



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica
Escuela Profesional de Ingeniería de Telecomunicaciones

**Diseño de un interferómetro de Mach-Zehnder en una
oblea de *silicio sobre aislante* para aplicaciones en
bio-sensores**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de
Telecomunicaciones

AUTOR

Freddy Orlando JARA POMA

ASESOR

Carlos Alberto SOTELO LOPEZ

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Jara, F. (2022). *Diseño de un interferómetro de Mach-Zehnder en una oblea de silicio sobre aislante para aplicaciones en bio-sensores*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería de Telecomunicaciones]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Freddy Orlando Jara Poma
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	74248056
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-0527-0774
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Carlos Alberto Sotelo Lopez.
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07017259
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-8960-6567
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Rafael Bustamante Alvarez.
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09377230
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Wilfredo Baro Fanola Merino.
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06030740
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Rómulo Alfonso Miguel Ato.
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09139449
Miembro del jurado 3	
Nombres y apellidos	Carlos Alberto Sotelo Lopez.
Tipo de documento	DNI

Número de documento de identidad	07017259
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica.
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Perú. ProCiencia. 015-2018-FONDECYT/BM
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones – INICTEL. País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: San Borja Avenida: San Luis 1771 Latitud: -12.084107 Longitud: -76.996612
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Enero 2021 – Diciembre 2021.
URL de disciplinas OCDE	Telecomunicaciones https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.05



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 001-EPIT-FIEE/2022

**TESIS N° 001-FIEE/2022 PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES**

Los suscritos Miembros de Jurado, nombrados por la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería de Telecomunicaciones, reunidos en la fecha bajo la Presidencia del Dr. Rafael Bustamante Alvarez e integrado por los Ingenieros: Ing. Romulo Miguel Ato, el Ing. Wilfredo Baro Fanola Merino y el Mg. Carlos Alberto Sotelo Lopez (Miembro -Asesor)

Después de escuchar la Sustentación de Tesis del Bachiller Freddy Orlando Jara Poma (14190258), para optar el Título Profesional de Ingeniero de Telecomunicaciones por la modalidad de Titulación Ordinaria, quien expuso su TESIS: “DISEÑO DE UN INTERFERÓMETRO DE MACH-ZEHNDER EN UNA OBLEA DE SILICIO SOBRE AISLANTE PARA APLICACIONES EN BIO-SENSORES”.

Se acordó **aprobar** por **unanimidad**.

Con la Nota de **(17) Diecisiete**.

Ciudad Universitaria, 14 de julio de 2022

Dr. Rafael Bustamante Alvarez
Presidente de Jurado

Ing. Rómulo Alfonso Miguel Ato
Miembro de Jurado

Ing. Wilfredo Baro Fanola Merino
Miembro de Jurado

Mg. Carlos Alberto Sotelo López
Miembro de Jurado-Asesor



Firmado digitalmente por SOTELO
LOPEZ, Carlos Alberto FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 25.07.2022 21:16:57 -05:00

Mg. Carlos Alberto Sotelo López
Director de la EPIT



Firmado digitalmente por UTRILLA
GALAZAR Dario FAU 20148092282
soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 27.07.2022 19:06:39 -05:00

Dr. Dario Utrilla Salazar
Decano FIEE – UNMSM



INFORME DE EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

1. Facultad:
Ingeniería Electrónica y Eléctrica.
2. Escuela Profesional:
Escuela Profesional de Ingeniería Telecomunicaciones.
3. Autoridad académica que emite el informe de originalidad: Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica.
4. Apellidos y Nombres de la autoridad académica: Unsihuay Tovar, Roberto florentino
5. Operador del programa informático de similitudes: Unsihuay Tovar, Roberto florentino
6. Documento evaluado: Tesis para Título de Pregrado de Ingeniero de Telecomunicaciones "Diseño de interferómetro de Mach-Zehnder en una oblea de Silicio sobre Aislante para aplicaciones en bio-sensores"
7. Autor del documento:
FREDDY ORLANDO JARA POMA
8. Fecha de aplicación de recepción del documento:
06 de mayo de 2022
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes:
24 de mayo de 2022
10. Software utilizado: Turnitin.
11. Configuración del programa detector de similitudes:
 - Excluye textos entrecomillados.
 - Excluye bibliografía.
 - Excluye cadenas menores de 40 palabras.
12. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes: 5 % (cinco)
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas:
 1. eprints.ucm.es 2% Fuente de Internet
 2. Submitted to University of Nottingham <1% trabajo del estudiante
 3. hdl.handle.net <1% Fuente de Internet
 4. educacion.unmsm.edu.pe < 1% Fuente de Internet
 5. pt.scribd.com <1% Fuente de Internet
 6. Javier Madrigal Madrigal. "Diseño, fabricación y caracterización de sensores basados en fibras ópticas de múltiples núcleos", Universitat Politècnica de Valencia, 2022 <1% publicación
 7. Submitted to Universidad Carlos III de Madrid <1% trabajo del estudiante
 8. www.optris.es <1% Fuente de Internet



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA) FACULTAD DE
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
DIRECCIÓN DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA TELECOMUNICACIONES



9. idoc.pub <1% Fuente de Internet
10. sedici.unlp.edu.ar <1% Fuente de Internet
11. Katsunari Okamoto. "Planar Optical Waveguides", Elsevier BV, 2022 <1% publicación
12. Luis Fernando Carrera Suárez. "Antenas multihaz con lente de Rotman para las bandas de microondas y milimétricas realizadas en diferentes tecnologías", 'Universitat Politecnica de Valencia', 2015 <1% Fuente de Internet

14. Observaciones:

Ninguno

15. Calificación de originalidad:

- Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones.

16. Fecha del informe:

14 de julio de 2022.



UNMSM

Firmado digitalmente por UNSIHUAY
TOVAR Roberto Florentino FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 14.06.2023 16:22:44 -05:00

Ing. Roberto florentino Unsihay Tovar
DIRECTOR DE LA EPIT

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico:

A Dios.

A mi papá, mamá y hermano por su apoyo constante, por su confianza y por ser mi soporte.

A mi asesora PhD. Ruth Rubio por compartir sus conocimientos y tiempo y por motivarme a dedicarme a la investigación.

Índice general

Dedicatoria	I
Lista de cuadros	IV
Lista de figuras	V
Resumen	VIII
Abstract	IX
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN	
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.2.1 Determinación del problema	4
1.2.2 Formulación del problema	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Importancia y alcance de la investigación	4
1.5 Limitaciones de la investigación	5
Capítulo 2: REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1 Marco Teórico	6
2.1.1 Silicio sobre aislante (SOI)	6
2.1.2 Funcionamiento del Interferómetro de Mach-Zehnder	7
2.1.3 Análisis modal en guías de onda dieléctricas	8
2.1.4 Biosensor de campo evanescente	10
2.2 Antecedentes del estudio	11
2.3 Bases Teóricas	13
2.3.1 Ecuaciones de Maxwell	13
2.3.2 Medio lineal, homogéneo, isotrópico y no-dispersivo	13
2.3.3 Electromagnetismo con dependencia armónica con el tiempo	14
2.3.4 Ecuaciones de Helmholtz	15
2.3.5 Condiciones de frontera	16
2.3.6 Guía de onda dieléctrica plana	16
2.3.7 Modelado de guías de onda dieléctricas rectangulares	21
2.3.8 Guía de onda dieléctrica rectangular	22

2.3.9	Método de índice efectivo	25
2.4	Definición de términos	28
Capítulo 3: HIPÓTESIS Y VARIABLES		
3.1	Hipótesis	29
3.2	VARIABLES	29
3.3	Operacionalización de las variables	29
Capítulo 4: MATERIALES Y MÉTODOS		
4.1	Área de estudio	30
4.2	Diseño de investigación	30
4.3	Población y muestra	30
4.4	Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información .	30
4.5	Análisis estadístico	31
Capítulo 5: RESULTADOS		
5.1	Estudio de dimensiones de guías de onda de silicio	32
5.1.1	Diseño #1	32
5.1.2	Diseño #2	37
5.1.3	Diseño #3	40
5.2	Análisis del comportamiento del interferómetro	44
5.2.1	Diseño #1	45
5.2.2	Diseño #2	47
5.2.3	Diseño #3	49
5.3	Determinación de parámetros de sensibilidad	52
Capítulo 6: DISCUSIÓN		
6.1	Estudio de dimensiones de guías de onda de silicio	55
6.2	Análisis del comportamiento del interferómetro	55
6.3	Determinación de parámetros de sensibilidad	56
Capítulo 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
7.1	Conclusiones	57
7.2	Recomendaciones	57

Índice de cuadros

1.1	Índices de refracción de sustancias biológicas	3
2.1	Propiedades de la onda electromagnética que se propaga en el Interferómetro Mach-Zehnder mostrado en la Figura 2.2b.	8
5.1	Dimensiones del Diseño #1	33
5.2	Índices efectivos del brazo sensor del Diseño #1	35
5.3	Índices efectivos del brazo referencia del Diseño #1	35
5.4	Dimensiones del Diseño #2	37
5.5	Índices efectivos del brazo sensor del Diseño #2	39
5.6	Índices efectivos del brazo referencia del Diseño #2	39
5.7	Dimensiones del Diseño #3	41
5.8	Índices efectivos del brazo sensor del Diseño #3	43
5.9	Valores de longitud de onda donde se encuentra valores mínimos en la transmisión del Diseño #1	46
5.10	Valores de longitud de onda donde se encuentra valores mínimos en la transmisión del Diseño #2	48
5.11	Valores de longitud de onda donde se encuentra valores mínimos en la transmisión del Diseño #3	50
5.12	Parámetros de sensibilidad de los diseños propuestos	52

Índice de figuras

2.1	Vista de perspectiva de la oblea de <i>silicio sobre aislante</i> (SOI). Fuente: Elaboración propia.	6
2.2	Representación gráfica del funcionamiento de un Interferómetro de Mach-Zehnder. (a) Representa un interferómetro con longitudes de brazos iguales, sin generar cambio de fase entre las ondas y produciendo interferencia constructiva a la salida. (b) Longitudes de brazos distintas, se genera cambio de fase de π radianes entre las ondas, produciendo interferencia destructiva a la salida. Fuente: Elaboración propia.	7
2.3	Índice de refracción de (a) silicio y (b) dióxido de silicio en función de la longitud de onda, a temperatura ambiente. Fuente: Elaboración propia.	9
2.4	Análisis modal de una guía de onda rectangular realizado con <i>Lumerical MODE</i> , para una longitud de onda de $1,55 \mu m$. (a) Sección transversal, $w = 500 nm$ y $t = 220 nm$. (b) Intensidad del campo eléctrico del modo TE. (c) Componente y del campo eléctrico. (d) Componente y , en dB, del campo eléctrico. Fuente: Elaboración propia.	10
2.5	Cambios en el índice de refracción efectivo n_{eff} y en el campo evanescente, de una guía de onda de $500 nm$ de ancho y $220 nm$ de espesor, para distintos índices de refracción del material de recubrimiento (n_c). (a) $n_c = 1$. (b) $n_c = 1,5$. (c) $n_c = 1,8$. (d) $n_c = 2$. Fuente: Elaboración propia.	11
2.6	(a) Vista transversal de Interferómetro de Mach-Zehnder suspendido en aire fabricado por Taha y col. (2017), con aplicación como sensor de fluido. (b) Vista longitudinal del Interferómetro de Mach-Zehnder propuesto por El Shamy y col. (2019) con aplicación como sensor de gas. Fuente: Taha y col. (2017), El Shamy y col. (2019).	12
2.7	Condiciones de frontera para (a) interfaz entre dos medios dieléctricos y (b) interfaz entre dieléctrico y conductor perfecto. Fuente: Elaboración propia.	16
2.8	Guía de onda dieléctrica plana, $n_1 > n_s > n_o$. Rayos guiados para $\theta < \pi/2 - \sin^{-1}(n_s/n_1)$ y rayos no guiados para $\theta > \pi/2 - \sin^{-1}(n_s/n_1)$. Fuente: Elaboración propia.	17

2.9	Modos (a) TE y (b) TM en una guía de onda dieléctrica plana. Fuente: Elaboración propia.	19
2.10	Modelado de guías de onda dieléctricas rectangulares. Fuente: Elaboración propia.	22
2.11	Guía de onda dieléctrica rectangular, $n_1 > n_0$. Fuente: Elaboración propia.	23
2.12	Sección transversal de una guía de onda dieléctrica tipo <i>ridge</i> . n_a representa el índice de refracción del recubrimiento, n_c al núcleo, n_r a la sección <i>rib</i> y n_s al sustrato. Fuente: Elaboración propia.	26
2.13	(a) Variación del índice de refracción en una guía de onda dieléctrica tipo <i>ridge</i> . (b) Distribución del índice de refracción efectivo $n_{eff}(x)$. Fuente: Elaboración propia.	27
5.1	Diseño de interferómetro Mach-Zehnder propuesto con guías de onda dieléctricas rectangulares. Fuente: Elaboración propia.	32
5.2	(a) Vista transversal y (b) vista longitudinal del interferómetro con guías de onda rectangulares. Fuente: Elaboración propia.	33
5.3	Intensidad del campo eléctrico ($ E_x ^2 + E_y ^2 + E_z ^2$) en el brazo de referencia (a y c) y en el brazo sensor (b y d) del Diseño #1. Componente E_y , en dB, del modo TE en el brazo de referencia (e y g) y en el brazo sensor (f y h) del Diseño #1. Fuente: Elaboración propia.	34
5.4	Pérdidas y polarización del modo en el brazo referencia (a) y en el brazo sensor (b) del Diseño #1. Fuente: Elaboración propia.	36
5.5	Intensidad del campo eléctrico ($ E_x ^2 + E_y ^2 + E_z ^2$) en el brazo de referencia (a y c) y en el brazo sensor (b y d) del Diseño #2. Componente E_y , en dB, del modo TE en el brazo de referencia (e y g) y en el brazo sensor (f y h) del Diseño #2. Fuente: Elaboración propia.	38
5.6	Pérdidas y polarización del modo en el brazo referencia (a) y en el brazo sensor (b) del Diseño #2. Fuente: Elaboración propia.	40
5.7	(a) Vista transversal y (b) vista longitudinal del interferómetro con guías de onda rectangulares. (c) Interfaz de guía de onda rectangular a una de ranura. Fuente: Elaboración propia.	40
5.8	Intensidad del campo eléctrico ($ E_x ^2 + E_y ^2 + E_z ^2$) en la guía de onda de ranura (a y b) del Diseño #3. Componente E_y del modo TE de la guía de onda de ranura (c y d) y componente E_y en dB (e y f) del Diseño #3. Fuente: Elaboración propia.	42
5.9	Diseño de interferómetro Mach-Zehnder propuesto con guías de onda dieléctricas rectangulares. Fuente: Elaboración propia.	43
5.10	Configuración de puertos en el interferómetro para el estudio de transmisión del modo TE. Fuente: Elaboración propia.	44

5.11	Transmisiones del modo TE, del interferómetro del Diseño #1 propuesto, para distintos valores de L_{sens} (a) $10 \mu m$, (b) $33 \mu m$, (c) $35 \mu m$, (d) $40 \mu m$ y (e) $45 \mu m$. Fuente: Elaboración propia.	45
5.12	Transmisiones del modo TE, del interferómetro del Diseño #2 propuesto, para distintos valores de L_{sens} (a) $40 \mu m$, (b) $87 \mu m$, (c) $100 \mu m$ y (d) $115 \mu m$. Fuente: Elaboración propia.	47
5.13	Transmisiones del modo TE, del interferómetro del Diseño #3 propuesto, para (a) $L_{sens} = 20 \mu m$ y (b) $L_{sens} = 40 \mu m$. Fuente: Elaboración propia.	49
5.14	(a y b) Intensidad del campo eléctrico y (c y d) componente y del campo eléctrico (E_y) del modo TE propagándose por una guía de onda de ranura del Diseño #3. Fuente: Elaboración propia.	51
5.15	Gráfica de comparación de sensibilidades de los diseños propuestos (región verde) y sensibilidades encontradas en la literatura junto con sus respectivas longitudes activas del sensor. Fuente: Elaboración propia. . .	53

Resumen

Los dispositivos ópticos integrados son ampliamente usados y estudiados para aplicaciones en comunicaciones ópticas. Sin embargo, la óptica integrada también puede ser usada para el desarrollo de biosensores ópticos. En este trabajo se realiza la propuesta de un dispositivo óptico integrado capaz de ser usado como biosensor, pues muchos de los dispositivos de detección de sustancias se basan en equipamiento biológico o químico. Este dispositivo está conformado por guías de onda nanométricas de silicio y es capaz de generar interferencia de la luz ante cambios mínimos en el índice de refracción (10^{-3} y 10^{-2}) de la sustancia a medir que lo rodea.

El dispositivo propuesto es un interferómetro de Mach-Zehnder y se estudian tres diseños distintos usando *silicio sobre aislante*, que es una tecnología de fabricación de dispositivos ópticos de silicio. Para cada diseño se estudia el comportamiento del campo electromagnético a la salida del interferómetro y se obtiene las sensibilidades en un rango de longitud de onda de 1.3 a 1.6 μm .

Palabras clave: Interferómetro, Mach-Zehnder, sensor óptico, interferencia, *silicio sobre aislante*, índice de refracción.

Abstract

Integrated optical devices are widely used and studied for applications in optical communications. However, integrated optics can also be used for the development of optical biosensors. In this work, the proposal of an integrated optical device capable of being used as a biosensor is made, since many of the substance detection devices are based on biological or chemical equipment. This device is made up of nanometric Silicon waveguides and is capable of generating light interference with minimal changes in the refractive index (10^{-3} and 10^{-2}) of the substance to be measured. that surrounds it.

The proposed device is a Mach-Zehnder interferometer and three different designs are studied using Silicon on Insulator, which is a manufacturing technology for Silicon optical devices. For each design, the behavior of the electromagnetic field at the interferometer output is studied and the sensitivities are obtained in a wavelength range of 1.3 to 1.6 μm .

Keywords: Interferometer, Mach-Zehnder, optical sensor, interference, Silicon on Insulator, refractive index.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En la actualidad, los dispositivos ópticos integrados son ampliamente usados y estudiados para aplicaciones en comunicaciones ópticas, empresas como *Intel Corporation* lograron la fabricación de moduladores electro-ópticos de silicio integrados que operan a 50 GHz (Dhiman, 2013) y pueden ser aplicados en la interconexión de centros de datos. El principio de funcionamiento de estos moduladores es la interferometría, la cual genera interferencia en la luz al aplicar un campo eléctrico al modulador. Bajo el mismo principio, estos dispositivos también pueden ser usados en la detección de sustancias biológicas, líquidos, gases, diagnóstico de enfermedades, entre otros. Trabajos en el desarrollo de biosensores ópticos buscan obtener dispositivos altamente sensibles y lograr su portabilidad para poder ser empleados en el diagnóstico de enfermedades (Dante y col., 2012) o para temas industriales como el control de calidad en la producción de alimentos (Meshram y col., 2018).

En los últimos años, el estudio y desarrollo de dispositivos ópticos integrados en un chip se ha incrementado considerablemente, solo basta con dar una breve revisión en los sitios web de las principales universidades y centros de estudios ^{1 2} en el mundo para notar que tienen a la óptica y fotónica como línea de investigación en desarrollo constante. En el Perú, el 2018, FONDECYT financió el proyecto de investigación “Desarrollo de un dispositivo optoelectrónico de bajo costo y banda ancha sintonizando velocidad de grupo en interfase RF – Óptica”, el cual tiene por finalidad diseñar, fabricar y caracterizar un modulador electro-óptico fotónico de silicio. Este trabajo de investigación se realizó en el marco del proyecto previamente descrito.

El presente trabajo de investigación tiene como propósito diseñar un dispositivo óptico de silicio capaz de ser usado como biosensor, pues podrá responder ante cambios en el índice de refracción de sustancias o elementos que lo rodeen. El dispositivo óptico propuesto es un interferómetro de Mach-Zehnder conformado de guías de onda dieléctricas de silicio. En un rango de longitudes de onda, este dispositivo logra crear interferencia de la luz, es decir que la transmisión del campo eléctrico sea cero. Los conceptos teóricos necesarios para entender el funcionamiento del interferómetro y de

¹Lipson Nanophotonics Group: <https://lipson.ee.columbia.edu/>

²CREOL: <https://creol.ucf.edu/>

los modos ópticos también son detallados en este trabajo.

El procedimiento necesario para el diseño de un sensor altamente sensible es detallado en la Sección 5, primero se estudia las dimensiones de las guías de onda. Luego se detalla el comportamiento del interferómetro, usando las guías de onda previamente estudiadas, obteniendo la transmisión a la salida del dispositivo. Finalmente, con los valores de transmisión se obtiene la sensibilidad del interferómetro ante cambios de 10^{-3} y 10^{-2} en el índice de refracción del medio o sustancia que lo rodea.

1.2 Planteamiento del problema

El desarrollo de biosensores requiere de dispositivos sensibles, compactos, con facilidad de fabricación y posibilidad de integrarlos en un chip. Los campos de aplicación como el control de calidad de los alimentos, la salud, el diagnóstico de enfermedades y el monitoreo ambiental y molecular hacen de los biosensores un tema de importancia en la investigación (Nejat & Nozhat, 2020). Entre todos los tipos de biosensores, los ópticos son los más estudiados, por lo que la investigación y el desarrollo tecnológico de este tipo de sensores ha experimentado un importante crecimiento durante la última década (Damborský y col., 2016). Existen varios dispositivos capaces de ser usados como biosensores ópticos, uno de ellos es el interferómetro de Mach-Zehnder.

La interferometría es una técnica que consiste en separar la luz en dos o más ondas, estas se propagan por rutas distintas sin interactuar una con la otra, para luego combinarlas y así generar interferencia (constructiva o destructiva). Este principio ha venido siendo utilizado en distintas aplicaciones, tales como, detección de ondas gravitacionales, moduladores electro-ópticos (Jara y col., 2021), entre otras. Sin embargo, no muchos trabajos han enfocado el funcionamiento del interferómetro de Mach-Zehnder en la detección óptica.

El tamaño de estos dispositivos ópticos suele ser de escala micrométrica y para su fabricación requiere de un proceso especializado. Además, en la literatura existe una amplia variedad de materiales empleados para fabricar estos dispositivos. *silicio sobre aislante* o *Silicon On Insulator* (SOI) es una tecnología que puede ser usada en la creación de dispositivos electrónicos y fotónicos (Baets y col., 2016), donde las guías de onda son fabricadas de silicio cristalino sobre un sustrato de dióxido de silicio. La ventaja de SOI radica en el reuso de los conocimientos sobre los procesos de fabricación de la industria CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), usada en la electrónica, ya que estos mismos pueden también ser empleados en el desarrollo de dispositivos fotónicos, con un gran potencial de alta densidad de integración en un chip, bajo costo y alto volumen de producción (Chen y col., 2018). En la parte fotónica, esta tecnología ha sido usada para desarrollo de circuitos opto-electrónicos integrados, óptica no-lineal, LIDAR (Detección y rango de luz), sensores y circuitos fotónicos cuánticos.

Con una tecnología capaz de fabricar dispositivos ópticos a escala micrométrica y usando la interferometría como principio de funcionamiento, es necesario conocer el alcance de los elementos o sustancias que pueden ser detectadas. En la literatura, autores han estudiado el índice de refracción de sustancias biológicas, como la presencia de glucosa en agua que presenta un índice de refracción de 1.33469 para una concentración de 20 g/L (Yeh, 2008), ver Cuadro 1.1, teniendo como referencia que el agua presenta un índice de refracción de 1.3198 (Bertie & Lan, 1996; Li y col., 2012). En caso de enfermedades, P. Y. Liu y col. (2016) encontraron que en tres etapas distintas del ciclo de infección de la malaria (Anillo, Trofozoito y Esquizonte) se produce un cambio en el índice de refracción de los glóbulos rojos mostrado en el Cuadro 1.1. Los glóbulos rojos sanos tienen una distribución homogénea del índice de refracción, mientras que los glóbulos rojos infectados muestran un índice de refracción no homogéneo en todo el citoplasma de la célula (P. Y. Liu y col., 2016). Además, se realizaron mediciones del índice de refracción de células con esporas de la bacteria *bacillus* (1.517 - 1.539) y de la bacteria en su forma vegetativa (1.387 - 1.400). También se encontró que células de cáncer tienen un índice de refracción de 1.370 (P. Y. Liu y col., 2016; Nejat & Nozhat, 2020).

Cuadro 1.1: Índices de refracción de sustancias biológicas

Sustancia biológica	Referencia	Índice de refracción
Glucosa en agua	Yeh (2008)	Concentración 20 g/L: n = 1.33469
Malaria	P. Y. Liu y col. (2016)	Etapa <i>Anillo</i> : n = 1.395 Etapa <i>Trofozoito</i> : n = 1.383 Etapa <i>Esquizonte</i> : n = 1.373 Glóbulos rojos sanos: n = 1.399
Bacteria <i>bacillus</i>	P. Y. Liu y col. (2016)	Forma vegetativa: n = 1.387 - 1.400 Esporas: n = 1.517 - 1.539
Células de cáncer	P. Y. Liu y col. (2016)	n = 1.370

Fuente: Elaboración propia

Considerando que el uso del interferómetro de Mach-Zehnder en la aplicación de biosensores no ha sido muy explorado en la literatura, la variedad de sustancias biológicas que pueden ser detectadas y que el uso de *silicio sobre aislante* (SOI) nos brinda la posibilidad de fabricar estos dispositivos e integrarlos en un chip, se propone el diseño de un interferómetro de Mach-Zehnder, usando *silicio sobre aislante*, como un dispositivo óptico integrado usado como biosensor, capaz de detectar cambios del índice de refracción de sustancias biológicas, lo cual puede ser expresado a través de:

1.2.1 Determinación del problema

Bajo lo expuesto en el planteamiento del problema, se considera necesario diseñar un dispositivo óptico en la forma de Interferómetro de Mach-Zehnder (IMZ) mediante el uso de la tecnología SOI, *silicio sobre aislante*, que sea capaz de identificar cambios en el índice de refracción de sustancias que rodeen al dispositivo.

1.2.2 Formulación del problema

Problema principal

¿Cuál sería el diseño de interferómetro de Mach-Zehnder mediante el uso de *silicio sobre aislante* para aplicaciones en biosensores?

Problemas específicos

- ¿Cuál sería la geometría óptima para un interferómetro de Mach-Zehnder empleado como biosensor?
- ¿Cuál es el comportamiento simulado del interferómetro de Mach-Zehnder?
- ¿Cuáles serían los parámetros de sensibilidad del dispositivo propuesto?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un dispositivo óptico en la forma de Interferómetro de Mach-Zehnder (IMZ) mediante el uso de *silicio sobre aislante* para aplicación como biosensor.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar las dimensiones de las guías de onda de silicio que conformarán el interferómetro.
- Analizar el comportamiento del interferómetro mediante simulación asistida por software.
- Determinar los parámetros de sensibilidad y rango de funcionamiento del dispositivo propuesto.

1.4 Importancia y alcance de la investigación

La importancia de este trabajo de investigación nace de la necesidad de explorar nuevas técnicas de detección de sustancias biológicas, creando dispositivos capaces de reaccionar ante cambios mínimos en su entorno. Con este trabajo se busca usar una alternativa en el desarrollo de biosensores ópticos mediante un interferómetro y el uso de *Silicon on Insulator*.

En la búsqueda de nuevas técnicas de detección, notamos que el Perú cuenta con un incipiente desarrollo en el estudio y diseño de dispositivos ópticos. Es limitada la literatura creada en este campo de estudio, pues los dispositivos de detección de sustancias biológicas son mayormente estudiados y diseñados por áreas especializadas en biología o química. Con este trabajo se busca también impulsar la línea de investigación en óptica en el país, con la posibilidad de, en un futuro, lograr el diseño, fabricación y medición de dispositivos ópticos integrados.

La variedad y complejidad de los dispositivos ópticos ha tenido un crecimiento exponencial en los últimos años, haciéndolos más complejos e idóneos para nuevas aplicaciones. El estudio realizado en este trabajo busca contribuir como una guía para poder explorar futuros trabajos en distintas líneas de investigación, como el diseño de moduladores electro-ópticos, anillos resonadores, divisores de potencia, entre otros.

Como alcance de investigación se plantea un estudio exploratorio de las dimensiones del Interferómetro de Mach-Zehnder necesarias para obtener el mayor cambio en la transmisión frente a variaciones en el índice de refracción del espacio que lo rodea. La finalidad de este trabajo no radica en la detección de una o varias sustancias en específico, por el contrario, busca obtener un dispositivo capaz de detectar cambios pequeños de 10^{-3} y 10^{-2} en el índice de refracción del entorno que rodea al dispositivo.

1.5 Limitaciones de la investigación

La principal limitación de esta investigación radica en la restricción al explorar distintos valores del espesor de las guías de ondas de silicio que conforman el interferómetro de Mach-Zehnder. Fabricar guías de onda con un espesor de 220 nm se ha convertido en un estándar en la fabricación de dispositivos ópticos integrados (Chrostowski & Hochberg, 2015). Esto se debe a que el proceso de fabricación de dispositivos ópticos requiere de equipos e infraestructura especializada, es por ello que se opta por *Multi Project Wafer* (MPW), u Oblea Multiproyecto, donde una empresa especializada fabrica dispositivos ópticos de distintos usuarios en una sola oblea de silicio, haciendo más asequible la etapa de fabricación y poniéndola a disposición de la comunidad en general.

Capítulo 2

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Silicio sobre aislante (SOI)

La tecnología SOI, *Silicon on Insulator*, consta de una oblea de silicio y es el espacio donde se construirá los dispositivos ópticos, como las guías de onda que forman al interferómetro de Mach-Zehnder estudiado en este trabajo de investigación. Mediante diversas técnicas y etapas de fabricación, se hace crecer silicio cristalino sobre una capa de dióxido de silicio, dándole forma rectangular, formando guías de onda.

La gran ventaja de usar silicio en fotónica, al igual que en la industria de la microelectrónica, es que podemos usarlo para construir sistemas complejos (Streshinsky y col., 2013). Los dispositivos ópticos típicos construidos con SOI pueden ser pasivos como guías de ondas, acopladores y filtros, y dispositivos activos como moduladores y foto-detectores (Streshinsky y col., 2013).

La estructura de una plataforma de *silicio sobre aislante* se muestra en la Figura 2.1. La plataformas y los dispositivos usados son hechos por distintos fabricantes, como OpSIS-IME, IMEC, IHP, entre otros, y siguen un estándar en sus dimensiones (Novack y col., 2014). El diámetro de las obleas de silicio es de 200 mm con un sustrato de silicio de 600 - 725 μm de espesor, sobre el sustrato se encuentra dióxido de silicio (SiO_2), también llamado *Buried* o *BOX*, con un espesor de 2 μm . Sobre el *BOX* se coloca silicio cristalino, donde se definirá los dispositivos ópticos, como el núcleo de una guía de onda. Sobre el núcleo se coloca un recubrimiento, también llamado *cladding*, de dióxido de silicio o de aire.

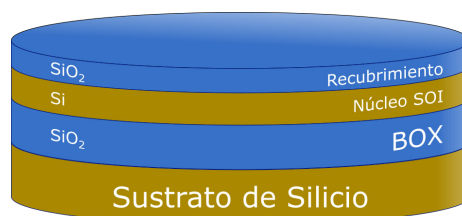


Figura 2.1: Vista de perspectiva de la oblea de *silicio sobre aislante* (SOI). Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Funcionamiento del Interferómetro de Mach-Zehnder

Los interferómetros forman parte de muchos circuitos ópticos, siendo el Interferómetro de Mach-Zehnder (IMZ) el más usado, ya que puede ser empleado en moduladores, *switches* y filtros (Pavesi & Guillot, 2006). El esquema de un Interferómetro de Mach-Zehnder es presentado en la Figura 2.2, el cual está conformado por cuatro guías de onda, un divisor (*splitter*) y un combinador (*combiner*). Los seis elementos que conforman el interferómetro pueden estar formados de silicio y, con las dimensiones adecuadas, pueden transportar la luz. El funcionamiento del interferómetro mostrado en la Figura 2.2a es simple, la luz ingresa por la guía de onda etiquetada como “Entrada”, luego la luz ingresa al *splitter*, asumiendo que el *splitter* divide la intensidad de la luz en 2 partes iguales, posteriormente, tendremos la misma intensidad de luz ingresando tanto para la guía de onda etiquetada como “Brazo 1” y “Brazo 2” y además ingresando con la misma fase. Luego, la luz se vuelve a unir en el combinador para luego finalizar en la guía de onda “Salida”.

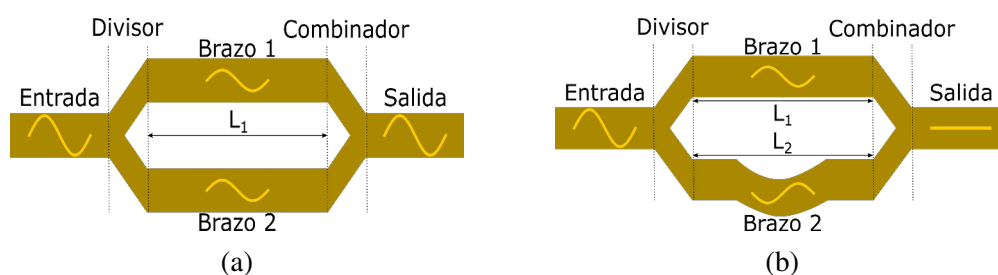


Figura 2.2: Representación gráfica del funcionamiento de un Interferómetro de Mach-Zehnder. (a) Representa un interferómetro con longitudes de brazos iguales, sin generar cambio de fase entre las ondas y produciendo interferencia constructiva a la salida. (b) Longitudes de brazos distintas, se genera cambio de fase de π radianes entre las ondas, produciendo interferencia destructiva a la salida. Fuente: Elaboración propia.

La utilidad del interferómetro radica en variar la fase en uno de los “Brazos”. La fase puede cambiar si modificamos la constante de propagación de la onda que se propaga en un brazo (variando el índice de refracción del brazo) o modificando la longitud de un brazo, como se muestra en la Figura 2.2b. El Cuadro 2.1 detalla las propiedades de la onda electromagnética que se propaga por el interferómetro. Podemos observar el campo eléctrico en cada sección del interferómetro, la intensidad de la luz en la entrada (I_i) y salida (I_o), la constante de propagación en cada brazo y la función de transferencia. Si consideramos que las guías de onda no tienen pérdidas ($\alpha_1 = \alpha_2 = 0$), observamos que la intensidad de la luz en la salida depende de $\beta_1 L_1 - \beta_2 L_2$, que representa la diferencia de fase entre la onda que viaja en el Brazo 1 y Brazo 2. Si elegimos un valor apropiado para L_1 y L_2 , tal que la diferencia de fases en ambos brazos sea de π radianes, podremos generar interferencia destructiva a la salida del IMZ, ver Figura 2.2b.

Cuadro 2.1: Propiedades de la onda electromagnética que se propaga en el Interferómetro Mach-Zehnder mostrado en la Figura 2.2b.

	Entrada	Brazo 1	Brazo 2	Salida
Campo eléctrico	E_i	$E_{o1} = \frac{E_i}{\sqrt{2}} e^{-i\beta_1 L_1 - \frac{\alpha_1}{2} L_1}$	$E_{o2} = \frac{E_i}{\sqrt{2}} e^{-i\beta_2 L_2 - \frac{\alpha_2}{2} L_2}$	$E_o = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_{o1} + E_{o2})$
Constante de propagación		$\beta_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda}$	$\beta_2 = \frac{2\pi n_2}{\lambda}$	
Longitud		L_1	$L_2 = \Delta L + L_1$	
Pérdidas		α_1	α_2	
Función de transferencia		$I_o = \frac{I_i}{4} (e^{-i\beta_1 L_1 - \frac{\alpha_1}{2} L_1} + e^{-i\beta_2 L_2 - \frac{\alpha_2}{2} L_2})^2$ Para $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, $I_o = \frac{I_i}{2} (1 + \text{Cos}(\beta_1 L_1 - \beta_2 L_2))$		

Fuente: Chrostowski y Hochberg (2015)

2.1.3 Análisis modal en guías de onda dieléctricas

Para el diseño de un Interferómetro de Mach-Zehnder, debemos estudiar el dispositivo mediante modelos numéricos que nos permitan encontrar la distribución del campo eléctrico en la guía de onda. El método usado será el método de diferencias finitas, en donde se discretiza el medio que se desea analizar. Dependiendo del objetivo del análisis, se discretizará en espacio o tiempo. El propósito de realizar un análisis modal es calcular el perfil espacial y la dependencia de frecuencia de los modos que se propagan en la guía de onda, el significado e interpretación de un modo se muestra en la Sección 2.3.6.

En el mercado existen varios software de simulación que cumplen esta función. Tanto *Lumerical/Ansys* como *Comsol Multiphysics* son simuladores que cuentan con librerías y/o productos que nos permiten usar el método de elementos finitos para encontrar los modos que se propagan por la guía de onda, estos software son usados frecuentemente en el estado del arte y se podrá tener acceso a parte de estos mediante una asociación con INICTEL-UNI y el grupo de investigación “RFMO: Radiofrecuencia, microondas y óptica”.

Conocer los índices de refracción de los materiales que serán empleados en este trabajo y su dependencia en frecuencia es importante para realizar el análisis modal. En este trabajo se usará silicio (*Si*) y dióxido de silicio (*SiO₂*). La variación del índice de refracción del silicio en función de la longitud de onda es presentada en la Figura 2.3a, donde se presenta en un rango de longitud de onda desde 1.033 μm hasta 1.771 μm , con una variación del índice de refracción desde 3.61 hasta 3.45, respectivamente (Pierce & Spicer, 1972). En el caso del dióxido de silicio se presenta en la Figura 2.3b,

el rango de longitud de onda va desde $1.033 \mu m$ hasta $1.797 \mu m$, con una variación del índice de refracción desde 1.45 hasta 1.441, respectivamente (Tan, 1998). Tanto el silicio como el dióxido de silicio son materiales transparentes en este rango de longitudes de onda, es decir no presentan pérdidas.

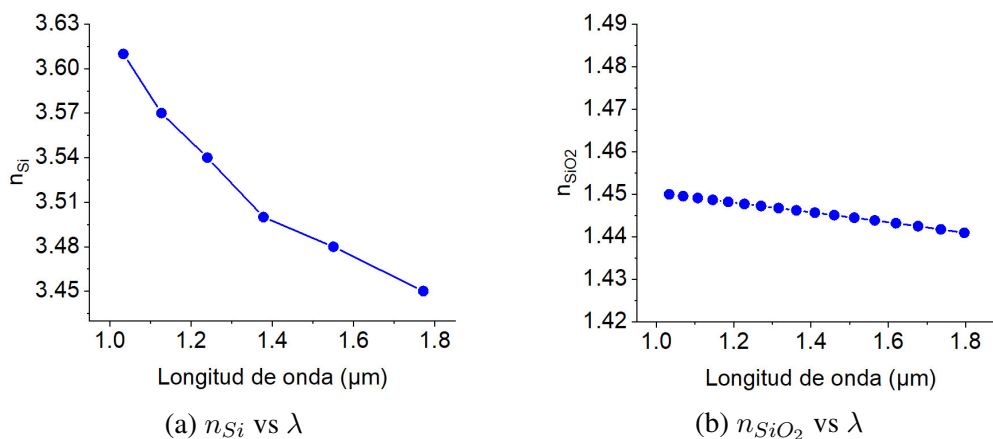


Figura 2.3: Índice de refracción de (a) silicio y (b) dióxido de silicio en función de la longitud de onda, a temperatura ambiente. Fuente: Elaboración propia.

Conociendo los índices de refracción de los materiales que usaremos en el dispositivo, se hará uso del software de simulación *Lumerical MODE*. Tal como se mencionó previamente, *Lumerical MODE* realiza el análisis modal de guías de onda. Son varias las consideraciones a tener en cuenta al momento de usar este simulador, una manera detallada de como realizar las simulaciones escapa del alcance del presente trabajo, pero para mayor detalle se invita al lector a consultar los manuales, de acceso libre, brindados en la pagina web del desarrollador.

Tomando en consideración lo antes mencionado, se realiza el análisis modal de una guía de onda rectangular de silicio, de $500 nm$ de ancho y $220 nm$ de espesor, sobre una plataforma SOI. La sección transversal de la guía de onda se muestra en la Figura 2.4a, donde el núcleo es de silicio, el recubrimiento de aire ($n_{Aire} = 1$) y el sustrato de dióxido de silicio. El ancho del núcleo es representado por $w = 500 nm$ y el espesor por $t = 220 nm$. Los resultados muestran que el modo fundamental es un modo TE, es decir, la mayor concentración del campo eléctrico se encuentra en el eje y con un índice de refracción efectivo de $n_{eff} = 2,384556$. En la Figura 2.4b se ve que gran parte de la intensidad del campo eléctrico ($|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$) se propaga por el núcleo de silicio. Teniendo en cuenta que, para que un modo se propague, el n_{eff} debe ser mayor a n_{SiO_2} y menor a n_{Si} . Las Figuras 2.4c y 2.4d representan la componente y del campo eléctrico del modo TE encontrado. En la Figura 2.4d se puede apreciar, con mayor detalle, que existe un campo en los bordes del núcleo que cae exponencialmente, a este campo se le llama **campo evanescente** y tiene importancia al encontrar el valor del n_{eff} .

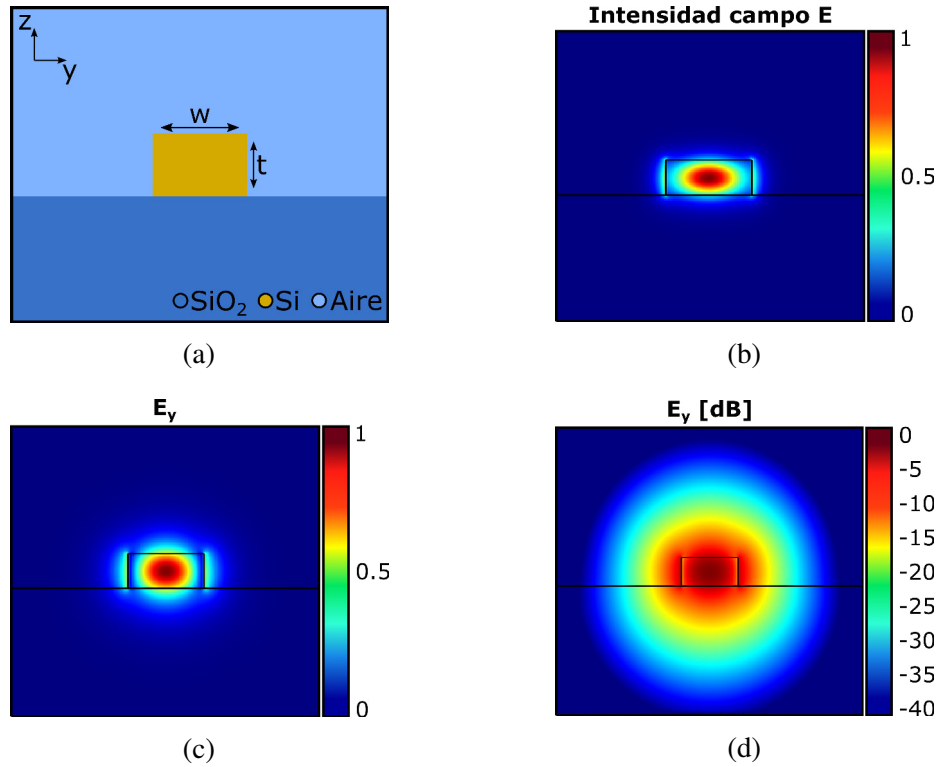


Figura 2.4: Análisis modal de una guía de onda rectangular realizado con *Lumerical MODE*, para una longitud de onda de $1,55 \mu\text{m}$. (a) Sección transversal, $w = 500 \text{ nm}$ y $t = 220 \text{ nm}$. (b) Intensidad del campo eléctrico del modo TE. (c) Componente y del campo eléctrico. (d) Componente y , en dB, del campo eléctrico. Fuente: Elaboración propia.

2.1.4 Biosensor de campo evanescente

Para el desarrollo de un IMZ para aplicaciones en biosensores alteraremos el campo evanescente en uno de los brazos del interferómetro, al cual llamaremos brazo sensor, y el brazo restante será el de referencia. La alteración del campo evanescente se logrará mediante la modificación del índice de refracción del recubrimiento de la guía de onda. A partir de esta alteración, el n_{eff} del modo que se propague por el brazo sensor cambiará, generando cambios en la respuesta en frecuencia del interferómetro. La sensibilidad del dispositivo se obtiene midiendo los cambios en frecuencia del dispositivo a medida que el índice de refracción del recubrimiento cambia:

$$Sensibilidad = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \quad (2.1)$$

En la sección anterior se realizó un análisis modal teniendo aire como recubrimiento, pero pueden ser sustancias biológicas las que reemplacen al aire, como las mostradas anteriormente en el Cuadro 1.1. En la Figura 2.5 se muestra con mayor detalle como el campo evanescente y el índice de refracción efectivo cambian a medida que el índice refracción del recubrimiento n_c varía de 1 a 2. A medida que n_c aumenta, hay

un aumento del n_{eff} y hay mas presencia de campo evanescente en el recubrimiento de la guía de onda.

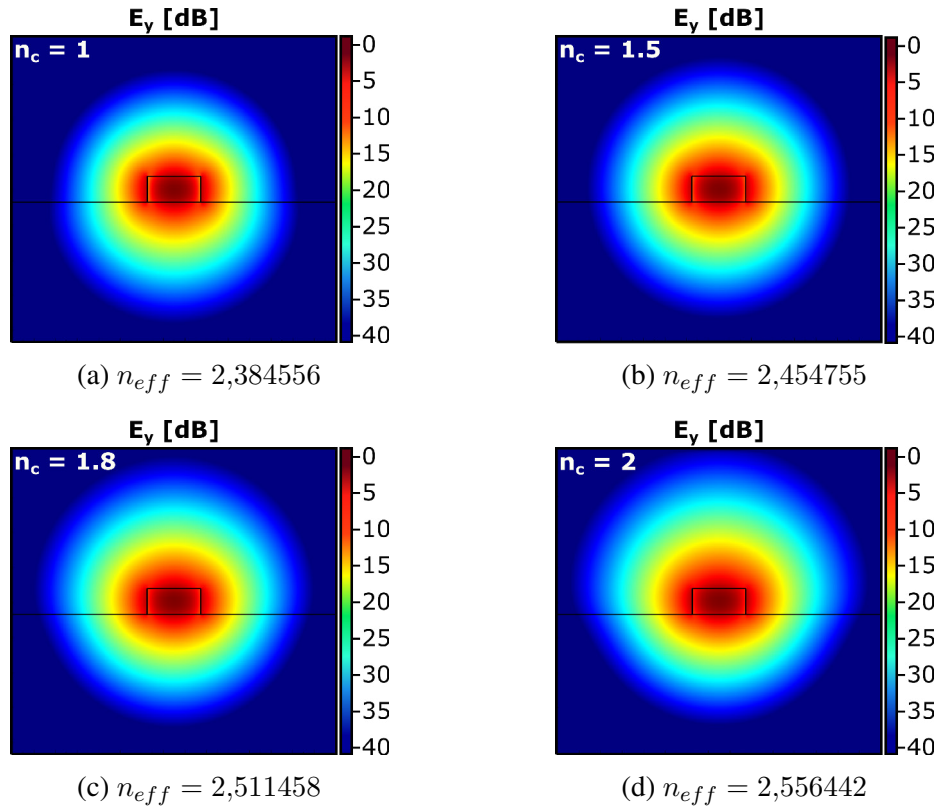


Figura 2.5: Cambios en el índice de refracción efectivo n_{eff} y en el campo evanescente, de una guía de onda de 500 nm de ancho y 220 nm de espesor, para distintos índices de refracción del material de recubrimiento (n_c). (a) $n_c = 1$. (b) $n_c = 1,5$. (c) $n_c = 1,8$. (d) $n_c = 2$. Fuente: Elaboración propia.

2.2 Antecedentes del estudio

En el estado del arte, dispositivos integrados basados en el funcionamiento del Interferómetro Mach-Zehnder (IMZ) con aplicación en sensores han sido reportados.

En el 2006, Densmore y colegas demostraron un sensor de campo evanescente que utiliza guías de onda fotónicas rectangulares usando *silicio sobre aislante (SOI)* (Densmore y col., 2006). En este artículo trabajaron con el campo evanescente de un modo TM, operando a una longitud de onda de 1550 nm , las dimensiones del núcleo fueron de 260 nm de ancho y 450 nm de espesor. Los autores encontraron el parámetro $\delta n_{eff}/\delta n_c = 0,31$ con $n_c \sim 1,32$, que relaciona el cambio del índice de refracción efectivo n_{eff} en función de n_c , n_c representa el índice de refracción de una solución de sacarosa que actúa como recubrimiento de la guía de onda. En este artículo se menciona que la sensibilidad del sensor se define como el cambio del n_{eff} del modo que se propaga por la guía de onda y este cambio puede depender del cambio en el índice de refracción del recubrimiento de la guía de onda, ya sea por

la presencia de alguna sustancia o por el cambio de espesor de una capa molecular absorbente, en ambos casos, se produciría un cambio en el campo evanescente y en consecuencia, un cambio en el n_{eff} . También se explica que la sensibilidad de este tipo de sensores puede ser incrementada si se reduce las dimensiones del núcleo de la guía de onda con el fin de obtener un modo menos confinado y modificar el n_{eff} con mayor facilidad, incrementando la interacción entre el material (o sustancia) que esta en el recubrimiento. Por otro parte, Abimael Jiménez y colegas, en el 2011, fabricaron un biosensor óptico basado en un interferómetro de Mach-Zehnder con guías de onda de nitruro de silicio (Si_3N_4) como núcleo, usando un láser de 632.8 nm (Abimael y col., 2011). El dispositivo tiene 10 mm de largo, ancho de 4 mm y 3.5 mm de separación entre el brazo de referencia y sensor.

En el 2017, Ayat M. Taha y colegas (Taha y col., 2017), fabricaron dos IMZ sobre una plataforma *SOI*, uno de ellos suspendido en aire. Los interferómetros fabricados cuentan con características especiales para aplicaciones como sensor de fluidos, perturbando el campo evanescente del modo TE. Las dimensiones del núcleo son de 450 nm de ancho y 220 nm de espesor. Los brazos del interferómetro cuentan con 1 cm de largo y la longitud de onda de operación de 1550 nm . Las sensibilidades encontradas fueron de $240 \text{ nm}/RIU$ y $740 \text{ nm}/RIU$ (RIU: Refractive Index Unit). La sección transversal de uno de los interferómetros estudiados se presentan en la Figura 2.6a.

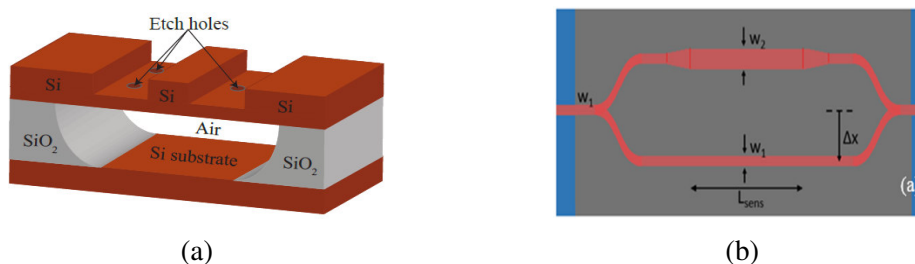


Figura 2.6: (a) Vista transversal de Interferómetro de Mach-Zehnder suspendido en aire fabricado por Taha y col. (2017), con aplicación como sensor de fluido. (b) Vista longitudinal del Interferómetro de Mach-Zehnder propuesto por El Shamy y col. (2019) con aplicación como sensor de gas. Fuente: Taha y col. (2017), El Shamy y col. (2019).

En el 2019, Raghi S. El Shamy y colegas propusieron un sensor de gas mediante el uso de dos configuraciones de IMZ (El Shamy y col., 2019). Una de las configuraciones presenta una guía de onda suspendida, ver Figura 2.6b, pero en ambos casos se trabajó con silicio como núcleo, operando en un rango de longitudes de onda de $4.5 \mu\text{m}$ a $5.5 \mu\text{m}$. El IMZ propuesto tiene la característica que las guías de onda tienen distintas dimensiones. Usan una guía de onda de referencia con un ancho mayor a 1100 nm y la guía de onda usada como sensor tiene 800 nm de ancho y $150 \mu\text{m}$ de largo. Ambas con el mismo espesor de 1100 nm . La sensibilidad reportada es de $3206 \text{ nm}/RIU$. La vista longitudinal del interferómetro con guías de onda suspendidas se muestra en

la Figura 2.6b, el propósito de tener la guía de onda de referencia más ancha es para hacerla menos sensible a cambio en su entorno, ya que ambas guías estarán expuestas al gas que se desea medir.

2.3 Bases Teóricas

2.3.1 Ecuaciones de Maxwell

Las Ecuaciones de Maxwell son el punto de partida para comprender la propagación de ondas electromagnéticas. Estas son el punto de partida para iniciar el estudio en el campo de la fotónica. Partiremos por enunciar las Ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial:

$$\nabla \times \vec{e}_{(\vec{r},t)} = -\mu \frac{\partial \vec{h}_{(\vec{r},t)}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{h}_{(\vec{r},t)} = \vec{J}_{(\vec{r},t)} + \varepsilon \frac{\partial \vec{e}_{(\vec{r},t)}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{e}_{(\vec{r},t)} = \frac{\rho_v}{\varepsilon} \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{h}_{(\vec{r},t)} = 0 \quad (2.5)$$

Siendo:

\vec{e} : Vector campo eléctrico

\vec{h} : Vector campo magnético

\vec{J} : Densidad de corrientes libres.

ρ_v : Densidad volumétrica de cargas libres

Las primeras dos ecuaciones muestran las leyes de Faraday y de Ampere relacionando los campos eléctricos y magnéticos. Las dos últimas ecuaciones muestran la densidad de flujo. Si acotamos estas ecuaciones a un problema sin fuentes, podremos tener las formas simplificadas observadas en las ecuaciones 2.2-2.5.

2.3.2 Medio lineal, homogéneo, isotrópico y no-dispersivo

La manera en cómo se comportan los materiales ante la presencia de un campo eléctrico está caracterizado por los parámetros ε , μ y σ (permitividad, permeabilidad y conductividad, respectivamente) del material (Saleh & Teich, 2019). En este sentido podemos enunciar los siguientes casos:

- El material es **lineal** si ε , μ y σ no varían a medida que se aplica un campo eléctrico.
- El material es **homogéneo** si ε , μ y σ son constantes en cada punto del material.
- El material es **isotrópico** si ε , μ y σ se mantienen constantes mientras la dirección del campo eléctrico varía. Caso contrario, el material es anisotrópico.

Materiales como algunos cristales presentan anisotropía, por ejemplo el nitruro de aluminio (AlN) y el niobato de litio ($LiNbO_3$).

- El material es **no-dispersivo** si ε , μ y σ no varían a medida que la frecuencia del campo eléctrico varía.

2.3.3 Electromagnetismo con dependencia armónica con el tiempo

Aquellas ondas electromagnéticas en las cuales solo está presente una componente de frecuencia son llamadas ondas electromagnéticas monocromáticas (Cheng, 1997). Podemos generar un campo eléctrico \vec{e} monocromático con dependencia armónica en el tiempo con referencia a $\cos \omega t$, expresado como

$$\vec{e}_{(x,y,z;t)} = \vec{e}_{(\vec{r};t)} = a(\vec{r}) \cos [\omega t + \phi(\vec{r})], \quad (2.6)$$

siendo $a(\vec{r})$ la amplitud, $\phi(\vec{r})$ la fase y $\omega = 2\pi f$ la frecuencia angular. Es conveniente representar el campo eléctrico \vec{e} en términos de una función compleja

$$\vec{E}_{(\vec{r};t)} = a(\vec{r}) e^{i\phi(\vec{r})} e^{i\omega t}, \quad (2.7)$$

tal que

$$\vec{e}_{(\vec{r};t)} = \text{Re}\{\vec{E}_{(\vec{r};t)}\} = \frac{1}{2}[\vec{E}_{(\vec{r};t)} + \vec{E}_{(\vec{r};t)}^*], \quad (2.8)$$

donde el símbolo * representa la conjugada compleja. La ecuación 2.7 puede presentarse en la forma

$$\vec{E}_{(\vec{r};t)} = \vec{E}_{(\vec{r})} e^{i\omega t}, \quad (2.9)$$

donde $\vec{E}_{(\vec{r})} = a(\vec{r}) e^{i\phi(\vec{r})}$ es independiente del tiempo, por tanto el campo $\vec{e}_{(\vec{r};t)}$ en función de $\vec{E}_{(\vec{r})}$ es presentado por

$$\vec{e}_{(\vec{r};t)} = \text{Re}\{\vec{E}_{(\vec{r})} e^{i\omega t}\} = \frac{1}{2}[\vec{E}_{(\vec{r})} e^{i\omega t} + \vec{E}_{(\vec{r})}^* e^{-i\omega t}], \quad (2.10)$$

el mismo procedimiento para el campo magnético

$$\vec{h}_{(\vec{r};t)} = \text{Re}\{\vec{H}_{(\vec{r})} e^{i\omega t}\} = \frac{1}{2}[\vec{H}_{(\vec{r})} e^{i\omega t} + \vec{H}_{(\vec{r})}^* e^{-i\omega t}]. \quad (2.11)$$

Combinando las ecuaciones 2.10 y 2.11 en las ecuaciones 2.2-2.5 y usando la relación $(\partial/\partial t)e^{i\omega t} = i\omega e^{i\omega t}$ para ondas monocromáticas producimos (Cheng, 1997):

$$\nabla \times \vec{E}_{(\vec{r})} = -i\omega \vec{B}_{(\vec{r})} \quad (2.12)$$

$$\nabla \times \vec{H}_{(\vec{r})} = i\omega \vec{\varepsilon} \vec{E}_{(\vec{r})} \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot \vec{D}_{(\vec{r})} = 0 \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}_{(\vec{r})} = 0 \quad (2.15)$$

Las ecuaciones 2.12-2.15 nos muestran una nueva manera de enunciar las Ecuaciones de Maxwell en presencia de ondas electromagnéticas monocromáticas con dependencia armónica en el tiempo en un medio lineal, isotrópico y homogéneo. Para nuestro propósito, vamos a asumir que la onda se propaga por un medio libre de fuentes, es decir $\vec{J} = 0$ y $\rho_v = 0$. Dando como resultado, en término de fasores vectoriales (Cheng, 1997), las Ecuaciones de Maxwell con dependencia armónica en el tiempo. Para medios isotrópicos la matriz $\bar{\epsilon}$ suele expresarse como una constante, pero en medios anisotrópicos la matriz toma la forma de una matriz 3×3 .

2.3.4 Ecuaciones de Helmholtz

Las Ecuaciones de Maxwell son ecuaciones diferenciales de primer grado con dos variables (Cheng, 1997) ($\vec{e}_{(\vec{r},t)}$ y $\vec{h}_{(\vec{r},t)}$). Se pueden generar ecuaciones de segundo grado pero que contenga solo una variable:

$$\nabla \times \vec{e}_{(\vec{r},t)} = -\mu \frac{\partial \vec{h}_{(\vec{r},t)}}{\partial t}$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{e}_{(\vec{r},t)}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{h}_{(\vec{r},t)}) = -\mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{e}_{(\vec{r},t)}}{\partial t^2}$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{e}_{(\vec{r},t)}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{e}_{(\vec{r},t)}) - \nabla^2 \vec{e}_{(\vec{r},t)} = -\nabla^2 \vec{e}_{(\vec{r},t)}$$

Dando por resultado la ecuación 2.16 para $\vec{e}_{(\vec{r},t)}$, en un medio libre de fuentes ($\vec{J} = 0$ y $\rho_v = 0$), y de manera similar la ecuación 2.17 para $\vec{h}_{(\vec{r},t)}$.

$$\nabla^2 \vec{e}_{(\vec{r},t)} - \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 \vec{e}_{(\vec{r},t)}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.16)$$

$$\nabla^2 \vec{h}_{(\vec{r},t)} - \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 \vec{h}_{(\vec{r},t)}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.17)$$

Siendo

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{\omega}{k}. \quad (2.18)$$

Donde:

∇^2 : Laplaciano

v_p : Velocidad de fase

k : Número de onda

El número de onda (k) es una medida del número de longitudes de onda en un intervalo de 2π y que a su vez depende de las características del medio y de la frecuencia de la onda (f). De la relación $v_p = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$ se puede deducir que las ondas electromagnéticas de cualquier frecuencia se propagan en un medio con la misma velocidad v_p . Las ecuaciones 2.16 y 2.17 son **ecuaciones de onda vectoriales homogéneas** (Cheng, 1997). Como se aprecia en su nomenclatura, $\vec{e}_{(\vec{r},t)}$ y $\vec{h}_{(\vec{r},t)}$ son campos con dependencia armónica en el tiempo, por lo cual, usaremos la relación $(\partial/\partial t)e^{i\omega t} = i\omega e^{i\omega t}$. Dando como resultado las ecuaciones 2.19 y 2.20 que son las ecuaciones homogéneas de Helmholtz.

$$\nabla^2 \vec{E}_{(\vec{r})} + k^2 \vec{E}_{(\vec{r})} = 0 \quad (2.19)$$

$$\nabla^2 \vec{H}_{(\vec{r})} + k^2 \vec{H}_{(\vec{r})} = 0 \quad (2.20)$$

2.3.5 Condiciones de frontera

En la frontera entre dos medios dieléctricos, para un medio libre de fuentes, es decir $\vec{J} = 0$ y $\rho_v = 0$, las componentes tangenciales del campo magnético y eléctrico E y H son continuos, de la misma manera, las componentes normales de las densidades de campo eléctrico y magnético D y B también son continuas, ver Figura 2.7a. En caso de la frontera entre un dieléctrico y un conductor (metal), la componente tangencial del vector campo eléctrico es cero, ver Figura 2.7b (Saleh & Teich, 2019).

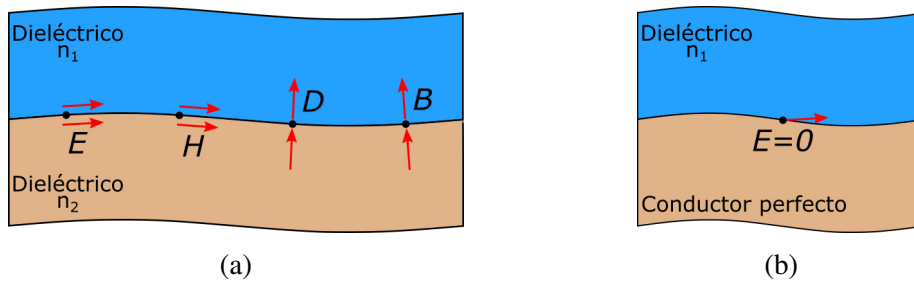


Figura 2.7: Condiciones de frontera para (a) interfaz entre dos medios dieléctricos y (b) interfaz entre dieléctrico y conductor perfecto. Fuente: Elaboración propia.

2.3.6 Guía de onda dieléctrica plana

En esta sección estudiaremos la propagación de ondas en una guía de onda dieléctrica plana, también llamada *slab*. Una típica guía de onda plana es mostrada en la Figura 2.8, consta de un material dieléctrico con índice de refracción n_1 , de espesor $2a$, rodeado de materiales dieléctricos con índices de refracción menores a n_1 . Este arreglo permite a la luz propagarse en el medio n_1 mediante reflexión total interna (Okamoto, 2006). En la literatura, el medio n_1 suele llamarse “núcleo” y los medios n_o y n_s “recubrimientos”. Para que la luz se propague por el medio n_1 , debe ocurrir reflexión

total interna (RTI), para esto debemos saber el ángulo crítico de la interfaz superior e inferior de n_1 . El ángulo crítico de la interfaz $n_1|n_o$ es $\theta_{o,c} = \sin^{-1}(n_o/n_1)$, y el de la interfaz $n_1|n_s$ es $\theta_{s,c} = \sin^{-1}(n_s/n_1)$. Para el análisis realizado en este trabajo, asumiremos que $n_s > n_o$, por tanto para que ocurra RTI, $\theta < \pi/2 - \sin^{-1}(n_s/n_1)$. Para estos ángulos, la luz se propagará en la dirección z y reflejará totalmente al incidir en las interfaces (rayos guiados). Por otro lado, para aquellos ángulos que no cumplan esta condición (rayos no guiados), se refractarán en las interfaces, perdiendo potencia en cada reflexión para luego desvanecerse.

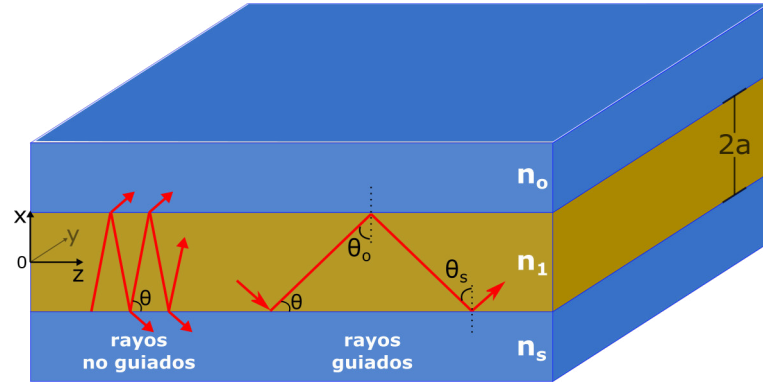


Figura 2.8: Guía de onda dieléctrica plana, $n_1 > n_s > n_o$. Rayos guiados para $\theta < \pi/2 - \sin^{-1}(n_s/n_1)$ y rayos no guiados para $\theta > \pi/2 - \sin^{-1}(n_s/n_1)$. Fuente: Elaboración propia.

Para guías de onda dieléctricas, podemos expresar la permitividad y permeabilidad como $\varepsilon = \varepsilon_0 n^2$ y $\mu = \mu_0$, respectivamente, siendo n el índice de refracción, para luego reemplazarlo en las ecuaciones 2.2 y 2.3, dando como resultado las ecuaciones 2.21a y 2.21b.

$$\nabla \times \vec{e}_{(\vec{r},t)} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{h}_{(\vec{r},t)}}{\partial t} \quad (2.21a)$$

$$\nabla \times \vec{h}_{(\vec{r},t)} = \varepsilon_0 n^2 \frac{\partial \vec{e}_{(\vec{r},t)}}{\partial t} \quad (2.21b)$$

De las ecuaciones 2.21 se puede derivar a las ecuaciones de Helmholtz para un medio dieléctrico:

$$\nabla^2 \vec{E}_{(\vec{r})} + k^2 n^2 \vec{E}_{(\vec{r})} = 0 \quad (2.22)$$

$$\nabla^2 \vec{H}_{(\vec{r})} + k^2 n^2 \vec{H}_{(\vec{r})} = 0 \quad (2.23)$$

En este trabajo se estudiará la propagación de ondas planas, de la forma

$$\vec{e}_{(\vec{r},t)} = \vec{E}(x, y)e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.24a)$$

$$\vec{h}_{(\vec{r},t)} = \vec{H}(x, y)e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.24b)$$

que representa una onda electromagnética con frecuencia angular ω que se propaga en el eje z con una constante de propagación β . Al sustituir las ecuaciones 2.24a y 2.24b en las ecuaciones 2.21a y 2.21b, se obtiene las siguientes ecuaciones para las componentes del campo eléctrico y magnético (Okamoto, 2006):

$$\nabla \times \vec{e}_{(\vec{r},t)} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{h}_{(\vec{r},t)}}{\partial t} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \\ -j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \end{array} \right. \quad (2.25)$$

$$\nabla \times \vec{h}_{(\vec{r},t)} = \varepsilon_0 n^2 \frac{\partial \vec{e}_{(\vec{r},t)}}{\partial t} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\varepsilon_0 n^2 E_x \\ -j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\varepsilon_0 n^2 E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\varepsilon_0 n^2 E_z \end{array} \right. \quad (2.26)$$

Considerando la guía de onda de la Figura 2.8 y las ecuaciones 2.25 y 2.26, se observa que los campos \vec{E} y \vec{H} no dependen del eje y . Por lo tanto, $\partial \vec{E}/\partial y = 0$ y $\partial \vec{H}/\partial y = 0$. Sustituyendo esta propiedad en las ecuaciones 2.25 y 2.26, se forman dos modos electromagnéticos independientes, los modos TE y TM. El modo TE cumple la siguiente ecuación de onda (Okamoto, 2006):

$$\frac{d^2 E_y}{dx^2} + (k^2 n^2 - \beta^2) E_y = 0 \quad (2.27a)$$

donde

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} E_y \quad (2.27b)$$

$$H_z = \frac{j}{\omega\mu_0} \frac{dE_y}{dx} \quad (2.27c)$$

$$E_x = E_z = H_y = 0 \quad (2.27d)$$

La ecuación 2.27a se obtiene directamente de la ecuación 2.22, considerando que, para un modo TE, las componentes E_y y H_z son predominantes y las ecuaciones 2.27b y 2.27c de 2.25. Las componentes E_y y H_z deben ser continuas en las interfaces $n_1|n_o$ y

$n_1|n_s$, de acuerdo a lo visto en la sección 2.3.5. De la ecuación 2.27d, la componente del campo eléctrico en el eje z es cero ($E_z = 0$). Debido a que el campo eléctrico se propaga en el plano perpendicular al eje z (dirección de propagación), la distribución de campo electromagnético es llamada **modo transversal eléctrico (TE)** (Okamoto, 2006).

Por otro lado, el modo TM satisface la ecuación de onda 2.28a, obtenida de 2.23, donde la componente del campo magnético en el eje z es cero ($H_z = 0$). Las ecuaciones 2.28b y 2.28c se obtienen de 2.26. Por ende, debido a que el campo magnético se propaga en el plano que es perpendicular al eje z (dirección de propagación), la distribución de campo electromagnético es llamada **modo transversal magnético (TM)** (Okamoto, 2006).

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{n^2} \frac{dH_y}{dx} \right) + \left(k^2 - \frac{\beta^2}{n^2} \right) H_y = 0 \quad (2.28a)$$

donde

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \epsilon_0 n^2} H_y \quad (2.28b)$$

$$E_z = -\frac{j}{\omega \epsilon_0 n^2} \frac{dH_y}{dx} \quad (2.28c)$$

$$E_y = H_x = H_z = 0 \quad (2.28d)$$

Los modos son ondas electromagnéticas que se propagan y conservan su forma durante todo el trayecto, manteniendo su polarización y la distribución del campo (Saleh & Teich, 2019). En la Figura 2.9 podemos apreciar los modos TE y TM en una guía de onda dieléctrica plana. Se observa que el campo eléctrico es paralelo a la superficie para el modo TE y que el campo eléctrico es perpendicular a la superficie para el modo TM.

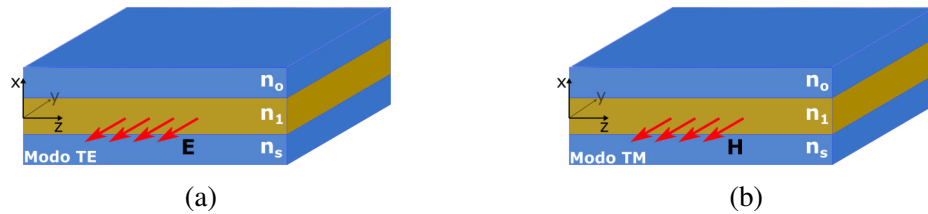


Figura 2.9: Modos (a) TE y (b) TM en una guía de onda dieléctrica plana. Fuente: Elaboración propia.

Un valor importante en el estudio de los modos en una guía de onda dieléctrica es el **índice de refracción efectivo**, n_{eff} , que es la relación entre la constante de propa-

gación β y el número de onda k y que cumple la relación (Okamoto, 2006)

$$n_o < n_s \leq \frac{\beta}{k} = n_{eff} \leq n_1 \quad (2.29)$$

El n_{eff} es un valor sin dimensiones y representa el índice de refracción para la onda plana. Esta relación nos será útil al momento de realizar simulaciones, ya que cada modo que encontremos tendrá un n_{eff} y si este cumple con la relación 2.29 sabremos si el modo encontrado se propaga.

Ecuaciones de dispersión para modos TE

Las constantes de propagación y los campos electromagnéticos de los modos TE y TM se obtienen resolviendo las ecuaciones 2.27 y 2.28. Para este análisis se seguirá considerando una guía de onda dieléctrica plana, Figura 2.8, teniendo en cuenta que $n_1 > n_s > n_o$, y que los campos electromagnéticos guiados se confinan en el núcleo de la guía de onda, medio n_1 , con un decaimiento exponencial en los recubrimientos, medios n_s y n_o . Para un modo TE, la distribución de campo eléctrico se expresa como (Okamoto, 2006)

$$E_y = \begin{cases} A \cos(\kappa a - \phi) e^{-\sigma(x-a)} & (x > a) \\ A \cos(\kappa x - \phi) & (-a \leq x \leq a) \\ A \cos(\kappa a + \phi) e^{\xi(x+a)} & (x < -a), \end{cases} \quad (2.30)$$

donde κ , σ y ξ son números de onda en el eje x en el núcleo y los recubrimientos son dados por

$$\begin{cases} \kappa = \sqrt{k^2 n_1^2 - \beta^2} \\ \sigma = \sqrt{\beta^2 - k^2 n_o^2} \\ \xi = \sqrt{\beta^2 - k^2 n_s^2}. \end{cases} \quad (2.31)$$

Considerando la Sección 2.3.5, las componentes E_y y H_z , para un modo TE, son continuas en las fronteras $n_1|n_o$ ($x = +a$) y $n_1|n_s$ ($x = -a$). La relación entre E_y y H_z es dada por la ecuación 2.27c. Sin considerar los términos independientes de x , $H_z \propto dE_y/dx$ se expresa como (Okamoto, 2006):

$$\frac{dE_y}{dx} = \begin{cases} -\sigma A \cos(\kappa a - \phi) e^{-\sigma(x-a)} & (x > a) \\ -\kappa A \sin(\kappa x - \phi) & (-a \leq x \leq a) \\ \xi A \cos(\kappa a + \phi) e^{\xi(x+a)} & (x < -a). \end{cases} \quad (2.32)$$

Debido a que dE_y/dx es continua en $x = \pm a$, se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \kappa A \sin(\kappa a + \phi) &= \xi A \cos(\kappa a + \phi) \\ \sigma A \cos(\kappa a - \phi) &= \kappa A \sin(\kappa a - \phi). \end{aligned} \quad (2.33)$$

Eliminando la constante A , obtenemos

$$\tan(u + \phi) = \frac{w}{u} \quad (2.34a)$$

$$\tan(u - \phi) = \frac{w'}{u} \quad (2.34b)$$

donde

$$\begin{aligned} u &= \kappa a \\ w &= \xi a \\ w' &= \sigma a. \end{aligned} \quad (2.35)$$

De 2.34, se obtienen las ecuaciones:

$$\begin{aligned} u &= \frac{m\pi}{2} + \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{w}{u}\right) + \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{w'}{u}\right) \quad (m = 0, 1, \dots) \\ \phi &= \frac{m\pi}{2} + \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{w}{u}\right) - \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{w'}{u}\right) \quad (m = 0, 1, \dots) \end{aligned} \quad (2.36)$$

Los números de onda transversales normalizados u , w y w' son dependientes. Usando la ecuación 2.31 y 2.35 se relacionan como (Okamoto, 2006):

$$u^2 + w^2 = k^2 a^2 (n_1^2 - n_s^2) = v^2 \quad (2.37)$$

$$w' = \sqrt{\gamma v^2 + w^2} \quad (2.38)$$

$$\gamma = \frac{n_s^2 - n_0^2}{n_1^2 - n_s^2} \quad (2.39)$$

donde v se denomina frecuencia normalizada y γ es una medida de asimetría de los índices de refracción del recubrimiento.

2.3.7 Modelado de guías de onda dieléctricas rectangulares

En esta sección se analizará, de manera general, como es el modelado de guías de onda dieléctricas rectangulares, también llamada *strip*, o de geometrías más complejas. Se tendrá en consideración el análisis realizado en la sección 2.3.6, donde se mostró como la guía de onda dieléctrica plana confina la luz solo en una dirección. Las guías de onda rectangulares, por otro lado, confinan la luz en dos direcciones, eje x y eje y .

Primero, segmentaremos la sección transversal de una guía de onda dieléctrica, tal como se muestra en la Figura 2.10a, con el fin de hacerla discreta y obtener poder trabajarla en bloques. Una geometría típica de una guía de onda es mostrada en la Figura 2.10b, donde n_5 representa al sustrato de la guía de onda, formando una simetría horizontal. Pero, partiendo de lo estudiado en la sección 2.3.6, esta geometría aún es difícil de estudiar. Una manera de poder hacer más fácil este problema es usando el

método de Marcatili, donde se ignora las regiones de las esquinas, ver Figura 2.10c, y además, se debe asumir que $n_1 = n_4$, formando así, dos guías de onda dieléctricas planas superpuestas, una vertical y una horizontal. Asumiendo estas dos condiciones, es posible aplicar el análisis realizado en la sección 2.3.6, pero lo hace un método muy restrictivo.

El método más común en el estudio de guías de onda dieléctricas es el método de índice efectivo. Tomando como ejemplo nuevamente la geometría mostrada en la Figura 2.10b, este método consiste en dividir la geometría en una formación de tres guías de onda dieléctricas planas, dos verticales y una horizontal. El proceso de división es mostrado en la Figura 2.10d y consiste, primero, en buscar el índice de refracción efectivo, $n_{eff,1}$, del modo que se propaga en la guía de onda dieléctrica plana con materiales n_1 , n_3 y n_5 , luego encontrar el $n_{eff,2}$ del modo que se propaga en la guía de onda dieléctrica plana con materiales n_2 , n_4 y n_5 . Finalmente, con los índices efectivos encontrados, se construye una tercera guía de onda horizontal con tres secciones, $n_{eff,1}|n_{eff,2}|n_{eff,1}$. Este método brinda resultados útiles y precisos, y es extremadamente intuitivo y útil cuando se piensa en guías de onda reales, además que no es imperativo una igualdad entre n_1, n_2, \dots y/o n_5 .

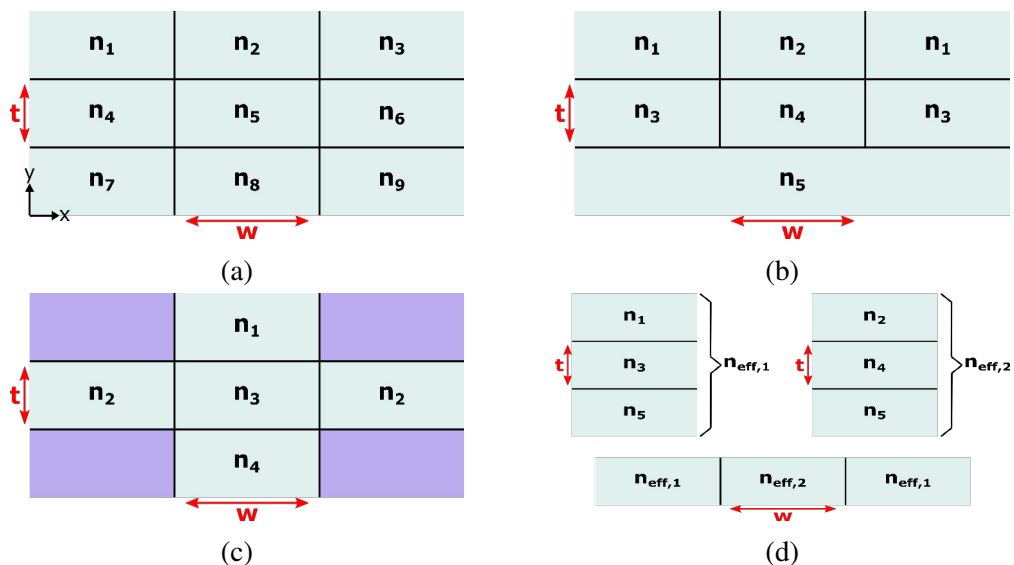


Figura 2.10: Modelado de guías de onda dieléctricas rectangulares. Fuente: Elaboración propia.

2.3.8 Guía de onda dieléctrica rectangular

En esta sección estudiaremos, con más detalle, la propagación de ondas en una guía de onda dieléctrica rectangular usando el método analítico de Marcatili (Okamoto, 2006). La sección transversal de una guía de onda dieléctrica rectangular se muestra en la Figura 2.11, donde el núcleo tiene un índice de refracción n_1 , el recubrimiento n_0 y $n_1 > n_0$. Para el uso del método de Marcatili, se asume que el campo electromagnético

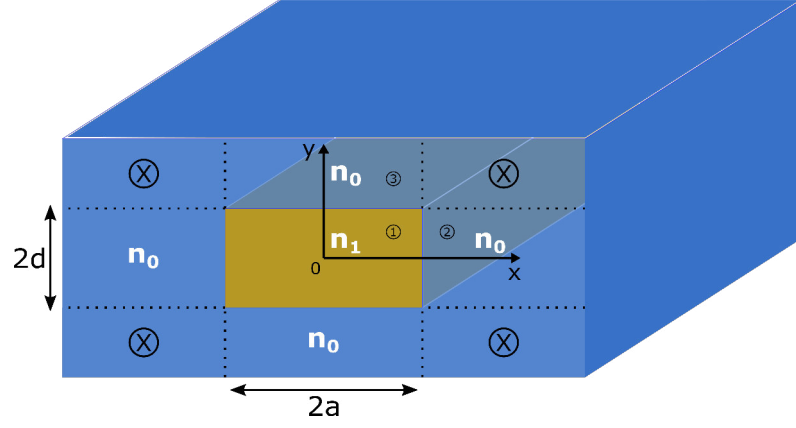


Figura 2.11: Guía de onda dieléctrica rectangular, $n_1 > n_0$. Fuente: Elaboración propia.

del modo que se propaga en el núcleo decae rápidamente en el recubrimiento, por lo tanto, las cuatro regiones marcadas con una “X” no serán consideradas en el estudio. El primer análisis que haremos será considerando un modo electromagnético, donde las componentes E_x y H_y son las predominantes. De acuerdo al método de Marcattili, $H_x = 0$ en las ecuaciones 2.25 y 2.26 (Okamoto, 2006). Por tanto, la ecuación de onda de este primer modo, derivada de la ecuación 2.23, y las demás componentes, derivadas de las ecuaciones 2.25 y 2.26, tienen la forma de

$$\frac{d^2 H_y}{dx^2} + \frac{d^2 H_y}{dy^2} + (k^2 n^2 - \beta^2) H_y = 0. \quad (2.40)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} H_x = 0 \\ E_x = \frac{\omega \mu_0}{\beta} H_y + \frac{1}{\omega \epsilon_0 n^2 \beta} \frac{d^2 H_y}{dx^2} \\ E_y = \frac{1}{\omega \epsilon_0 n^2 \beta} \frac{d^2 H_y}{dx dy} \\ E_z = \frac{-j}{\omega \epsilon_0 n^2} \frac{d H_y}{dx} \\ H_z = \frac{-j}{\beta} \frac{d H_y}{dy}. \end{array} \right. \quad (2.41)$$

Para el siguiente modo que estudiaremos, $H_y = 0$ en las ecuaciones 2.25 y 2.26 y los campos E_y y H_x son los predominantes. Por tanto, la ecuación de onda de este segundo modo y las demás componentes tienen la forma de (Okamoto, 2006)

$$\frac{d^2 H_x}{dx^2} + \frac{d^2 H_x}{dy^2} + (k^2 n^2 - \beta^2) H_x = 0 \quad (2.42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} H_y = 0 \\ E_x = -\frac{1}{\omega\varepsilon_0 n^2 \beta} \frac{d^2 H_x}{dx dy} \\ E_y = -\frac{\omega\mu_0}{\beta} H_x - \frac{1}{\omega\varepsilon_0 n^2 \beta} \frac{d^2 H_x}{dy^2} \\ E_z = \frac{j}{\omega\varepsilon_0 n^2} \frac{dH_x}{dy} \\ H_z = \frac{-j}{\beta} \frac{dH_x}{dx} \end{array} \right. \quad (2.43)$$

Debido a que E_x y H_y son los campos predominantes, el modo descrito en las ecuaciones 2.40 y 2.41 es expresado como E_{pq}^x , donde p y q son enteros. En cambio, el modo descrito en las ecuaciones 2.42 y 2.43 es expresado como E_{pq}^y , ya que E_y y H_x son los campos predominantes (Okamoto, 2006).

Ecuaciones de dispersión para modos E_{pq}^x y E_{pq}^y

En esta sección estudiaremos las ecuaciones de dispersión de los modos E_{pq}^x y E_{pq}^y . Tomando aun como referencia la Figura 2.11, observamos una simetría en los ejes x y y , por tanto, estudiaremos las regiones 1, 2 y 3. Empezando con el modo E_{pq}^x , expresamos el campo H_y , tal que cumpla con la ecuación de onda 2.40, como (Okamoto, 2006)

$$H_y = \begin{cases} A \cos(k_x x - \phi) \cos(k_y y - \psi) & \text{región 1} \\ A \cos(k_x a - \phi) e^{-\gamma_x(x-a)} \cos(k_y y - \psi) & \text{región 2} \\ A \cos(k_x x - \phi) e^{-\gamma_y(y-d)} \cos(k_y d - \psi) & \text{región 3} \end{cases} \quad (2.44)$$

donde k_x , k_y , γ_x y γ_y son llamados números de onda transversales, y cumplen con la ecuación 2.45. Las fases ópticas del modo se representan con ϕ y ψ en la ecuación 2.46.

$$\begin{cases} -k_x^2 - k_y^2 + k^2 n_1^2 - \beta^2 = 0 & \text{región 1} \\ \gamma_x^2 - k_y^2 + k^2 n_0^2 - \beta^2 = 0 & \text{región 2} \\ -k_x^2 + \gamma_y^2 + k^2 n_0^2 - \beta^2 = 0 & \text{región 3} \end{cases} \quad (2.45)$$

$$\begin{cases} \phi = (p-1) \frac{\pi}{2} & (p = 1, 2, \dots) \\ \psi = (q-1) \frac{\pi}{2} & (q = 1, 2, \dots) \end{cases} \quad (2.46)$$

Los modos más bajos para guías de onda rectangulares son los modos $E_{p=1,q=1}^x$ o $E_{p=1,q=1}^y$. De acuerdo al estudio de las condiciones de frontera, el campo eléctrico $E_z \propto (1/n^2) \partial H_y / \partial x$ debe ser continuo en $x = a$ y el campo magnético $H_z \propto \partial H_y / \partial y$ debe ser continuo en $y = d$, obteniendo las siguientes ecuaciones de dispersión (Okamoto,

2006):

$$k_x a = (p - 1) \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{n_1^2 \gamma_x}{n_0^2 k_x} \right) \quad (2.47a)$$

$$k_y d = (q - 1) \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_y}{k_y} \right) \quad (2.47b)$$

Los números de onda transversales de la ecuación 2.45 pueden relacionarse de una manera distinta:

$$\gamma_x^2 = k^2 (n_1^2 - n_0^2) - k_x^2, \quad (2.48)$$

$$\gamma_y^2 = k^2 (n_1^2 - n_0^2) - k_y^2. \quad (2.49)$$

el número de onda k_x se obtiene de las ecuaciones 2.47a y 2.48, y el número de onda k_y se obtiene de las ecuaciones 2.47b y 2.49. Con los valores de k_x y k_y podemos obtener el valor de la constante de propagación β

$$\beta^2 = k^2 n_1^2 - (k_x^2 + k_y^2). \quad (2.50)$$

Por otro lado, en el caso de la ecuación de dispersión del modo $E_{p,q}^y$, el campo magnético H_x se expresa como (Okamoto, 2006)

$$H_x = \begin{cases} A \cos(k_x x - \phi) \cos(k_y y - \psi) & \text{región 1} \\ A \cos(k_x a - \phi) e^{-\gamma_x(x-a)} \cos(k_y y - \psi) & \text{región 2} \\ A \cos(k_x x - \phi) e^{-\gamma_y(y-d)} \cos(k_y d - \psi) & \text{región 3} \end{cases} \quad (2.51)$$

Aplicando las condiciones de frontera, $H_z \propto \partial H_x / \partial x$ continua en $x = a$ y $E_z \propto (1/n^2) \partial H_x / \partial y$ continua en $y = d$, se obtienen las ecuaciones de dispersión para el modo $E_{p,q}^y$:

$$k_x a = (p - 1) \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_x}{k_x} \right) \quad (2.52a)$$

$$k_y d = (q - 1) \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{n_1^2 \gamma_y}{n_0^2 k_y} \right) \quad (2.52b)$$

2.3.9 Método de índice efectivo

En esta sección estudiaremos el método de índice efectivo para estudiar guías de ondas con estructuras más complejas, como la mostrada en la Figura 2.12, esta es una guía de onda tipo *ridge*, la cual es difícil de estudiar con el método analítico de Marcattili, estudiado en la sección 2.3.8. El estudio de guías de ondas complejas, como la de tipo *ridge*, también puede ser hecho mediante métodos numéricos como el método

de elementos finitos o el método de diferencia finita. En los siguientes párrafos estudiaremos el comportamiento del modo E_{pq}^x en la guía de onda mostrada en la Figura 2.12.

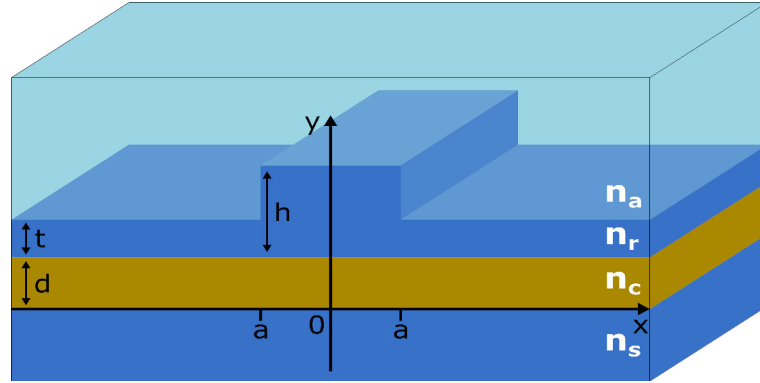


Figura 2.12: Sección transversal de una guía de onda dieléctrica tipo *ridge*. n_a representa el índice de refracción del recubrimiento, n_c al núcleo, n_r a la sección *rib* y n_s al sustrato. Fuente: Elaboración propia.

Como punto de partida, usaremos la ecuación de onda 2.53, presentada previamente en la ecuación 2.40, del modo E_{pq}^x :

$$\frac{d^2 H_y}{dx^2} + \frac{d^2 H_y}{dy^2} + [k^2 n^2(x, y) - \beta^2] H_y = 0 \quad (2.53)$$

Al usar el método de índice efectivo, se asume que el campo electromagnético puede ser expresado mediante la separación de dos variables (Okamoto, 2006), tal como lo muestra la ecuación 2.54.

$$H_y(x, y) = X(x)Y(y) \quad (2.54)$$

Sustituyendo la ecuación 2.54 en 2.53 y dividiendo entre XY , obtenemos:

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + [k^2 n^2(x, y) - \beta^2] = 0 \quad (2.55)$$

Luego, a la ecuación 2.55, añadimos la expresión, independiente de y , $k^2 n_{eff}^2(x)$ y la separamos en dos ecuaciones independientes:

$$\frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + [k^2 n^2(x, y) - k^2 n_{eff}^2(x)] = 0 \quad (2.56a)$$

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + [k^2 n_{eff}^2(x) - \beta^2] = 0 \quad (2.56b)$$

El término $n_{eff}(x)$ representa la distribución del índice efectivo (Okamoto, 2006). De las ecuaciones 2.56 se puede obtener el valor de $n_{eff}(x)$, sabiendo que la variación de los índices de refracción, $n_{(x,y)}$, de la geometría estudiada se muestra en la Figura

2.13a, donde $n_r = n_s$. El valor de s representa la altura de la sección *rib* de la guía de onda, n_r :

$$s = \begin{cases} h & 0 \leq |x| \leq a \\ t & |x| > a \end{cases} \quad (2.57)$$

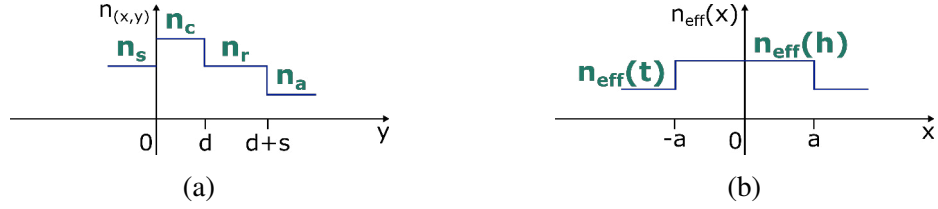


Figura 2.13: (a) Variación del índice de refracción en una guía de onda dieléctrica tipo *ridge*. (b) Distribución del índice de refracción efectivo $n_{eff}(x)$. Fuente: Elaboración propia.

Debido a que $H_z \propto \partial H_y / \partial y$ es continuo, debido a las condiciones de frontera, en $y = 0, d$ y $d + s$, genera una condición de continuidad para $\partial Y / \partial y$. Las ecuaciones de dispersión para la guía de onda plana de cuatro secciones de la Figura 2.13a tiene la forma de (Okamoto, 2006):

$$\text{sen}(\kappa d - 2\phi) = \text{sen}(\kappa d) e^{-2(\sigma s + \psi)} \quad (2.58)$$

donde

$$\phi = \tan^{-1}(\sigma / \kappa) \quad (2.59a)$$

$$\psi = \tanh^{-1}(\sigma / \gamma) \quad (2.59b)$$

$$\kappa = k \sqrt{n_c^2 - n_{eff}^2} \quad (2.59c)$$

$$\sigma = k \sqrt{n_{eff}^2 - n_s^2} \quad (2.59d)$$

$$\gamma = k \sqrt{n_{eff}^2 - n_a^2} \quad (2.59e)$$

Ya que s presenta dos valores distintos (h y t), la ecuación 2.58 deberá aplicarse en ambos casos. La solución de la ecuación 2.58 con $s = h$ generará un índice de refracción efectivo $n_{eff}(h)$, para $0 \leq |x| \leq a$, y para el caso de $s = t$, un índice de refracción efectivo $n_{eff}(t)$, para $|x| > a$. Obteniendo así, la distribución del índice efectivo, mostrada en la Figura 2.13b. Luego, aplicando el análisis presentado en la Sección 2.3.6 y siguiendo el concepto del método de índice efectivo estudiado en la Sección 2.3.7, se analizará una nueva guía de onda plana, formada por $n_{eff}(t) | n_{eff}(h) | n_{eff}(t)$, dando solución a la ecuación 2.56b. Las condiciones de frontera indican que $E_z \propto (1/n^2) \partial H_y / \partial x$ es continuo en $x = \pm a$. Por lo tanto, $(1/n^2) X$ también es continuo en $x = \pm a$. Teniendo en cuenta estas dos condiciones de frontera,

la ecuación de dispersión se obtiene como (Okamoto, 2006):

$$u.\tan(u) = w.\frac{n_{eff}^2(h)}{n_{eff}^2(t)} \quad (2.60)$$

donde

$$u = ka\sqrt{n_{eff}^2(h) - \left(\frac{\beta}{k}\right)^2} \quad (2.61a)$$

$$w = ka\sqrt{\left(\frac{\beta}{k}\right)^2 - n_{eff}^2(t)} \quad (2.61b)$$

En el caso de los modos E_{pq}^y , las ecuaciones de dispersión son:

$$\text{sen}(\kappa d - 2\phi) = \text{sen}(\kappa d)e^{-2(\sigma s + \psi)} \quad (2.62)$$

$$u.\tan(u) = w \quad (2.63)$$

donde

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\sigma n_c^2}{\kappa n_s^2}\right) \quad (2.64)$$

$$\psi = \tanh^{-1}\left(\frac{\sigma n_a^2}{\gamma n_s^2}\right). \quad (2.65)$$

2.4 Definición de términos

Interferómetro de Mach-Zehnder: Dispositivo óptico capaz de generar interferencia de luz mediante el desfase de ondas electromagnéticas.

Guía de onda óptica: Dispositivo óptico pasivo capaz de lograr la propagación de ondas electromagnéticas.

Modo óptico: Puede ser transversal eléctrico (TE) o transversal magnético (TM). Representan ondas electromagnéticas que se propagan y conservan su forma durante todo el trayecto, manteniendo su polarización y la distribución del campo.

Índice de refracción efectivo: Representado como n_{eff} y es la relación entre la constante de propagación β y el número de onda k . Determina el índice de refracción que experimenta un modo óptico.

Campo evanescente: Representa el campo remanente del modo óptico formado alrededor de la guía de onda y tiene un decaimiento exponencial.

Silicio sobre aislante: Es una tecnología que consta de una oblea de silicio y permite la fabricación de dispositivos ópticos pasivos o activos.

Capítulo 3 HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

El diseño de un dispositivo óptico basado en el funcionamiento del interferómetro de Mach-Zehnder compuesto de guías de onda dieléctricas de silicio es capaz de detectar variaciones en el índice de refracción de sustancias o elementos ubicados en el entorno del dispositivo.

3.2 Variables

Variable independiente

Dimensiones del interferómetro de Mach-Zehnder.

Variable dependiente

Sensibilidad del interferómetro de Mach-Zehnder.

3.3 Operacionalización de las variables

Variables	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores
Dimensiones del interferómetro de Mach-Zehnder	Conocer si existe un modo óptico con las dimensiones del interferómetro elegidas.	Ancho de las guías de onda de silicio.	Evaluar si el n_{eff} del modo cumple con la relación 2.29
Sensibilidad del interferómetro de Mach-Zehnder	Cambio en la respuesta del interferómetro ante cambios en el índice de refracción del entorno.	Largo de las guías de onda de silicio.	Desfase entre ambos brazos del interferómetro.

Capítulo 4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área de estudio

El área de estudio de la presente investigación es la óptica en dispositivos integrados, teniendo al silicio como material dieléctrico que conforma las guías de onda del interferómetro.

4.2 Diseño de investigación

El diseño de este trabajo de investigación es de tipo experimental, pues se manipularon las dimensiones del interferómetro de Mach-Zehnder y de las guías de ondas de silicio que lo conforman, para luego medir la sensibilidad del dispositivo.

4.3 Población y muestra

Población

La población constituye los dispositivos ópticos capaces de crear interferencia de la luz. En la literatura resaltan múltiples opciones de dispositivos capaces de crear este efecto como el interferómetro de Michelson, el interferómetro de Fabry-Perot y el interferómetro de Mach-Zehnder, todos estos tienen configuraciones distintas pero logran crear el mismo efecto, la interferencia.

Muestra

En este trabajo nos enfocaremos en el interferómetro de Mach-Zehnder con aplicación en biosensores, ya que en la literatura se ha encontrado gran variedad de reportes mostrando la posibilidad de fabricarlo de silicio e integrarlo en un chip.

4.4 Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información

Procedimiento

Se detallará el procedimiento en base a cada objetivo específico planteado en este trabajo.

Para el estudio de dimensiones de las guías de onda se revisó, en la literatura, reportes de distintos anchos de guías de ondas fabricadas de silicio. Como parte de

las limitaciones de investigación, el espesor de las guías de onda se mantendrá en 220 *nm*. Conociendo el estado del arte, se pudo establecer un rango de anchos disponibles para ser usados en el interferómetro. Luego, usando el software *Lumerical MODE* estudiaremos las características principales de estas guías de onda, como que tipo es el modo fundamental de la guía de onda (TE o TM), las pérdidas y el índice de refracción efectivo.

Para poder analizar el comportamiento del interferómetro se hizo uso de los paquetes *MODE* e *Interconnect* del software *Lumerical*. Habiendo formado el interferómetro con las guías de onda previamente estudiadas, se extrajo la transmisión en la salida del dispositivo.

El parámetro de sensibilidad se extrajo de la variación en frecuencia de la transmisión del dispositivo ante el cambio de índice de refracción del recubrimiento de la guía de onda, mediante la ecuación 2.1.

Técnicas e instrumentos

Técnica	Instrumento
Simulación	Análisis modal de guías de onda. Medición de transmisión a la salida del interferómetro.

4.5 Análisis estadístico

Los datos obtenidos en este trabajo fueron realizados de manera no probabilística, debido a los datos precisos que proporciona el software *Lumerical Ansys*.

Capítulo 5 RESULTADOS

5.1 Estudio de dimensiones de guías de onda de silicio

En esta sección se detallará las dimensiones de los dispositivos propuestos y las características del modo que se propaga por las guías de onda. Una vista total del interferómetro propuesto es mostrada en la Figura 5.1, este consta de dos guías de onda rectangulares de silicio, un divisor y combinador de potencia de silicio. La guía de onda con un recubrimiento de SiO_2 será llamada “brazo referencia” del interferómetro, mientras que el “brazo sensor” tendrá una ventana que servirá para que el modo interactúe directamente con el medio o sustancia que se desea detectar.

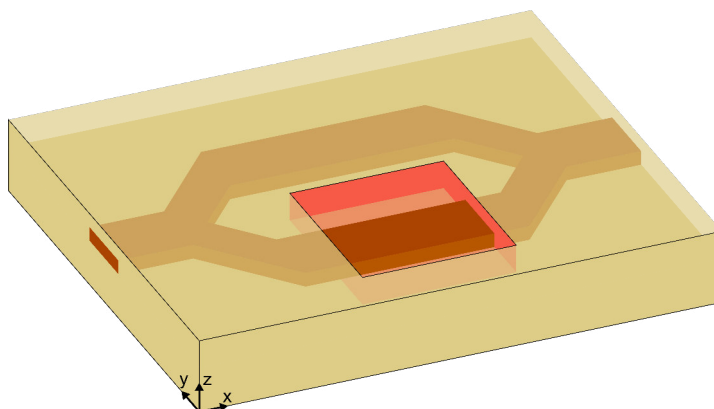


Figura 5.1: Diseño de interferómetro Mach-Zehnder propuesto con guías de onda dieléctricas rectangulares. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1 Diseño #1

Como primer diseño del interferómetro, se estudia el caso donde los brazos de referencia y sensor constan cada uno de una guía de onda rectangular. La vista transversal (plano yz) y longitudinal (plano xy) de este diseño se muestra en la Figura 5.2a y 5.2b, respectivamente. En este diseño se trabaja con un mismo ancho (w) y espesor (t) para los brazos del interferómetro, el brazo de referencia cuenta con un recubrimiento de SiO_2 de espesor δ y la ventana en el brazo sensor consta de un ancho w_{sens} y un largo L_{sens} .

El valor e importancia de L_{sens} será discutido en la sección 5.2. Los valores de los parámetros previamente mencionados y mostrados en las Figuras 5.2a y 5.2b son

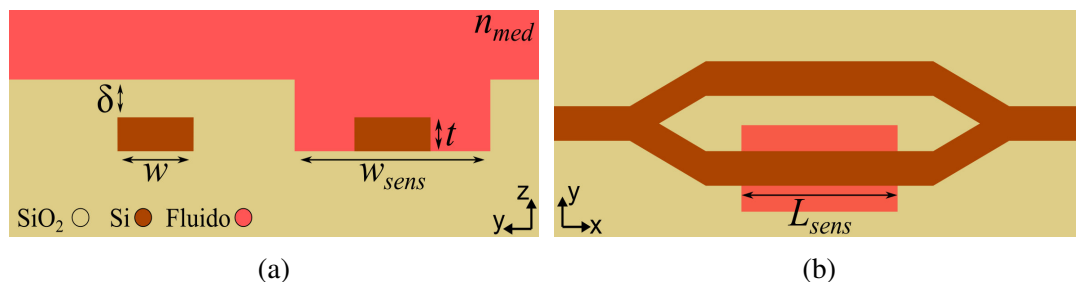


Figura 5.2: (a) Vista transversal y (b) vista longitudinal del interferómetro con guías de onda rectangulares. Fuente: Elaboración propia.

presentados en el Cuadro 5.1. El parámetro n_{med} mostrado en la Figura 5.2a representa el índice de refracción del fluido o sustancia que detectará el sensor, debido a que el presente trabajo no se enfocará en detectar una sustancia o elemento en particular, estudiaremos el comportamiento de este y de los siguientes diseños con tres valores de $n_{med} = 1,4, 1,399$ y $1,39$. La idea de estas variaciones es estudiar el comportamiento del interferómetro ante cambios pequeños de 10^{-3} y 10^{-2} del n_{med} .

Cuadro 5.1: Dimensiones del Diseño #1

Dimensión	Valor
w	320 nm
t	220 nm
δ	500 nm
w_{sens}	3000 nm

Fuente: Elaboración propia

La propuesta de una guía de onda de 320 nm de ancho, se sustenta debido a que en la literatura múltiples autores han logrado fabricar guías de onda de silicio con estas dimensiones (De Heyn y col., 2012; Spott y col., 2011; Xu y col., 2008), en muchos de estos trabajos, estas guías forman parte de dispositivos mas complejos, como de anillos resonadores.

Para conocer cuál es el modo que se propaga por estas guías de onda y cuál es su índice de refracción efectivo (n_{eff}), es necesario realizar un análisis modal, usando el software *Lumerical MODE*, en las guías de onda que conforman cada brazo del interferómetro. El rango, de longitudes de onda, de operación del dispositivo irá desde $1.3 \mu\text{m}$ hasta $1.6 \mu\text{m}$. Las Figuras 5.3 y 5.4 y los Cuadros 5.2 y 5.3 muestran el resultado del análisis modal realizado.

Los resultados del análisis modal muestran que el modo fundamental propagándose por ambas guías de onda de 320 nm de ancho y 220 nm de espesor es un modo TE, en el rango de $1.3 \mu\text{m}$ a $1.6 \mu\text{m}$. Debido a que el modo TE es el que se propaga, hay una mayor presencia de la componente y del campo eléctrico (E_y).

La intensidad del campo eléctrico ($|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$) normalizada, para 1.3

μm y $1.6 \mu m$, del brazo referencia y sensor se muestra en las Figuras 5.3a, 5.3b, 5.3c y 5.3d; estos resultados muestran que la mayor parte del campo eléctrico se propaga dentro del núcleo de silicio, pero se observa la existencia de un campo evanescente.

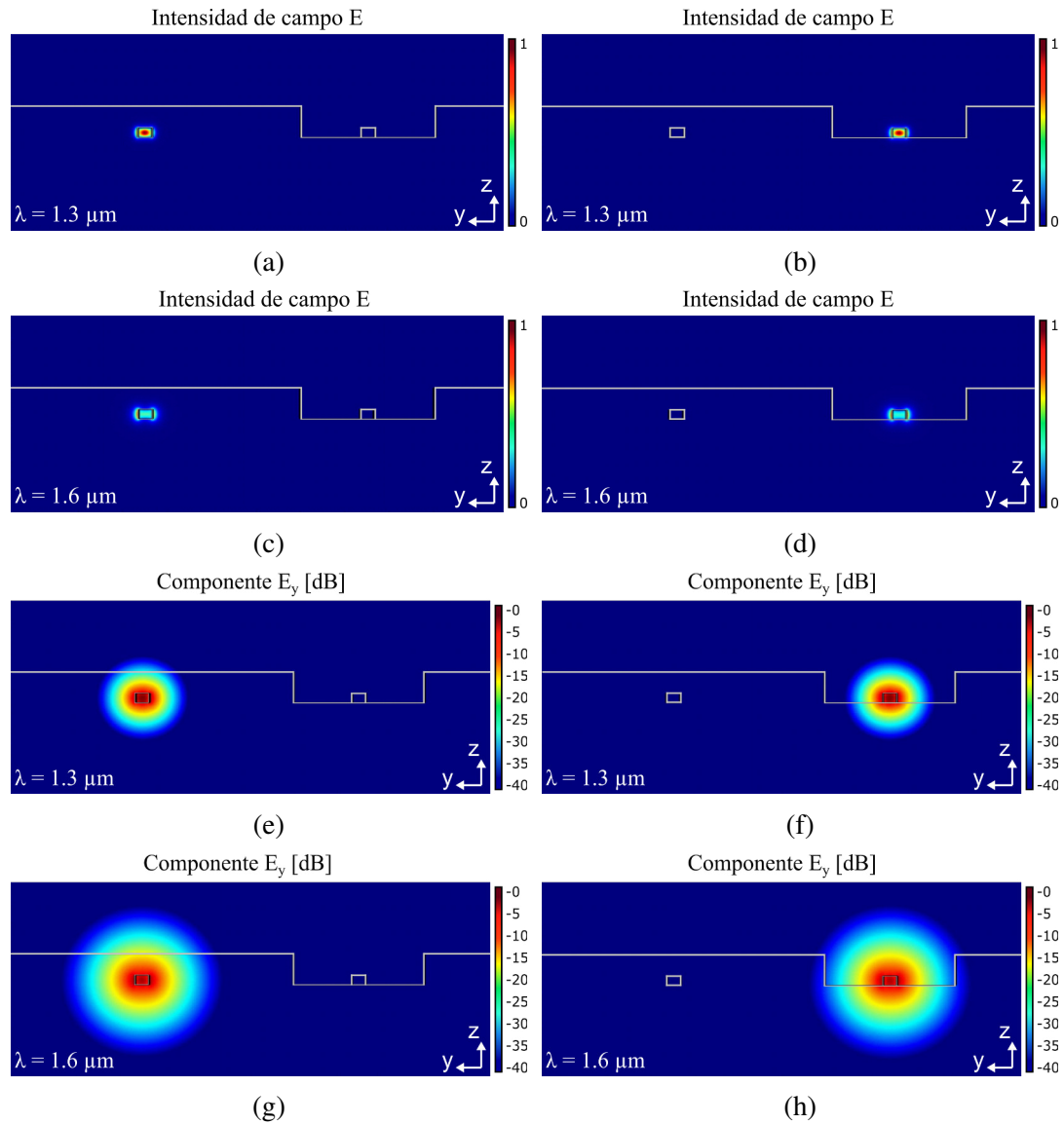


Figura 5.3: Intensidad del campo eléctrico ($|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$) en el brazo de referencia (a y c) y en el brazo sensor (b y d) del Diseño #1. Componente E_y , en dB, del modo TE en el brazo de referencia (e y g) y en el brazo sensor (f y h) del Diseño #1. Fuente: Elaboración propia.

Debido a que nuestro dispositivo utilizará el campo evanescente para detectar los cambios en el n_{med} , se muestra la componente E_y , en dB, del modo TE en las Figuras 5.3e, 5.3f, 5.3g y 5.3h. Estos gráficos muestran el campo evanescente del modo TE hasta un punto de caída de -40 dB, además se observa que gran parte del campo evanescente en el brazo de referencia se mantiene dentro del recubrimiento de espesor δ , por lo que hay menos interacción entre n_{med} y el núcleo del brazo de referencia. Por otro lado, en el brazo sensor se observa que hay una mayor interacción del campo

evanescente con n_{med} .

Sabiendo el tipo de modo que se propaga por las guías de onda, y que para cada modo existe un índice de refracción efectivo distinto, es necesario conocer si los n_{eff} de los modos encontrados cumplen con la relación 2.29, presentada en la Sección 2.3.6. Para esto, se presenta los Cuadros 5.2 y 5.3. Estos datos también forman parte del análisis modal realizado con el software *Lumerical MODE*.

El Cuadro 5.2 presenta los cambios en el índice efectivo del brazo sensor $n_{eff,S}$ en el rango de operación de $1.3 \mu m$ a $1.6 \mu m$ para los tres valores de n_{med} (1.4, 1.399 y 1.39). Los resultados muestran que los valores de $n_{eff,S}$ disminuyen a medida que aumenta la longitud de onda de operación, pero aun con esta disminución se sigue cumpliendo la relación 2.29. La forma en que se presentan los datos en el Cuadro 5.2 es con la intención de resaltar los pequeños cambios en $n_{eff,S}$ a medida que n_{med} disminuye.

Cuadro 5.2: Índices efectivos del brazo sensor del Diseño #1

$\lambda (\mu m)$	$n_{eff,S}$		
	$n_{med} = 1,4 (\Lambda)$	$n_{med} = 1,399$	$n_{med} = 1,39$
1.3	2,33485	$\Lambda - 0,00026$	$\Lambda - 0,00267$
1.375	2,19954	$\Lambda - 0,00034$	$\Lambda - 0,00343$
1.45	2,06645	$\Lambda - 0,00044$	$\Lambda - 0,00432$
1.525	1,93880	$\Lambda - 0,00053$	$\Lambda - 0,00527$
1.6	1,82125	$\Lambda - 0,00061$	$\Lambda - 0,00618$

Fuente: Elaboración propia

A diferencia de los cambios del índice efectivo del brazo sensor $n_{eff,S}$, los índices efectivos del brazo de referencia $n_{eff,R}$ deben mantenerse constantes frente a las variaciones de n_{med} . Estos datos se muestran en el Cuadro 5.3, donde se observa que en el rango de $1.3 \mu m$ a $1.6 \mu m$, el valor de $n_{eff,R}$ no cambia a medida que n_{med} disminuye. Estos valores siguen cumpliendo la relación 2.29.

Cuadro 5.3: Índices efectivos del brazo referencia del Diseño #1

$\lambda (\mu m)$	$n_{eff,R}$		
	$n_{med} = 1,4$	$n_{med} = 1,399$	$n_{med} = 1,39$
1.3	2,34722	2,34722	2,34722
1.375	2,21512	2,21512	2,21512
1.45	2,08566	2,08566	2,08566
1.525	1,96181	1,96181	1,96181
1.6	1,84769	1,84768	1,84768

Fuente: Elaboración propia

Tal como se mencionó en párrafos anteriores, el modo fundamental propagándose

por ambas guías de onda de 320 nm de ancho y 220 nm de espesor es un modo TE, esta afirmación se debe al valor de la polarización del modo que también es extraído del análisis modal en los brazos del interferómetro.

La polarización del modo se obtiene de la ecuación 5.1, cuyos valores oscilan de 0 a 1, dependiendo de la presencia de la componente E_y . Si este parámetro tiende a 1, significa que representa un modo TE, si tiende a 0 representa un modo TM.

$$\text{Polarización del modo} = \frac{\int |E_y|^2 dydz}{\int (|E_y|^2 + |E_z|^2) dydz} \quad (5.1)$$

Los valores de la polarización del modo del brazo sensor como el de referencia se presenta en la Figura 5.4, los datos muestran que, en ambos brazos, este valor es muy cercano a 1, aun cuando la longitud de onda es de $1.6 \mu\text{m}$.

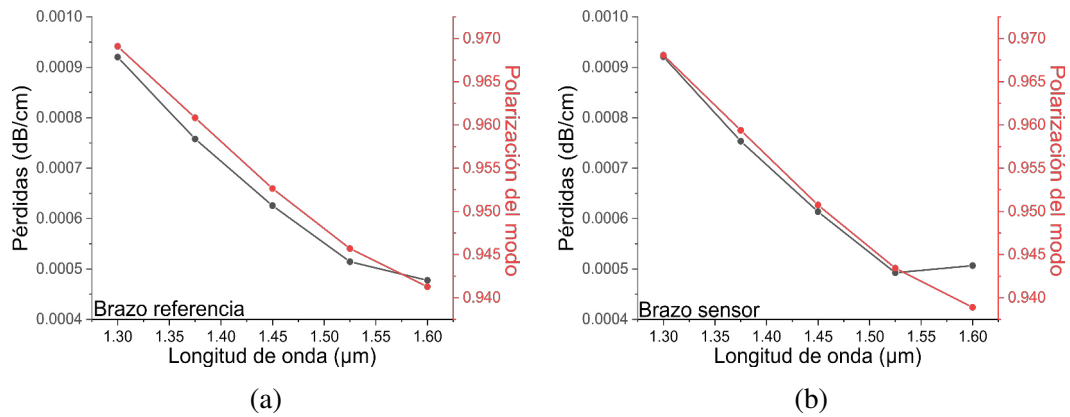


Figura 5.4: Pérdidas y polarización del modo en el brazo referencia (a) y en el brazo sensor (b) del Diseño #1. Fuente: Elaboración propia.

Las pérdidas que presentan estos modo se obtienen mediante la ecuación 5.2, siendo κ la parte imaginaria del índice de refracción, y son presentadas en la Figura 5.4. Los datos muestran que las pérdidas de los modos TE son mínimas, esto se debe a lo mencionado en la Sección 2.1.3, donde se resalta que el silicio y el dióxido de silicio son materiales transparentes en el rango de longitud de onda de $1.3 \mu\text{m}$ a $1.6 \mu\text{m}$.

$$\text{Pérdidas (dB/m)} = -20 \log_{10}(e^{-2\pi\kappa/\lambda_0}) \quad (5.2)$$

5.1.2 Diseño #2

Como segundo diseño del interferómetro, a igual que el Diseño #1, se estudia el caso donde los brazos de referencia y sensor constan cada uno de una guía de onda rectangular. La vistas transversal (plano yz) y longitudinal (plano xy) son las mismas del Diseño #1 y son mostradas en las Figuras 5.2a y 5.2b, respectivamente.

En este diseño se trabaja con un mismo ancho (w) y espesor (t) para los brazos del interferómetro, el brazo de referencia cuenta con un recubrimiento de SiO_2 de espesor δ y la ventana en el brazo sensor consta de un ancho w_{sens} y un largo L_{sens} . El valor e importancia de L_{sens} será discutido en la sección 5.2.

Los valores de los parámetros del Diseño #2 son presentados en el Cuadro 5.4. A igual que en el diseño anterior, estudiaremos el parámetro n_{med} para valores de 1,4, 1,399 y 1,39.

Cuadro 5.4: Dimensiones del Diseño #2

Dimensión	Valor
w	450 nm
t	220 nm
δ	500 nm
w_{sens}	3000 nm

Fuente: Elaboración propia

La propuesta de una guía de onda de 450 nm de ancho, se sustenta debido a que en la literatura múltiples autores han estudiado y logrado fabricar guías de onda de silicio con estas dimensiones (Ibrahim y col., 2012; Luo y col., 2014; Noriega & Hernandez-Figueroa, 2013), con aplicación en guías de onda segmentadas, circuitos WDM, guías de onda de rejilla, entre otras.

Para este diseño también se realiza un análisis modal, usando *Lumerical MODE*, en cada brazo del interferómetro en un rango de 1.3 μm a 1.6 μm de longitudes de onda. Las Figuras 5.5 y 5.6 y los Cuadros 5.5 y 5.6 muestran el resultado del análisis modal realizado.

La intensidad del campo eléctrico ($|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$) normalizada, para 1.3 μm y 1.6 μm , del brazo referencia y sensor se muestra en las Figuras 5.5a, 5.5b, 5.5c y 5.5d; estos resultados muestran que la mayor parte del campo eléctrico se propaga dentro del núcleo de silicio, pero se observa la existencia de un campo evanescente.

Debido a que nuestro dispositivo utilizará el campo evanescente para detectar los cambios en el n_{med} , se muestra la componente E_y , en dB, del modo TE en las Figuras 5.5e, 5.5f, 5.5g y 5.5h. Estos gráficos muestran el campo evanescente del modo TE hasta un punto de caída de -40 dB, además se observa que gran parte del campo evanescente en el brazo de referencia se mantiene dentro del recubrimiento de espesor

δ , por lo que hay menos interacción entre n_{med} y el núcleo del brazo de referencia. Por otro lado, en el brazo sensor se observa que hay una mayor interacción del campo evanescente con n_{med} .

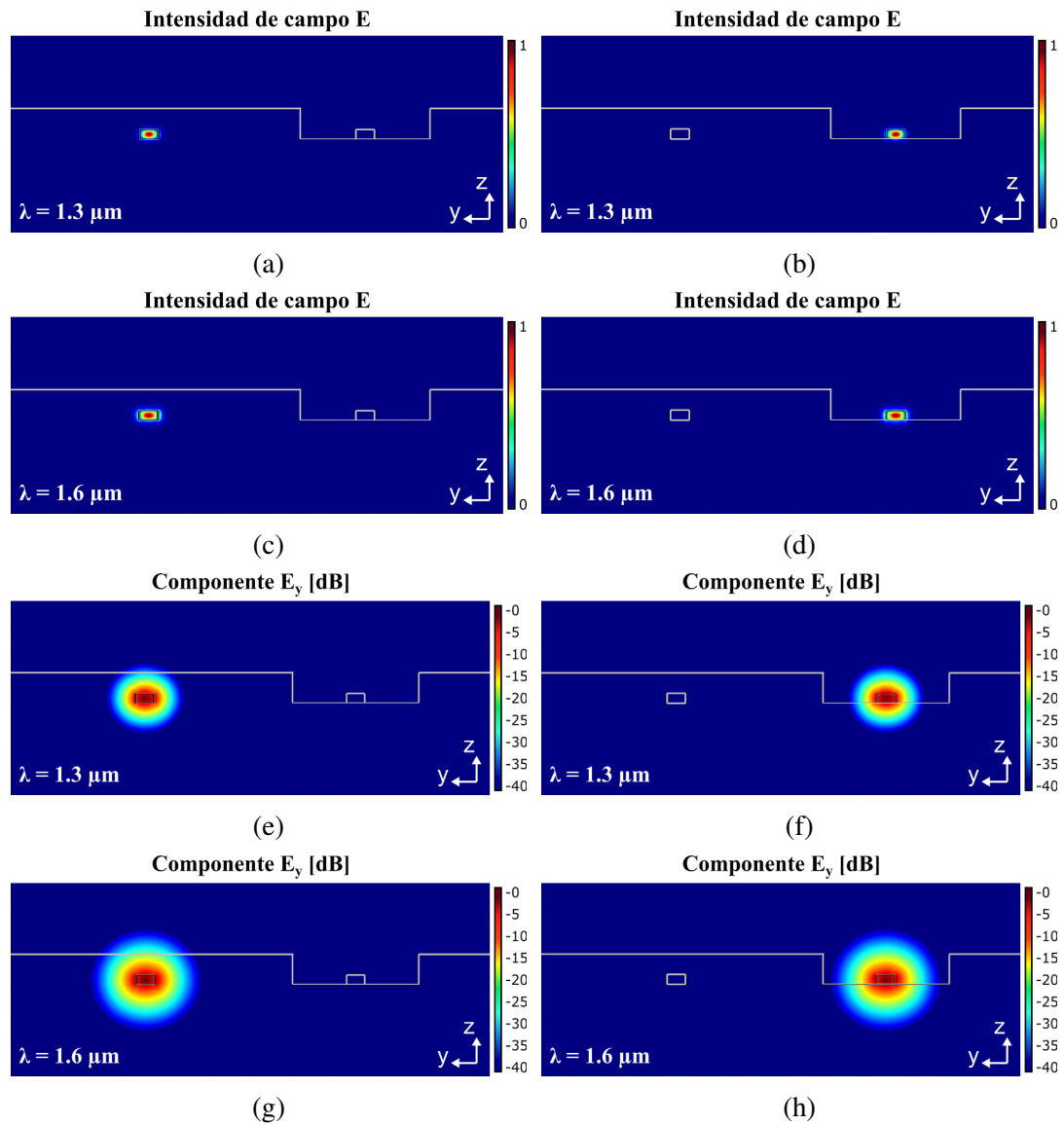


Figura 5.5: Intensidad del campo eléctrico ($|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$) en el brazo de referencia (a y c) y en el brazo sensor (b y d) del Diseño #2. Componente E_y , en dB, del modo TE en el brazo de referencia (e y g) y en el brazo sensor (f y h) del Diseño #2. Fuente: Elaboración propia.

Sabiendo el tipo de modo que se propaga por las guías de onda, y que para cada modo existe un índice de refracción efectivo distinto, es necesario conocer si los n_{eff} de los modos encontrados cumplen con la relación 2.29, presentada en la Sección 2.3.6. Para esto, se presenta los Cuadros 5.5 y 5.6. Estos datos también forman parte del análisis modal realizado con el software *Lumerical MODE*.

El Cuadro 5.5 presenta los cambios en el índice efectivo del brazo sensor $n_{eff,S}$ en el rango de operación de $1.3 \mu\text{m}$ a $1.6 \mu\text{m}$ para los tres valores de n_{med} (1.4, 1.399

y 1.39). Los resultados muestran que los valores de $n_{eff,S}$ disminuyen a medida que aumenta la longitud de onda de operación, pero aun con esta disminución se sigue cumpliendo la relación 2.29. La forma en que se presentan los datos en el Cuadro 5.5 es con la intención de resaltar los pequeños cambios en $n_{eff,S}$ a medida que n_{med} disminuye.

Cuadro 5.5: Índices efectivos del brazo sensor del Diseño #2

λ (μm)	$n_{eff,S}$		
	$n_{med} = 1,4$ (Λ)	$n_{med} = 1,399$	$n_{med} = 1,39$
1.3	2,66218	$\Lambda - 0,00011$	$\Lambda - 0,00104$
1.375	2,56684	$\Lambda - 0,00013$	$\Lambda - 0,00128$
1.45	2,47155	$\Lambda - 0,00015$	$\Lambda - 0,00157$
1.525	2,37594	$\Lambda - 0,00019$	$\Lambda - 0,00193$
1.6	2,27998	$\Lambda - 0,00024$	$\Lambda - 0,00234$

Fuente: Elaboración propia

A diferencia de los cambios del índice efectivo del brazo sensor $n_{eff,S}$, los índices efectivos del brazo de referencia $n_{eff,R}$ deben mantenerse constantes frente a las variaciones de n_{med} . Estos datos se muestran en el Cuadro 5.6, donde se observa que en el rango de $1.3 \mu m$ a $1.6 \mu m$, el valor de $n_{eff,R}$ no cambia a medida que n_{med} disminuye. Estos valores siguen cumpliendo la relación 2.29.

Cuadro 5.6: Índices efectivos del brazo referencia del Diseño #2

λ (μm)	$n_{eff,R}$		
	$n_{med} = 1,4$	$n_{med} = 1,399$	$n_{med} = 1,39$
1.3	2,66701	2,66701	2,66701
1.375	2,57272	2,57272	2,57272
1.45	2,47865	2,47865	2,47865
1.525	2,38443	2,38443	2,38443
1.6	2,29006	2,29006	2,29006

Fuente: Elaboración propia

Los valores de la polarización del modo del brazo sensor como el de referencia se presenta en la Figura 5.6, los datos muestran que, en ambos brazos, el modo TE se propaga por ambas guías de onda, aun cuando la longitud de onda es de $1.6 \mu m$. Debido a que el modo TE es el que se propaga, hay una mayor presencia de la componente y del campo eléctrico (E_y). Las pérdidas son presentadas en la Figura 5.6. Los datos muestran que las pérdidas de los modos TE son mínimas, debido a que el silicio y el dióxido de silicio son materiales transparentes en el rango de longitud de onda de $1.3 \mu m$ a $1.6 \mu m$.

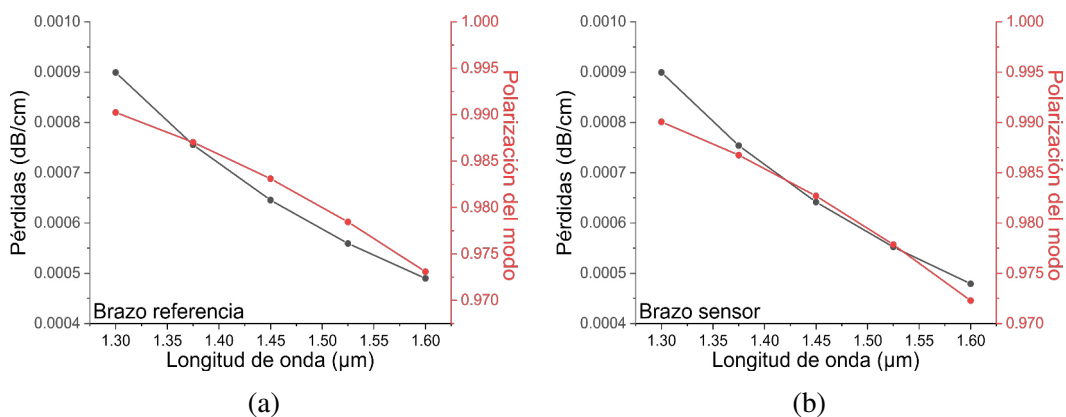


Figura 5.6: Pérdidas y polarización del modo en el brazo referencia (a) y en el brazo sensor (b) del Diseño #2. Fuente: Elaboración propia.

5.1.3 Diseño #3

En este diseño se presenta un nuevo tipo de guía de onda llamada guía de onda de ranura, o *slot*, esta guía solo formará parte del brazo sensor de interferómetro. La guía de onda de ranura consta de dos guías de onda rectangulares muy cercanas, tal que gran parte del campo eléctrico se concentra en medio de estas dos. La vistas transversal (plano yz) y longitudinal (plano xy) son mostradas en las Figuras 5.7a y 5.7b, respectivamente. El acoplamiento entre una guía de onda de ranura y una rectangular ha sido estudiado por múltiples autores, pero en este trabajo se propone el uso de la interfaz mostrada en la Figura 5.7c que fue estudiada por Passaro y La Notte (2012), la cual presenta pocas pérdidas y facilidad de fabricación.

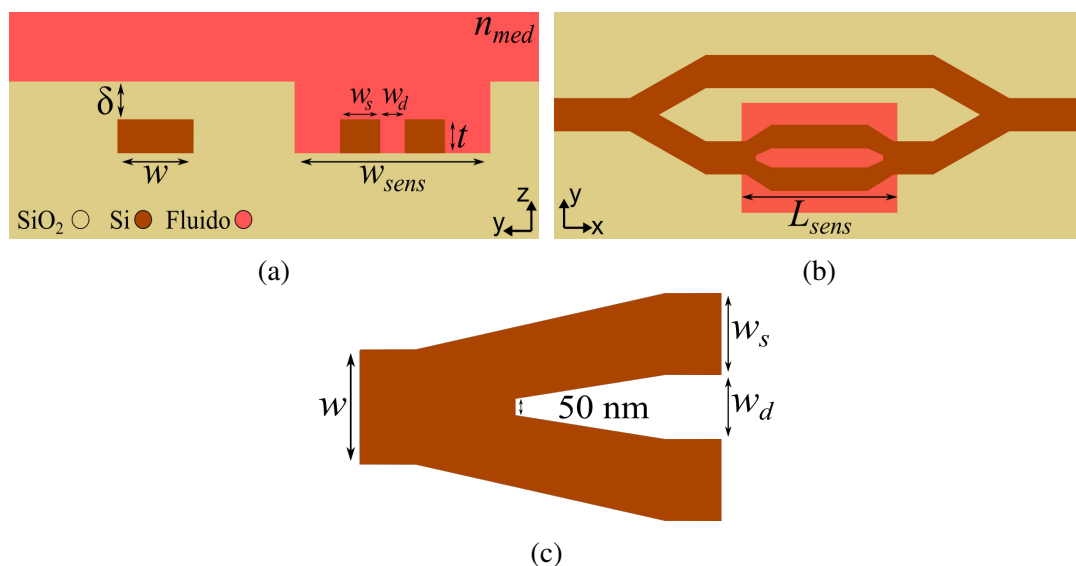


Figura 5.7: (a) Vista transversal y (b) vista longitudinal del interferómetro con guías de onda rectangulares. (c) Interfaz de guía de onda rectangular a una de ranura. Fuente: Elaboración propia.

En este diseño se trabaja con un ancho w y espesor t con un recubrimiento de SiO_2 de espesor δ para el brazo de referencia del interferómetro. La ventana en el brazo sensor consta de un ancho w_{sens} y un largo L_{sens} . Los valores de los parámetros del Diseño #3 son presentados en el Cuadro 5.7. A igual que en los diseños anteriores, estudiaremos el parámetro n_{med} para valores de 1,4, 1,399 y 1,39.

Cuadro 5.7: Dimensiones del Diseño #3

Dimensión	Valor
w	450 nm
w_s	230 nm
w_d	200 nm
t	220 nm
δ	500 nm
w_{sens}	5000 nm

Fuente: Elaboración propia

La propuesta de una guía de onda de ranura con guías rectangulares de 230 nm ancho separadas 200 nm se sustenta debido a que en la literatura se ha logrado fabricar estas guías de onda de silicio (Ding y col., 2010). Este tipo de guías de onda de ranura también han sido reportadas para aplicación en moduladores electro-ópticos (Ding y col., 2010; Ji y col., 2019; Steglich & You, 2018).

Para este diseño se realizará solo el análisis modal para la guía de onda de ranura en un rango de 1.3 μm a 1.6 μm de longitud de onda, usando *Lumerical MODE*, debido a que la guía de onda de referencia ya fue estudiada en el Diseño #2. Las Figuras 5.8 y 5.9 y el Cuadro 5.8 muestran el resultado del análisis modal realizado. La intensidad del campo eléctrico ($|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$) normalizada, para 1.3 μm y 1.6 μm , del brazo sensor se muestra en las Figuras 5.8a y 5.8b. Estos resultados muestran una poca presencia del campo eléctrico dentro las guías de onda rectangulares de ancho w_s , además de la presencia de campo evanescente rodeando estas guías. Con el fin de observar el campo evanescente de esta guía de onda, se muestra la componente E_y normalizada y en dB del modo TE en las Figuras 5.8c, 5.8d, 5.8e y 5.8f. Estos gráficos muestran con mayor detalle el campo evanescente del modo TE, la mayor parte del campo eléctrico se concentra en el espacio de ancho w_d de la guía de onda de ranura, a mayor la longitud de onda, mayor presencia del campo eléctrico en este espacio. La componente E_y en dB es con el fin de establecer un valor de w_{sens} suficiente para tener una mayor interacción entre el medio a medir (n_{med}) y el campo evanescente.

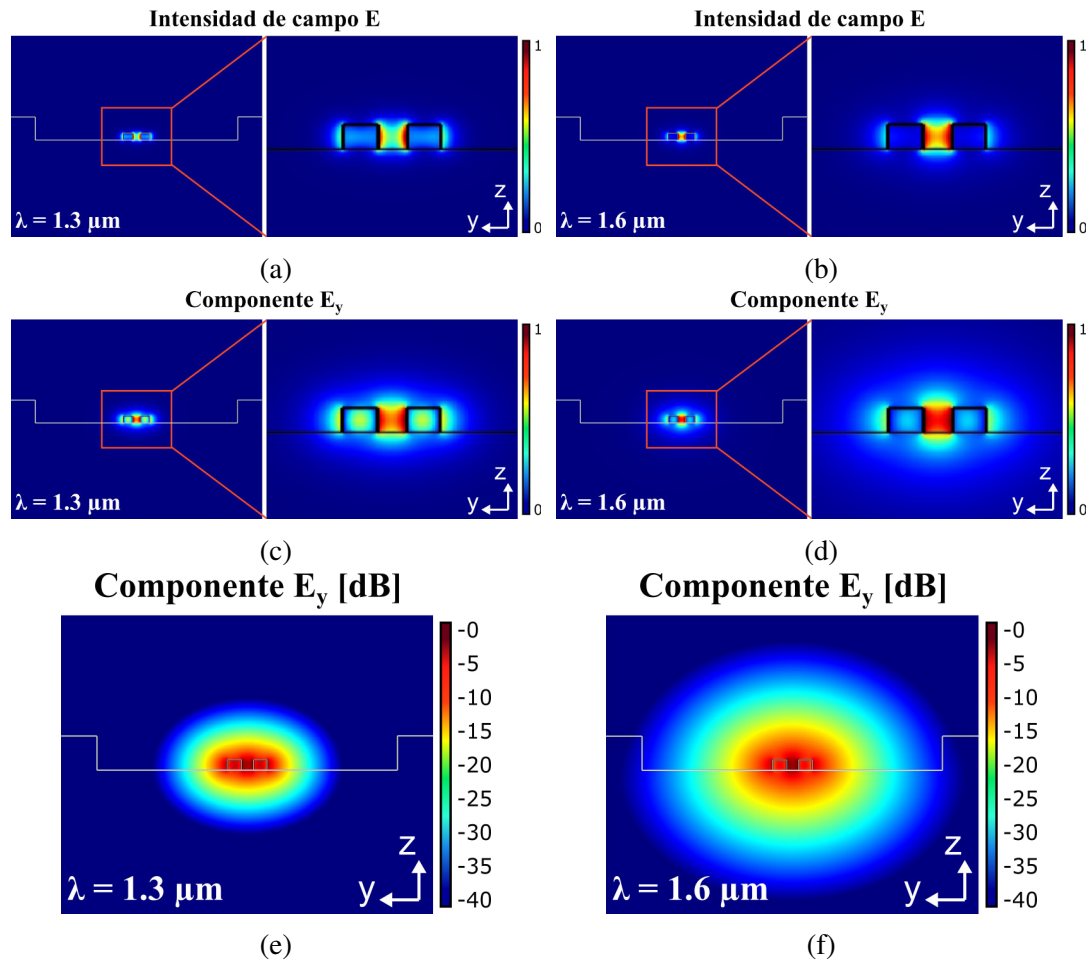


Figura 5.8: Intensidad del campo eléctrico ($|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$) en la guía de onda de ranura (a y b) del Diseño #3. Componente E_y del modo TE de la guía de onda de ranura (c y d) y componente E_y en dB (e y f) del Diseño #3. Fuente: Elaboración propia.

Los valores de la polarización del modo del brazo sensor se presenta en la Figura 5.9, los datos muestran que el modo TE se propaga por la guía de onda de ranura, aun cuando la longitud de onda es de $1.6 \mu\text{m}$. Debido a que el modo TE es el que se propaga, hay una mayor presencia de la componente y del campo eléctrico (E_y). Las pérdidas también son presentadas en la Figura 5.9. Los datos muestran que las pérdidas de los modos TE también se mantienen mínimas en el rango de longitud de onda de $1.3 \mu\text{m}$ a $1.6 \mu\text{m}$.

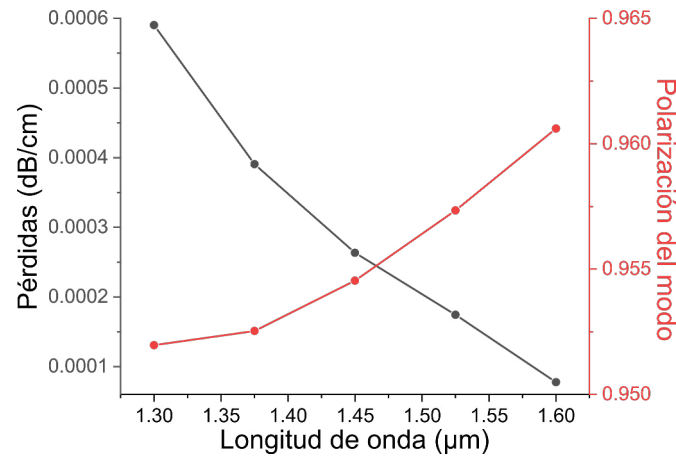


Figura 5.9: Diseño de interferómetro Mach-Zehnder propuesto con guías de onda dieléctricas rectangulares. Fuente: Elaboración propia.

Sabiendo el tipo de modo que se propaga por las guías de onda, y que para cada modo existe un índice de refracción efectivo distinto, es necesario conocer si los n_{eff} de los modos encontrados cumplen con la relación 2.29. Para esto, se presenta el Cuadro 5.8. El Cuadro 5.8 presenta los cambios en el índice efectivo del brazo sensor $n_{eff,S}$ en el rango de operación de $1.3 \mu\text{m}$ a $1.6 \mu\text{m}$ para los tres valores de n_{med} (1.4, 1.399 y 1.39).

Cuadro 5.8: Índices efectivos del brazo sensor del Diseño #3

$\lambda (\mu\text{m})$	$n_{eff,S}$		
	$n_{med} = 1,4 (\Lambda)$	$n_{med} = 1,399$	$n_{med} = 1,39$
1.3	1,89339	$\Lambda - 0,00071$	$\Lambda - 0,00713$
1.375	1,79001	$\Lambda - 0,00077$	$\Lambda - 0,00774$
1.45	1,71067	$\Lambda - 0,00080$	$\Lambda - 0,00798$
1.525	1,64969	$\Lambda - 0,00080$	$\Lambda - 0,00799$
1.6	1,60209	$\Lambda - 0,00078$	$\Lambda - 0,00784$

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del Cuadro 5.8 muestran que las variaciones de $n_{eff,S}$ siguen siendo del orden de 10^{-4} pero se mantienen casi constantes en ~ 0.00077 para $n_{med} = 1,399$ y ~ 0.00773 para $n_{med} = 1,39$, esto es contrario a lo encontrado en los dos diseños anteriores donde había un mayor cambio en $n_{eff,S}$ a medida que aumentaba la longitud de onda.

5.2 Análisis del comportamiento del interferómetro

En esta sección estudiaremos como es el comportamiento de todo el interferómetro usando las dimensiones reportadas en la Sección 5.1. Hasta el momento no se ha mencionado ni analizado la importancia de L_{sens} en los diseños propuestos, ya que el análisis modal es el estudio de solo la sección transversal de las guías de onda.

Los datos del análisis modal obtenidos en la Sección 5.1 mediante *Lumerical MODE* serán usados para analizar el comportamiento de todo el interferómetro. Para esto usaremos el software *Lumerical Interconnect*. Este software nos permite conocer la transmisión del modo TE a la salida del dispositivo.

La Figura 5.10 muestra como es la configuración que se usará para analizar la transmisión del modo TE, los resultados obtenidos mostrarán la transmisión a la salida del dispositivo. El uso del divisor y combinador de potencia en el interferómetro es con el fin de dividir y separar la luz en dos partes iguales, estos componentes pasivos no afectan a la fase de la onda, solo en la intensidad.



Figura 5.10: Configuración de puertos en el interferómetro para el estudio de transmisión del modo TE. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de esta Sección mostrarán los puntos de frecuencia donde existe mayor interferencia, es decir, puntos en frecuencia donde las dos ondas, que viajan por los brazos del interferómetro, se desfasan 180° , produciendo un valor cercano a cero en la transmisión (T). Con el fin de apreciar con mayor detalles estos puntos mínimos, los datos se presentarán en dB ($10 \log_{10}(T)$). A igual que en el análisis modal, se estudiará la transmisión para tres valores de $n_{med} = 1,4, 1,399$ y $1,39$.

5.2.1 Diseño #1

Tomando en cuenta las dimensiones del Diseño #1 cuyas guías de onda son de 320 nm de ancho y 220 nm de espesor, ver Cuadro 5.1, se hará un estudio del valor adecuado de L_{sens} , considerando que se desea tener un dispositivo compacto y altamente sensible. El valor de L_{sens} representa la longitud (eje x) de la ventana ubicada en el brazo sensor del interferómetro, ver Figura 5.2b. Para este análisis estudiamos distintos valores de L_{sens} con el fin de encontrar la mayor sensibilidad en el rango de longitud de onda de $1.3\ \mu\text{m}$ a $1.6\ \mu\text{m}$. La Figura 5.11 muestra la transmisión del modo TE para distintos valores de L_{sens} .

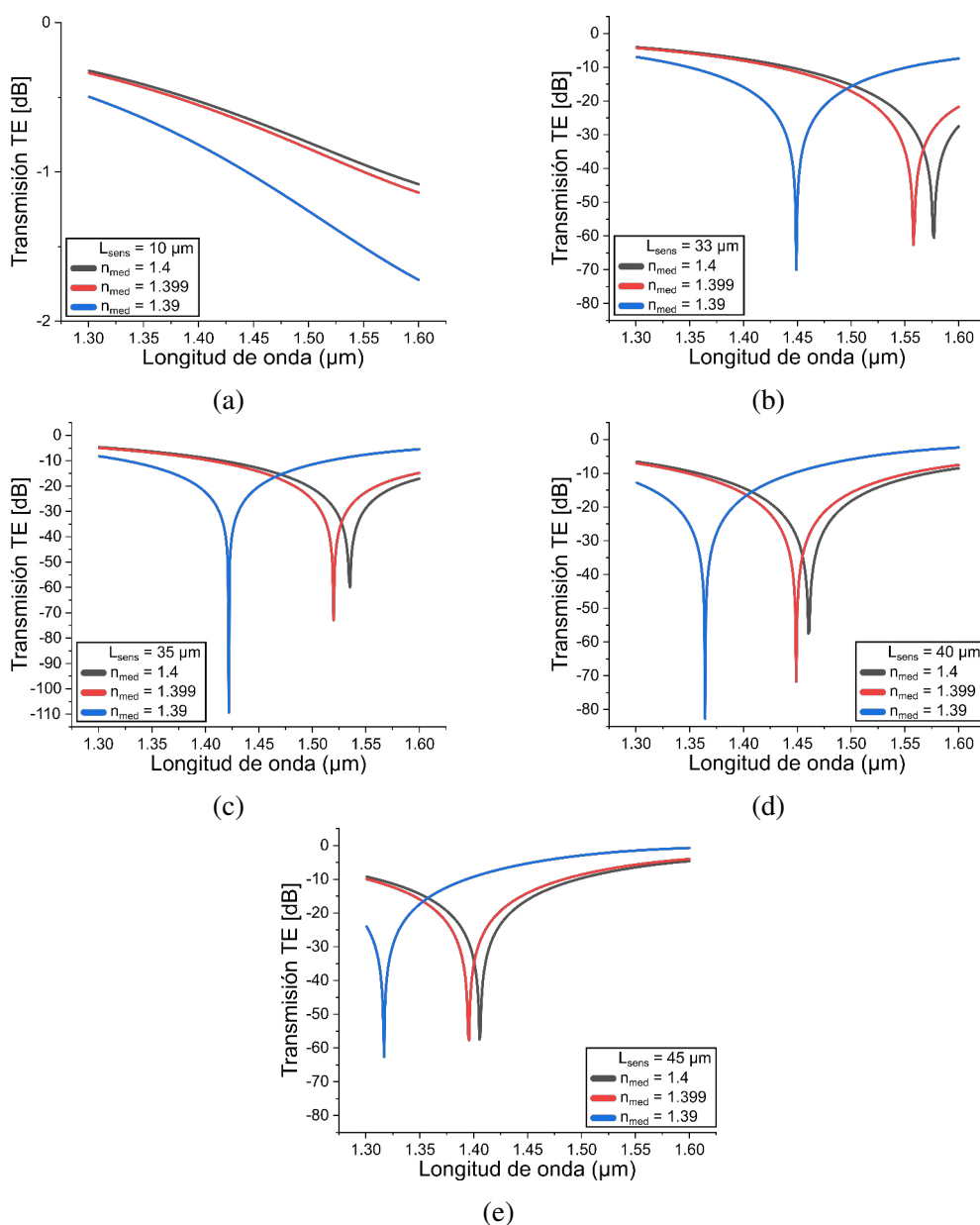


Figura 5.11: Transmisiones del modo TE, del interferómetro del Diseño #1 propuesto, para distintos valores de L_{sens} (a) $10\ \mu\text{m}$, (b) $33\ \mu\text{m}$, (c) $35\ \mu\text{m}$, (d) $40\ \mu\text{m}$ y (e) $45\ \mu\text{m}$. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.11a muestra la transmisión del modo TE para $L_{sens} = 10 \mu m$, los resultados muestran una tendencia decreciente pero no se evidencia un punto de transmisión mínima para ninguno de los valores de n_{med} , esto indica que una longitud de $10 \mu m$ no es suficiente para lograr un desfase de 180° entre los dos brazos del interferómetro, por tanto en el rango de longitudes de onda de 1.3 a $1.6 \mu m$ no es posible encontrar un punto de referencia para poder obtener la sensibilidad.

Las Figuras 5.11b, 5.11c, 5.11d y 5.11e muestran la transmisión del modo TE para valores de L_{sens} de $33 \mu m$, $35 \mu m$, $40 \mu m$ y $45 \mu m$, respectivamente. Estos datos muestran que el dispositivo estudiado tiene respuestas distintas ante las pequeñas variaciones de n_{med} , con estos valores de L_{sens} se observan puntos mínimos en la transmisión del modo TE, los cuales serán usados para la medición de la sensibilidad.

Con el fin de mostrar con mayor detalle los resultados y complementar la Figura 5.11, se presenta el Cuadro 5.9 para presentar numéricamente los puntos de longitud de onda donde se encuentran los valores mínimos de transmisión del Diseño #1. Cuando L_{sens} toma el valor de $10 \mu m$ no es posible obtener valores de referencia mínimos en la transmisión, por lo tanto no se puede obtener los cambios en $\Delta\lambda$ en el rango de longitudes de onda de 1.3 a $1.6 \mu m$. Para el caso de L_{sens} de 33 , 35 , 40 y $45 \mu m$, se obtienen variaciones en el desplazamiento de la transmisión mínima ($\Delta\lambda$) del orden de 10^{-3} y $10^{-2} \mu m$. Cuando L_{sens} toma el valor de $33 \mu m$, el desplazamiento de la transmisión mínima toma valores máximos de 0.01924 y $0.12808 \mu m$ para $\Delta n_{med} = 0,001$ y $\Delta n_{med} = 0,01$, respectivamente.

Cuadro 5.9: Valores de longitud de onda donde se encuentra valores mínimos en la transmisión del Diseño #1

$L_{sens} (\mu m)$	Longitud de onda $\lambda (\mu m)$			$\Delta\lambda (\mu m)$	
	n_{med}			Δn_{med}	
	1,4	1,399	1,39	0,001	0,01
10	-	-	-	-	-
33	1.57713	1.55789	1.44905	0.01924	0.12808
35	1.53522	1.51984	1.42188	0.01538	0.11334
40	1.46038	1.44905	1.36432	0.01133	0.09606
45	1.40541	1.39571	1.31694	0.00970	0.08847

Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Diseño #2

Tomando en cuenta las dimensiones del Diseño #2 cuyas guías de onda son de 450 nm de ancho y 220 nm de espesor, ver Cuadro 5.4, se hará un estudio del valor adecuado de L_{sens} , considerando que se desea tener un dispositivo compacto y altamente sensible. A igual que en el Diseño #1, el valor de L_{sens} representa la longitud (eje x) de la ventana ubicada en el brazo sensor del interferómetro, ver Figura 5.2b. Para este análisis estudiamos distintos valores de L_{sens} con el fin de encontrar la mayor sensibilidad en el rango de longitud de onda de $1.3\ \mu\text{m}$ a $1.6\ \mu\text{m}$. La Figura 5.12 muestra la transmisión del modo TE para distintos valores de L_{sens} .

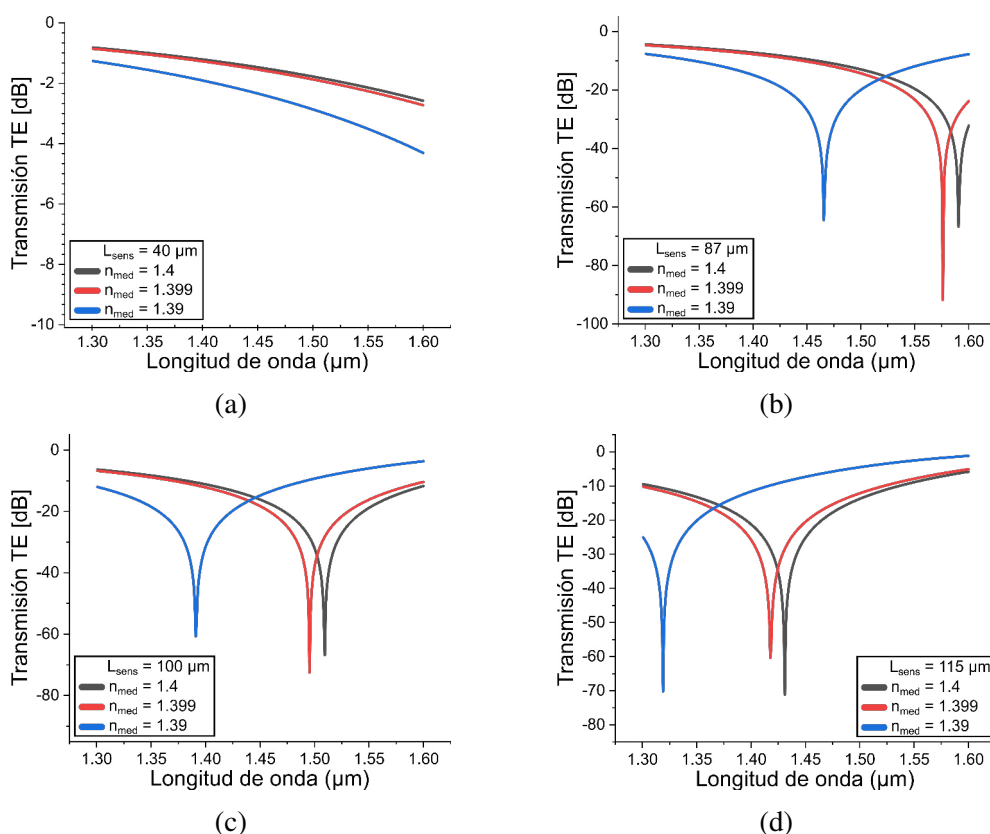


Figura 5.12: Transmisiones del modo TE, del interferómetro del Diseño #2 propuesto, para distintos valores de L_{sens} (a) $40\ \mu\text{m}$, (b) $87\ \mu\text{m}$, (c) $100\ \mu\text{m}$ y (d) $115\ \mu\text{m}$. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.12a muestra la transmisión del modo TE para $L_{sens} = 40\ \mu\text{m}$, los resultados muestran una tendencia decreciente pero no se evidencia un punto de transmisión mínima para ninguno de los valores de n_{med} , esto indica que una longitud de $40\ \mu\text{m}$ no es suficiente para lograr un desfase de 180° entre los dos brazos del interferómetro, por tanto en el rango de longitudes de onda de 1.3 a $1.6\ \mu\text{m}$ no es posible encontrar un punto de referencia para poder obtener la sensibilidad.

Las Figuras 5.12b, 5.12c y 5.12d muestran la transmisión del modo TE para valores de L_{sens} de $87\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$ y $115\ \mu\text{m}$, respectivamente. Estos datos muestran que el

dispositivo estudiado tiene respuestas distintas ante las pequeñas variaciones de n_{med} , con estos valores de L_{sens} se observan puntos mínimos en la transmisión del modo TE, los cuales serán usados para la medición de la sensibilidad.

Con el fin de mostrar con mayor detalle los resultados y complementar la Figura 5.12, se presenta el Cuadro 5.10 para presentar numéricamente los puntos de longitud de onda donde se encuentran los valores mínimos de transmisión del Diseño #2. Cuando L_{sens} toma el valor de $40 \mu m$ no es posible obtener valores de referencia mínimos en la transmisión, por lo tanto no se puede obtener los cambios en $\Delta\lambda$ en el rango de longitudes de onda de 1.3 a $1.6 \mu m$. Para el caso de L_{sens} de 87 , 100 y $115 \mu m$, se obtiene un desplazamiento promedio de la transmisión mínima de $0.01393 \mu m$ con un máximo de $0.01446 \mu m$ para $\Delta n_{med} = 0,001$ y un desplazamiento promedio de la transmisión mínima de $0.11847 \mu m$ con un máximo de $0.12488 \mu m$ para $\Delta n_{med} = 0,01$.

Cuadro 5.10: Valores de longitud de onda donde se encuentra valores mínimos en la transmisión del Diseño #2

$L_{sens} (\mu m)$	Longitud de onda $\lambda (\mu m)$			$\Delta\lambda (\mu m)$	
	n_{med}			Δn_{med}	
	1,4	1,399	1,39	0,001	0,01
40	-	-	-	-	-
87	1.59056	1.57610	1.46568	0.01446	0.12488
100	1.50944	1.49548	1.39091	0.01396	0.11853
115	1.43110	1.41772	1.31908	0.01338	0.11202

Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Diseño #3

En esta Sección se estudiará el comportamiento del interferómetro tomando en cuenta las dimensiones del Diseño #3, ver Cuadro 5.7, el cual presenta una guía de onda de ranura en el brazo sensor del interferómetro y una guía de onda rectangular en el brazo de referencia.

En esta sección se estudiará L_{sens} para valores de $20 \mu m$ y $40 \mu m$ que representarán la longitud (eje x) de la ventana ubicada en el brazo sensor del interferómetro, ver Figura 5.7b. La Figuras 5.13a y 5.13b muestran las transmisiones del modo TE para $L_{sens} = 20 \mu m$ y $L_{sens} = 40 \mu m$, respectivamente.

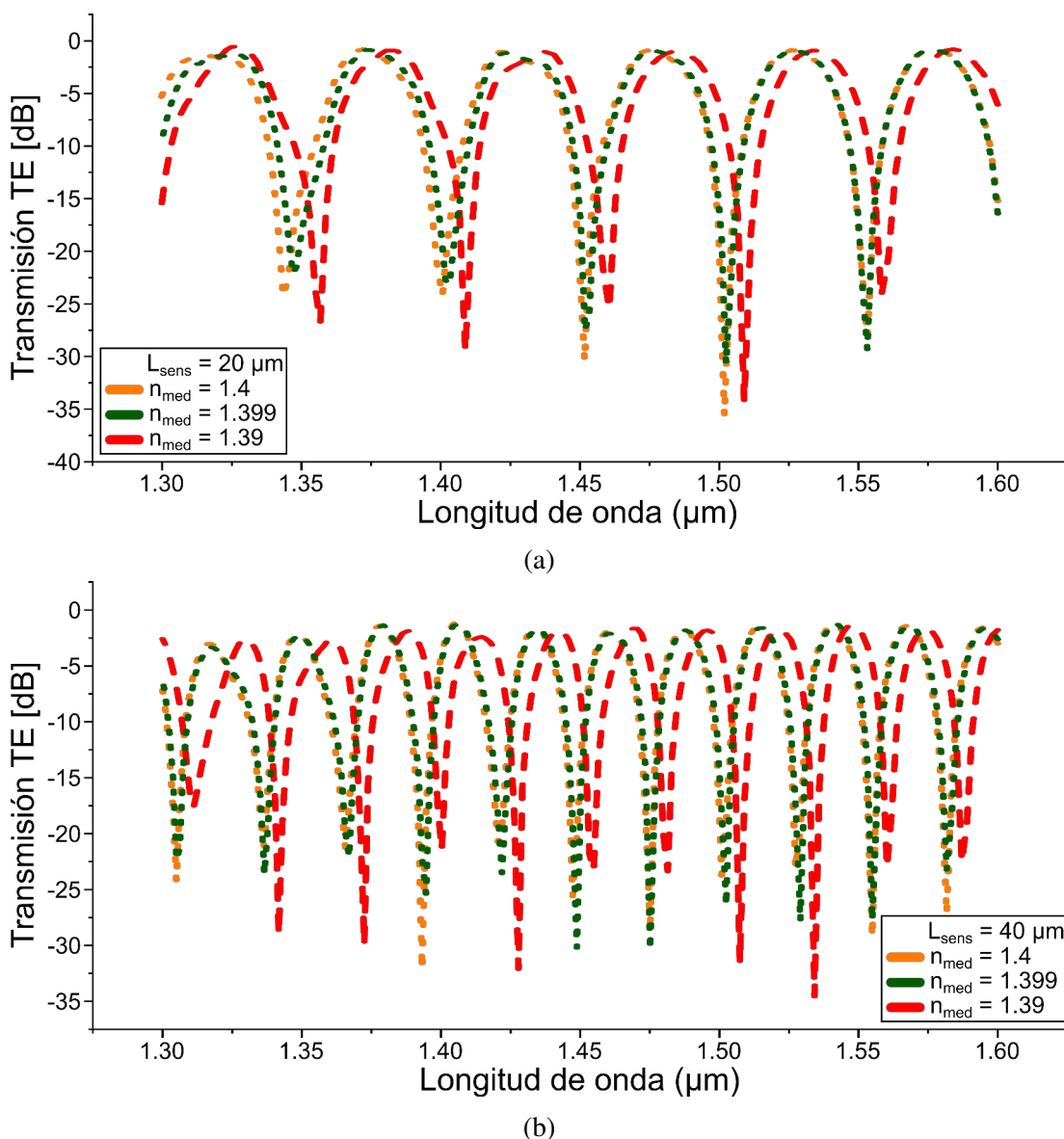


Figura 5.13: Transmisiones del modo TE, del interferómetro del Diseño #3 propuesto, para (a) $L_{sens} = 20 \mu m$ y (b) $L_{sens} = 40 \mu m$. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados para $L_{sens} = 20 \mu m$ muestran cinco puntos de transmisión mínima del modo TE en el rango de $1.3 \mu m$ a $1.6 \mu m$. En todos estos puntos, los dos brazos

del interferómetro tienen una diferencia de fase de 180° . A diferencia de los diseños anteriores, en este diseño no se observa cambios importantes en la transmisión del modo TE ante las variaciones de n_{med} y en algunos puntos la transmisión se mantiene constante cuando $\Delta n_{med} = 0,001$.

Con una longitud L_{sens} de $40 \mu m$ los resultados muestran una mayor presencia de puntos de diferencia de fase de 180° a diferencia de $L_{sens} = 20 \mu m$. Se observa once puntos de transmisión mínima del modo TE en el rango de $1.3 \mu m$ a $1.6 \mu m$. Para esta longitud tampoco se observa cambios importantes en la transmisión del modo TE cuando $\Delta n_{med} = 0,001$. A diferencia de los Diseños #1 y #2, en el Diseño #3 no se observa cambios importantes en la transmisión del modo TE ante las variaciones de n_{med} y en algunos puntos la transmisión no varía cuando $\Delta n_{med} = 0,001$.

Los puntos de longitud de onda (μm) donde ocurre transmisión mínima para L_{sens} de 20 y $40 \mu m$ son detallados en el Cuadro 5.11. Cuando L_{sens} tiene un valor de $20 \mu m$, la transmisión se desplaza un máximo de $0.0035 \mu m$ para $\Delta n_{med} = 0,001$ y un máximo de $0.01336 \mu m$ para $\Delta n_{med} = 0,01$. Cuando L_{sens} tiene un valor de $40 \mu m$ la transmisión tiene un desplazamiento máximo de $0.00169 \mu m$ para $\Delta n_{med} = 0,001$, y un desplazamiento promedio de $0.00642 \mu m$, con un valor máximo de $0.00763 \mu m$ para $\Delta n_{med} = 0,01$.

Cuadro 5.11: Valores de longitud de onda donde se encuentra valores mínimos en la transmisión del Diseño #3

$L_{sens} (\mu m)$	Longitud de onda $\lambda (\mu m)$			$\Delta \lambda (\mu m)$	
	n_{med}			Δn_{med}	
	1,4	1,399	1,39	0,001	0,01
20	1.55317	1.55317	1.55824	0	0.00507
	1.50189	1.50243	1.50900	0.00054	0.00711
	1.45167	1.45184	1.46055	0.00017	0.00888
	1.40059	1.40312	1.40885	0.00253	0.00826
	1.34346	1.34696	1.35682	0.00350	0.01336
40	1.58166	1.58166	1.58712	0	0.00546
	1.55492	1.55492	1.56020	0	0.00528
	1.52738	1.52907	1.53417	0.00169	0.00679
	1.50080	1.50243	1.50736	0.00163	0.00656
	1.47512	1.47512	1.48146	0	0.00634
	1.44727	1.44879	1.45490	0.00152	0.00763
	1.42045	1.42192	1.42780	0.00147	0.00735
	1.39320	1.39461	1.40027	0.00141	0.00707
	1.36562	1.36697	1.37241	0.00135	0.00679
	1.33652	1.33652	1.34172	0	0.00520
1.30492	1.30492	1.31112	0	0.00620	

Fuente: Elaboración propia

Para conocer como se propaga el campo eléctrico a lo largo de una guía de onda de

ranura junto con la interfaz de acoplamiento de esta con una guía de onda rectangular, se presenta la Figura 5.14, donde se observa como la mayor parte del campo eléctrico se concentra en la ranura (región de ancho w_d), especialmente para una longitud de onda de $1.6 \mu m$. Las Figuras 5.14a y 5.14b muestran la intensidad del campo eléctrico propagándose en el eje x para las longitudes de onda de $1,3 \mu m$ y $1,6 \mu m$ y las Figuras 5.14c y 5.14d mostrando la componente y del campo eléctrico (E_y) del modo TE propagándose por una guía de onda de ranura con las dimensiones mostradas en la Figura 5.7 y Cuadro 5.7.

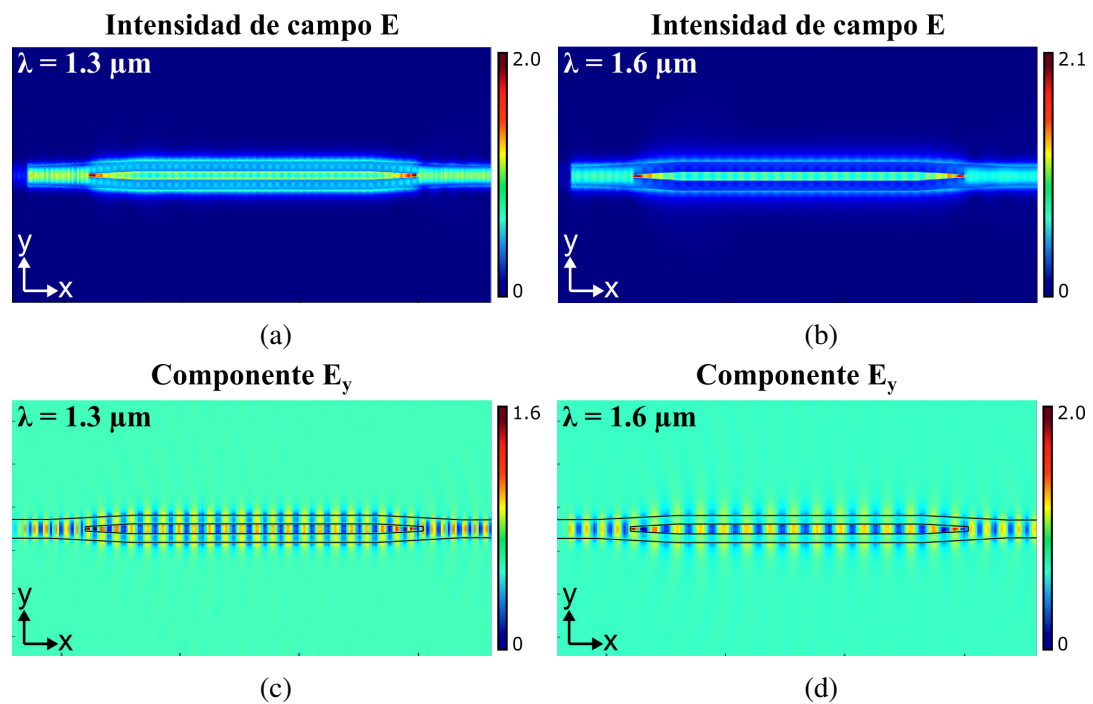


Figura 5.14: (a y b) Intensidad del campo eléctrico y (c y d) componente y del campo eléctrico (E_y) del modo TE propagándose por una guía de onda de ranura del Diseño #3. Fuente: Elaboración propia.

5.3 Determinación de parámetros de sensibilidad

Para determinar la sensibilidad de los dispositivos propuestos usaremos la información mostrada en los Cuadros 5.9-5.11 de la sección anterior, ya que determinaremos la sensibilidad tomando como referencia los puntos mínimos en la transmisión. Para encontrar la sensibilidad se usa la ecuación 2.1 ($Sensibilidad = \Delta\lambda/\Delta n_{med}$), presentada en la Sección 2.1.4.

Las unidades de las sensibilidades se expresan en $\mu m/RIU$ o nm/RIU , el significado de RIU viene del idioma inglés, *Refractive Index Unit*, y es usado en sensores ópticos para representar el cambio mínimo detectable en el índice de refracción. Por cada diseño propuesto se presentan dos sensibilidades, $S(\Delta n_{med} = 0,001)$ y $S(\Delta n_{med} = 0,01)$, que representan la respuesta del dispositivo ante variaciones de 0,001 y 0,01 de n_{med} , respectivamente.

Las sensibilidades de todos los diseños propuestos se muestran en el Cuadro 5.12. Los datos muestran que el Diseño #3 presenta las sensibilidades mas bajas de todos los diseños propuestos. En el caso de las sensibilidades con mayor valor encontradas, los resultados muestran que el Diseño #1 con $L_{sens} = 33 \mu m$ presenta las sensibilidades máximas, 19,24 y 12,808 para $\Delta n_{med} = 0,001$ y $\Delta n_{med} = 0,01$, respectivamente. Además se muestra que el valor de la sensibilidad $S(\Delta n_{med} = 0,001) = 19,24$ del Diseño #1 mejora un poco más de 11 veces con respecto a la sensibilidad del Diseño #3, además de necesitar $7 \mu m$ menos de longitud del brazo sensor. En el caso de la sensibilidad $S(\Delta n_{med} = 0,01) = 12,808$ del Diseño #1, mejora un poco más de 16 veces con respecto a la sensibilidad del Diseño #3.

Cuadro 5.12: Parámetros de sensibilidad de los diseños propuestos

Sensibilidad S ($\mu m/RIU$)			
Diseño	L_{sens} (μm)	$S(\Delta n_{med} = 0,001)$	$S(\Delta n_{med} = 0,01)$
Diseño #1	33	19.24	12.808
	35	15.38	11.334
	40	11.33	9.606
	45	9.7	4.347
Diseño #2	87	14.46	12.488
	100	13.96	11.853
	115	13.38	11.202
Diseño #3	20	3.5	1.336
	40	1.69	0.763

Fuente: Elaboración propia

Es importante comentar las sensibilidades encontradas en el Diseño #2. Los datos del Cuadro 5.12 muestran que para las tres longitudes del brazo sensor estudiadas,

las sensibilidades tienen un valor promedio a $13 \mu m/RIU$, pero con la desventaja que se requieren longitudes del dispositivo mayores a los $87 \mu m$. Las sensibilidades encontradas en el Diseño #1 son superiores en un 48 % a las del Diseño #2 y requieren 37 % menos longitud del brazo sensor del interferómetro. Es importante resaltar del Diseño #2 la poca variación de las sensibilidades, esto se debe a las dimensiones del núcleo, ya que este diseño presenta menos campo evanescente, por ende es menor la interacción entre el modo óptico y n_{med} .

Existen dos características importantes en el diseño de un sensor óptico integrado, el tamaño y la sensibilidad del dispositivo. Para poder comparar los diseños propuestos en este trabajo con los encontrados en la literatura, se muestra la Figura 5.15. Este gráfico expresa la sensibilidad ($\mu m/RIU$) en función de la longitud de la región activa del sensor (μm). Los diseños propuestos en este trabajo se encuentran en la región verde sombreada, ver Cuadro 5.15.

La propuesta de este trabajo se basa en guías de ondas de *silicio sobre aislante*. En los trabajos de la Figura 5.15, se usan materiales tales como: silicio (Si), nitruro de silicio (Si_3N_4) y Polímero, que son de fácil fabricación y ampliamente usados en la literatura para diversas aplicaciones en óptica integrada, pero debido a su contraste de índices de refracción y las dimensiones usadas, no se puede miniaturizar más manteniendo la sensibilidad alta.

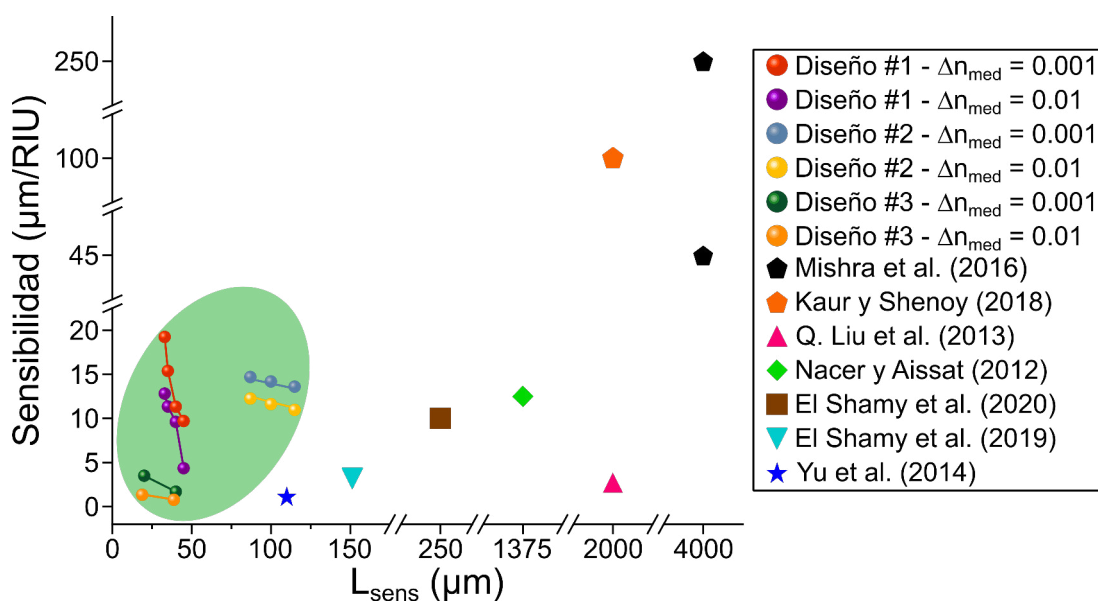


Figura 5.15: Gráfica de comparación de sensibilidades de los diseños propuestos (región verde) y sensibilidades encontradas en la literatura junto con sus respectivas longitudes activas del sensor. Fuente: Elaboración propia.

Los dispositivos de la Figura 5.15 que trabajan con guías de onda de silicio son el de Nacer y Aissat (2012) y El Shamy y col. (2019). El trabajo Nacer y Aissat (2012) consta de guías de onda de ranura de silicio que operan en el rango de longitud de onda

de 1550 y 1560 μm y requiere una longitud del dispositivo 40 veces mayor al propuesto en el Diseño #1 con una sensibilidad de 12 $\mu m/RIU$. El trabajo de El Shamy y col. (2019) es realizado con guías de onda rectangulares de silicio con 800 y 1100 nm de ancho y con sustrato de Zafiro (Al_2O_3), opera en el rango de longitud de onda de 4500 y 5500 μm , y requiere una longitud del dispositivo 4.5 veces mayor al propuesto en el Diseño #1 con una sensibilidad de 3.2 $\mu m/RIU$.

Entre los sensores ópticos de la Figura 5.15 que trabajan con materiales distintos al silicio se encuentra el de Mishra y col. (2016), donde se presenta un sensor basado en *Surface Plasmon Resonance* (SPR) con guías de onda fabricadas de polímero con sensibilidades superiores al doble de la sensibilidad máxima propuesta en el Diseño #1, pero con la desventaja de necesitar una longitud del dispositivo 120 veces más larga. Autores como Kaur y Shenoy (2018) proponen un dispositivo con sensibilidad mayor al triple de la sensibilidad máxima propuesta en el Diseño #1, usando *Grating couplers* de Si_3N_4 , pero requiere una longitud del dispositivo 60 veces más larga al propuesto. El diseño de Q. Liu y col. (2013) consta de guías de onda de ranura y *Grating couplers* de Si_3N_4 , requiere 60 veces más de longitud del dispositivo pero la sensibilidad es 7 veces menor a la sensibilidad máxima propuesta en el Diseño #1. Sensibilidades por debajo de la sensibilidad máxima propuesta en el Diseño #1 se presentan en El Shamy y col. (2020) y Yu y col. (2014), donde se proponen sensores con guías de onda plasmónico y fibras ópticas, respectivamente.

Capítulo 6 DISCUSIÓN

6.1 Estudio de dimensiones de guías de onda de silicio

Como parte del estudio de dimensiones de guías de onda de silicio se realizó el análisis modal de todas las guías de onda propuestas en los tres diseños, este análisis fue realizado mediante el software *Lumerical MODE* y nos muestra cuatro resultados importantes en el diseño de dispositivos ópticos: índice de refracción efectivo, polarización del modo, pérdidas y la distribución del campo evanescente. De acuerdo a lo que establece la teoría, se observa una mayor presencia del campo evanescente a medida que aumenta la longitud de onda. Una manera de explicar esto, es que al aumentar λ , el campo eléctrico del modo se hace mas grande, por lo que el campo tiene menos espacio para propagarse dentro del núcleo, es por ello que hay mas presencia de campo evanescente cuando el ancho de las guías de onda es de 320 nm en comparación con las de 450 nm .

En los dos primeros diseños se propuso el uso de dimensiones idénticas de las guías de onda que conforman los dos brazos del interferómetro, pero el brazo de referencia presentaba un recubrimiento de SiO_2 . El propósito de usar este recubrimiento es obtener una fase distinta en el brazo de referencia, de lo contrario no ocurriría la diferencia de fase y ambos brazos del interferómetro tendrían el mismo n_{eff} . Para el tercer diseño se optó también por el uso de un recubrimiento en el brazo de referencia debido a que en la literatura se reportó que aumenta la sensibilidad del sensor (Q. Liu y col., 2013).

Los datos obtenidos en los Cuadros 5.2, 5.5 y 5.8 muestran claramente que los cambios en el n_{eff} , del brazo sensor del interferómetro, varían en el orden de 10^{-4} , estos cambios son muy pequeños, es por eso que se usa longitudes del brazo (L_{sens}) del orden de las decenas de μm para poder generar la interferencia en la transmisión.

6.2 Análisis del comportamiento del interferómetro

Para el análisis del comportamiento del interferómetro se usaron los datos del análisis modal realizado en la Sección 5.1 y la configuración de los puertos de entrada y salida presentada en la Figura 5.10. Esta configuración de los puertos nos permite conocer la transmisión normalizada del modo TE a la salida del dispositivo, tomando como referencia el puerto de entrada. Los puntos donde ocurre una transmisión mínima en la salida del interferómetro (interferencia destructiva) se muestran en los Cuadros

5.9-5.11 y representan la respuesta del interferómetro ante distintos cambios de n_{med} y que, contrario a lo esperado, para valores mayores de L_{sens} no se obtiene necesariamente mayor cambio en $\Delta\lambda$. Los resultados muestran que los puntos mínimos de transmisión cercanos a $1.6 \mu m$ presentan un mayor valor de $\Delta\lambda$ ya que a medida que se incrementa el valor de λ , existe una mayor presencia de campo evanescente, por ende una mayor interacción entre el campo evanescente y n_{med} .

6.3 Determinación de parámetros de sensibilidad

Para determinar la sensibilidad de los dispositivos propuestos, se reemplazó los valores de $\Delta\lambda$, ver Cuadros 5.9-5.11, en la ecuación 2.1. Las sensibilidades de cada diseño fueron presentadas en el Cuadro 5.12 y representan la respuesta del interferómetro ante dos cambios de n_{med} . En aquellos diseños donde se presente mayores valores en $\Delta\lambda$ son aquellos que presentan mayor sensibilidad. El interferómetro con mayor sensibilidad encontrada pertenece al Diseño #1 con el brazo sensor con $33 \mu m$ de largo ($L_{sens} = 33 \mu m$).

El resumen de los resultados obtenidos se presenta gráficamente en la Figura 5.15, se observa claramente que nuestros diseños requieren una longitud 30 % menor para lograr una sensibilidad 17 veces mayor ante cambios en el índice de refracción de 10^{-3} y 10^{-2} .

Capítulo 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Se estudió tres propuestas en las dimensiones de las guías de onda de silicio que conforman el interferómetro de Mach-Zehnder, mediante la evaluación de las pérdidas del modo óptico, los índices de refracción efectivos, las polarizaciones del modo y la distribución del campo evanescente. Es importante concluir que existen ciertos límites al realizar propuestas de dispositivos ópticos, sobre todo a nivel de la fabricación de guías de onda de silicio, tal como se detalló en las limitaciones de la investigación. Es por ello que, nuestros diseños cuentan siempre con guías de onda de 220 nm de espesor y las propuestas del ancho en las guías de onda se basaron en trabajos previos realizados por otros autores que lograron fabricar las guías de silicio con estas dimensiones.

Se analizó el comportamiento de los tres diseños del interferómetro mediante simulación asistida por software, mediante el estudio de la transmisión del modo TE, en la salida del interferómetro, frente a cambios en el valor de n_{med} de 10^{-3} y 10^{-2} .

Se determinó los parámetros de sensibilidad de los dispositivos propuestos en un rango de funcionamiento de 1.3 a $1.6\ \mu\text{m}$ de longitud de onda, mediante los datos obtenidos de la transmisión del interferómetro ante cambios en n_{med} . Los resultados, comparados con otros diseños propuestos en la literatura, presentan una sensibilidad elevada y con menor longitud requerida para el funcionamiento como sensor.

Se concluye que de los tres diseños propuestos, el Diseño #1 con el brazo sensor con $33\ \mu\text{m}$ de largo presenta una sensibilidad de $19,24$ y $12,808$ para $\Delta n_{med} = 0,001$ y $\Delta n_{med} = 0,01$, respectivamente. Siendo esta superior con respecto a los otros dos diseños también propuestos en este trabajo.

7.2 Recomendaciones

Para trabajos futuros, se recomienda complementar el diseño propuesto del interferómetro con la línea de investigación de microfluídica, pues este trabajo también puede ser enfocado como sensor de fluidos pero se requiere un estudio detallado del comportamiento de este sobre la estructura del interferómetro, evaluando, por ejemplo, la viscosidad y la presión necesaria para ser medido correctamente.

Finalmente, se recomienda explorar nuevas aplicaciones en el campo de la óptica

integrada de silicio, ya que este material cuenta con propiedades no lineales o con procesos de fabricación especiales que dan paso a nuevos dispositivos como moduladores electro-ópticos o *frequency combs* que se pueden aplicar a técnicas de transmisión como WDM o en la interconexión de centros de datos.

Bibliografía

- Abimael, J.-P., Heredia, A., Roberto, C. A.-L., Moreno, M. & Martinez, C. (2011). Fabrication of a MZI device based on waveguides of SiN for biological detection. *2011 International Semiconductor Device Research Symposium (ISDRS)*, 1-2.
- Baets, R., Subramanian, A. Z., Clemmen, S., Kuyken, B., Bienstman, P., Le Thomas, N., Roelkens, G., Van Thourhout, D., Helin, P. & Severi, S. (2016). Silicon Photonics: silicon nitride versus silicon-on-insulator. *Optical Fiber Communication Conference*, Th3J-1.
- Bertie, J. E. & Lan, Z. (1996). Infrared intensities of liquids XX: The intensity of the OH stretching band of liquid water revisited, and the best current values of the optical constants of H₂O (l) at 25 C between 15,000 and 1 cm⁻¹. *Applied Spectroscopy*, 50(8), 1047-1057.
- Chen, X., Milosevic, M. M., Stanković, S., Reynolds, S., Bucio, T. D., Li, K., Thomson, D. J., Gardes, F. & Reed, G. T. (2018). The emergence of silicon photonics as a flexible technology platform. *Proceedings of the IEEE*, 106(12), 2101-2116.
- Cheng, D. K. (1997). *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. Pearson Educación.
- Chrostowski, L. & Hochberg, M. (2015). *Silicon photonics design: from devices to systems*. Cambridge University Press.
- Damborský, P., Švitel, J. & Katrlík, J. (2016). Optical biosensors. *Essays in biochemistry*, 60(1), 91-100.
- Dante, S., Duval, D., Guerrero, A. B. G., Osmond, J., Zinoviev, K., Sepúlveda, B., Horna, C. D. & Gómez, L. L. (2012). Hacia un sistema completo Lab-on-Chip basado en interferómetros de Mach-Zehnder integrados. *Optica pura y aplicada*, 45(2), 87-95.
- De Heyn, P., Vermeulen, D., Van Thourhout, D. & Roelkens, G. (2012). Silicon-on-insulator all-pass microring resonators using a polarization rotating coupling section. *IEEE Photonics Technology Letters*, 24(14), 1176-1178.
- Densmore, A., Xu, D.-X., Waldron, P., Janz, S., Cheben, P., Lapointe, J., Delâge, A., Lamontagne, B., Schmid, J. & Post, E. (2006). A silicon-on-insulator photonic wire based evanescent field sensor. *IEEE Photonics Technology Letters*, 18(23), 2520-2522.

- Dhiman, A. (2013). Silicon photonics: a review. *IOSR Journal of Applied Physics*, 3(5), 67-79.
- Ding, R., Baehr-Jones, T., Kim, W.-J., Xiong, X., Bojko, R., Fedeli, J.-M., Fournier, M. & Hochberg, M. (2010). Low-loss strip-loaded slot waveguides in silicon-on-insulator. *Optics express*, 18(24), 25061-25067.
- El Shamy, R. S., Khalil, D. & Swillam, M. A. (2020). Mid infrared optical gas sensor using plasmonic Mach-Zehnder interferometer. *Scientific Reports*, 10(1), 1-9.
- El Shamy, R. S., Swillam, M. A. & Khalil, D. A. (2019). Mid infrared integrated MZI gas sensor using suspended silicon waveguide. *Journal of Lightwave Technology*, 37(17), 4394-4400.
- Ibrahim, M., Schmid, J. H., Aleali, A., Cheben, P., Lapointe, J., Janz, S., Bock, P. J., Densmore, A., Lamontagne, B., Ma, R. y col. (2012). Athermal silicon waveguides with bridged subwavelength gratings for TE and TM polarizations. *Optics express*, 20(16), 18356-18361.
- Jara, F., Rubio-Noriega, R. E., Alayo, M. I. & Alvarado, M. A. (2021). Space exploration of AlN pedestal waveguides for phase shifting applications. *Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXIX*, 11680, 1168010.
- Ji, L., Zhang, D., Xu, Y., Gao, Y., Wu, C., Wang, X., Li, Z. & Sun, X. (2019). Design of an electro-absorption modulator based on graphene-on-silicon slot waveguide. *IEEE Photonics Journal*, 11(3), 1-11.
- Li, G., Chen, X., Li, O., Shao, C., Jiang, Y., Huang, L., Ni, B., Hu, W. & Lu, W. (2012). A novel plasmonic resonance sensor based on an infrared perfect absorber. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(20), 205102.
- Liu, P. Y., Chin, L., Ser, W., Chen, H., Hsieh, C.-M., Lee, C.-H., Sung, K.-B., Ayi, T., Yap, P., Liedberg, B. y col. (2016). Cell refractive index for cell biology and disease diagnosis: past, present and future. *Lab on a Chip*, 16(4), 634-644.
- Liu, Q., Kee, J. S. & Park, M. K. (2013). A refractive index sensor design based on grating-assisted coupling between a strip waveguide and a slot waveguide. *Optics express*, 21(5), 5897-5909.
- Luo, L.-W., Ophir, N., Chen, C. P., Gabrielli, L. H., Poitras, C. B., Bergmen, K. & Lipson, M. (2014). WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip. *Nature communications*, 5(1), 1-7.
- Meshram, B., Agrawal, A., Adil, S., Ranvir, S. & Sande, K. (2018). Biosensor and its application in food and dairy industry: a review. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci*, 7, 3305-3324.
- Mishra, S. K., Zou, B. & Chiang, K. S. (2016). Surface-plasmon-resonance refractive-index sensor with Cu-coated polymer waveguide. *IEEE photonics technology letters*, 28(17), 1835-1838.

- Nejat, M. & Nozhat, N. (2020). Multi-band MIM refractive index biosensor based on Ag-air grating with equivalent circuit and T-matrix methods in near-infrared region. *Scientific reports*, 10(1), 1-12.
- Noriega, R. R. & Hernandez-Figueroa, H. (2013). Two-dimensional finite-element analysis of tapered segmented structures. *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XVII*, 8627, 862717.
- Novack, A., Streshinsky, M., Ding, R., Liu, Y., Lim, A. E.-J., Lo, G.-Q., Baehr-Jones, T. & Hochberg, M. (2014). Progress in silicon platforms for integrated optics. *Nanophotonics*, 3(4-5), 205-214.
- Okamoto, K. (2006). *Fundamentals of optical waveguides*. Academic press.
- Passaro, V. & La Notte, M. (2012). Optimizing SOI slot waveguide fabrication tolerances and strip-slot coupling for very efficient optical sensing. *Sensors*, 12(3), 2436-2455.
- Pavesi, L. & Guillot, G. (2006). Optical interconnects. *Springer series in optical sciences*, 119.
- Pierce, D. T. & Spicer, W. E. (1972). Electronic structure of amorphous Si from photoemission and optical studies. *Physical Review B*, 5(8), 3017.
- Saleh, B. E. & Teich, M. C. (2019). *Fundamentals of photonics*. John Wiley & sons.
- Spott, A., Baehr-Jones, T., Ding, R., Liu, Y., Bojko, R., O'Malley, T., Pomerene, A., Hill, C., Reinhardt, W. & Hochberg, M. (2011). Photolithographically fabricated low-loss asymmetric silicon slot waveguides. *Optics express*, 19(11), 10950-10958.
- Steglich, P. & You, K. (2018). Silicon-on-insulator slot waveguides: Theory and applications in electro-optics and optical sensing. *Emerging Waveguide Technology*, 187-210.
- Streshinsky, M., Ding, R., Liu, Y., Novack, A., Galland, C., Lim, A.-J., Lo, P. G.-Q., Baehr-Jones, T. & Hochberg, M. (2013). The road to affordable, large-scale silicon photonics. *Optics and Photonics News*, 24(9), 32-39.
- Taha, A. M., Paredes, B., Khilo, A. & Dahlem, M. S. (2017). SOI-based centimeter-scale Mach-Zehnder interferometers for fluid sensing. *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXI*, 10106, 101060N.
- Tan, C. (1998). Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 223(1-2), 158-163.
- Xu, Q., Fattal, D. & Beausoleil, R. G. (2008). 1.5- μm -radius high-Q silicon microring resonators. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, CTuDD1.
- Yeh, Y.-L. (2008). Real-time measurement of glucose concentration and average refractive index using a laser interferometer. *Optics and Lasers in Engineering*, 46(9), 666-670.

Yu, H., Xiong, L., Chen, Z., Li, Q., Yi, X., Ding, Y., Wang, F., Lv, H. & Ding, Y. (2014). Ultracompact and high sensitive refractive index sensor based on Mach–Zehnder interferometer. *Optics and Lasers in Engineering*, 56, 50-53.