto se hace para tener en cuenta, que en general las dispersiones de las dos cubiertas son diferentes porque se fabrican con técnicas diferentes. El SiO_2 de la cubierta inferior se crece por oxidación térmica vía húmeda, y se tiene pensado que el SiO_2 de la cubierta superior se deposite por ablación láser. Sin embargo, la dispersión de ambos materiales puede ser igual si el SiO_2 de la cubierta superior se dopa con otro material (Politi *et al.*, 2008).

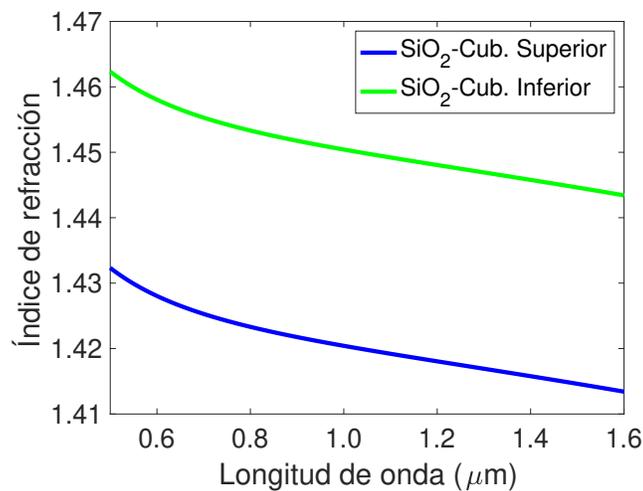


Figura 32. Dispersión del SiO_2 de la cubierta superior y el SiO_2 que está por debajo del núcleo (cubierta inferior). Cub. inferior es la abreviatura para cubierta inferior y Cub. superior es la abreviatura para cubierta superior.

Para este diseño (ver figura 33a), el acoplador es bimodal (solo soporta los modos fundamentales TE y TM) y las dimensiones de interés se muestran en la tabla 4. En la figura 33b se muestra la gráfica de transmitancia de los modos fundamentales TE y TM en el brazo del acoplador y el porcentaje de pérdidas de potencia en función del radio de curvatura de los brazos. Desde estos resultados, se escoge un radio de curvatura de $R = 10.000 \mu\text{m}$, ya que radios mayores a este, mantienen la transmitancia del modo fundamental TE por encima de 0.97 y el porcentaje de pérdidas de potencia por debajo del 2.30 %.

Con los parámetros mencionados hasta el momento, en la figura 34a se presenta la potencia a lo largo del acoplador cuando se inyecta el modo fundamental TE en el brazo inferior de entrada. Aquí, la parte central del acoplador es $L = 11.385 \mu\text{m}$, es decir, tres veces mayor que $L_{50:50}$. De acuerdo con los monitores de potencia, la transmitancia de los brazos inferior y superior son 0.5870 y 0.3237, respectivamente; lo cual corresponde a una proporción de salida de 64.46 % : 35.54 %. Este resultado

no está de acuerdo con la TMA, lo cual puede estar asociado al acoplamiento adicional que introducen los brazos del acoplador y que modifican la longitud de acoplamiento.

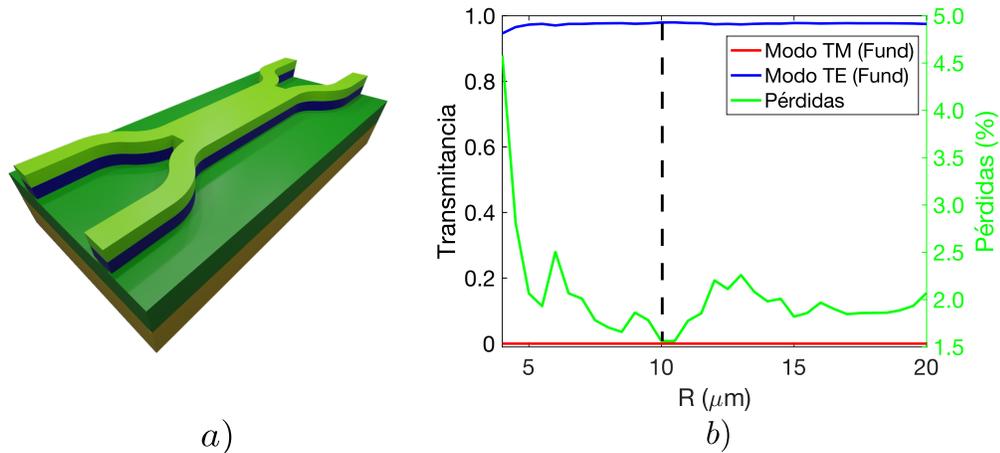


Figura 33. a) Esquema del primer diseño de divisor de potencia 50 : 50 para $\lambda = 0.826 \mu\text{m}$. b) Gráfica de pérdidas de potencia y transmitancia de los modos que soporta la guía de onda en función del radio de curvatura.

Tabla 4. Parámetros de interés para el primer diseño propuesto del divisor de potencia 50 : 50. L_c es la longitud de acoplamiento, $L_{50:50}$ es la longitud mínima a la cual el divisor de potencia es 50 : 50, L es la longitud central del acoplador y L_{corr} es la longitud central del acoplador después de hacer la corrección debida a los brazos.

Párametro	Valor (μm)
An_b	0.300
$An_{Si_3N_4}$	0.300
$Al_{Si_3N_4}$	0.495
L_c	7.590
$L_{50:50}$	3.795
L	11.385
L_{corr}	10.500
R	10.000

En este trabajo de tesis, la corrección del acoplamiento debido a los brazos del acoplador se hace cambiando la longitud central y simulando la propagación de luz por la estructura hasta que se obtenga una proporción de salida cercana a la esperada. Siguiendo lo anterior, en la figura 34b se muestra la potencia a lo largo del acoplador para una longitud central corregida $L_{corr} = 10.500 \mu\text{m}$. En este caso, aproximadamente la mitad de la potencia sale por cada brazo. De hecho, de acuerdo con los monitores de potencia, la transmitancia de los brazos inferior y superior son 0.4034 y 0.4278, que corresponde a una proporción de salida de 48.18 % : 51.82 %. Además de las pérdidas de potencia debidas a las curvaturas de los brazos, se producen pérdidas de potencia porque una parte de la luz se refleja y sale por el brazo de entrada superior, y porque al final de la parte central del acoplador, una fracción de la

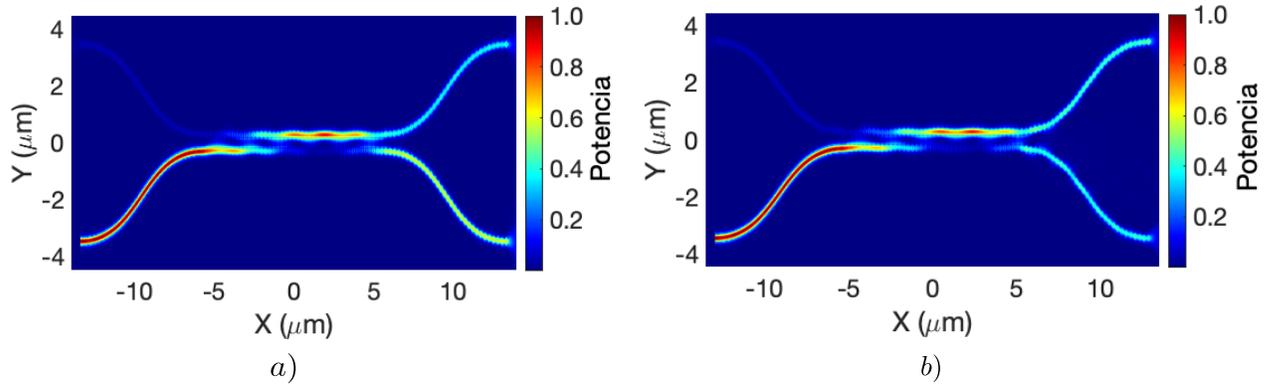


Figura 34. Propagación a lo largo del acoplador del primer diseño con una longitud central de a) $L = 11.385 \mu m$ y b) $L = 10.500 \mu m$

luz sale por el SiO_2 , en lugar de guiarse por los brazos de salida.

4.1.2. Segunda propuesta de diseño

Una segunda propuesta de diseño, sin material de cubierta superior, (ver figura 35a) tiene las dimensiones que se muestran en la tabla 5. Con las dimensiones del núcleo, de la figura 35b, se escoge $R = 7.000 \mu m$ para los brazos del acoplador. Con este radio, la transmitancia del modo fundamental TE se mantiene por encima de 0.99 y el porcentaje de pérdidas de potencia se mantiene por debajo del 0.85 %.

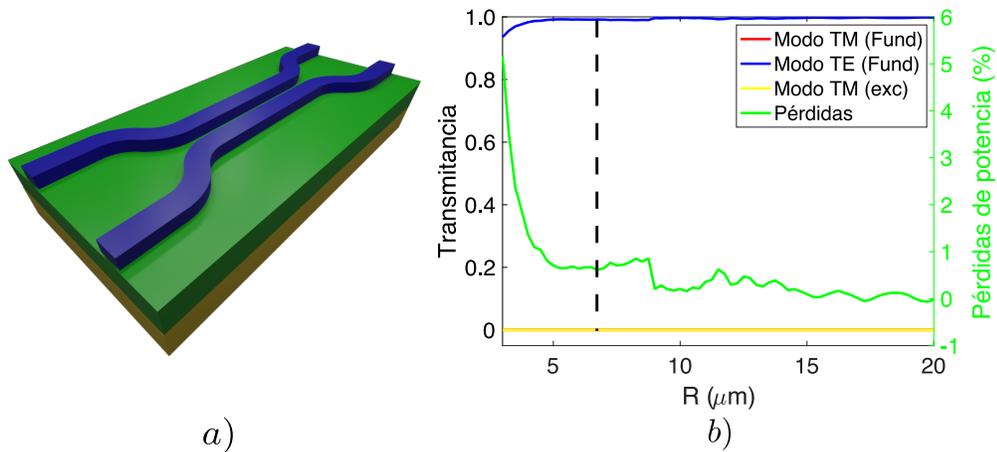
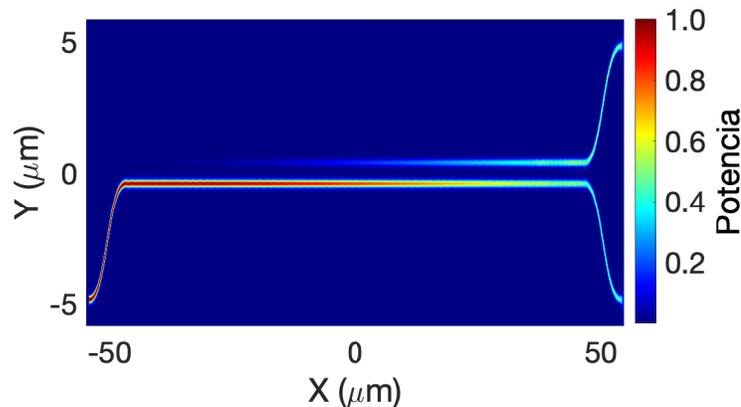


Figura 35. a) Esquema del segundo diseño de divisor de potencia 50 : 50 para $\lambda = 0.826 \mu m$. b) Gráfica de pérdidas de potencia y transmitancia de los modos que soporta la guía de onda en función del radio de curvatura.

Tabla 5. Parámetros de interés para el segundo diseño propuesto del divisor de potencia 50 : 50.

Párametro	Valor (μm)
An_b	0.450
$An_{Si_3N_4}$	0.350
$Al_{Si_3N_4}$	0.495
L_c	187.727
$L_{50:50}$	93.863
L	93.863
L_{corr}	93.863
R	7.000

La propagación en VarFDTD al inyectar el modo fundamental TE se puede ver en la figura 36. En este caso, 0.4418 y 0.4783 son las transmitancias registradas en los brazos inferior y superior; lo cual corresponde a una proporción de 48.35 % : 51.65 %. Se observa en este caso que la propagación en VarFDTD concuerda con los resultados de la TMA. Ya que el radio de curvatura es menor que en el diseño anterior, los brazos se separan rápidamente y el efecto de los brazos en la longitud de acoplamiento es despreciable.

**Figura 36.** Propagación a lo largo del acoplador del segundo diseño con una longitud central de $L = 93.863 \mu m$

4.2. Diseño de un separador (mezclador) de frecuencias para $\lambda_1 = 0.826 \mu m$ y $\lambda_2 = 1.555 \mu m$

En la sección 2.4.1 se presentaron las ecuaciones para diseñar un separador (mezclador) de frecuencias en dos longitudes de onda λ_1 y λ_2 . Para utilizar dichas ecuaciones, se deben conocer las longitudes de acoplamiento L_{c1} y L_{c2} asociadas a λ_1 y λ_2 , respectivamente. Sin embargo, conocer las longitudes de acoplamiento no es suficiente para determinar la longitud central que debe tener el acoplador de tal forma que separe (mezcle) las longitudes de onda. Lo anterior se evidencia en las ecuaciones (41) y (42), en donde, conocidas L_{c1} y L_{c2} , aún falta determinar el número de veces que

cada longitud de onda cambia de guía (esto asociado con el número entero m).

En la referencia (Cheng y Ramaswamy, 1991) proponen un método para diseñar separadores (mezcladores) de frecuencias para dos longitudes de onda dadas λ_1 y λ_2 . La ventaja de este método es que permite conocer el número de veces que cada longitud de onda debe cambiar de guía y, por lo tanto, conocer el brazo por el que cada longitud de onda sale. Este método consiste en definir un parámetro η que viene dado por la ecuación (51)

$$\eta = \frac{\lambda_2 L_{c1}}{\lambda_1 L_{c2}}. \quad (51)$$

En la ecuación (51), conocidas λ_1 y λ_2 , η varía de acuerdo a la relación L_{c1}/L_{c2} . Como se observó en la sección 3.7, para una longitud de onda fija, la longitud de acoplamiento varía con cambios en la altura, ancho y separación de las guías de onda. Así, si se fijan las longitudes de onda, la altura del núcleo, y la separación entre las guías, se puede graficar η en función del ancho entre las guías. Adicionalmente, la ecuación (52) define el parámetro η_{01}

$$\eta_{01} = \frac{2m_2}{2m_1 - 1} \frac{\lambda_2}{\lambda_1}, \quad (52)$$

en donde m_1 y m_2 pueden tomar los valores $1, 2, 3, \dots$, y en general $m_1 \neq m_2$. η_{01} es un valor constante siempre que λ_1 y λ_2 sean fijos. Si λ_1 y λ_2 entran por el mismo brazo (por ejemplo, por el brazo inferior), $2m_2$ representa el número par de veces que λ_2 cambia de guía de onda y sale por el brazo inferior, mientras que, $2m_1 - 1$ es el número impar de veces que cambia de guía de onda λ_1 y sale por el brazo superior. El caso contrario se puede dar si se define el parámetro η_{02} por la ecuación (53)

$$\eta_{02} = \frac{2m_1 - 1}{2m_2} \frac{\lambda_2}{\lambda_1}, \quad (53)$$

en donde $2m_2$ es el número par de veces que λ_1 cambia de guía de onda y sale por el brazo inferior y $2m_1 - 1$ es el número impar de veces que λ_2 cambia de guía de onda por lo que sale por el brazo superior. Definiendo los anteriores parámetros, el ancho para el cual cada longitud de onda sale por un brazo diferente es aquel en donde ya sea η_{01} o η_{02} corten a la gráfica de η (ver ecuación 51) en función del ancho de las guías de onda.

En este sentido, para un acoplador con cubierta superior de SiO_2 como el de la figura 33a, $\lambda_1 = 0.826 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.555 \mu\text{m}$ y $Al_{Si_3N_4} = 0.495 \mu\text{m}$, en la figura 37 se muestra la gráfica del parámetro η en función del ancho del núcleo para $An_b = 0.300 \mu\text{m}$ (línea continua). Además, en la gráfica se ve el parámetro constante η_{01} (línea punteada) con un valor $\eta_{01} = 26.36$, el cual corresponde a 14 cambios de guía de onda de $\lambda_2 = 1.555 \mu\text{m}$ y 1 cambio de guía de onda de $\lambda_1 = 0.826 \mu\text{m}$. η_{01} corta la gráfica

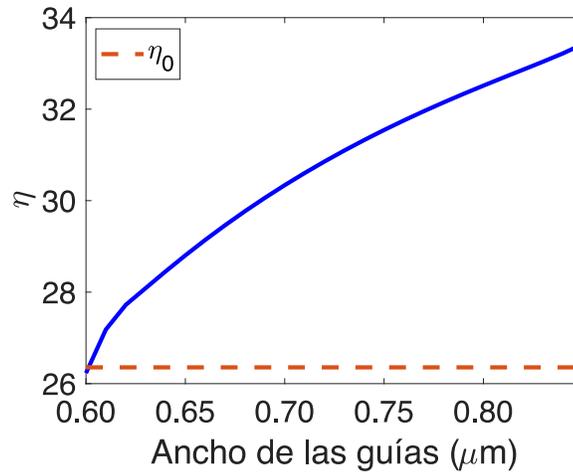


Figura 37. Parámetros η y η_0 en función del ancho del núcleo.

de η en el valor $An_{Si_3N_4} = 0.603 \mu m$. Más aún, en el punto de corte $L_{c1} = 81.660 \mu m$ y $L_{c2} = 5.833 \mu m$ y reemplazando estos valores y los cambios de guía de cada λ en la ecuación (42), se obtiene $L = 81.660 \mu m$ para la longitud central del acoplador.

En las figuras 38a y 38b se muestran las gráficas de transmitancia de los modos fundamentales TE y TM en el brazo del acoplador, y el porcentaje de pérdidas de potencia en función del radio de curvatura de los brazos para $\lambda_1 = 0.826 \mu m$ y $\lambda_2 = 1.555 \mu m$, respectivamente. De estas gráficas se escoge $R = 10.000 \mu m$ para los brazos del acoplador. Con este radio, la transmitancia del modo fundamental TE se mantiene por encima de 0.99 para $\lambda = 0.826 \mu m$ y 0.91 para $\lambda = 1.555 \mu m$, mientras que el porcentaje de pérdidas de potencia se mantiene por debajo del 0.23 % para $\lambda = 0.826 \mu m$ y 8.00 % para $\lambda = 1.555 \mu m$.

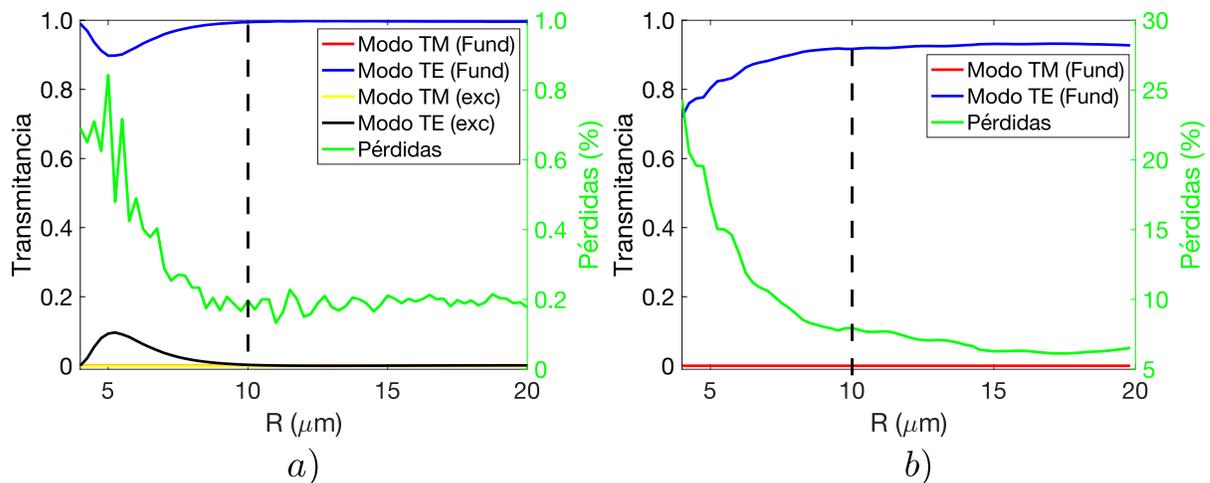
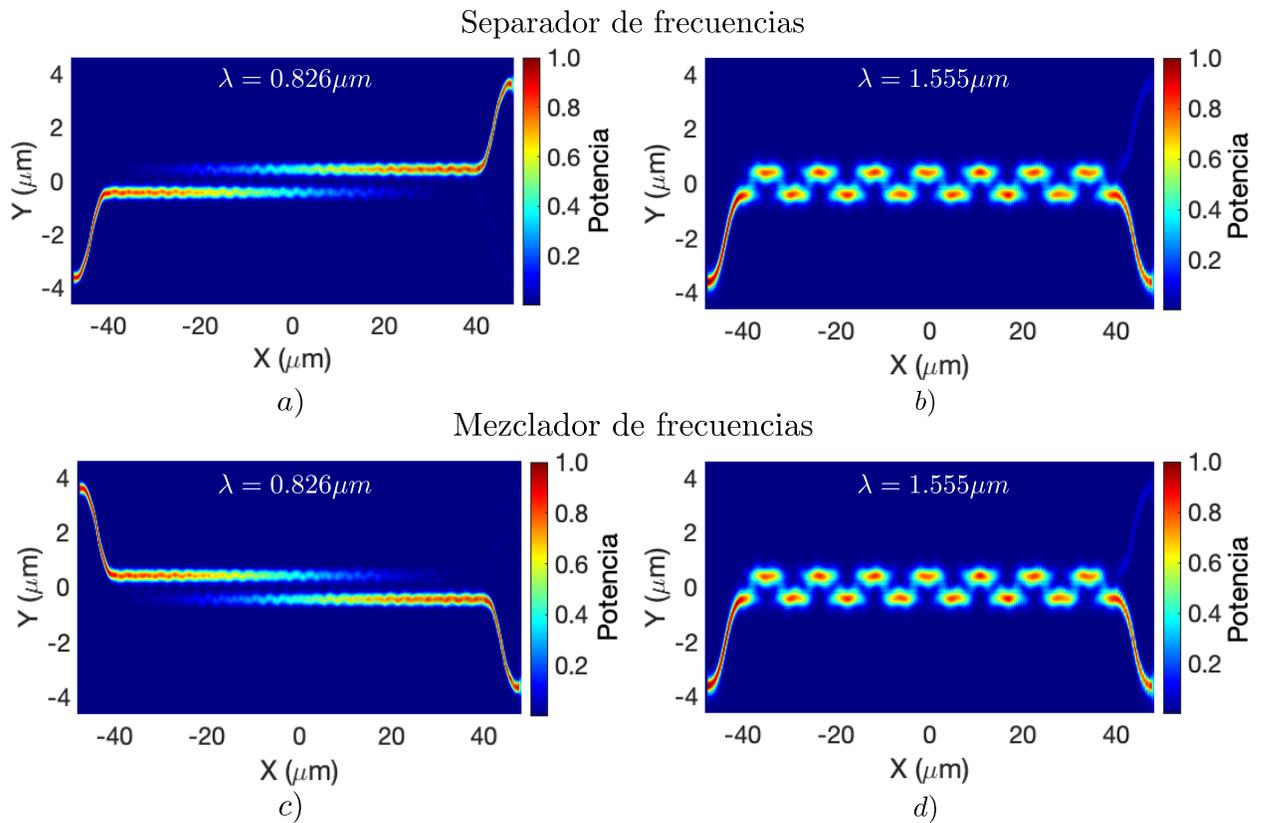


Figura 38. Gráfica de pérdidas de potencia y transmitancia de los modos que soporta la guía de onda en función del radio de curvatura para a) $\lambda = 0.826 \mu m$ y b) $\lambda = 1.555 \mu m$.

La potencia a lo largo del acoplador con los anteriores parámetros y por el que se inyecta el modo fundamental TE a $\lambda_1 = 0.826 \mu\text{m}$ se muestra en la figura 39a. Como se aprecia, la luz tuvo el espacio suficiente para hacer un solo cambio de guía de onda. En este caso, la proporción de salida es de 5.54 % : 94.46 % porque los monitores registraron una transmitancia de 0.005 y 0.904 en los brazos inferior y superior. De forma análoga, al inyectar el modo fundamental TE a $\lambda_2 = 1.555 \mu\text{m}$ (figura 39b), se obtiene una proporción de salida de 91.41 % : 8.59 %. Aquí, los monitores registraron una transmitancia de 0.8085 y 0.076. Además, en las figuras 39c y 39d se observa el funcionamiento del mismo acoplador pero esta vez funcionando como mezclador de frecuencias. Esto es, las dos longitudes de onda se introducen por brazos diferentes y salen por el mismo brazo en su mayor proporción.



Capítulo 5. Fabricación de estructuras con resoluciones submicrométricas

Hasta este punto, los resultados numéricos obtenidos para los diseños de los acopladores, evidenciaron que las dimensiones de las guías de onda y la separación entre guías, deben tener tamaños submicrométricos. De esta forma, la longitud del acoplador es tal que puede ser integrado en el circuito fotónico propuesto (Aguayo-Alvarado *et al.*, 2020). En los grupos LINOC y NANODID, por un lado, se tiene como objetivo desarrollar plataformas de diseño de las diferentes estructuras que componen el circuito, y por otro lado, se busca desarrollar una metodología para la fabricación de dichas estructuras, y en general, del circuito fotónico integrado. En trabajos anteriores a este, se fabricaron guías de onda de Si_3N_4 sobre SiO_2 y en un sustrato de Si en el LaNNAFab. Sin embargo, las dimensiones del núcleo de estas guías de onda son mayores a $1 \mu\text{m}$, lo cual no se puede aplicar para fabricar acopladores con las características mencionadas en los capítulos previos.

En este capítulo se presenta una metodología para fabricar estructuras basadas en guías de onda con dimensiones submicrométricas en el LaNNAFab. Para esto, el capítulo se divide de la siguiente forma: En la sección 5.1 se presenta la propuesta de proceso de fabricación y se describen, de forma general, los pasos de dicha propuesta. En la sección 5.2 se describen detalles específicos del depósito de fotoresina. Mientras que, en la sección 5.3 se detallan tanto el funcionamiento de la escritora láser como el procedimiento empleado para escribir patrones sobre la fotoresina. En la sección 5.4 se describe la etapa de revelado, en la sección 5.5 se detalla el proceso de rebaba y en la sección 5.6 se describe la etapa de depósito de cromo (Cr). En la sección 5.7 se describe el proceso para remover la fotoresina y por último, en la sección 5.8 se muestran los resultados principales de este trabajo experimental.

5.1. Propuesta de proceso de fabricación

La figura 40 muestra los pasos que conforman la propuesta de proceso de fabricación de estructuras de guías de onda con resoluciones submicrométricas. Esta propuesta consiste en un proceso de fotolitografía, combinada con un proceso de levantamiento ('lift off' por su nombre en inglés) y por último un decapado con plasma.

El primer paso es la síntesis de los materiales en forma de películas delgadas, la cual se hace con la técnica de pulverización catódica reactiva por radio frecuencias para el Si_3N_4 . Mientras que, el

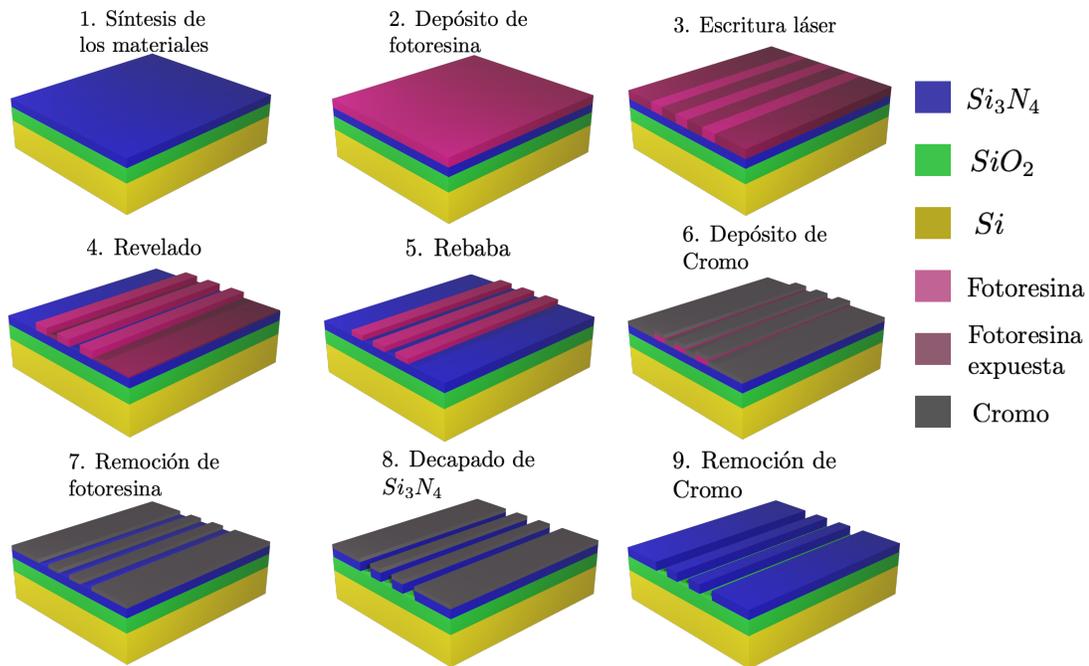


Figura 40. Esquema de la propuesta de fabricación.

SiO_2 se sintetiza por la técnica de oxidación térmica vía húmeda sobre obleas de Si. En este punto se debe aclarar que este primer paso se tiene estandarizado en el LaNNAFab como resultado de trabajos previos.

En el segundo paso, se deposita fotoresina sobre la película delgada de Si_3N_4 . En tercer lugar, se hace un proceso de escritura láser directa, el cual descompone la fotoresina en las regiones en donde incide el láser (fue utilizado en este trabajo lo que se conoce como fotoresina positiva (Cui, 2017)). En cuarto lugar, el revelado remueve la fotoresina sobre la cual incide el láser. Para las estructuras de interés (acopladores ópticos), no toda la fotoresina expuesta se removió, lo cual implicó adicionar un quinto paso con el que se ataca la fotoresina con plasma de Oxígeno, y como consecuencia, se remueve por completo la fotoresina expuesta. A este paso le hemos llamado en este trabajo el proceso de rebaba.

El sexto paso consiste en depositar una película delgada de Cr para el proceso de levantamiento, en donde se deposita Cr sobre la muestra por medio de la técnica de pulverización catódica, la idea es usar el Cr para definir el patrón de interés. El séptimo paso consiste en levantar la fotoresina que está presente en la muestra con ayuda de acetona y ultrasonido. Como consecuencia, se levanta también el Cr que permanece encima de la fotoresina, quedando el Si_3N_4 expuesto al ambiente en las zonas que fue levantada la fotoresina y tapado en las zonas que quedaron cubiertas con Cr. Esta última zona

es la misma a la que se hizo incidir el láser durante la escritura directa. En el octavo paso se decapa el Si_3N_4 que está expuesto al ambiente, con plasma de CF_4 , quedando un grabado en 3D del patrón de Cr (las condiciones de plasma del CF_4 no atacan el Cr de la superficie). Por último, se remueve el Cr por decapado húmedo con ácido que solo ataca el Cr y no modifica el Si_3N_4 . Se debe aclarar que los parámetros para el decapado con plasma de CF_4 empleado en el octavo paso provienen de resultados experimentales obtenidos previamente en el LaNNAFab.

A continuación se describen las etapas del proceso de fabricación que se alcanzaron a desarrollar en este trabajo de tesis. Estas etapas se llevaron a cabo sobre sustratos de Si y queda como trabajo a futuro, aplicarlas en Si_3N_4 sobre SiO_2 y en un sustrato de Si.

5.2. Depósito de fotoresina

Previo al depósito de fotoresina, con el equipo PICOTrack PCT 100 RREEI (figura 41), se funcionaliza la superficie del sustrato con moléculas de HMDS (hexamethyldisilazane). El HMDS es un fijador que mejora la adhesión de la fotoresina a la superficie de la muestra. El PICOTrack está totalmente automatizado; por lo que, un brazo robótico introduce y retira la muestra del horno en donde se coloca el HMDS.

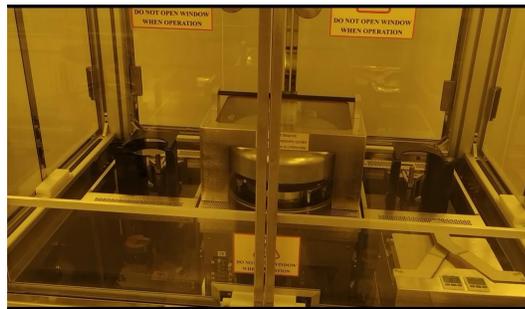


Figura 41. Equipo PICOTrack PCT 100 RREEI empleado para depositar HMDS

La siguiente parte en esta etapa es trasladar el sustrato al equipo MIDAS Spin-3000TD (ver figura 42a). Este equipo tiene una base en la que se posiciona el sustrato y se sujeta usando vacío. El proceso consiste en depositar fotoresina sobre la superficie del sustrato y después hacerlo girar. Esto hace que la fotoresina se distribuya homogéneamente por la superficie. La fotoresina se deposita con una jeringa que tiene un filtro en el agujero de salida (ver figura 42b). El filtro tiene un tamaño de poro de $0.1 \mu\text{m}$ y se utiliza para disminuir posibles impurezas en la fotoresina. Así, en las figuras 42c y 42d se observan imágenes tomadas con el microscopio óptico, de la fotoresina depositada sin filtro y con filtro,

respectivamente. Disminuir impurezas en la fotoresina es importante porque estas pueden afectar el proceso de escritura láser. En este trabajo, el sustrato se rota a una velocidad de 2000 rpm con lo cual se deposita una película de fotoresina cuyo grosor es de 160 nm, aproximadamente. Posterior a esto, se retira el sustrato y se lleva a un horno a una temperatura de 100°C por 1 min para eliminar solventes y fijar la fotoresina. Este proceso se conoce como recocido suave. En la figura 43 se muestra el sustrato después de estos pasos.

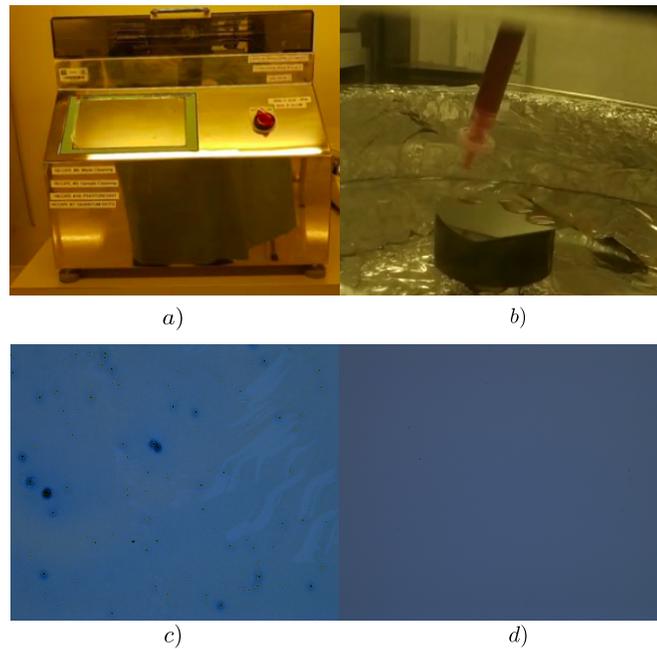


Figura 42. a) Equipo MIDAS Spin-3000TD. b) Depósito de fotoresina con una jeringa y un filtro. Depósito de fotoresina c) sin filtro y d) con filtro.



Figura 43. Sustrato con fotoresina depositada.

5.3. Escritura láser

Posterior al depósito de fotoresina, se lleva el sustrato al equipo MicroWriter ML3 (ver figura 44a) cuyas especificaciones se encuentran en la tabla 6.

Tabla 6. Especificaciones del equipo MicroWriter ML3.

Parámetro	Valor
Resoluciones	$0.6\mu m$, $1\mu m$, $2\mu m$ y $5\mu m$
Área de escritura máxima	$195mm \times 195mm$
Longitud de onda	$405nm$

Este equipo sirve para hacer escritura directa, es decir, escribe los patrones directamente sobre la fotoresina sin necesidad de máscaras o moldes. El equipo tiene una plataforma (sobre la que se posiciona el sustrato) que se mueve en los tres ejes (x,y,z). Adicionalmente, posee 19 láseres semiconductores, de los cuales 17 tienen la función de incidir sobre la fotoresina mientras los otros 2 funcionan para alinear el sustrato, es decir, posicionar el sustrato de tal forma que quede en el foco de los láseres. Además, incluye un software desde el cual se puede autoenfocar el sustrato, preparar el patrón que se desea escribir y exponer la fotoresina a luz ultravioleta.

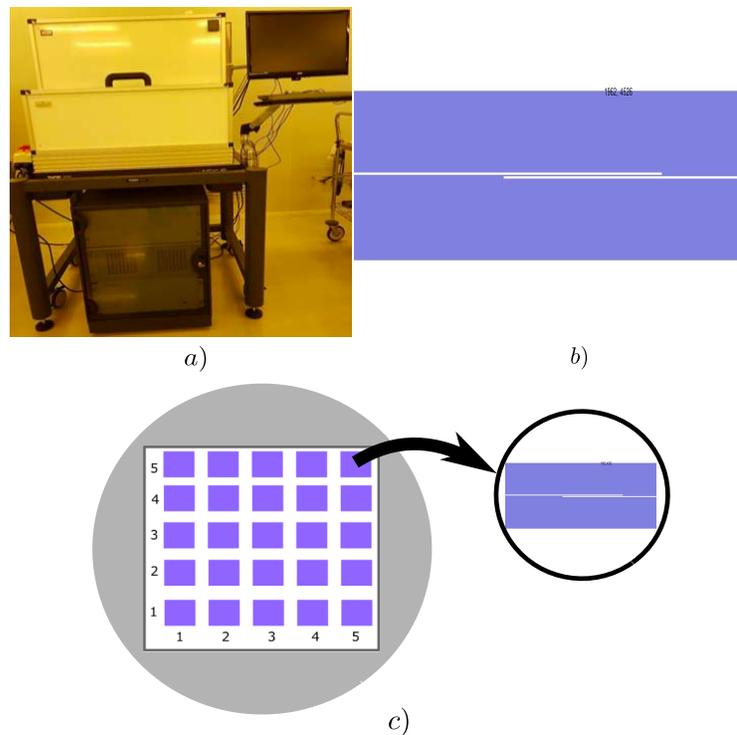


Figura 44. a) Equipo MicroWriter ML3 para escritura directa. b) Ejemplo de un patrón que se carga en el software de la escritora láser. c) Esquema del arreglo de patrones distribuidos por el sustrato. Todos los recuadros tienen el mismo patrón pero con una combinación de dosis y foco diferentes.

Para llevar a cabo el proceso de escritura láser, primero se posiciona el sustrato en la plataforma y se limpia su superficie con Nitrógeno para remover posibles partículas en la superficie que puedan alterar la dirección del láser durante la escritura del patrón. En segundo lugar, se ajusta la altura de

la muestra (dirección vertical) hasta que la superficie de la muestra coincida con la posición focal del arreglo óptico por donde pasa el láser de la escritora y después, se carga el archivo con los patrones que se desean escribir (ver figura 44b). Estos patrones se dibujan en el software CleWin 5, el cual genera archivos vectorizados para que puedan ser leídos por el software que controla la escritora. En este punto, se le da al software de control de la escritora, la siguiente información: dosis, foco, resolución del láser, posición de los patrones sobre el sustrato, y se inicia el proceso de escritura. Para determinar los valores de dosis y foco adecuados, se escribe el mismo patrón en diferentes regiones de la muestra, en un arreglo rectangular (ver figura 44c) en donde el foco cambia horizontalmente mientras la dosis varía verticalmente. Después del proceso de revelado se observan todos los patrones en el microscopio óptico y se escoge el patrón que esté mejor definido al final del proceso. Una vez terminado el proceso de escritura, se retira el sustrato y se lleva al horno para hacer un recocido fuerte a 115°C por 20 s . Por último, se retira el sustrato del horno y se deja reposar por 1 min antes de revelar.

5.4. Revelado

En esta etapa, se sumerge el sustrato en el líquido revelador (figura 45a) por 1 min para retirar la fotoresina expuesta a la luz UV en la etapa anterior (recordemos que se utilizó en este trabajo una fotoresina positiva). Luego, se retira el sustrato del revelador y se enjuaga con agua desionizada para retirar el revelador residual (ver figura 45b). Se seca el sustrato con la ayuda de una pistola de Nitrógeno, y hasta este punto, se pueden apreciar zonas grabadas a simple vista (figura 45c).

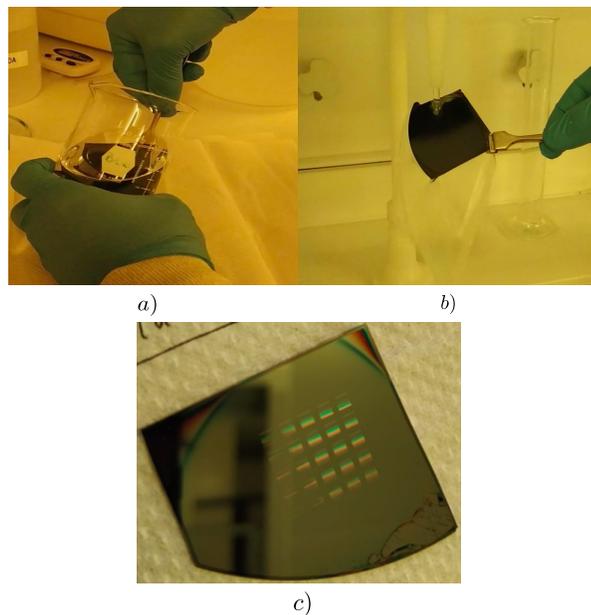


Figura 45. a) Sustrato sumergido en el revelador. b) Enjuague del sustrato con agua. c) Patrones escritos en fotoresina.

5.5. Rebaba

El equipo PE-50 de la compañía PlasmaEtch (ver figura 46a) se emplea para remover material atacando su superficie con plasma (decapado vía seca). El gas utilizado para generar el plasma depende del material que se desee decapar. El equipo está compuesto por una fuente de poder de radio frecuencia, una pequeña cámara de vacío (en donde se posiciona el sustrato), válvulas que regulan el flujo de gases hacia y desde la cavidad, y una bomba de vacío.

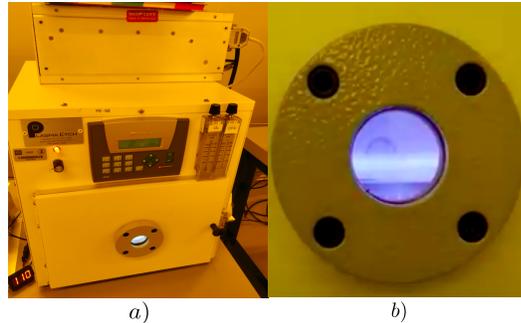


Figura 46. a) Equipo PE-50 para decapar con plasma. b) Plasma de Oxígeno.

En esta etapa del proceso de fabricación, se remueve fotoresina expuesta al láser durante la escritura y que permanece incluso después del revelado. Para esto, se introduce el sustrato en la cámara, se hace vacío, y se configura el flujo de oxígeno que entrará a la cámara. Se ajusta la potencia de la fuente que produce el plasma, y el tiempo durante el cual el plasma permanece encendido (figura 46b). Por último, se introduce Nitrógeno en la cámara hasta que se iguale la presión interna con la presión ambiente para retirar el sustrato. En la figura 47 se observa el grosor de la fotoresina en función del tiempo de decapado. Ajustando los datos experimentales (puntos rojos) a una función lineal (línea azul), se obtuvo una tasa de decapado de 1.21 nm/s . Los datos relacionados con esta etapa de la fabricación se presentan en la tabla 7.

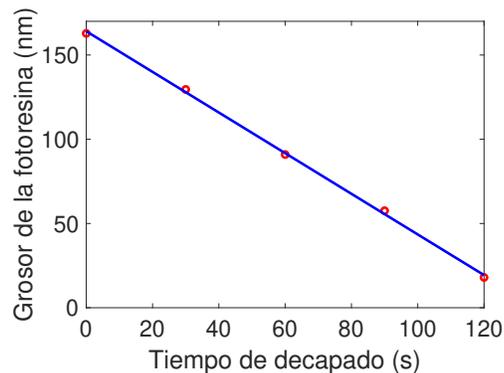


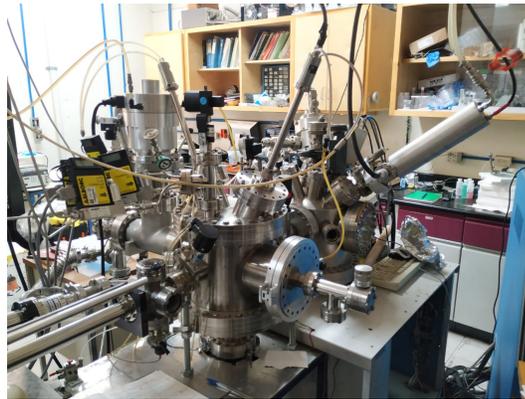
Figura 47. Grosor de la fotoresina en función del tiempo de decapado. Simbología: Datos experimentales (puntos rojos), ajuste lineal (línea azul).

Tabla 7. Parámetros del proceso de rebaba.

Parámetro	Valor
Potencia	60 Watts
Flujo de oxígeno	10 – 15 sccm
Tiempo de decapado	45 s
Presión	234 mTorr

5.6. Depósito de cromo

En esta etapa, se deposita Cr por pulverización catódica con el equipo que se muestra en la figura 48. El equipo está compuesto por una cámara de vacío, que a su vez, está conectada a una bomba mecánica y a una bomba turbomolecular; un portasustratos, flujómetros con los cuales se controla la cantidad de gas que entra a la cámara y una fuente de corriente, con la cual se genera el plasma. Con la técnica de pulverización catódica, un blanco del material que se desea depositar (en este caso Cr) se erosiona, y el material erosionado se colecta en la superficie del sustrato. Como consecuencia, se forma una película delgada del material.

**Figura 48.** Fotografía del sistema empleado para depositar Cr por medio de la técnica de erosión iónica.

Para depositar el Cr, primero se coloca el blanco en su posición (que típicamente es un cañón de erosión iónica que se adquiere comercialmente), y el sustrato en el portasustratos. El sustrato se sujeta para que no se caiga, y se bloquea el camino entre el blanco y el sustrato con un obturador. Se cierra la cámara por completo, y se encienden las bombas de vacío. Una vez obtenido el vacío deseado (que para nuestro caso fue de 10^{-6} Torr), se introduce Argón en forma de gas en la cámara y se enciende el plasma aplicando un voltaje negativo (del orden de 400 V) al blanco. Se deja que el plasma pulverice por un tiempo al blanco de Cr sin que dicho vapor se dirija al sustrato. Esto con el fin de que se limpie el blanco de Cr de óxido y posibles impurezas. Después del tiempo de limpieza, se abre el obturador y el Cr desprendido del blanco se deposita sobre el sustrato. El portasustratos se rota en todo este proceso

para que el depósito de Cr sea lo más homogéneo posible. En la tabla 8 se muestran las condiciones experimentales que se emplearon para depositar Cr.

Tabla 8. Condiciones experimentales para depositar la película de Cr por medio de la técnica de erosión iónica.

Parámetro	Valor
Presión base	10^{-6} Torr
Potencia	50 Watts
Flujo de oxígeno	5 sccm
Presión de trabajo	5 mTorr
Tiempo de Limpieza	5 min
Tiempo de depósito	75 s

5.7. Remoción de fotoresina

La etapa de remoción de fotoresina se hace con el equipo de ultrasonido de la empresa Branson Ultrasonics mostrado en la figura 49a. Después del depósito de Cr, el sustrato se sumerge en acetona y se lleva a ultrasonido por 1 min (ver figura 49b). Se espera que después de esta etapa, se remueva toda la fotoresina que hay en el sustrato.



Figura 49. a) Equipo de ultrasonido empleado para remover la fotoresina. b) Sustrato sumergido en acetona.

5.8. Resultados de la fabricación

En esta sección se muestran, por un lado, algunos de los errores que se pueden presentar en el proceso de fabricación, y por otro lado, los resultados experimentales más relevantes.

Diversos factores afectan el proceso de fabricación. Entre estos se resalta: la suciedad de la superficie del sustrato, la poca adhesión de la fotoresina al sustrato, dosis y foco de la escritora láser inadecuados, mayor o menor tiempo de revelado del necesario, entre otros. En la figura 50a se observan estructuras después de la etapa de revelado. Se puede ver que las líneas rectas en los patrones

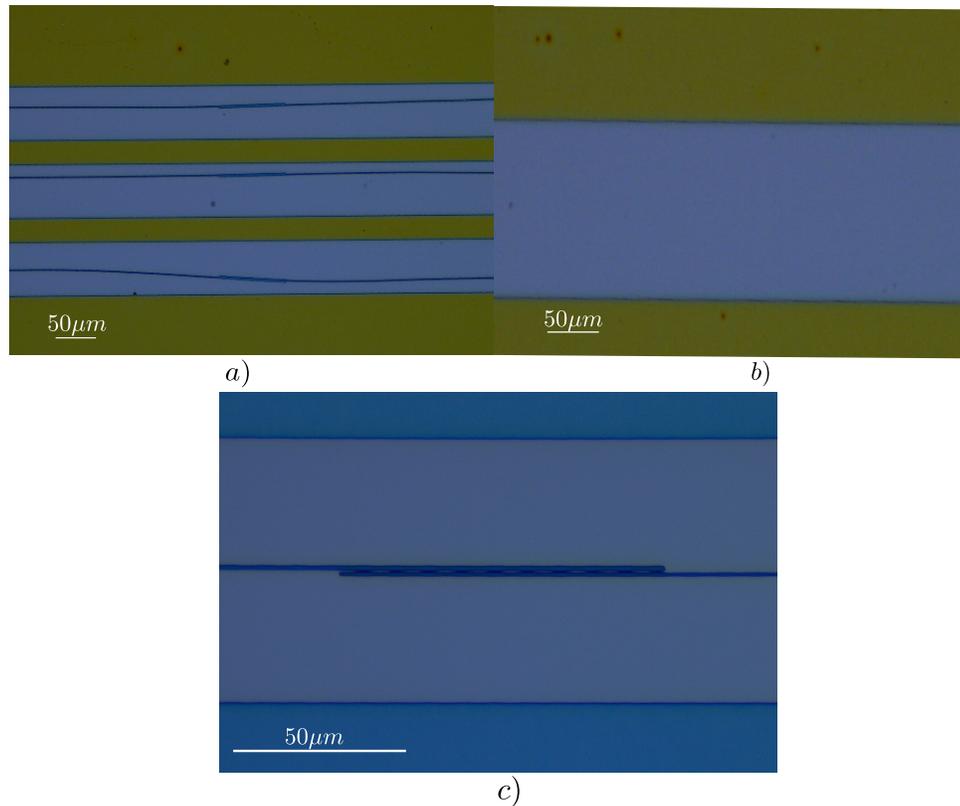


Figura 50. Fotografías que muestran errores de fabricación por a) falta de adhesión de la fotoresina a la superficie del sustrato, b) mayor tiempo de revelado del necesario y c) valores de dosis y foco inadecuados.

se desvían y forman líneas curvas. A primera vista parece que el fallo se presenta al momento de escribir el patrón. Sin embargo, este problema es consecuencia de una mala adherencia de la fotoresina al sustrato, por lo que, las líneas curvas que se ven en la figura en realidad son líneas de fotoresina desplazadas de su lugar. Este problema se soluciona depositando una capa de HMDS sobre el sustrato antes de depositar la fotoresina.

En la figura 50b el tiempo de revelado fue mayor al necesario, y por eso, las tres estructuras que deberían aparecer (como se observa en la figura 50a), se ven como una sola. Un último ejemplo de los errores que se presentan en la fabricación es el que se muestra en la figura 50c, en donde es difícil distinguir la separación entre las dos líneas. Este problema se deriva de escoger valores de dosis y foco inadecuados para la escritora láser. Sin embargo, como ya se mencionó antes, el problema se soluciona haciendo un estudio en donde se varíen ambos parámetros y escogiendo las estructuras mejores definidas.

Se debe recalcar que incluso con los parámetros adecuados se pueden presentar errores en el proceso de fabricación asociados, por ejemplo, a suciedad del sustrato o un grosor ligeramente diferente de fotoresina. Para superar estos problemas, en una misma oblea como la que se muestra en la figura

51, se fabrican estructuras con los mismos parámetros y se escogen los mejores resultados. La oblea de Si mostrada en la figura 51 es el resultado hasta la etapa de rebaba. Esta oblea tiene estructuras hechas en fotoresina con dimensiones submicrométricas.

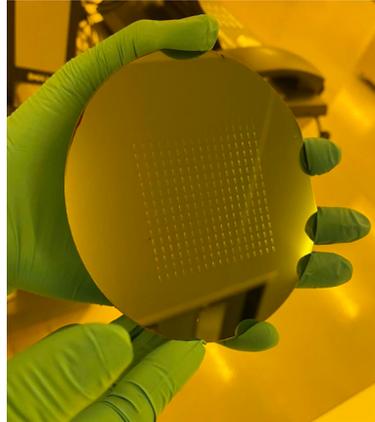


Figura 51. Oblea de Si después de la etapa de rebaba.

Una de las estructuras fabricadas en fotoresina se puede ver en la figura 52a en donde, en las zonas de color azul hay fotoresina y en las zonas de color gris hay Si. Aquí, se presentan dos guías de fotoresina de $0.5 \mu\text{m}$ de separación entre ellas y que representa un acoplador sin brazos curvos. Además, la región en donde las dos guías están una al lado de la otra es de $100 \mu\text{m}$ de largo.

Otra estructura es la que se muestra en la figura 52b, en donde se aprecia un anillo próximo a una guía. La fabricación de este tipo de estructuras es importante para los grupos LINOC y NANODID por dos razones; en primer lugar, la fuente de fotones y la compuerta cuántica incluyen estructuras con curvas cerradas y este resultado permite saber el comportamiento de la escritora en esta situación. En segundo lugar, en el grupo se están diseñando, al momento de escribir este trabajo de tesis, fuentes de parejas de fotones en micro anillos resonadores, para los cuales además se deben considerar guías de onda rectas para la inyección y extracción de luz al y desde el anillo, a estas guías rectas acopladas a los anillos se les conoce como buses (Faruque *et al.*, 2018).

Las figuras 52c y 52d son acopladores con brazos tipo *s-bend*, cuyo ancho de las guías es $0.750 \mu\text{m}$ y la separación entre guías en la parte central es de $0.650 \mu\text{m}$, los cuales son muy próximos en geometría a los que se han propuesto en este trabajo de tesis. El acoplador de la derecha es el inverso del acoplador de la izquierda, es decir, en donde uno de ellos tiene fotoresina, el otro no tiene, y por comodidad al primero le llamaré negativo y al segundo positivo. Las dimensiones de dicho acoplador se basan en una propuesta de diseño de divisor de potencia $50 : 50$ para $\lambda = 1.555 \mu\text{m}$ que se quiere fabricar y probar en LaNnFab y LINOC, respectivamente.

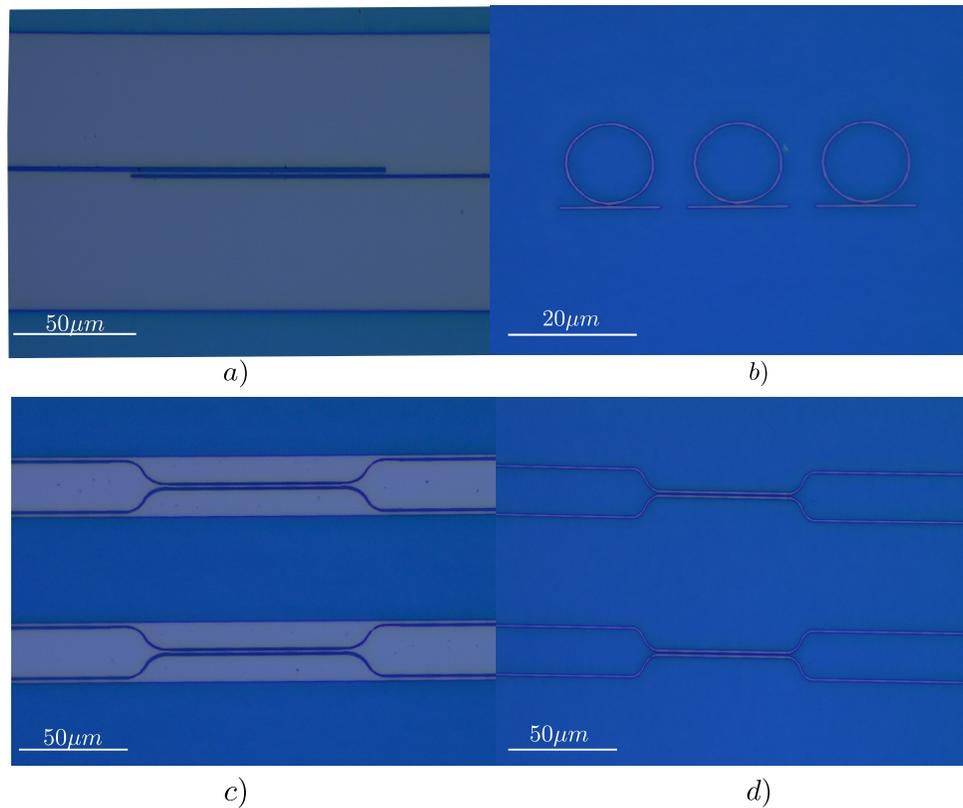


Figura 52. Imágenes de microscopio óptico de a) guías rectas de fotoreolina, b) anillo con guía recta próxima, c) acoplador negativo con brazos *s-bend* y d) acoplador positivo con brazos *s-bend*.

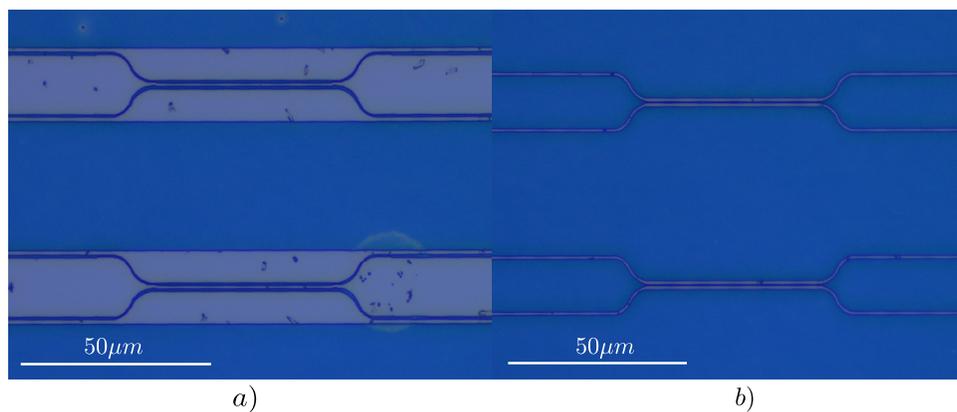


Figura 53. Imágenes de microscopio óptico de a) acoplador negativo con brazos *s-bend* y b) acoplador positivo con brazos *s-bend*, después del depósito de Cr y la remoción de fotoreolina.

En las figuras 53a y 53b se muestra la imagen de microscopio óptico de los acopladores negativo y positivo después de las etapas de depósito de Cr y remoción de fotoreolina. Para observar la topografía de las estructuras hasta esta etapa del proceso de fabricación, se tomaron medidas de AFM en la región central de ambos acopladores. En las figuras 54a y 54b se muestra la topografía 3D de la región central del acoplador negativo y un perfil transversal de esta topografía. En estas imágenes se

observan dos estructuras de aproximadamente 120 nm de altura y 1.00 μm de ancho separadas por una distancia de aproximadamente 0.60 μm . Se esperaba que después de estas etapas, una película de Cr de aproximadamente 20 nm de grosor sobresaliera en la parte central. Esto no se ve en las imágenes de AFM porque posiblemente, en las estructuras no se removió toda la fotoresina, es decir, el tiempo de ultrasonido no fue suficiente para remover la fotoresina que está en las estructuras pero si para remover la fotoresina en el resto del sustrato.

La explicación anterior se respalda por dos razones principales: 1) la altura de las estructuras es aproximadamente igual al grosor de la película de fotoresina más el grosor de la película de Cr y 2) en el acoplador positivo también se observa lo mismo. Las figuras 54c y 54d muestran la topografía 3D y un perfil de dicha topografía para la región central del acoplador positivo. Como se puede ver en el perfil transversal, en el centro hay una estructura de aproximadamente 150 nm de alto. De nuevo se observa lo contrario a lo que se esperaba y, por lo tanto, la estructura de la parte central debe corresponder a una película de fotoresina más una película de Cr. Si bien no se removió la fotoresina en las estructuras, se debe resaltar que las dimensiones de las guías que componen el acoplador, son aproximadas a las esperadas.

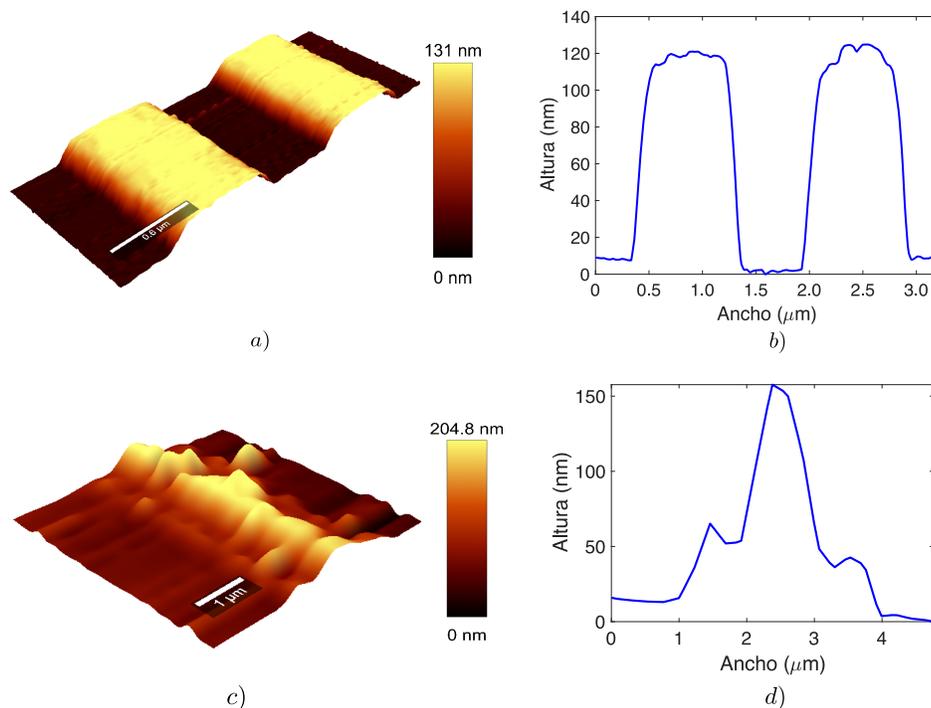


Figura 54. a) Topografía 3D de la región central del acoplador negativo tomada con AFM. b) Perfil transversal de la topografía 3D de la región central del acoplador negativo. c) Topografía 3D de la región central del acoplador positivo tomada con AFM. d) Perfil transversal de la topografía 3D de la región central del acoplador positivo.

Capítulo 6. Conclusiones

En este trabajo de tesis, estudiaron acopladores ópticos integrados basados en una plataforma de Si_3N_4 sobre SiO_2 y en un sustrato de Si, los cuales tienen aplicaciones en procesamiento de información, como divisores de potencia y como separadores (mezcladores) de frecuencias. El estudio numérico de los acopladores permitió proponer diseños específicos de divisores de potencia y separadores (mezcladores) de frecuencias, y se logró una primera comprobación de su funcionamiento empleando VarFDTD. Asimismo, se desarrolló una metodología para fabricar estructuras con dimensiones submicrométricas en el LaNNAFab del CNyN-UNAM. Se lograron fabricar acopladores completos (incluyendo los brazos) en guías de onda de fotoresina. Por último, se caracterizó, con la técnica de AFM, la morfología de los acopladores fabricados.

Respecto al diseño numérico de los acopladores, se resalta lo siguiente:

- Se encontró que la plataforma basada en Si_3N_4 , SiO_2 y Si, requiere dimensiones submicrométricas de las guías de onda y la separación entre éstas, para garantizar que el área ocupada por el dispositivo se mantenga viable para aplicaciones de fotónica integrada.
- Se demostró que la colocación de un material por encima del acoplador con un índice de refracción de 1.45, como por ejemplo SiO_2 , promueve una disminución del contraste dieléctrico, lo cual reduce la longitud del acoplador y permite que sea integrado en el circuito fotónico propuesto por los grupos LINOC y NANODID. Además, se observó que cubrir el acoplador con un material con índice de refracción cercano al del núcleo de Si_3N_4 , como por ejemplo ITO, hace que disminuya la longitud del acoplador, pero al mismo tiempo, produce acoplamiento de potencia a modos propios del ITO. Ésto último ocasiona que el funcionamiento del acoplador cambie y que parte de la luz se propague por el ITO y no se acople a los brazos de salida, lo que causa pérdidas de potencia a la salida del acoplador.
- Se estudiaron numéricamente las tolerancias en el proceso de fabricación de acopladores ópticos integrados. En específico, se hizo un diagnóstico del cambio en la longitud de acoplamiento debido a errores de fabricación en el ancho y la separación entre las guías. Se observó que errores de fabricación en el ancho y la separación entre las guías de onda del orden de $0.015\mu\text{m}$, producen errores en la longitud de acoplamiento del orden de $63.534\mu\text{m}$. De estos resultados se evidencia que la longitud de acoplamiento es altamente sensible a variaciones en las dimensiones de las guías de onda en el proceso de fabricación, lo cual cambia el funcionamiento del

acoplador. Si bien con los resultados de este estudio se pueden analizar los efectos de los errores de fabricación (de acuerdo a una aproximación lineal) en el funcionamiento del acoplador, un diagnóstico más realista se debe hacer, calculando la longitud de acoplamiento para todo el conjunto de anchos y separaciones de las guías de onda, sin embargo, para esto se emplearía un tiempo de cómputo mayor. También se encontraron ecuaciones que definen las fronteras de anchos y alturas de las guías de onda para las cuales el acoplador es monomodal, bimodal o multimodal. Teniendo en cuenta éstas ecuaciones, se puede disminuir el acoplamiento entre modos no deseados diseñando los acopladores en el régimen monomodal o bimodal.

- Se estudiaron las pérdidas de potencia en la propagación en función del acoplamiento entre distintos modos espaciales y de polarización, así como la curvatura de los brazos del acoplador. Para evitar el acoplamiento entre distintos modos se diseñaron guías monomodales y bimodales para las longitudes de onda de interés. En cuanto a las pérdidas por curvatura, se determinaron radios de curvatura que garantizaran la propagación del modo fundamental TE por el brazo del acoplador, y al mismo tiempo generaran bajas pérdidas de potencia.
- Se desarrollaron módulos de diseño para todos los estudios anteriores basados en scripts de las paqueterías MODE Solutions y FDTD de Lumerical.

Con respecto a los diseños de los divisores de potencia y al diseño del separador (mezclador) de frecuencias, se resalta lo siguiente:

- Con la combinación de la TMA y módulos numéricos hechos en MODE Solutions, se propusieron diseños específicos de dos divisores de potencia 50 : 50 para $\lambda = 0.826 \mu m$, los cuales hacen parte del circuito fotónico propuesto por los grupos LINOC y NANODID. La propagación en VarFDTD pudo demostrar que ambos acopladores funcionan aproximadamente como divisores de potencia 50 : 50.
- Se diseñó un separador de frecuencias para las longitudes de onda $\lambda_1 = 0.826 \mu m$ y $\lambda_2 = 1.555 \mu m$. Además, se demostró que este mismo diseño funciona como un mezclador de frecuencias para las mismas longitudes de onda. No obstante, se debe tener en cuenta, que el método de solución numérica de VarFDTD es solo una aproximación a la solución exacta del problema. Para obtener resultados más confiables, la propagación se debe hacer en FDTD, pero como ya se mencionó, esto puede demorar varios días e incluso semanas dependiendo de las dimensiones del acoplador.

En cuanto a la parte experimental, se resalta lo siguiente:

- Se desarrolló una metodología que permite la fabricación de estructuras de guías de onda con tamaños submicrométricos. En concreto, se determinaron parámetros adecuados de tiempos y temperaturas de recocido, dosis y foco de la escritora láser, tiempo de revelado, condiciones de depósitos de Cr y remoción de fotoresina para lograr estructuras con dimensiones menores a $1 \mu\text{m}$. Además, se encontró que se debe funcionalizar la superficie del sustrato de Si con HMDS para mejorar la adherencia de la fotoresina al sustrato. Con la metodología desarrollada, se fabricaron guías de onda hechas en fotoresina separadas $0.50 \mu\text{m}$ entre ellas y acopladores con brazos *s-bend* incluidos con anchos del núcleo de $0.75 \mu\text{m}$ y separación de $0.65 \mu\text{m}$. Además, se mostró que se pueden fabricar incluso estructuras con curvaturas cerradas, importantes para la fabricación de la fuente de fotones, compuertas cuánticas y anillos resonadores.
- Se caracterizaron morfológicamente, con la técnica de AFM, los acopladores fabricados hasta la etapa de remoción de fotoresina. En esta caracterización se evidenció, que en las estructuras permanece fotoresina y Cr (sobre la fotoresina) que se debieron remover con la acetona y el ultrasonido. Sin embargo, las imágenes de AFM mostraron que las dimensiones de las estructuras de fotoresina en la parte central del acoplador son del orden de $1 \mu\text{m}$ de ancho y $0.6 \mu\text{m}$ de separación, lo cual es próximo a las dimensiones esperadas.

6.1. Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro, en la parte de diseño numérico, se desea tener toda una base de datos de longitudes de acoplamiento para todo un rango de anchos, alturas, separaciones de los núcleos, longitudes de onda y materiales de cubierta. Además, en el momento se tiene adelantado un código en MATLAB que calcula la corrección de la longitud de la parte central del acoplador sin necesidad de simular la propagación en VarFDTD. Este código representa una reducción significativa en el tiempo de cómputo necesario para lograr un diseño específico.

En la parte experimental, se deben fabricar los acopladores en Si_3N_4 sobre SiO_2 y en un sustrato de Si y caracterizar su morfología con técnicas de AFM y microscopía óptica. Inicialmente, uno de los objetivos de este trabajo de tesis fue el de caracterizar ópticamente los acopladores previamente fabricados y diseñados. No obstante, por la situación de la pandemia debida al SARS-COVID-2, no se logró cumplir con esta meta. Por lo que, la caracterización óptica queda como trabajo a futuro. Se debe

resaltar, que en LINOC ya se cuenta con la infraestructura para acoplar luz a dispositivos de guías de onda integradas.

Literatura citada

- Acín, A., Bloch, I., Buhrman, H., Calarco, T., Eichler, C., Eisert, J., Esteve, D., Gisin, N., Glaser, S. J., Jelezko, F., *et al.* (2018). The quantum technologies roadmap: a european community view. *New Journal of Physics*, **20**(8): 080201.
- Agrawal, G. P. (2013). *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, New York.
- Aguayo-Alvarado, A. L., Acevedo-Carrera, A., Domínguez-Serna, F. A., Cruz, W. D. L., y Garay-Palmett, K. (2020). A proposal for nonlinear - optics based quantum gates in integrated photonic circuits. En: *Frontiers in Optics / Laser Science*. Optical Society of America, p. FM4A.8.
- Ansys/Lumerical (2021a). Finite Difference Time Domain (FDTD) solver introduction. Recuperado el 7 de noviembre de 2021 de: <https://support.lumerical.com/hc/en-us/articles/360034914633-Finite-Difference-Time-Domain-FDTD-solver-introduction>.
- Ansys/Lumerical (2021b). MODE Finite Difference Eigenmode (FDE) solver introduction. Recuperado el 7 de noviembre de 2021 de: <https://support.lumerical.com/hc/en-us/articles/360034917233-MODE-Finite-Difference-Eigenmode-FDE-solver-introduction>.
- Ansys/Lumerical (2021c). Mode 2.5d varfdtd solver introduction. Recuperado el 7 de noviembre de 2021 de: <https://support.lumerical.com/hc/en-us/articles/360034917213-MODE-2-5D-varFDTD-solver-introduction->.
- Ansys/Lumerical (2021d). Waveguide Simulation Object. Recuperado el 7 de noviembre de 2021 de: <http://web.archive.org/web/20080207010024/http://www.808multimedia.com/winnt/kernel.htm>.
- Aspect, A., Grangier, P., y Roger, G. (1981). Experimental tests of realistic local theories via bell's theorem. *Physical review letters*, **47**(7): 460.
- Blatt, R. y Roos, C. F. (2012). Quantum simulations with trapped ions. *Nature Physics*, **8**(4): 277–284.
- Blumenthal, D. J., Heideman, R., Geuzebroek, D., Leinse, A., y Roeloffzen, C. (2018). Silicon nitride in silicon photonics. *Proceedings of the IEEE*, **106**(12): 2209–2231.
- Cheng, H. C. y Ramaswamy, R. V. (1991). Symmetrical directional coupler as a wavelength multiplexer-demultiplexer: theory and experiment. *IEEE journal of quantum electronics*, **27**(3): 567–574.
- Coldren, L. A., Corzine, S. W., y Mashanovitch, M. L. (2012). *Diode lasers and photonic integrated circuits*, Vol. 218. John Wiley & Sons.
- Cui, Z. (2017). *Nanofabrication: Principles, Capabilities and Limits*. Springer, 2nd ed.
- Deutsch, D. (1985). Quantum theory, the church–turing principle and the universal quantum computer. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, **400**(1818): 97–117.
- Elshaari, A. W., Pernice, W., Srinivasan, K., Benson, O., y Zwiller, V. (2020). Hybrid integrated quantum photonic circuits. *Nature Photonics*, **14**(5): 285–298.
- Faruque, I. I., Sinclair, G. F., Bonneau, D., Rarity, J. G., y Thompson, M. G. (2018). On-chip quantum interference with heralded photons from two independent micro-ring resonator sources in silicon photonics. *Optics express*, **26**(16): 20379–20395.
- Fujisawa, T. y Koshiba, M. (2006). Polarization-independent optical directional coupler based on slot waveguides. *Optics letters*, **31**(1): 56–58.

- Giovannetti, V., Lloyd, S., y Maccone, L. (2011). Advances in quantum metrology. *Nature photonics*, **5**(4): 222–229.
- Gupta, R. K., Chandran, S., y Das, B. K. (2017). Wavelength-independent directional couplers for integrated silicon photonics. *Journal of Lightwave Technology*, **35**(22): 4916–4923.
- He, R., Sazio, P. J., Peacock, A. C., Healy, N., Sparks, J. R., Krishnamurthi, M., Gopalan, V., y Badding, J. V. (2012). Integration of gigahertz-bandwidth semiconductor devices inside microstructured optical fibres. *Nature Photonics*, **6**(3): 174–179.
- Hong, C.-K., Ou, Z.-Y., y Mandel, L. (1987). Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference. *Physical review letters*, **59**(18): 2044.
- Houck, A. A., Türeci, H. E., y Koch, J. (2012). On-chip quantum simulation with superconducting circuits. *Nature Physics*, **8**(4): 292–299.
- Huang, Y., Kalyoncu, S. K., Zhao, Q., Torun, R., y Boyraz, O. (2014). Silicon-on-sapphire waveguides design for mid-ir evanescent field absorption gas sensors. *Optics Communications*, **313**: 186–194.
- Januar, I. y Mickelson, A. R. (1993). Dual-wavelength ($\lambda= 1300\text{--}1650$ nm) directional coupler multiplexer–demultiplexer by the annealed-proton-exchange process in linbo 3. *Optics letters*, **18**(6): 417–419.
- Kaplan, A. E., Van Der Tol, J. J., Bassi, P., y Bellanca, G. (2020). Analysis of etch depth for polarization-free directional couplers. En: *2020 Italian Conference on Optics and Photonics (ICOP)*. IEEE, pp. 1–4.
- Lee, B. (2003). Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical fiber technology*, **9**(2): 57–79.
- Levy, J. (2011). *Integrated nonlinear optics in silicon nitride waveguides and resonators*. Tesis de doctorado, Cornell University.
- Lifante, G. (2003). *Integrated photonics: fundamentals*. John Wiley & Sons.
- Lo, H.-K., Curty, M., y Tamaki, K. (2014). Secure quantum key distribution. *Nature Photonics*, **8**(8): 595–604.
- Lu, Z., Yun, H., Wang, Y., Chen, Z., Zhang, F., Jaeger, N. A., y Chrostowski, L. (2015). Broadband silicon photonic directional coupler using asymmetric-waveguide based phase control. *Optics express*, **23**(3): 3795–3808.
- Luff, B., Harris, R., Wilkinson, J., Wilson, R., y Schiffrin, D. (1996). Integrated-optical directional coupler biosensor. *Optics letters*, **21**(8): 618–620.
- Mohseni, M., Read, P., Neven, H., Boixo, S., Denchev, V., Babbush, R., Fowler, A., Smelyanskiy, V., y Martinis, J. (2017). Commercialize quantum technologies in five years. *Nature News*, **543**(7644): 171.
- Nielsen, M. A. y Chuang, I. L. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press.
- O'brien, J. L., Furusawa, A., y Vučković, J. (2009). Photonic quantum technologies. *Nature Photonics*, **3**(12): 687–695.
- Pavesi, L., Lockwood, D. J., et al. (2016). *Silicon photonics III*, Vol. 122. Springer. pp. 1–36.

- Pfaff, W., Hensen, B. J., Bernien, H., van Dam, S. B., Blok, M. S., Taminiau, T. H., Tiggelman, M. J., Schouten, R. N., Markham, M., Twitchen, D. J., *et al.* (2014). Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits. *Science*, **345**(6196): 532–535.
- Pierre, L., Najafi, S. I., *et al.* (1994). New method to design directional coupler dual wavelength multi/demultiplexer with bends at both extremities. *Optics communications*, **111**(1-2): 43–50.
- Politi, A., Cryan, M. J., Rarity, J. G., Yu, S., y O'brien, J. L. (2008). Silica-on-silicon waveguide quantum circuits. *Science*, **320**(5876): 646–649.
- Riedel, M. F., Binosi, D., Thew, R., y Calarco, T. (2017). The european quantum technologies flagship programme. *Quantum Science and Technology*, **2**(3): 030501.
- Saleh, B. E. y Teich, M. C. (2007). *Fundamentals of Photonics*. Wiley Series in Pure and Applied Optics. Wiley.
- Silverstone, J. W., Bonneau, D., Ohira, K., Suzuki, N., Yoshida, H., Iizuka, N., Ezaki, M., Natarajan, C. M., Tanner, M. G., Hadfield, R. H., *et al.* (2014). On-chip quantum interference between silicon photon-pair sources. *Nature Photonics*, **8**(2): 104–108.
- Silverstone, J. W., Wang, J., Bonneau, D., Sibson, P., Santagati, R., Erven, C., O'Brien, J., y Thompson, M. (2016). Silicon quantum photonics. En: *2016 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)*. IEEE, pp. 1–2.
- Tosi, M., Fasciszewski, A., Rossini, L. A. B., y Caso, P. A. C. (2020). Silicon nitride polarisation beam splitters: a review. *IET Optoelectronics*, **14**(3): 120–124.
- Uchiyamada, K., Okubo, K., Yokokawa, M., Carlen, E., Asakawa, K., y Suzuki, H. (2015). Micron scale directional coupler as a transducer for biochemical sensing. *Optics express*, **23**(13): 17156–17168.
- Wang, J., Santamato, A., Jiang, P., Bonneau, D., Engin, E., Silverstone, J. W., Lermer, M., Beetz, J., Kamp, M., Höfling, S., *et al.* (2014). Gallium arsenide (GaAs) quantum photonic waveguide circuits. *Optics Communications*, **327**: 49–55.
- Yamada, H., Chu, T., Ishida, S., y Arakawa, Y. (2005). Optical directional coupler based on Si-wire waveguides. *IEEE photonics technology letters*, **17**(3): 585–587.
- Yariv, A. (1973). Coupled-mode theory for guided-wave optics. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **9**(9): 919–933.
- Yariv, A. y Yeh, P. (2007). *Photonics: optical electronics in modern communications*. Oxford University Press.
- Zhang, Y., McKnight, L., Engin, E., Watson, I. M., Cryan, M. J., Gu, E., Thompson, M. G., Calvez, S., O'Brien, J. L., y Dawson, M. D. (2011). GaN directional couplers for integrated quantum photonics. *Applied Physics Letters*, **99**(16): 161119.