



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO – SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

Estudio de un interferómetro Mach-
Zehnder basado en una fibra de núcleo
hueco y sus aplicaciones

TESIS

Que para obtener el grado de:
Doctor en Ingeniería Eléctrica

PRESENTA:
M. en T. A. Sigifredo Marrujo García

DIRECTORES:
Dr. Iván Hernández Romano
Dr. Miguel Torres Cisneros

SALAMANCA, GTO.

JUNIO 2023

Con profunda gratitud y orgullo, dedico esta tesis, testimonio de mi trabajo y dedicación, a la persona que ha sido el motor impulsor detrás de cada página escrita y cada paso dado: a mí mismo.

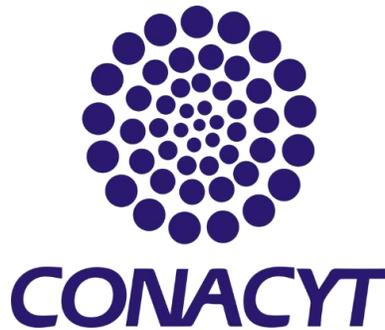
Que esta tesis me sirva de recordatorio de que soy capaz de alcanzar metas desafiantes y de superar cualquier obstáculo que se interponga en mi camino.

Agradecimientos

Agradecimientos institucionales.



A la universidad de Guanajuato por el apoyo recibido de los proyectos: **CIIC 071/2018** y **CIIC-084/2021**.



Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca de posgrados nacionales (**Programa**): **003047 – Doctorado en Ingeniería Eléctrica, (CVU): 510737**. Además, por los apoyos recibidos de los proyectos: **CB2017-2018-AI-S-31806, CB2016-286368, CB2016-286629**.

ATENTAMENTE

Una firma manuscrita en azul sobre una línea horizontal negra.

Sigifredo Marrujo García

Agradecimientos personales.

Durante mi trayectoria de doctorado, recibí una invaluable ayuda y apoyo de diversas personas, a quienes me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento.

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia: mi madre, Myriam García; mi padre, Sigifredo Marrujo; mi hermana, Laura Marrujo; mis tíos José Sánchez y Adelita García; mi tía Laura García, y mis primos Guillermo Sánchez y Luis Sánchez, junto con sus hermosas familias. Siempre han respaldado mis decisiones y han estado presentes en momentos importantes de mi vida. Su amor y preocupación me han dado fuerzas para enfrentar cualquier desafío.

También quiero agradecer a mis maravillosos amigos: Alejandro Solís, Alinne Estrella, Armando Miramontes, Carmen Domínguez, Cecilia Arellano, Cesar Conejo, Cipriano Guzmán, Daniel Luis, Efrén Álvarez, Giselle Martínez, Isaac Solorio, Karen Reyes, Luis Novo, Luis Piad, María Nieto, Mitzi Rojo, Modesto Cruz, Nancy Miguel, Paola Sánchez, Patricia López, Samuel Jesús, Victoria Ruíz, Yara Carbajal, Yue Rodríguez y muchos más. Aunque temo haber omitido algunos nombres, quiero que sepan que su apoyo emocional y su colaboración en mi trabajo de investigación han enriquecido mi experiencia de vida.

Mi gratitud también se extiende al personal administrativo de la universidad, quienes me han ayudado en varias ocasiones a resolver problemas administrativos durante mi tiempo como estudiante de doctorado.

Asimismo, debo agradecer a MS. Alexandra Elbakyan, al Dr. Juan Manuel Sierra Hernández, al Dr. Juan Pablo Ramírez Paredes y al BS. Lawrence Gordon Tesler, cuyas contribuciones directas e indirectas han hecho posible la realización de esta tesis.

Deseo expresar mi sincero agradecimiento al Dr. David Monzón Hernández, al Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala, al Dr. Olivier Jean Michel Pottiez y al Dr. Roberto Rojas Laguna. Ellos me han brindado orientación y sugerencias valiosas para mi estudio, compartiendo generosamente sus amplios conocimientos y experiencias de investigación en sensores de fibra óptica durante el desarrollo de este trabajo de tesis.

Por último, quiero manifestar mi profunda gratitud a mis asesores, el Dr. Miguel Torres Cisneros y el Dr. Iván Hernández Romano. El Dr. Cisneros me brindó la oportunidad de realizar mis estudios de doctorado en el Laboratorio de Física Aplicada y Tecnologías Avanzadas (LAFATA) de la Universidad de Guanajuato, proporcionándome una excelente plataforma de investigación y valiosas colaboraciones con otros destacados investigadores a lo largo de los años. El Dr. Iván me ha inspirado con ideas innovadoras de investigación, y sus habilidades y actitud profesional han sido fundamentales para mi crecimiento. Sus enseñanzas en habilidades experimentales y analíticas serán de gran beneficio en mi trabajo futuro. Sin su dedicación y compromiso, este trabajo de tesis no habría llegado a buen puerto.

Este trabajo de tesis es el resultado de mucho esfuerzo, numerosos cambios de planes y una buena dosis de ingenio para superar obstáculos. Por eso, solo puedo concluir con las palabras del poeta Antonio Machado Ruiz: "Caminante no hay camino, se hace camino al andar".

Resumen

En el **Capítulo 1**, se presenta una reseña de los antecedentes que dieron origen a los sensores de fibra óptica y de los avances más recientes en esa rama de la ciencia. Se hace énfasis en aquellas propiedades que los vuelven dispositivos robustos y versátiles. Además, se esbozan algunas aplicaciones de los sensores de fibra óptica en diversas áreas. De igual manera, se presentan las motivaciones para la realización de la presente investigación y finalmente se bosqueja la estructura general del trabajo de tesis. En el **Capítulo 2**, se muestran los distintos sensores de fibra óptica, se abordan las cuatro categorías principales, haciendo especial énfasis en los principios teóricos de funcionamiento de un MZI. En el **Capítulo 3**, se aborda la estructura de MZIs basados en CHCF y se explica su técnica de fabricación. Se menciona la forma en que fueron caracterizados, y a partir de dichas características se establecen sus parámetros de diseño, lo cual permite realizar simulaciones de elemento finito y numéricas para predecir su comportamiento. En el **Capítulo 4**, se muestra un sensor de curvatura que posee la característica de ser inmune a diversas variables físicas, volviéndolo un candidato ideal para el monitoreo estructural, siendo esto viable debido a la posibilidad de encapsularlo en polímero mejorando sus propiedades mecánicas. En el **Capítulo 5**, se muestra la caracterización de un sensor MZI basado en fibra hueca y su comportamiento al utilizar el fenómeno llamado Efecto Vernier. El diseño se da a través de simulación numérica y mediante un preciso sistema de fabricación se obtienen sensores cuyas diferencias en tamaño son tan pequeñas que multiplican su sensibilidad en temperatura al conectarse en cascada (serie). En el **Capítulo 6**, se muestra una aplicación de los dispositivos MZI como laser sintonizable y su potencial aplicación en el área de las telecomunicaciones. Finalmente, en el **Capítulo 7**, se abordan las conclusiones generales del trabajo y se toca de forma breve el trabajo a futuro.

Publicaciones

Esta tesis contiene el material de los siguientes artículos científicos publicados en las siguientes revistas arbitradas.

- 📄 **Marrujo-García, S.**, Hernández-Romano, I., Torres-Cisneros, M., May-Arrijoja, D., Minkovich, V. P., & Monzón-Hernández, D. (2020). *Temperature Independent Curvature Sensor Based on In-Fiber Mach-Zehnder Interferometer Using Hollow-Core Fiber*. *Journal of Lightwave Technology*, 38(15), 4166-4173. DOI: 10.1109/JLT.2020.2985041.

- 📄 **Marrujo-García, S.**, Hernández-Romano, I., May-Arrijoja, D. A., Minkovich, V. P., & Torres-Cisneros, M. (2021). *In-Line Mach-Zehnder Interferometers Based on a Capillary Hollow-Core Fiber Using Vernier Effect for a Highly Sensitive Temperature Sensor*. *Sensors*, 21(16), 5471. DOI: 10.3390/s21165471.

- 📄 **Marrujo-García, S.**, Herrera-Piad, L. A., Hernández-Romano, I., May-Arrijoja, D. A., Minkovich, V. P., & Torres-Cisneros, M. (2021). *Narrow Spectral Linewidth and Tunable Erbium-Doped Fiber Ring Laser Using a MZI Based on CHCF*. *Optical Fiber Technology*, 67, 102739. DOI: 10.1016/j.yofte.2021.102739.

- 📄 Herrera-Piad, L. A., **Marrujo-García, S.**, Hernández-Romano, I., May-Arrijoja, D. A., Minkovich, V. P., & Torres-Cisneros, M. (2022). *Highly Stable Switchable Emissions of an Erbium-Doped Fiber Ring Laser Using Cascaded MZIs Based on CHCF*. *Machines*, 10(10), 962. DOI: 10.3390/machines10100962.

Congresos

In extenso

- 
Marrujo-García, S., Flores-Hernández, S., Torres-Cisneros, M., López-Cortés, D., Monzón-Hernández, D., May-Arrijoja, D. A., & Hernández-Romano, I. (2018, September). Temperature Sensor Based on Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer. In *Laser Science* (pp. JTU2A-85). Optical Society of America.
- 
Marrujo-García, S., Flores-Hernández, S., Torres-Cisneros, M., López-Cortés, D., Monzón-Hernández, D., May-Arrijoja, D. A., & Hernández-Romano, I. (2018, November). Polymer Comparison on Temperature Sensors Based on Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer- In *Latin America Optics and Photonics Conference* (pp. Tu5B-5). Optical Society of America.
- 
 Hernández-Romano, I., **Marrujo-García, S.**, Torres-Cisneros, M., López-Cortés, D., May-Arrijoja, D. A., & Monzón-Hernández, D. (2019, September). Fiber Optic Bending Sensor Based on Hollow Core Fiber. In *frontiers in Optics* (pp. JW4A-59). Optical Society of America.
- 
Marrujo-García, S., Hernández-Romano, I., Torres-Cisneros, M., Monzón-Hernández, D., & May-Arrijoja, D. A. (2019, September). Curvature and Sensitivity Enhanced Temperature Polymer-Coated Multimode Interference Sensor. In *Infrared Sensors, Devices and Applications IX* (Vol. III29, p. III290M). International Society for Optics and Photonics.
- 
Marrujo-García, S., Hernández-Romano, I., Torres-Cisneros, M., May-Arrijoja, D. A., Minkovich, V. P., & Monzón-Hernández, D. (2020, September). Use of FFT to Increase Measurements Range of a Curvature Sensor Based on a Mach-Zehnder Interferometer. In *Frontiers in Optics* (pp. JTh4B-30). Optical Society of America.
- 
 Herrera-Piada, L. A., Hernández-Romano, I., **Marrujo-García, S.**, May-Arrijoja, D. A., Minkovich, V. P., & Torres-Cisneros, M. (2020, September). Sensor Dual de Temperatura y Curvatura Cubierto con PDMS Basado en Mecanismo ARROW. XVII Encuentro “Participación de la Mujer en la Ciencia” (SI-FMCT07). Centro de Investigaciones en Óptica A. C.
- 
Marrujo-García, S., Hernández-Romano, I., May-Arrijoja, D. A., Cuando-Espitia, N., Torres-Cisneros, M., Minkovich, V. P., & Monzón-Hernández, D. (2021, July). Optimization of the Fringe Contrast of an Interference Pattern of a Mach-Zehnder Interferometer and Its Use as a Curvature Sensor. In *Optical Sensors* (pp. SM2A-5). Optical Society of America.

- 📄 **Marrujo-García, S.**, Hernández-Romano, I., May-Arrijoja, D. A., Minkovich, V. P., & Torres-Cisneros, M. (2021, November). Temperature Sensor Based on Parallel Mach-Zehnder Interferometers Using Vernier Effect. In *Frontiers in Optics* (pp. FM5C-4). Optical Society of America.
- 📄 **Marrujo-García, S.**, Hernández-Romano, I., May-Arrijoja, D. A., Minkovich, V. P., & Torres-Cisneros, M. (2021, November). Temperature Sensor Based on Vernier Effect Using Two Cascaded Capillary Hollow Core Fiber Mach-Zehnder Interferometers. In *Mexican Optics and Photonics Meeting* (pp. MOPM2021-66). Academia Mexicana de Óptica.

Sin extenso

- 📄 **Marrujo-García, S.**, Torres-Cisneros, M., López-Cortés, D., Monzón-Hernández, D., Sánchez-Mondragón, J. J., May-Arrijoja, D. A., & Hernández-Romano, I. (2018, October). Fiber Optic Temperature Sensor Based on Fabry-Perot Interferometer Using Different Polymers. *LXI Congreso Nacional de Física* (pp. SMF-879). sociedad Mexicana de Física.

Contenido

| | |
|--|------|
| Agradecimientos | iii |
| Resumen | v |
| Publicaciones | vii |
| Congresos | ix |
| In extenso | ix |
| Sin extenso | x |
| Contenido..... | xi |
| Lista de figuras | xiii |
| Lista de tablas..... | xvii |
| Lista de abreviaturas | xix |
| Capítulo 1..... | 1 |
| 1 Introducción..... | 1 |
| 1.1 Reseña histórica..... | 2 |
| 1.2 Motivación del trabajo de tesis | 4 |
| 1.3 Objetivo..... | 4 |
| 1.4 Estructura de la tesis..... | 4 |
| Referencias | 6 |
| Capítulo 2 | 7 |
| 2 Marco teórico | 7 |
| 2.1 Sensor basado en Interferómetro Fabry-Perot (FPI) | 7 |
| 2.2 Sensor basado en Interferómetro Sagnac (SI) | 8 |
| 2.3 Sensor basado en Interferómetro Michelson (MI) | 8 |
| 2.4 Sensor basado en Interferómetro Mach-Zehnder (MZI)..... | 9 |
| Referencias | 13 |
| Capítulo 3 | 15 |
| 3 Fabricación, Caracterización y Simulación de un MZI basado en CHCF..... | 15 |
| 3.1 Fabricación..... | 15 |
| 3.2 Caracterización..... | 17 |
| 3.3 Simulación | 21 |
| Referencias | 27 |
| Capítulo 4 | 29 |

| | | |
|-----|--|----|
| 4 | Aplicación del MZI como sensor de curvatura | 29 |
| 4.1 | Introducción | 29 |
| 4.2 | Principio de funcionamiento del MZI como sensor de curvatura..... | 30 |
| 4.3 | Proceso de fabricación del MZI como sensor de curvatura | 32 |
| 4.4 | Resultados experimentales..... | 34 |
| 4.5 | Conclusiones..... | 37 |
| | Referencias | 39 |
| | Capítulo 5 | 41 |
| 5 | Aplicación del MZI como sensor de temperatura..... | 41 |
| 5.1 | Introducción | 41 |
| 5.2 | Análisis de simulación de un MZI a diferentes temperaturas y de selección de dispositivo para usar en el efecto Vernier..... | 43 |
| 5.3 | Efecto Vernier: Valores a calcular y considerar para diseñar el experimento..... | 43 |
| 5.4 | Simulación de dos MZIs en serie usando el efecto Vernier | 45 |
| 5.5 | Resultados experimentales..... | 46 |
| 5.6 | Conclusiones..... | 51 |
| | Referencias | 52 |
| | Capítulo 6 | 55 |
| 6 | Aplicación del MZI como láser sintonizable | 55 |
| 6.1 | Introducción | 55 |
| 6.2 | Principio de funcionamiento del MZI como láser sintonizable | 56 |
| 6.3 | Proceso de fabricación del MZI como láser sintonizable..... | 57 |
| 6.4 | Resultados experimentales..... | 58 |
| 6.5 | Conclusiones..... | 60 |
| | Referencias | 62 |
| | Capítulo 7 | 65 |
| 7 | Conclusiones generales y trabajo a futuro..... | 65 |
| 7.1 | Conclusiones generales..... | 65 |
| 7.2 | Trabajo a futuro..... | 66 |
| 8 | ANEXO 1 | 67 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 (a) FPI extrínseco, (b) FPI intrínseco. R1 y R2 son las reflexiones que se dan en las caras paralelas que conforman la cavidad. | 7 |
| Figura 2.2 Dibujo esquemático de un SI. | 8 |
| Figura 2.3 (a) Configuración básica de un MI, (b) Configuración de un MI compacto en línea. Las flechas rojas representan la dirección en la que se propaga la luz. | 9 |
| Figura 2.4 Dibujo esquemático de un MZI básico. | 9 |
| Figura 2.5 Diversas configuraciones de MZI en fibra. (a) MZI basado en LPG, (b) MZI basado en desplazamiento lateral, (c) MZI basado en fibra fotónica colapsada, (d) MZI basado en fibra adelgazada, (e) y (f) MZIs basados en diámetros de núcleo diferentes. | 10 |
| Figura 2.6 (a) Diagrama esquemático de un MZI basado en una sección de CHCF y dos secciones de MMF (1 mm), (b) Corte transversal de una CHCF. | 12 |
| Figura 3.1 Arreglo experimental para cortar segmentos de MMF y CHCF de forma precisa. . | 15 |
| Figura 3.2 Proceso de fabricación del MZI: Fabricación de la primera parte (a)-(d), Fabricación de la segunda parte (e) y (f), Ensamble del MZI (g) y (h). | 16 |
| Figura 3.3 Vista lateral del dispositivo fabricado y la sección de empalme entre la MMF y la CHCF. | 17 |
| Figura 3.4 Arreglo experimental para caracterizar los MZI. | 18 |
| Figura 3.5 Espectro experimental de un MZI de 1 mm de longitud de CHCF. | 18 |
| Figura 3.6 Se fabricaron más de treinta MZIs con diferentes longitudes de CHCF (a) Espectro de transmisión. (b) FFT del espectro de transmisión. | 19 |
| Figura 3.7 Variación de la frecuencia espacial en función de las longitudes de CHCF. | 20 |
| Figura 3.8 Distribución de los modos de campo en el centro de la CHCF. | 22 |
| Figura 3.9 Todos los modos LP_{11} que cumplen la condición $nr_{clad, eff} = 1.444$ | 23 |
| Figura 3.10 Simulación FEM de la distribución del campo eléctrico del MZI de 1 mm de longitud de CHCF. Las longitudes de onda (correspondientes a un máximo y un mínimo) fueron obtenidas de datos experimentales. | 23 |
| Figura 3.11 (a) Distribución de campo del modo fundamental y modos de revestimiento a dos temperaturas distintas (10 y 70 °C), (b) Simulación de las variaciones de la diferencia de índice de refracción efectivo (ERID) a diferentes temperaturas. | 24 |
| Figura 3.12 Simulación numérica del espectro de transmisión del MZI a diferentes temperaturas usando longitudes (L_0) de 1 mm (a), 2 mm (c), y 3 mm (e). El corrimiento en longitud de onda de un pico del espectro en función de la temperatura utilizando las longitudes (L_0) de 1 mm (b), 2 mm (d), y 3 mm (f). | 25 |
| Figura 4.1 (a) Montaje experimental para la medición de curvas, (b) Ranura cuadrada, (c) Sistema de rotación alrededor del eje x, (d) Diagrama esquemático del montaje de flexión. | 31 |
| Figura 4.2 Proceso de fabricación: (a) montaje del sensor sobre la lámina de acero (b) recubrimiento del sensor con un polímero. | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.3 Dibujo esquemático que muestra la posición de la fibra óptica dentro del polímero (encapsulado del sensor)..... | 33 |
| Figura 4.4 Espectro experimental de un MZI de 1 mm de longitud de CHCF, con PDMS y sin PDMS..... | 33 |
| Figura 4.5 (a) La respuesta espectral del dispositivo de 1 mm-CHCF, (b) Variación del contraste de franjas a diferentes curvaturas..... | 34 |
| Figura 4.6 (a) FFT calculada de los espectros mostrados en la Figura 4.5(a), (b) Amplitud normalizada de la FFT en función de la curvatura..... | 35 |
| Figura 4.7 Contraste de franjas en función de la temperatura, el inserto muestra los espectros detallados del dispositivo..... | 35 |
| Figura 4.8 Amplitud normalizada de la FFT en función de la temperatura, el inserto muestra la FFT calculada del inserto mostrado en la Figura 4.7..... | 36 |
| Figura 4.9 (a) Contraste de franjas en función de la deformación, el inserto muestra los espectros detallados del dispositivo, (b) ampliación del grupo de picos del gráfico insertado. | 37 |
| Figura 5.1 Patrones de interferencia de (a) el interferómetro 1 y (b) el interferómetro 2, (c) la superposición de las dos señales de salida ($FSR1 \sim FSR2$), utilizando el efecto Vernier en una configuración en serie..... | 42 |
| Figura 5.2 Variaciones del aumento (M) en función del porcentaje de la diferencia de tamaño..... | 44 |
| Figura 5.3 Dibujo esquemático de dos MZI en cascada con diferentes longitudes..... | 45 |
| Figura 5.4 (a) Espectros de transmisión de los dos MZI con diferentes longitudes, (b) Espectros de transmisión de los dos MZI en cascada cuando el MZI sensor estaba a diferentes temperaturas, (c) Desplazamiento de la longitud de onda de la envolvente inferior de ajuste en función de los cambios de temperatura..... | 46 |
| Figura 5.5 (a) Espectros experimentales del MZI de detección a diferentes temperaturas, (b) Desplazamiento de la longitud de onda de uno de los valles del espectro en función de la temperatura..... | 47 |
| Figura 5.6 (a) Configuración experimental para la medición de la temperatura basada en el efecto Vernier. (b) Espectros experimentales de los dos MZIs cuando el MZI sensor estaba a diferentes temperaturas, (c) Desplazamiento en longitud de onda de la envolvente inferior en función de la temperatura..... | 48 |
| Figura 5.7 Espectro de transmisión de dos sensores fabricados con el sistema mostrado en la Figura 13 a una temperatura de 30 °C..... | 49 |
| Figura 6.1 Vista lateral del dispositivo fabricado y la sección de empalme entre la MMF y la CHCF..... | 57 |
| Figura 6.2 Esquema de la cavidad del láser de anillo de fibra desarrollado utilizando un MZI basado en CHCF..... | 58 |
| Figura 6.3 Emisión láser obtenida del montaje experimental del láser de fibra en anillo..... | 58 |

Figura 6.4 (a) Respuesta espectral del láser para temperaturas de 30 a 140 °C, (b) Desplazamiento de la longitud de onda del pico del láser en función de la temperatura aplicada. 59

Figura 6.5 Análisis de la estabilidad del láser. 59

Figura 8.1 Simulaciones del dispositivo de 0.3 mm de longitud. (a) Índice de refracción fijo. (b) Respuesta a temperatura del dispositivo usando solo el TEC. (c) Expansión térmica fija. (d) Respuesta a temperatura del dispositivo usando solo el TOC. 67

Figura 8.2 Simulaciones del dispositivo de 3.0 mm de longitud. (a) Índice de refracción fijo. (b) Respuesta a temperatura del dispositivo usando solo el TEC. (c) Expansión térmica fija. (d) Respuesta a temperatura del dispositivo usando solo el TOC. 68

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1 Parámetros de las fibras ópticas. | 16 |
| Tabla 3.2 Parámetros del programa de empalme (Fitel, modelo s179). | 17 |
| Tabla 3.3 Error de fabricación para cada longitud. | 20 |
| Tabla 3.4 Simulación de los MZI usando diferentes longitudes. | 26 |
| Tabla 4.1 Sensibilidades experimentales de los MZI construidos con diferentes longitudes de CHCF. | 34 |
| Tabla 4.2 Comparación del desempeño del sensor de curvatura con la literatura..... | 37 |
| Tabla 5.1 Error de fabricación de cada longitud. | 47 |
| Tabla 5.2 Diferentes sensores de temperatura solo de fibra basados en el efecto Vernier | 50 |
| Tabla 6.1 Pérdida de inserción y contraste de los diferentes MZI. | 57 |
| Tabla 6.2 Comparación de los parámetros del láser con la literatura | 60 |

Lista de abreviaturas

| | |
|---------|---|
| ARROW | Guias de Onda Óptica Reflectantes Antirresonantes |
| CHCF | Fibra capilar de núcleo hueco |
| ERI | Índice de refracción efectivo |
| ERID | Diferencia de índice de refracción |
| FBG | Rejillas de Bragg |
| FEM | Método de Elemento Finito |
| FFT | Transformada Rápida de Fourier |
| FOS | Sensor de Fibra Óptica |
| FPI | Interferómetro Fabry-Perot |
| FSR | Rango espectral libre |
| In-line | En línea/Serie |
| LPG | Rejilla de periodo largo |
| MI | Interferómetro Michelson |
| MMF | Fibra multimodo |
| MZI | Interferómetro Mach-Zehnder |
| OPL | Longitud de Camino Óptico |
| OSA | Analizador de Espectros Ópticos |
| PCF | Fibra de cristal fotónico |
| PSD | Diferencia de Tamaño Porcentual |
| RI | Índice de Refracción |
| SI | Interferómetro Sagnac |
| SLD | Diodo Superliminiscente |
| SMF | Fibra monomodo |
| SMSR | Relación de Supresión de Modo Lateral |
| SNR | Relación Señal a Ruido |
| SPR | Resonancia de Plasmón Superficial |
| TCF | Fibra de núcleo delgado |
| TEC | Coefficiente de Expansión Térmica |
| TEDFL | Láser Sintonizable de Fibra Dopada con Erbio |
| TOC | Coefficiente Termo Óptico |

Capítulo 1

Cuando usted llegó no había nada, cuando yo llegué solo estaba usted.

En este capítulo se presenta una reseña de los antecedentes, de los avances más recientes y de las propiedades más destacables de los dispositivos de fibra óptica. Se hace énfasis en aquellos que se utilizan como sensores, se esbozan algunas de las aplicaciones pioneras en sensores de fibra óptica y se mencionan algunas de las técnicas más recientes en esta rama de la investigación. De igual manera, se presentan las motivaciones para la realización de la presente investigación y finalmente se bosqueja la estructura general del trabajo de tesis.

Introducción

En los últimos años, el interés y aceptación del mercado por el uso de sensores de fibra óptica (FOSs, por sus siglas en inglés) ha crecido significativamente. Los FOSs ofrecen ventajas sobre los sensores tradicionales, especialmente en aplicaciones donde los sensores tradicionales son inviables, difíciles de implementar o no pueden ofrecer la cantidad de datos e información que un sensor de fibra sí puede. Los sensores de fibra óptica ofrecen varias ventajas sobre los sensores convencionales, como un tamaño más pequeño o una vida útil más larga. Asimismo, la inmunidad a las interferencias electromagnéticas, la capacidad de multiplexación y la alta sensibilidad son otras características que hacen de la tecnología de sensores de fibra óptica la opción preferida en áreas como la salud y el sector aeroespacial [1].

Los avances más recientes en el desarrollo de FOS han aumentado la demanda de sensores ópticos en los sectores industrial, militar y social. Algunos ejemplos son el monitoreo ambiental y atmosférico, las ciencias terrestres y espaciales, el procesamiento químico industrial y la biotecnología, el cumplimiento de la ley, las imágenes digitales, el escaneo y la impresión. Los avances en I+D de dispositivos basados en fibra abarcan campos como la medicina, la industria química y las telecomunicaciones. Estos dispositivos están diseñados para procesar y medir diversas propiedades físicas como: temperatura, cambio químico, campos eléctricos y magnéticos, vibración, esfuerzo, desplazamiento, tasa de flujo, caudal, presión, rotación, radiación, nivel de líquidos, intensidad luminosa y color. Para el desempeño en entornos hostiles, los FOSs ofrecen dispositivos más estables y confiables que los sensores eléctricos tradicionales, donde estos últimos tienen dificultades [2], por el contrario, los sensores de fibra ofrecen numerosas ventajas sobre otros tipos de sensores como:

- Permitir fabricar sensores pequeños (μm – mm) que no contaminan sus alrededores y son resistentes a la corrosión.
- Pasividad eléctrica: pueden usarse en ambientes volátiles (lugares con gases, líquidos y polvos explosivos).

- Inmunidad eléctrica: perfectos para ambientes con microondas, inmunes a interferencia por radiofrecuencia y electromagnética.
- Resistentes a temperaturas altas y a ambientes químicamente reactivos: ideales para ambientes duros y hostiles.
- Compactos y ligeros: perfectos para montaje en superficies y aplicaciones embebidas. Requieren cableado ligero.
- Amplio rango dinámico: capacidad de medir un amplio espectro de parámetros físicos y químicos permitiendo el monitoreo remoto.
- Gran sensibilidad y resolución.
- Aislamiento eléctrico: aislamiento eléctrico absoluto contra cargas electrostáticas altas.
- Operación remota a varios kilómetros de distancia sin necesidad de repetidores eléctricos (sin cableado extra).
- Sensibilidad: ideal para su implementación en perforaciones profundas o medición en ambientes peligrosos.
- Multiplexado y medición distribuida en un gran número de puntos diferentes a lo largo de un solo cable de fibra óptica: ideal para disminuir la cantidad de cableado y peso de estos, o para el monitoreo de estructuras extensas como tuberías, presas, puentes, etc.

Las ventajas de los FOSs se extienden a la capacidad de la fibra de enviar y recibir señales ópticas a través de largas distancias. En la actualidad existe la motivación para utilizar estos dispositivos en arreglos de sensores que eliminarían el proceso de conversión de señales eléctricas a señales fotónicas en cada punto de medición, reduciendo por lo tanto costos e incrementando la flexibilidad de los sistemas de medición [1].

1.1 Reseña histórica

Los sensores de fibra óptica se basan en la interferencia que se produce entre dos haces que se propagan a lo largo de diferentes longitudes de camino óptico (OPL, por sus siglas en inglés) en la misma fibra o en dos fibras diferentes. Es importante mencionar que las diferencias en las longitudes de camino óptico no son necesariamente una diferencia espacial (longitud), ya que un cambio en el índice de refracción (RI, por sus siglas en inglés) —el cual no afecta longitudinalmente el camino por donde viaja la luz— de una sola fibra, causará esta diferencia de “longitud” del camino óptico. Los sensores de fibra óptica constan de un divisor de haz y un combinador de haz que se pueden venir en varias configuraciones. En las aplicaciones de detección, una de las longitudes de camino óptico está configurada para verse afectada por cambios externos. Los sensores de fibra óptica cuantifican dichas perturbaciones al mostrar cambios en la longitud de onda, la fase, la intensidad, la frecuencia o el ancho de banda.

Entre las múltiples ventajas de las fibras ópticas está su capacidad para reducir los efectos de la distorsión del frente de onda producto de la turbulencia atmosférica, además de permitir la

fabricación de divisores y combinadores de haz compactos. Estas propiedades hacen que las fibras ópticas sean un medio adecuado para guiar luz en interferómetros gigantes para la detección de ondas gravitacionales, sensores de intrusión, sistemas de monitoreo de salud estructural y detección de fugas de largo alcance [3-6].

Los sensores de fibra óptica modernos deben su desarrollo a dos de los avances científicos más importantes de la década de 1960: el láser (1960) y la demostración teórica de una fibra óptica de bajas impurezas y bajas pérdidas (1966) [7]. En ambos casos, su origen se remonta a décadas anteriores: al predecesor del láser, que amplificaba señales de microondas (el máser) y a las fibras de poca longitud y baja transparencia utilizadas en los primeros endoscopios para aplicaciones médicas e industriales [8]. En la actualidad la situación es completamente diferente. Los diodos láser que en 1979 costaban 3,000.00 dólares, con una vida útil de apenas unas horas, actualmente se venden por un par de dólares, tienen una vida útil de decenas de miles de horas y se utilizan ampliamente en reproductores de discos compactos, impresoras láser, punteros y lectores de códigos de barras. La fibra óptica monomodo, que costaba 20 dólares por metro en la misma época, actualmente cuesta menos de 0.10 dólares por metro, a la par que sus propiedades ópticas y mecánicas han mejorado enormemente [9]. Siendo así, que a principios de la década de 1970 se fabricaron las primeras fibras ópticas modernas de bajas pérdidas, llevándose a cabo algunos de los primeros experimentos con estas nuevas fibras sin el propósito de usarse en telecomunicaciones, principal motivación de su desarrollo, sino para usarlas en el área de la medición, como sensores [8]. Estos trabajos pioneros dieron lugar al rápido crecimiento de una serie de grupos de investigación centrados en la explotación de esta nueva tecnología con un enfoque principalmente dirigido a las aplicaciones militares y aeroespaciales [10] por ejemplo, con el desarrollo del giroscopio [11, 12] y el hidrófono [13, 14].

Actualmente, la principal motivación en este campo de investigación es desarrollar diferentes tecnologías para diseñar sensores capaces de medir tantas variables físicas como sea posible, y es aquí donde radica el éxito de los FOSs [8]. No obstante, solo unas cuantas de esas técnicas y propuestas han sido comercialmente exitosas. Otro inconveniente es que, dado que los sensores de fibra óptica tienen que competir con tecnologías más maduras y establecidas en muchas áreas, es necesario demostrar que los dispositivos de fibra óptica son superiores a estos últimos [15]. Para competir, se han creado varias clases con estos dispositivos los cuales se pueden dividir en 4 grandes categorías: interferómetro Fabry-Perot (FPI, por sus siglas en inglés), interferómetro Sagnac (SI, por sus siglas en inglés), interferómetro Michelson (MI, por sus siglas en inglés) e interferómetro Mach-Zehnder (MZI, por sus siglas en inglés) [16].

Las variables físicas que pueden medir estos sensores son: temperatura, esfuerzo, presión, rotación, desplazamiento, índice de refracción, polarización, ultrasonido, entre muchas más. Además, estas capacidades de medición se han combinado con otras tecnologías de fibra como: rejillas de fibra, interferómetros de fibra, dispersión Brillouin/Raman, resonancia de plasmón superficial (SPR, por sus siglas en inglés), fibras microestructuradas, nanoalambres, acopladores de fibras especiales, etc. Algunos de estos sensores se han usado para el monitoreo en tiempo real de estructuras como puentes y con el desarrollo de materiales biocompatibles con el cuerpo humano se han podido desarrollar sistemas y herramientas para el monitoreo biológico y de la salud. La tendencia actual de los dispositivos de fibra es la miniaturización, por lo que los métodos ópticos anticuados que requieren equipos voluminosos quedan obsoletos y se reemplazan por pequeños dispositivos de fibra óptica. Entre estos dispositivos basados en interferómetros con un tamaño reducido, las estructuras de fibra en línea (In-line) con dos caminos ópticos diferentes en una sola guía de onda (fibra) son las más atractivas. Este tipo de estructuras (in-line) ofrecen ventajas como fácil alineación, alta tasa de acoplamiento de luz y

gran estabilidad a cambios externos, inmunidad a perturbaciones de ruido electromagnético, menos consumo de energía y un amplio potencial para multiplexación a gran escala [15-17].

1.2 Motivación del trabajo de tesis

Las tecnologías basadas en FOS son capaces de medir casi todas las variables y propiedades físicas existentes, así como un gran número de variables y propiedades químicas. Tienen la capacidad de operar en ambientes hostiles y corrosivos donde los métodos de medición tradicionales han tenido problemas. La capacidad de trabajar aislados o en una red de sensores distribuidos permite diseños masivos y livianos al tiempo que reduce los costos operativos y de instalación. El no verse afectados por los campos eléctricos y magnéticos, poder trabajar expuestos a las inclemencias ambientales debido a sus propiedades anticorrosivas y no conductoras separados por decenas de kilómetros de las estaciones de medición los convierten en la alternativa optima a futuro en diversas áreas como la salud, las telecomunicaciones, la construcción, la robótica y la industria aeroespacial.

1.3 Objetivo

Diseñar, fabricar y caracterizar interferómetros Mach-Zehnder, basados en fibra de núcleo hueco, que tengan la versatilidad suficiente para ser implementados en múltiples aplicaciones relacionadas a la medición de variables físicas, entre otros posibles usos.

1.4 Estructura de la tesis

En el **Capítulo 3**, se estudia a profundidad un MZI particular basado en una fibra especial de núcleo hueco, donde se analizan los elementos que componen al dispositivo, así como su estructura. Se realiza un breve análisis matemático de su funcionamiento. Complementariamente, se simula el comportamiento del sensor por medio de elemento finito y simulación numérica con el propósito de comprender algunas de las propiedades del MZI y finalmente, se muestra y desglosa el sistema utilizado para la fabricación de dicho sensor, todo esto respaldado por parámetros y datos obtenidos experimentalmente. En el **Capítulo 4**, se diseñó y desarrolló un sensor basado en la estructura antes mencionada para medir curvatura, el cual posee la propiedad de ser insensible a 3 variables físicas, la temperatura, la tensión, y el índice de refracción. El dispositivo fue montado en una lámina delgada y flexible de acero y cubierto con un polímero para protegerlo de las condiciones ambientales, dotándolo de la robustez y repetibilidad necesarias para ser candidato a monitoreo estructural. Se muestran los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio, donde es posible visualizar el comportamiento del sensor a diversas curvaturas. En el **Capítulo 5**, se presentan los resultados numéricos y experimentales de un MZI capaz de medir temperatura apoyándose del fenómeno conocido como Efecto Vernier; el trabajo se centra en estudiar cómo se mejora la respuesta a temperatura de un dispositivo al conectar dos de ellos en serie. El resultado obtenido fue que, al conectar sensores muy semejantes, con una diferencia en longitud de 1.54%, debido a la superposición de sus respectivos patrones de interferencia, la sensibilidad se multiplicó por un factor determinado. Los MZI fueron simulados de forma numérica tanto de forma individual como conectados en serie y dichas características se trasladaron a dos dispositivos reales. El éxito de este trabajo se debe al desarrollo de una técnica para cortar con precisión segmentos de fibra, lo que nos llevó a fabricar sensores muy reproducibles. Con lo que se logró una discrepancia entre la simulación y los resultados experimentales menor al 3%. En el **Capítulo 6**, se evaluó la viabilidad de utilizar la estructura del MZI basado en fibra especial del núcleo hueco como un filtro para telecomunicaciones. El resultado obtenido fue un láser sintonizable

con un pico de emisión estrecho (0.03 nm), una excelente relación señal-ruido (66 dB) y con una estabilidad muy destacable en tiempo respecto a potencia y longitud de onda.

Nota previa: A lo largo de todo este documento se utilizará *medición, mide, medir, sensado, sensa* y *sensar* de manera equivalente, es decir: cuando se escribe *sensado, sensa, sensar*, hace referencia a *medición, mide, medir* y viceversa

Referencias

- [1] N. Sabri, S. A. Aljunid, M. S. Salim, and S. Fouad, "Fiber Optic Sensors: Short Review and Applications," in *Recent Trends in Physics of Material Science and Technology*, F. L. Gaol, K. Shrivastava, and J. Akhtar Eds. Singapore: Springer Singapore, 2015, pp. 299-311.
- [2] P. B. R. Shizhuo Yin, Francis T.S. Yu, P. B. R. Shizhuo Yin, Francis T.S. Yu, Ed. *Fiber optic sensors*, 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [3] V. Sačharov, "Linear relativistic fiber-optic interferometer," *Laser physics*, vol. 11, no. 9, pp. 1014-1018, 2001.
- [4] R. T. Cahill, "Optical-fiber gravitational wave detector: dynamical 3-space turbulence detected," *Progress in Physics*, vol. 4, no. October, pp. 63-68, 2007.
- [5] A. Mishra, S. Al Gabani, and A. Jumaa Al Hosany, "Pipeline leakage detection using fiber optics distributed temperature sensing DTS," in *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, 2017: OnePetro.
- [6] A. Bahrapour, M. Bathaee, S. Tofighi, A. Bahrapour, F. Farman, and M. Vali, "Polarization maintaining optical fiber multi-intruder sensor," *Optics & Laser Technology*, vol. 44, no. 7, pp. 2026-2031, 2012.
- [7] K. C. Kao and G. A. Hockham, "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1966, vol. 113, no. 7: IET, pp. 1151-1158.
- [8] K. Grattan and T. Sun, "Fiber optic sensor technology: an overview," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 82, no. 1-3, pp. 40-61, 2000.
- [9] E. Udd, "An overview of fiber-optic sensors," *Review of Scientific Instruments*, vol. 66, no. 8, pp. 4015-4030, 1995, doi: 10.1063/1.1145411.
- [10] C. Merzbacher, A. D. Kersey, and E. Friebel, "Fiber optic sensors in concrete structures: a review," *Smart materials and structures*, vol. 5, no. 2, p. 196, 1996.
- [11] B. W. Lee, H. J. Jeong, and B. Y. Kim, "High-sensitivity mode-locked fiber laser gyroscope," *Optics letters*, vol. 22, no. 2, pp. 129-131, 1997.
- [12] V. Vali and R. Shorthill, "Fiber ring interferometer," *Applied optics*, vol. 15, no. 5, pp. 1099-1100, 1976.
- [13] J. Bucaro, H. Dardy, and E. Carome, "Fiber-optic hydrophone," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 62, no. 5, pp. 1302-1304, 1977.
- [14] J. Dakin, C. Wade, and M. Henning, "Novel optical fibre hydrophone array using a single laser source and detector," *Electronics Letters*, vol. 1, no. 20, pp. 53-54, 1984.
- [15] B. Lee, "Review of the present status of optical fiber sensors," *Optical Fiber Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 57-79, 2003, doi: 10.1016/s1068-5200(02)00527-8.
- [16] B. H. Lee *et al.*, "Interferometric fiber optic sensors," *sensors*, vol. 12, no. 3, pp. 2467-2486, 2012.
- [17] A. R. Bahrapour, S. Tofighi, M. Bathaee, and F. Farman, "Optical fiber interferometers and their applications," *Interferometry-Research and Applications in Science and Technology*, vol. 1, pp. 3-30, 2012.

Capítulo 2

No es lo mucho que tenemos, sino lo poco que necesitamos para hacerlo, lo que nos hace buenos en nuestro trabajo.

En este capítulo se presenta una breve explicación de los cuatro grupos en los que generalmente se categorizan los sensores de fibra, así como una muy breve explicación de su funcionamiento, haciendo hincapié en los dispositivos de fibra basados en interferómetros Mach-Zehnder y las diversas técnicas usadas para fabricarlos, finalizando con la estructura que se abordará en este trabajo de tesis.

Marco teórico

Como se mencionó anteriormente, es posible agrupar la mayoría de los sensores de fibra en cuatro formas muy bien definidas y representativas, siendo estas los FPI, SI, MI y MZI. A continuación, cada uno de esos grupos de sensores será explicado brevemente.

2.1 Sensor basado en Interferómetro Fabry-Perot (FPI)

El primer grupo corresponde a los interferómetros FPI. Este tipo de interferómetros está formado generalmente por dos superficies paralelas y reflejantes las cuales están separadas a una distancia determinada, siendo esta comúnmente una distancia fija. Cuando la luz guiada por la fibra óptica pasa entre estas dos superficies produce una interferencia, dicha interferencia se da debido a la múltiple superposición de los haces transmitidos y reflejados en dichas superficies [1] formando así un interferómetro que puede trabajar como sensor. Para el caso particular de los sensores fabricados con fibra óptica, el FPI puede ser construido si se producen zonas reflejantes dentro o fuera de la fibra. Lo que da lugar a dos categorías principales: siendo la primera los sensores extrínsecos, mientras que la segunda serían los sensores intrínsecos [2, 3]. El FPI extrínseco se forma al usar las reflexiones de una cavidad externa, es decir, una cavidad que no existe dentro de la fibra óptica [4]. En la Figura 2.1(a) se muestra un sensor extrínseco donde la cavidad (en este caso de aire) y las superficies reflejantes (las caras planas de la fibra óptica) se forman con ayuda de una estructura externa de soporte.

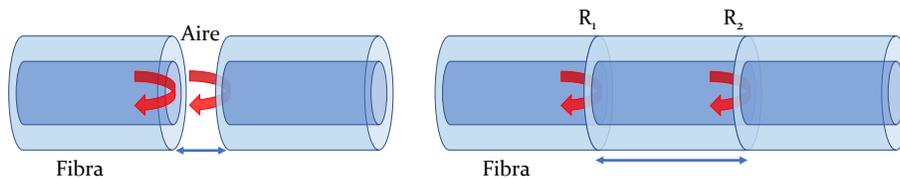


Figura 2.1 (a) FPI extrínseco, (b) FPI intrínseco. R1 y R2 son las reflexiones que se dan en las caras paralelas que conforman la cavidad.

Debido a que en este tipo de arreglos es posible utilizar espejos altamente reflejantes y controlar su grado de reflectividad, esta estructura producirá contrastes altos en la señal medida

[5]. Pese a esta gran ventaja, los FPI extrínsecos tienen algunas desventajas como la baja eficiencia de acoplamiento, dificultad de alineación o problemas para encapsular el sensor [6]. Por otro lado, los FPI intrínsecos tienen componentes reflejantes formadas dentro de la misma estructura de la fibra. Cuando los reflectores se forman dentro de la fibra, como en la Figura 2.1(b), se tendrán reflectividades que se propagarán dentro de la misma fibra que guía la luz. Estas zonas reflejantes pueden formarse de diversas maneras, como por ejemplo usando micromaquinado [7], rejillas de Bragg (FBGs, por sus siglas en inglés) [8], ataque químico [9], o deposición de películas delgadas [10].

2.2 Sensor basado en Interferómetro Sagnac (SI)

El segundo grupo está formado por los interferómetros Sagnac, esta clase de interferómetros han causado interés recientemente para aplicaciones de medición debido a que poseen la característica tener una estructura simple, de fácil fabricación y con buena resistencia a las inclemencias ambientales [11]. Los SI están conformados por un anillo de fibra óptica, en el cual dos haces de luz se propaga en direcciones opuestas con diferentes estados de polarización. Como se puede observar en la Figura 2.2, la luz que entra es dividida en dos direcciones con la ayuda de un acoplador de fibra de 3 dB (50/50), para que posteriormente, los dos haces que se propagaban en dirección opuesta sean combinados nuevamente en el mismo acoplador que los dividió. A diferencia de otros interferómetros de fibra, la OPL estará determinada por la velocidad de propagación dependiente de polarización de los modos guiados dentro de la fibra. Para maximizar la característica dependiente de polarización del SI, se utilizan fibras birrefringentes en la parte encargada de operar como sensor. Para obtener los mejores resultados, la polarización es ajustada con ayuda de un controlador de polarización al principio de la fibra que será usada como sensor [12].

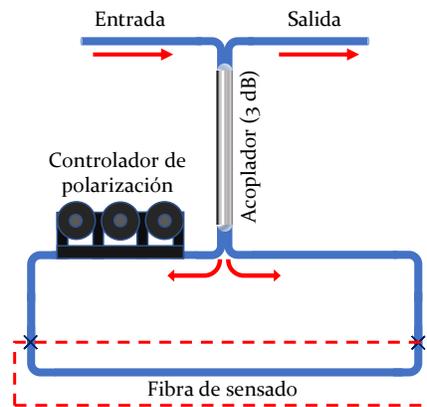


Figura 2.2 Dibujo esquemático de un SI.

2.3 Sensor basado en Interferómetro Michelson (MI)

El tercer grupo son los interferómetros de Michelson, el principio básico de funcionamiento de los MI es la interferencia entre los haces de luz que viajan en dos brazos distintos; de manera individual cada haz de luz es reflejado mediante un espejo (reflector) que se encuentra en el extremo de cada brazo como se muestra en la Figura 2.3(a) [13], siendo ésta la principal característica de este interferómetro. Dado que los MI trabajan usando modos de reflexión, son compactos y manejables, así como prácticos y de fácil implementación. La capacidad que tienen

de multiplexación, con conexión en paralelo, de varios sensores es otro de los puntos a favor de los MI. Sin embargo, para obtener los mejores resultados, será esencial tener un control preciso de la diferencia de longitudes de las fibras que conforman el brazo de referencia y el brazo de detección para que estén dentro de la longitud de coherencia de la fuente de luz.

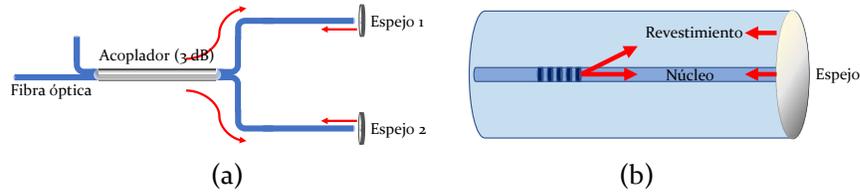


Figura 2.3 (a) Configuración básica de un MI, (b) Configuración de un MI compacto en línea. Las flechas rojas representan la dirección en la que se propaga la luz.

También es posible una configuración en línea del MI, como se muestra en la Figura 2.3(b). Una parte del haz que viaja a través del núcleo de la fibra se acoplará al revestimiento, mismo que será reflejado junto con el haz de luz del núcleo mediante el reflector que tendrán en común situado en el extremo de la fibra.

2.4 Sensor basado en Interferómetro Mach-Zehnder (MZI)

El último grupo, los interferómetros Mach-Zehnder, son comúnmente utilizados en aplicaciones de medición de variables debido a su gran versatilidad y a su enorme flexibilidad al momento de configurarlos. En sus inicios, los MZI estaban formados por dos brazos independientes los cuales eran el brazo de referencia y el brazo de sentido, como puede observarse en la Figura 2.4. En este tipo de configuración, la luz que entra al dispositivo será dividida en dos haces independientes por medio de un acoplador de fibra de 3 dB (al que llamaremos divisor de haz) para que posteriormente ambos haces de luz sean combinados nuevamente por medio de otro acoplador con características similares. La luz que se vuelve a combinar creará una interferencia relacionada a la OPL entre los dos brazos antes mencionados.

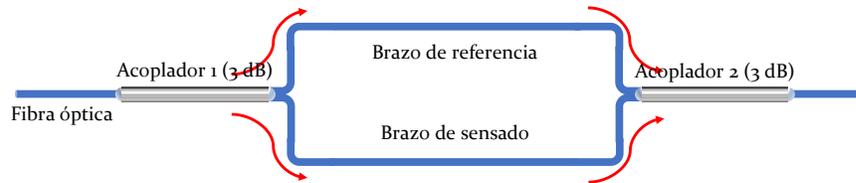


Figura 2.4 Dibujo esquemático de un MZI básico.

Al momento de utilizar un MZI en aplicaciones de sentido, será imperante que el brazo de referencia se mantenga protegido y aislado de cualquier perturbación externa, siendo solamente el brazo que mide el que será expuesto a los cambios externos que se desean evaluar. De este modo, las variaciones en el brazo que sense, inducidas por los cambios en la temperatura, la curvatura o el RI cambiarán la OPL del MZI, haciendo que dichas diferencias sean fácilmente medidas analizando los cambios en la señal de interferencia [12].

Desde la llegada de las Rejillas de Periodo Largo (LPGs, por sus siglas en inglés) la estructura del MZI hecha con dos brazos separados ha sido rápidamente reemplazada por un arreglo de guía de onda in-line. Es posible observar en la Figura 2.5(a), que una parte de la luz que es guiada a través del núcleo de la fibra monomodo (SMF, por sus siglas en inglés) escapa del mismo y se

acopla al revestimiento debido a la LPG, para posteriormente ser acoplada nuevamente al núcleo debido a una segunda LPG. El haz que no se vio afectado por la primera rejilla y que viajaba en el núcleo, así como los haces combinados del revestimiento interfieren, dando origen a un MZI compacto y efectivo.

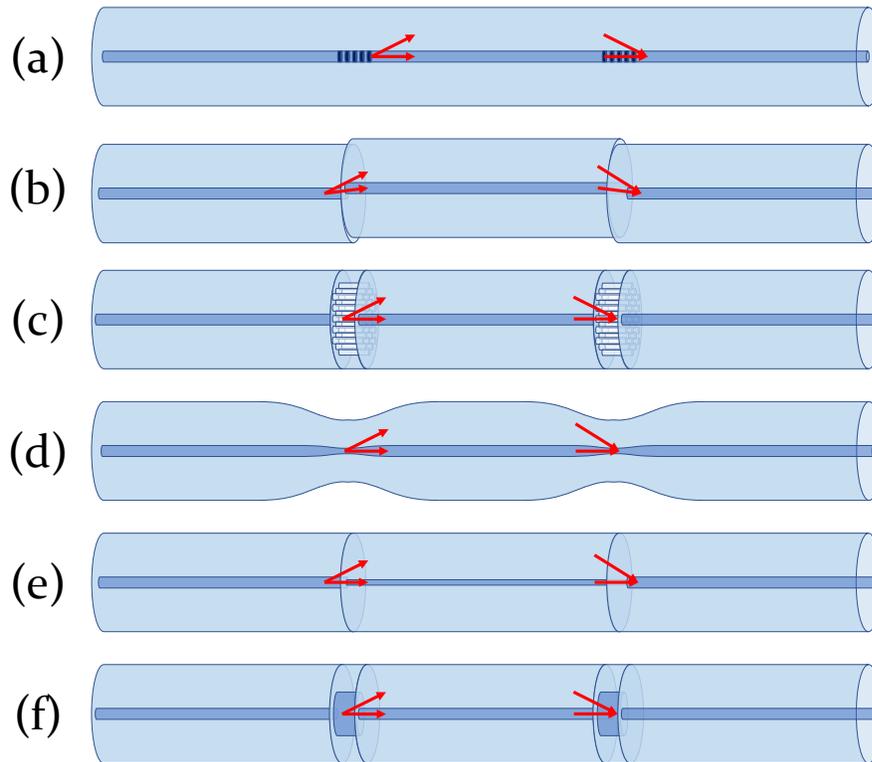


Figura 2.5 Diversas configuraciones de MZI en fibra. (a) MZI basado en LPG, (b) MZI basado en desplazamiento lateral, (c) MZI basado en fibra fotónica colapsada, (d) MZI basado en fibra adelgazada, (e) y (f) MZIs basados en diámetros de núcleo diferentes.

Este tipo de MZI in-line tienen longitudes idénticas entre el brazo de referencia y el brazo de medición, pero tienen OPL distintas debido a la dispersión modal; es decir, el haz de luz propagándose a través del revestimiento tiene un índice de refracción efectivo (ERI, por sus siglas en inglés) diferente y generalmente menor que el haz propagándose a través del núcleo. Otra forma de dividir el haz en modos de núcleo y de revestimiento es empalmado dos fibras idénticas, pero con un pequeño desplazamiento lateral como se muestra en la Figura 2.5(b). Debido al descentramiento del núcleo, parte de los modos que se propagan a través del núcleo se acoplan al revestimiento, dando pie a que se propaguen modos de revestimiento que no son afectados significativamente por la longitud de onda. Incluso con fibras de cristal fotónico (PCFs, por sus siglas en inglés) es posible formar un MZI simplemente empalmado un pedazo de PCF entre dos fibras convencionales con un poco de desplazamiento lateral [14]. Este método es relativamente económico y principalmente rápido cuando lo comparamos con el uso de LPGs. Esta técnica tiene la ventaja de poder producir patrones de interferencia usando casi cualquier longitud de onda. Además de tener la ventaja de que la cantidad de modos de revestimiento, así

como las pérdidas por inserción pueden ser controladas ajustando la cantidad de desplazamiento lateral entre las fibras unidas.

Colapsar las cavidades de aire de las PCF es otro buen método para fabricar MZI. Es rápido, relativamente sencillo, y no requiere de procesos complejos de alineación para cortar segmentos de fibra. El haz del modo del núcleo en una PCF se expande dentro de la región colapsada, de forma que parte de esa luz se acopla a los modos de revestimiento de la PCF, como se muestra en la Figura 2.5(c). Sin embargo, en este caso, acoplar varios modos de revestimiento resulta ser algo difícil [14], sumado a esto, las pérdidas por inserción son generalmente altas y muy difíciles de controlar comparadas con el método de desplazamiento lateral, además de ser un método caro debido a los costos de adquisición de este tipo de fibras especiales. Siguiendo este método de fabricación y llevándolo al extremo, al adelgazar la fibra en dos puntos a lo largo de ella misma, es posible formar un MZI en línea como se muestra en la Figura 2.5(d) [15, 16]. Debido al adelgazamiento, el modo de núcleo aumenta de tamaño y se expande fuera de este, haciendo que parte del modo se acople a los modos de revestimiento. Es una forma económica y relativamente sencilla de crear un MZI, pero con el riesgo de volverlos muy frágiles, especialmente en la región adelgazada, ya sea por un adelgazamiento extremo o por cambios en la estructura química de la fibra.

Otro método de dividir el haz para formar un MZI de fibra es usando fibras con diferentes tamaños de núcleo como se muestra en la Figura 2.5(e) y (f) [17, 18]. La Figura 2.5(e) muestra un método en el cual una fibra de núcleo delgado (TCF, por sus siglas en inglés) se inserta entre dos SMF convencionales. En la región del núcleo delgado el haz es guiado no solo por los modos de núcleo sino también por los modos de revestimiento [18]. La Figura 2.5(f) muestra un método diferente, en el cual una sección pequeña de fibra multimodo (MMF, por sus siglas en inglés) es empalmada a una SMF en dos puntos diferentes a lo largo de la SMF. En este caso particular, la luz que se propaga a través de la SMF se dividirá en modos de núcleo y modos de revestimiento en la MMF y será combinada nuevamente en el segundo segmento de MMF para ser acoplada nuevamente en la SMF [17].

2.4.1 MZI basado en CHCF

En este trabajo de tesis se utilizó un MZI similar al mostrado en la Figura 2.5(f) pero con la diferencia de que la sección media de fibra monomodo es sustituida por un tipo de fibra especial. Un dibujo esquemático del MZI propuesto en este trabajo de tesis se muestra en la Figura 2.6(a), dicha estructura consiste en una sección de fibra capilar de núcleo hueco (CHCF, por sus siglas en inglés) que esta empalmada entre dos secciones de MMF con diámetros de núcleo y revestimiento de 105 y 125 μm . Los diámetros internos y externos de la CHCF son de 65.5 y 125 μm , respectivamente, ver la Figura 2.6(b). La luz proveniente de una fuente de amplio espectro fue acoplada al sensor por medio de una SMF, y la señal de salida fue enviada a un sistema de detección por medio de otra SMF.

El espectro de transmisión de este dispositivo de fibra puede ser expresado por medio de la siguiente ecuación [19]

$$I = I_{ch} + I_{rclad} + 2\sqrt{I_{ch}I_{rclad}} \cos \left\{ \frac{2\pi\Delta n_{eff}}{\lambda} L \right\}, \quad (1)$$

donde $\Delta n_{eff} = n_{rclad,eff} - n_{ch,eff}$. I_{ch} y I_{rclad} son las intensidades de los haces propagados en el agujero central y en el anillo de vidrio, respectivamente; Δn_{eff} , $n_{ch,eff}$, y $n_{rclad,eff}$ son la diferencia de índice de refracción efectivo (ERID, por sus siglas en inglés), el ERI del agujero

central, y el ERI del anillo de vidrio, respectivamente. L y λ son la longitud del CHCF y la longitud de onda de la luz, respectivamente.

El rango espectral libre (FSR , por sus siglas en inglés) de este patrón de interferencia está dado por $FSR = \lambda^2 / \Delta n_{eff} L$, y esto puede usarse para obtener una relación lineal entre la frecuencia espacial (ξ) y la longitud (L) [19].

$$\xi = \frac{1}{FSR} = \frac{1}{\lambda^2} \Delta n_{eff} L, \quad (2)$$

donde la frecuencia espacial es el número de ciclos por nm. Por lo tanto, la Ecuación (2) puede ser usada para determinar el Δn_{eff} utilizando diferentes longitudes (L) de CHCF [19].

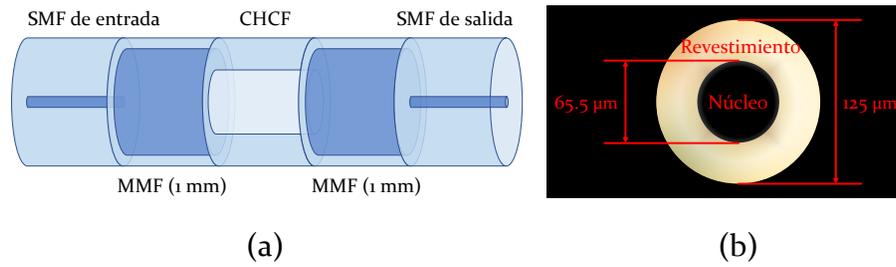


Figura 2.6 (a) Diagrama esquemático de un MZI basado en una sección de CHCF y dos secciones de MMF (1 mm), (b) Corte transversal de una CHCF.

Referencias

- [1] F. L. Pedrotti, L. M. Pedrotti, and L. S. Pedrotti, *Introduction to optics*. Cambridge University Press, 2017.
- [2] W.-H. Tsai and C.-J. Lin, "A novel structure for the intrinsic Fabry-Perot fiber-optic temperature sensor," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, no. 5, pp. 682-686, 2001.
- [3] S.-H. Kim, J.-J. Lee, D.-C. Lee, and I.-B. Kwon, "A study on the development of transmission-type extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor," *Journal of lightwave technology*, vol. 17, no. 10, pp. 1869-1874, 1999.
- [4] Y.-J. Rao, "Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors," *Optical Fiber Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 227-237, 2006.
- [5] D. Hunger, T. Steinmetz, Y. Colombe, C. Deutsch, T. W. Hänsch, and J. Reichel, "A fiber Fabry-Perot cavity with high finesse," *New Journal of Physics*, vol. 12, no. 6, p. 065038, 2010.
- [6] J. Sirkis, D. Brennan, M. Putman, T. Berkoff, A. Kersey, and E. Friebele, "In-line fiber etalon for strain measurement," *Optics letters*, vol. 18, no. 22, pp. 1973-1975, 1993.
- [7] Z. Ran, Y. Rao, J. Zhang, Z. Liu, and B. Xu, "A miniature fiber-optic refractive-index sensor based on laser-machined Fabry-Perot interferometer tip," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 23, pp. 5426-5429, 2009.
- [8] X. Wan and H. F. Taylor, "Intrinsic fiber Fabry-Perot temperature sensor with fiber Bragg grating mirrors," *Optics letters*, vol. 27, no. 16, pp. 1388-1390, 2002.
- [9] Y. Zhang, X. Chen, Y. Wang, K. L. Cooper, and A. Wang, "Microgap multicavity Fabry-Pérot biosensor," *Journal of lightwave technology*, vol. 25, no. 7, pp. 1797-1804, 2007.
- [10] J.-R. Zhao, X.-G. Huang, W.-X. He, and J.-H. Chen, "High-resolution and temperature-insensitive fiber optic refractive index sensor based on Fresnel reflection modulated by Fabry-Perot interference," *Journal of lightwave technology*, vol. 28, no. 19, pp. 2799-2803, 2010.
- [11] H. Fu *et al.*, "Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer," *Applied optics*, vol. 47, no. 15, pp. 2835-2839, 2008.
- [12] B. H. Lee *et al.*, "Interferometric fiber optic sensors," *sensors*, vol. 12, no. 3, pp. 2467-2486, 2012.
- [13] L.-b. Yuan, L.-m. Zhou, and J.-s. Wu, "Fiber optic temperature sensor with duplex Michelson interferometric technique," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 86, no. 1-2, pp. 2-7, 2000.
- [14] H. Y. Choi, M. J. Kim, and B. H. Lee, "All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber," *Optics Express*, vol. 15, no. 9, pp. 5711-5720, 2007.
- [15] Z. Tian *et al.*, "Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 8, pp. 626-628, 2008.
- [16] P. Lu, L. Men, K. Sooley, and Q. Chen, "Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature," *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 13, p. 131110, 2009.

- [17] L. V. Nguyen, D. Hwang, S. Moon, D. S. Moon, and Y. Chung, "High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch," *Optics express*, vol. 16, no. 15, pp. 11369-11375, 2008.
- [18] J.-J. Zhu, A. P. Zhang, T.-H. Xia, S. He, and W. Xue, "Fiber-optic high-temperature sensor based on thin-core fiber modal interferometer," *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 9, pp. 1415-1418, 2010.
- [19] S. Marujo-García, I. Hernández-Romano, M. Torres-Cisneros, D. A. May-Arriola, V. P. Minkovič, and D. Monzón-Hernández, "Temperature-independent curvature sensor based on in-fiber Mach-Zehnder interferometer using hollow-core fiber," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 15, pp. 4166-4173, 2020.

Capítulo 3

La suerte favorece a los valientes.

En este capítulo se presenta información relacionada con las técnicas de fabricación empleadas para el desarrollo de los sensores abordados más adelante, también recopila información estadística de la caracterización de estos y, por último, haciendo uso de la información estadística antes mencionada, se simula —usando elemento finito y simulación numérica— el comportamiento general de todos los dispositivos utilizados durante esta tesis. Los datos, información y comportamiento presentados en este capítulo, aplican para todos y cada uno de los sensores fabricados. Es importante mencionar que la información, presentada en este capítulo de tesis, está conformada por los datos más recientes y actualizados al momento de ser escrita esta tesis.

Fabricación, Caracterización y Simulación de un MZI basado en CHCF

3.1 Fabricación

No sería equivocado afirmar que la pieza clave de este trabajo es el minucioso y bien controlado proceso de fabricación. Todos los dispositivos fabricados durante esta investigación dependen de un arreglo de fabricación diseñado para cortar diversas longitudes de CHCF con suma precisión y alta repetibilidad. Dicho arreglo consiste en una etapa de traslación lineal la cual, en su parte superior, tiene una placa de acero con una ranura en V donde, con ayuda de un par de imanes de neodimio, un segmento de SMF es fijado, mientras que la punta (la parte de la fibra que será cortada) descansa de forma estable en una cortadora convencional de fibra, véase la Figura 3.1.

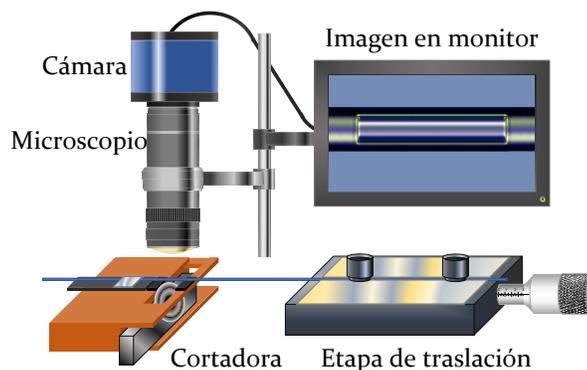


Figura 3.1 Arreglo experimental para cortar segmentos de MMF y CHCF de forma precisa.

Posteriormente, la punta (perfectamente cortada) de la SMF se monta en los sujetadores magnéticos de una empalmadora de fibra convencional, para ser empalmada con una MMF o

una CHCF. Una vez hecho el empalme, la fibra óptica es devuelta y fijada en su posición de inicio en la cortadora de fibra, siendo así que la sección recientemente empalmada (a la que simplemente llamaremos “el empalme”) quedará alineada justo por encima de la navaja, lo cual corresponde a la posición cero. Posteriormente, se girará el tornillo micrométrico de la etapa de traslación a una posición específica, previamente calculada, lo que corresponderá con una longitud de MMF o CHCF determinada, y de este modo la fibra (MMF o CHCF) será nuevamente cortada de forma precisa usando la cortadora.

Todos estos pasos se llevan a cabo sin remover los imanes que mantienen la SMF firmemente sujeta a la etapa de traslación. Adicionalmente, se utiliza un microscopio conectado a una computadora para observar la posición inicial y final de las fibras ópticas, lo que mejora considerablemente el control sobre el proceso de corte.

Antes de describir a detalle el proceso de fabricación del MZI, en la Tabla 3.1 se mostrarán las características de las fibras utilizadas durante este trabajo.

Tabla 3.1 Parámetros de las fibras ópticas.

| Tipo | SMF | MMF | CHCF |
|------------------|--------|--------|---------------|
| ∅ revestimiento | 125 μm | 125 μm | 125 μm |
| ∅ núcleo | ~9 μm | 105 μm | 65.5 μm |
| RI revestimiento | 1.443 | 1.443 | 1.443 |
| RI núcleo | 1.452 | 1.462 | 1 |
| Longitud | 50 cm | 1 mm | De 0.3 a 3 mm |

El proceso completo de fabricación del MZI debe separarse en dos etapas para mejorar la tasa de éxito, como se muestra en la Figura 3.2. La primera parte de este proceso consiste en empalmar una SMF a una MMF, para posteriormente cortar una sección de 1 mm de longitud de dicha MMF. Esta sección de MMF funcionará como un divisor de haz para el interferómetro.

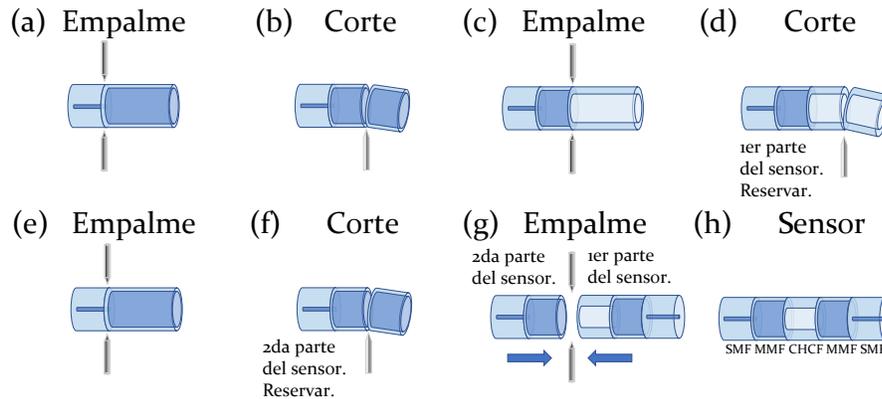


Figura 3.2 Proceso de fabricación del MZI: Fabricación de la primera parte (a)-(d), Fabricación de la segunda parte (e) y (f), Ensamble del MZI (g) y (h).

Después de eso, la MMF se empalmará a una CHCF, y se cortará una sección de dicha CHCF a una longitud previamente seleccionada —se fabricaron longitudes de 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm— ver la Figura 3.2(a)-(d). La segunda parte del proceso consistió en construir otro divisor de haz empalmando y cortando una sección de MMF a una de SMF, como

se muestra en la Figura 3.2(e) y (f). Finalmente, para completar el proceso de fabricación del MZI, fue necesario empalmar ambas partes como se observa en la Figura 3.2(g) y (h).

La Figura 3.3 muestra una vista lateral del dispositivo fabricado, así como las secciones de empalme entre la MMF y la CHCF.



Figura 3.3 Vista lateral del dispositivo fabricado y la sección de empalme entre la MMF y la CHCF.

Es importante hacer mención que se desarrolló un programa especial para minimizar las pérdidas de potencia óptica por empalmes y evitar la deformación de la CHCF, lo que podría modificar la amplitud de los modos de revestimiento (ocasionando un contraste pobre en el patrón de interferencia). Una empalmadora de fusión de marca Fitel, modelo sl79, se utilizó durante todo el proceso de fabricación, y los parámetros del programa se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Parámetros del programa de empalme (Fitel, modelo sl79).

| Parámetro de empalme | Valores del parámetro |
|----------------------------------|-----------------------|
| 1sr Arc start power ¹ | 10 |
| 1st Arc end power ¹ | 40 |
| 1st Arc duration (ms) | 1500 |
| Cleaning offset/arc ¹ | 10 |
| Cleaning duration | 100 |
| Pre Arc duration (ms) | 160 |
| Gap (μm) | 22 |
| Z push length (μm) | 15 |
| Z pull start time (ms) | 500 |
| Z pull length (μm) | 10 |
| Alignment type | Cladding |
| Axis offset (μm) | 0 |

¹El programa de la empalmadora no menciona las unidades en las que se mide la potencia del arco. Solo es posible seleccionar valores desde 0 hasta 255.

3.2 Caracterización

Una vez fabricados todos los dispositivos, será necesario caracterizarlos. Esto se logró mediante el arreglo experimental mostrado en la Figura 3.4. El arreglo experimental consta de un diodo superluminiscente (SLD, por sus siglas en inglés) centrado a 1550 nm con un ancho espectral de 160 nm. Luz proveniente del SLD fue acoplada a un MZI usando una fibra SMF, una vez que la señal atravesaba el dispositivo, esta era entregada a un OSA (Anritsu MS9740A) por

medio de otra SMF. Para obtener resultados estables, cada sensor se montó (protegido con un aislante térmico) en una celda Peltier (Echotherm IC20 Digital, Torrey Pines) a una temperatura constante (30 °C) esto con la finalidad de reducir los errores en la medición por cambios en la temperatura ambiental.

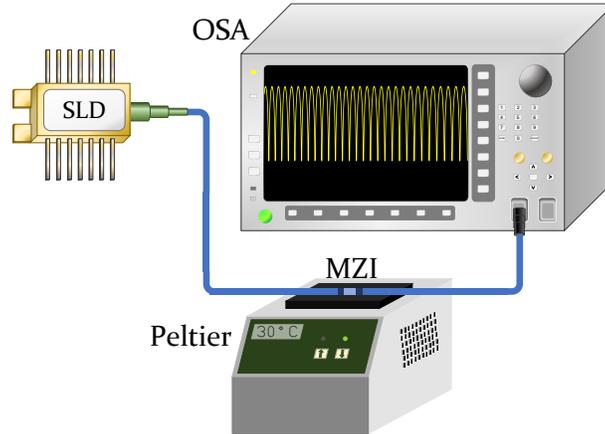


Figura 3.4 Arreglo experimental para caracterizar los MZI.

Un espectro típico de un MZI puede observarse con detalle en la Figura 3.5, para este caso se seleccionó un dispositivo con una longitud de 1 mm de CHCF, centrado a una longitud de onda de 1570 nm, con aproximadamente 13 dB de pérdidas por inserción.

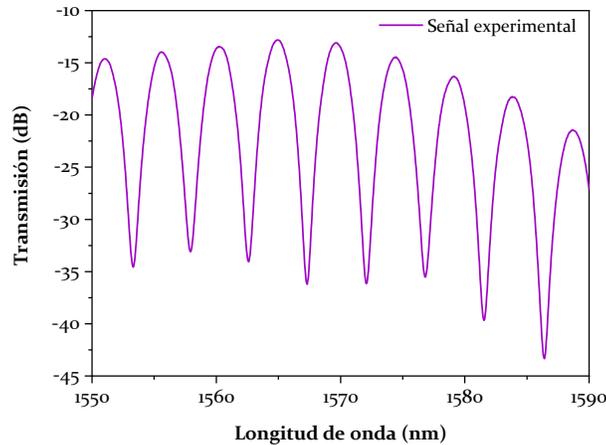


Figura 3.5 Espectro experimental de un MZI de 1 mm de longitud de CHCF.

Se tomaron los patrones de interferencia de todos los MZI fabricados con diferentes longitudes de CHCF, como puede observarse en la Figura 3.6(a). Por medio de la frecuencia espacial podemos saber la cantidad de modos propagándose a través del dispositivo. La frecuencia espacial de cada uno de los MZI puede obtenerse al aplicarse sobre su señal la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), ver la Figura 3.6(b). Es posible observar cómo al momento de incrementar el tamaño de la CHCF la distancia entre valles del *FSR* se reduce, lo que nos indica de un cambio en las frecuencias de las dos señales que

interfieren entre sí, la frecuencia espacial al ser el valor inverso del FSR , como se observa en la Ecuación (2), crecerá conforme la cavidad aumente de tamaño.

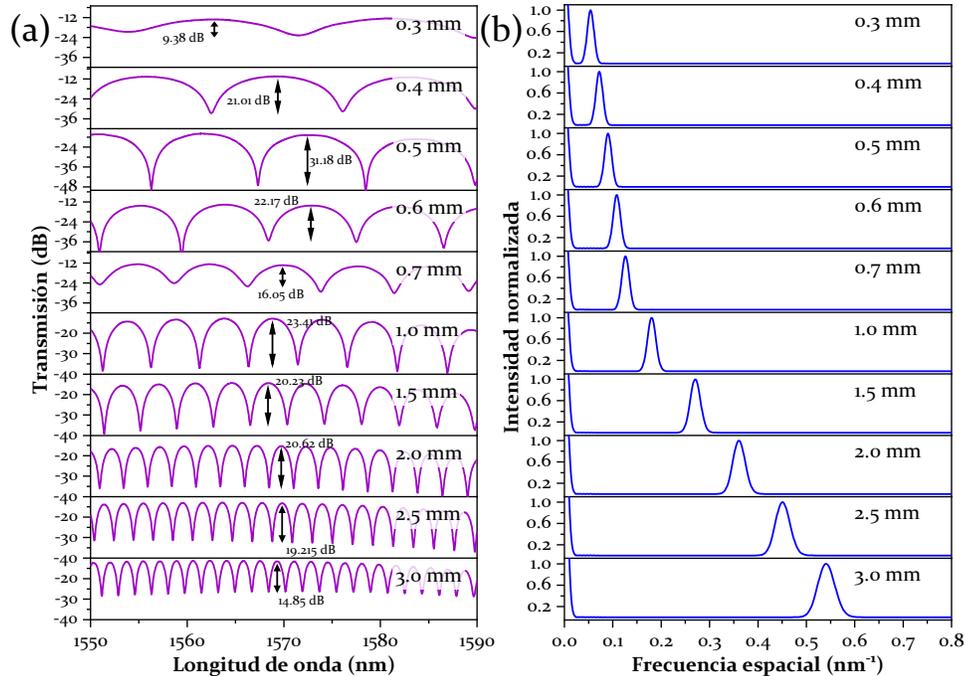


Figura 3.6 Se fabricaron más de treinta MZIs con diferentes longitudes de CHCF (a) Espectro de transmisión. (b) FFT del espectro de transmisión.

Al momento de graficar la frecuencia espacial de cada dispositivo contra sus respectivas longitudes de CHCF podemos conocer la pendiente (ξ/L), la cual tiene un valor de $0.1873 \pm 9.8176E-4$ (nm)⁻¹/mm, ver la Figura 3.7. También, es posible calcular el Δn_{eff} usando dicha pendiente, la longitud de onda central del espectro (1570 nm, ver la Figura 3.6(a)), y la Ecuación (2), lo que resulta en un $\Delta n_{eff} = 0.4620 \pm 1.3225E - 3$. Por otra parte, al conocer el Δn_{eff} y utilizando la formula $L = \lambda^2 / \Delta n_{eff} FSR$, donde el FSR se mide directamente del analizador de espectros ópticos (OSA, por sus siglas en inglés) es posible conocer la longitud física de los MZIs sin la necesidad de medirlos con el microscopio. En la Figura 3.6(b), la intensidad que se observa en la frecuencia espacial cero (el extremo izquierdo de la gráfica) está asociada al modo fundamental, es decir, el modo que se propaga a través del centro hueco de la CHCF, mientras que los otros picos predominantes que aparecen están relacionados con modos de propagación específicos entre los posibles modos de revestimiento. Es importante hacer la aclaración de que otros picos están presentes, lo que nos da una pista de que más de un modo puede llegar a existir en la cavidad formada por la CHCF, pero sus amplitudes son tan pequeñas comparadas con la intensidad de los picos predominantes que tienen poco o nulo efecto al momento de producirse la interferencia, por lo que se considera que su presencia es insignificante. Por su parte, el batido entre los dos modos predominantes será el que genere el patrón de interferencia, y dado que la envolvente de este patrón no muestra ninguna modulación adicional queda demostrado que solo dos modos interfieren en estos MZIs.

En este punto era imperante conocer la reproducibilidad de cada dispositivo, por lo que se llevaron a cabo pruebas adicionales para verificar el error de fabricación de los MZI. Esto

significa que se tenía el interés de calcular el porcentaje de error producido al momento de cortar longitudes específicas de CHCF, para dicho propósito se utilizó nuevamente el arreglo experimental mostrado en la Figura 3.4, el cual permite investigar el *FSR* usando el espectro de transmisión de cada MZI. Es importante mencionar, que es posible calcular la longitud de un MZI utilizando $L = \lambda^2 / \Delta n_{eff}(FSR)$.

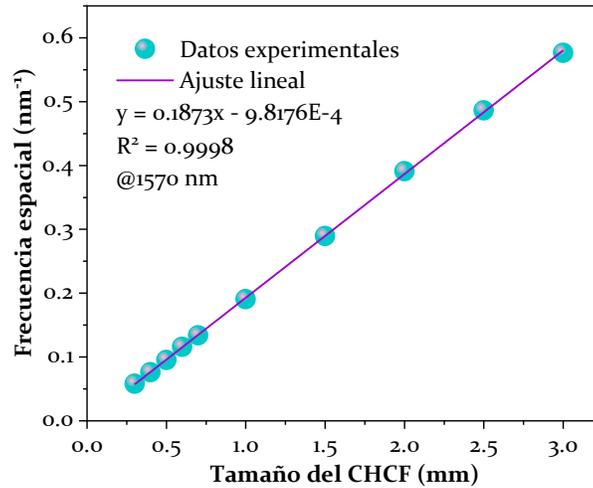


Figura 3.7 Variación de la frecuencia espacial en función de las longitudes de CHCF.

No menos de 30 MZI de cada longitud se fabricaron para estimar cada error de fabricación (error porcentual) los cuales se midieron con un microscopio y se analizaron sus espectros de salida, como se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Error de fabricación para cada longitud.

| Longitud (mm) | <i>FSR</i> promedio (nm) | Frecuencia espacial (nm ⁻¹) | Error de longitud de fabricación (mm) ¹ | Error de fabricación ² (%) |
|------------------|--------------------------|---|--|---------------------------------------|
| 0.3 | 17.06 | 0.05799 | 0.0040 | 1.397 |
| 0.4 | 13.16 | 0.07599 | 0.0110 | 2.646 |
| 0.5 | 9.94 | 0.09532 | 0.0120 | 2.369 |
| 0.6 | 8.45 | 0.11598 | 0.0140 | 2.280 |
| 0.7 | 7.41 | 0.13398 | 0.0080 | 1.178 |
| 1.0 | 5.25 | 0.19045 | 0.0355 | 3.545 |
| 1.5 | 3.45 | 0.28960 | 0.0557 | 3.713 |
| 2.0 | 2.56 | 0.39092 | 0.0625 | 3.125 |
| 2.5 | 2.06 | 0.48614 | 0.0472 | 1.888 |
| 3.0 | 1.73 | 0.57635 | 0.0256 | 0.876 |
| Promedio: | - | - | 0.0275 | 2.302 |

¹Error absoluto del proceso de fabricación. ²Porcentaje de error relativo a la longitud del sensor.

La columna 4 muestra los errores de longitud de fabricación y el promedio de estos valores es <30 μm, lo que significa que el error es similar para todas las longitudes que se cortaron. La columna 5 indica los porcentajes de error de todas las longitudes, como se mencionó

anteriormente, esto relaciona las longitudes deseadas que requieren ser cortadas con el error existente en el proceso de corte. Por lo tanto, puede observarse que el porcentaje de error disminuye conforme la longitud del CHCF incrementa, ya que el error de longitud de fabricación es casi el mismo para todas las longitudes.

Es posible que este error en el proceso de fabricación provenga de las tolerancias en los elementos y herramientas utilizados; solo por mencionar algunos de ellos: etapa de traslación (mínimo movimiento incremental alcanzable, 10 μm , desviación angular, <150 μrad , juego, <3 μm); cortadora (ángulo de corte, <3°); posicionamiento de la fibra; alineación del empalme respecto a la navaja de la cortadora (posición cero). Es importante mencionar que se fabricaron MZIs con longitudes de CHCF menores a 0.3 mm y mayores a 3 mm, pero para los primeros, los errores de fabricación los hacían muy variables en tamaño, y para los segundos, sus contrastes eran menores a 10 dB.

3.3 Simulación

Una vez que se conoce el valor de la pendiente es posible simular los espectros de estos MZIs para futuras aplicaciones, también es posible encontrar los modos de propagación de la luz que están interfiriendo entre sí para crear dicho espectro. Es importante mencionar que, para obtener resultados consistentes, los métodos estadísticos aplicados anteriormente, para conocer la precisión con la que se fabricaba cada dispositivo, serán fundamentales.

3.3.1 Simulación basada en los resultados experimentales de los posibles modos propagados en la CHCF

Para realizar las simulaciones se utilizó un programa basado en elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés), específicamente se utilizó el programa comercial COMSOL Multiphysics para simular la sección transversal de la CHCF con el propósito de poder calcular el ERI de los modos de propagación. En este caso, para el análisis de modos débilmente guiados, se usaron condiciones de frontera estrictas. En la computación numérica, las condiciones de frontera son utilizadas para simular la interacción que existe entre el dominio del problema (su límite) y el resto del mundo. Existen diversos tipos de condiciones de frontera, por ejemplo, las condiciones de frontera fijas, de flujo constante, periódicas o de dispersión. Teniendo cada una de ellas un uso distinto.

Por ejemplo, las condiciones de frontera fijas proporcionan una superficie con una reflexión perfecta. Las condiciones de frontera de flujo constante se utilizarán para simular algo como una fuente de corriente constante. Ambas condiciones de frontera son esencialmente el límite del mundo, y no hay más interacción con el mundo exterior a través de este límite. Las condiciones de frontera periódicas se utilizan para simular grandes estructuras repetitivas. Sin embargo, en situaciones en las que el resto del mundo está vacío, aparte de la estructura estudiada, se utilizan las condiciones de frontera de dispersión.

Una condición de frontera de dispersión (SBC, por sus siglas en inglés) es una frontera que es transparente para todas las ondas salientes del modelo en un límite que se encuentra infinitamente lejos. Esto muchas veces no es posible, por lo que cuando se utiliza este tipo de fronteras en simulaciones reales con distancias “ligeramente inferiores” al infinito, no se comportan muy bien. En general, funcionan bastante bien para las ondas planas y esféricas que se desplazan de forma normal a la frontera, sin embargo, a medida que el ángulo se desvía de la normal se producen más reflexiones en la frontera.

Un método para evitar esto es utilizando una capa perfectamente adaptada (PML, por sus siglas en inglés) alrededor del borde del dominio del problema a estudiar para reducir la amplitud de la onda saliente antes de que llegue a la frontera. Estas condiciones de frontera funcionan muy bien para una amplia gama de ángulos de incidencia. De este modo, cuando las reflexiones vuelven al problema estudiado son varias veces menos intensas y no afectan ni interactúan negativamente con la simulación. Las capas perfectamente adaptadas también tienen la ventaja de absorber las ondas evanescentes que pueden producirse cerca de las estructuras en el dominio del problema.

Por lo que podríamos decir que la PML no es estrictamente una condición de frontera, sino un dominio o región que añadimos a lo largo del exterior del modelo con la capacidad de absorber todas las ondas salientes. Así pues, desde un punto de vista físico, la LMP puede considerarse en realidad como un material con una absorción casi perfecta y que no interactúa con el dominio de estudio. Siendo estos los motivos de utilizar una PML cómo frontera entre el modelo y el espacio circundante.

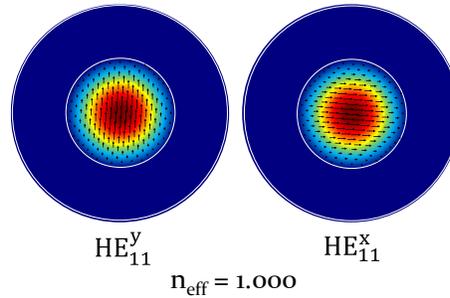


Figura 3.8 Distribución de los modos de campo en el centro de la CHCF.

De los resultados experimentales nosotros sabemos que $\Delta n_{eff} = 0.4620$, por lo cual, nos dimos a la tarea de buscar dos modos que cumplieran con esta condición. Uno de los modos que interfiere se propaga por el agujero y el otro por el anillo de la CHCF. La primera simulación que hicimos fue la del modo fundamental (LP_{01} , HE_{11}^x y HE_{11}^y , [1]) en el agujero de la fibra, ya que este es el modo más probable en propagarse, para lo cual se empleó la ecuación de Sellmeier [2, 3] para calcular el índice de refracción de la sílice. Esta información se introdujo en la simulación basada en FEM y encontramos que $n_{ch,eff} = 1.0000$, como se puede observar en la Figura 3.8. Continuando con este análisis encontramos que los modos LP_{11} (TE_{01} , TM_{01} , $HE_{21} \times 2$) [4] también cumplen con esta condición ($n_{rclad,eff} = 1.4444$), ver la Figura 3.9. Por lo tanto, de todos los diferentes modos que pueden propagarse en el anillo de vidrio, el modo TE_{01} mostrado en la Figura 3.9 fue seleccionados por cumplir la condición experimental $\Delta n_{eff} = 0.4620$, el cual corresponde a un valor de $n_{rclad,eff} = 1.4444$. Al usar este ERI, se calculó un valor de $\Delta n_{eff} = 0.4444$, que es solamente 3.96% menor que el valor obtenido experimentalmente. Es importante remarcar que esta estructura, donde dos modos predominantes interfieren, es similar a un interferómetro de microfibra [5], donde dos modos son excitados (HE_{11} y HE_{12}). Siendo uno de estos el modo fundamental que viaja en el agujero central de la CHCF, y el otro es el modo de revestimiento que se propaga a través del anillo de sílice. La diferencia principal entre esta estructura y la nuestra radica en que para fabricar el

interferómetro de microfibra se requiere de una maquina adelgazadora, mientras que para construir la estructura propuesta se necesita de una empalmadora de fibra convencional.

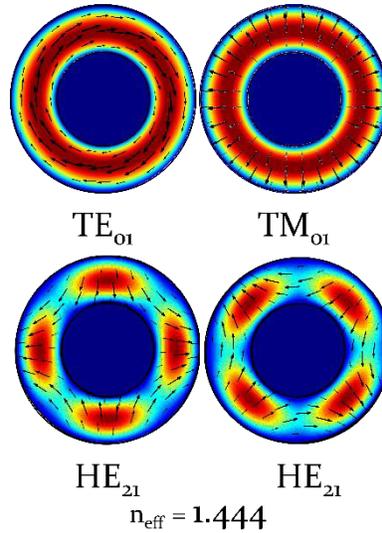


Figura 3.9 Todos los modos LP_{1l} que cumplen la condición $n_{rclad,eff} = 1.444$.

Con el objetivo de mejorar nuestra comprensión sobre el funcionamiento de este sensor, se simuló un MZI en propagación para las longitudes de onda experimental que muestran un máximo (1566.36 nm) y un mínimo (a 1571.46 nm) en la transmisión para el sensor de 1 mm de CHCF. Las longitudes de onda se tomaron de la Figura 3.5, lo que significa que se utilizó información experimental en la simulación para obtener las diferentes distribuciones de campo eléctrico a lo largo del sensor.

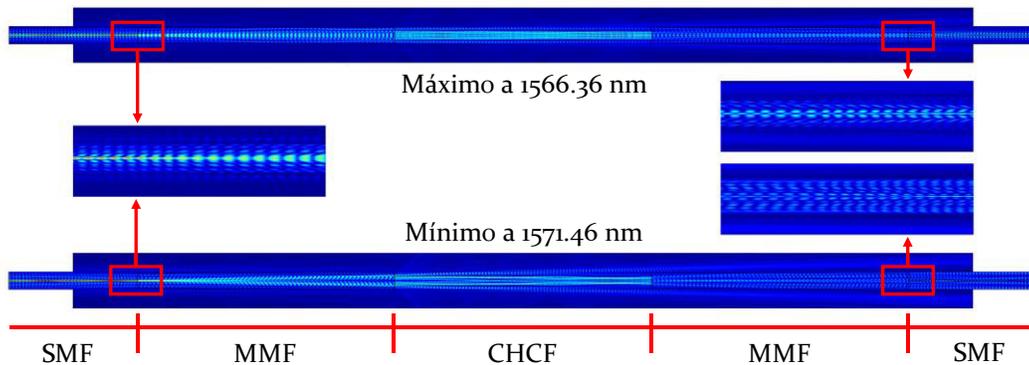


Figura 3.10 Simulación FEM de la distribución del campo eléctrico del MZI de 1 mm de longitud de CHCF. Las longitudes de onda (correspondientes a un máximo y un mínimo) fueron obtenidas de datos experimentales.

El RI del núcleo de la fibra multimodo fue determinado usando la apertura numérica de una MMF (105/125) bajo el supuesto de que la diferencia relativa de RI entre el núcleo y el revestimiento es menor al 1% (para cumplir las condiciones de la aproximación de guiado débil)

[6, 7]. Es posible observar estas simulaciones en la Figura 3.10, que para ambos casos, cuando la luz entra en la MMF, solo los modos LP₁₁ pueden ser excitados debido a la simetría circular del modo fundamental de la SMF [8, 9], y por lo tanto, la MMF funciona como un divisor de haz. Cuando la luz viaja a través de la CHCF, parte de esa luz se propaga en el agujero central (aire), y la luz restante se propaga en el anillo de sílice, que introduce una diferencia de camino óptico entre los modos guiados que tienen permitido existir en ambas regiones. Existe una gran diferencia entre las CHCF de ambas simulaciones, la máxima transmisión muestra mayor confinamiento de la luz, mientras que la mínima transmisión exhibe haces de luz escapando del confinamiento de la CHCF. La siguiente sección de MMF recombina estos modos y crea una señal de interferencia en la SMF de salida. A la salida de ambas simulaciones es posible observar que la máxima transmisión tiene más luz comparado con la mínima transmisión, por lo que, usando las longitudes de onda experimentales, así como el ERI de los modos, mostramos que el dispositivo funciona como un MZI en el que dos modos predominantes interfieren.

3.3.2 Simulación del MZI a diferentes temperaturas usando el modo fundamental del hueco de la fibra CHCF y un modo del revestimiento.

Es bien sabido que el RI de la sílice sufre modificaciones con los cambios de temperatura, y el coeficiente termo óptico (TOC, por sus siglas en inglés) (α_{TOC}) ($8.5 \times 10^{-6}/K$) [10] se usa para calcular el incremento en RI conforme la temperatura es elevada ($n = n_0 + \alpha_{TOC}\Delta T$, donde n_0 es el RI dado por la ecuación de Sellmeier [7] a 20 °C, y ΔT es el incremento de temperatura). Así, cuando el MZI es sometido a cambios de temperatura, el RI de la sílice se modifica, ocasionando que el ERI del modo que viaja a través del anillo de vidrio también cambie, este valor fue calculado usando el programa basado en FEM, ver Figura 3.11(a).

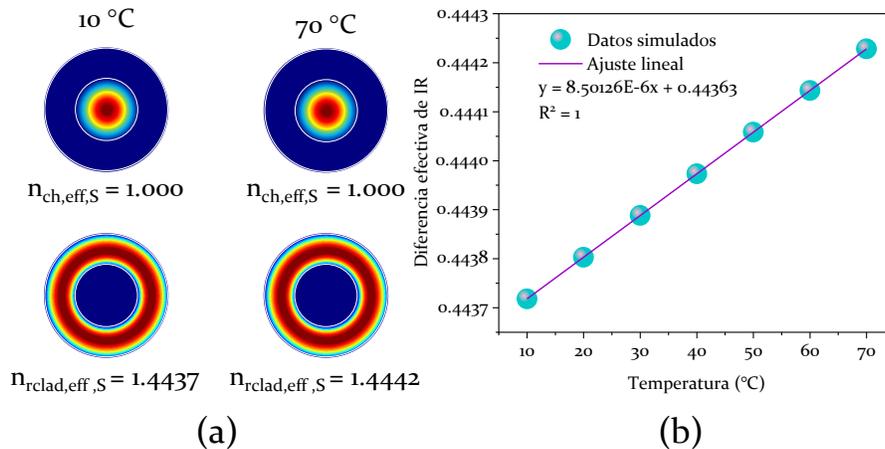


Figura 3.11 (a) Distribución de campo del modo fundamental y modos de revestimiento a dos temperaturas distintas (10 y 70 °C), (b) Simulación de las variaciones de la diferencia de índice de refracción efectivo (ERID) a diferentes temperaturas.

Debido a que cambios de temperatura menores a 80 °C difícilmente cambiarían el RI del aire, se asume que el ERI del modo fundamental (el modo que viaja en el aire) será el mismo durante la simulación. La diferencia de ERI (ERID) ($\Delta n_{eff} = n_{rclad,eff} - n_{ch,eff}$) se calcula para diferentes temperaturas, y es posible encontrar una relación lineal entre ellas la cual se muestra en la Figura 3.11(b). Como se mencionó anteriormente, la Ecuación (1) describe el espectro de

transmisión de este MZI, donde el valor de L y ERID se incrementan conforme la temperatura se eleva, y el coeficiente de expansión térmica (TEC, por sus siglas en inglés) (α_{TEC}) ($4.1 \times 10^{-7}/^{\circ}C$) [11] se utiliza para calcular los cambios de longitud ($L = L_0 + L_0\alpha_{TEC}\Delta T$). Los diferentes valores de L_0 utilizados en esta simulación comienzan desde 0.5 hasta 3 mm en incrementos de 0.5 mm. Es posible simular el espectro de salida del MZI usando la Ecuación (1), los cambios de ERID de la Figura 3.11(b), y los valores de L dependientes de la temperatura (ver la Figura 3.12).

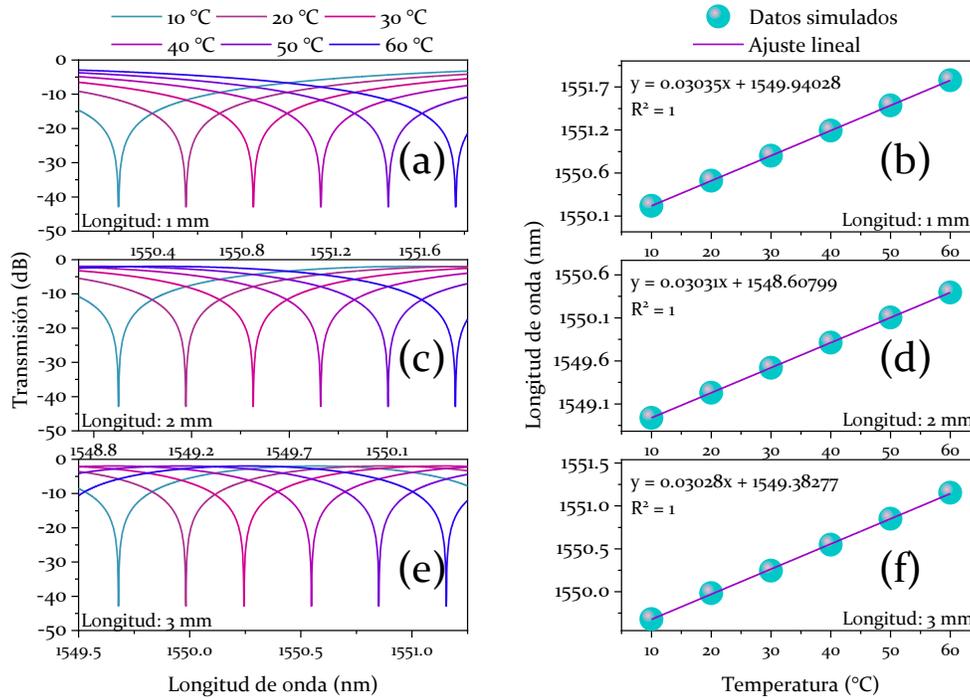


Figura 3.12 Simulación numérica del espectro de transmisión del MZI a diferentes temperaturas usando longitudes (L_0) de 1 mm (a), 2 mm (c), y 3 mm (e). El corrimiento en longitud de onda de un pico del espectro en función de la temperatura utilizando las longitudes (L_0) de 1 mm (b), 2 mm (d), y 3 mm (f).

Estas simulaciones muestran el corrimiento en longitud de onda que el patrón de interferencias sufre cuando hay cambios de temperatura de 10 a 60 °C en incrementos de 10 °C, para MZI cuyas longitudes (L_0) son 1, 2 y 3 mm, respectivamente, ver la Figura 3.12(a), (c) y (e). La respuesta lineal del MZI y su respuesta a temperatura se muestran en la Figura 3.12(b), (d) y (f). La Tabla 3.4 resume estos resultados e incluye la respuesta a temperatura de los dispositivos cuyas longitudes son 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 1.5 y 2.5 mm. Es evidente que el ancho espectral libre de cada sensor disminuye conforme la longitud del sensor crece, dejando en evidencia que las sensibilidades a temperatura de cada dispositivo son muy similares. Este último resultado no es tan evidente ya que se podría pensar que conforme se incremente la longitud de la CHCF la sensibilidad del sensor se incrementaría, pero esto no sucede en las simulaciones ni en los resultados experimentales.

Para un mejor entendimiento de como el cambio de temperatura afecta la longitud e índice de refracción del MZI, por favor remítase al Anexo I.

Tabla 3.4 Simulación de los MZI usando diferentes longitudes.

| Longitud de CHCF (mm) | FSR (nm) | Respuesta (nm/°C) |
|----------------------------------|---------------------|------------------------------|
| 0.3 | 18.1132 | 0.03028 |
| 0.4 | 13.5248 | 0.03032 |
| 0.5 | 10.7912 | 0.03029 |
| 0.6 | 8.9768 | 0.03029 |
| 0.7 | 7.6848 | 0.03031 |
| 1.0 | 5.3672 | 0.03032 |
| 1.5 | 3.5719 | 0.03029 |
| 2.0 | 2.6765 | 0.03031 |
| 2.5 | 2.1401 | 0.03030 |
| 3.0 | 1.7828 | 0.03029 |

Referencias

- [1] C.-H. Lai *et al.*, "Modal characteristics of antiresonant reflecting pipe waveguides for terahertz waveguiding," *Optics express*, vol. 18, no. 1, pp. 309-322, 2010.
- [2] F. Schneider, J. Draheim, R. Kamberger, and U. Wallrabe, "Process and material properties of polydimethylsiloxane (PDMS) for Optical MEMS," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 151, no. 2, pp. 95-99, 2009.
- [3] I. H. Malitson, "Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica," *Josa*, vol. 55, no. 10, pp. 1205-1209, 1965.
- [4] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, 4 th ed. McGraw-Hill, 2011, p. 654.
- [5] I. Hernández-Romano, D. Monzón-Hernández, C. Moreno-Hernández, D. Moreno-Hernandez, and J. Villatoro, "Highly sensitive temperature sensor based on a polymer-coated microfiber interferometer," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 24, pp. 2591-2594, 2015.
- [6] Y. Jaluria and Y. Jaluria, "Manufacture of optical fibers: drawing and coating processes," *Advanced Materials Processing and Manufacturing*, pp. 239-286, 2018.
- [7] D. Gloge, "Weakly guiding fibers," *Applied optics*, vol. 10, no. 10, pp. 2252-2258, 1971.
- [8] W. S. Mohammed, A. Mehta, and E. G. Johnson, "Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no. 2, p. 469, 2004.
- [9] Q. Wang, G. Farrell, and W. Yan, "Investigation on single-mode–multimode–single-mode fiber structure," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 5, pp. 512-519, 2008.
- [10] J. Komma, C. Schwarz, G. Hofmann, D. Heinert, and R. Nawrodt, "Thermo-optic coefficient of silicon at 1550 nm and cryogenic temperatures," *Applied Physics Letters*, vol. 101, no. 4, p. 041905, 2012.
- [11] X. Li, S. Lin, J. Liang, Y. Zhang, H. Oigawa, and T. Ueda, "Fiber-optic temperature sensor based on difference of thermal expansion coefficient between fused silica and metallic materials," *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 155-162, 2011.

Capítulo 4

El trabajo duro te pondrá donde la suerte pueda encontrarte.

En este capítulo se abordará el uso del dispositivo MZI basado en CHCF como sensor de curvatura. Se presentará información relacionada con las adaptaciones técnicas que se le hicieron al sensor para usarlo con los fines antes mencionados. Se abordará el principio de funcionamiento, así como el arreglo experimental utilizado. Este capítulo fue escrito con los datos e información más actuales y precisos para el momento en que se realizó la publicación JCR (en la que se basa este apartado) por lo que es posible que existan discrepancias en datos e información presentados en el Capítulo 3.

Aplicación del MZI como sensor de curvatura

4.1 Introducción

La curvatura es un parámetro crucial en la industria, con innumerables aplicaciones en áreas como la ingeniería mecánica [1], la ingeniería estructural [2], y los brazos robóticos [3] que requieren sistemas de monitoreo constante para medir la deformación por flexión. Los sensores de flexión, o curvatura, de fibra óptica han sido una excelente opción para abordar esa cuestión, hasta ahora se han utilizado diversos esquemas basados en rejillas de Bragg (FBG) [4], rejillas de fibra de periodo largo (LPG) [5], interferencia modal [6-8], e interferómetros Mach-Zehnder [9-12] (utilizando diferentes fibras especiales o técnicas de empalme inusuales).

Cabe señalar que hay dos parámetros críticos en un sensor de flexión de fibra, la sensibilidad y el rango de curvatura, que deben considerarse antes de utilizarlos en una aplicación. Por ejemplo, Y. Zhang et al. [4] demostraron un sensor basado en un FBG, que fue grabado en el núcleo central de una fibra de siete núcleos, exhibió una sensibilidad de curvatura y un intervalo de medición de curvatura de -7.27 dB/m^{-1} y de 0 m^{-1} a 1 m^{-1} , respectivamente. El FBG también se inscribió en una fibra adelgazada bicónica (Taper) abrupta [13], en este caso el contraste fue monitoreado, mostrando una sensibilidad máxima de 0.1196 dB/m^{-1} (de 0 a 80 m^{-1}). Además, mostraron un sensor de curvatura fabricado por dos LPG (separados por un pequeño segmento de MMF) [14] y su sensibilidad máxima fue de $-21.080 \text{ nm/m}^{-1}$ (de 0.246 a 0.738 m^{-1}). Además, Y. Zhao et al. [6] mostraron un sensor de curvatura de fibra óptica basado en interferencia modal que utilizaba 5 cm de CHCF intercalados entre dos segmentos de SMF; las secciones de empalme se realizaban mediante un taper abrupto. Este dispositivo muestra un rango de medición de curvatura de 0.765 m^{-1} a 3.423 m^{-1} y una sensibilidad de curvatura de (5.05 dB/m^{-1}) . El sensor propuesto por Y. Gong et al. [7], basado en interferencia multimodal, tiene una buena sensibilidad de curvatura $-130.37 \text{ dB/m}^{-1}$, pero un rango dinámico de curvatura muy limitado (de 0.11 m^{-1} a 0.34 m^{-1}).

Por otro lado, se implementó un MZI insertando un segmento de fibra hueca de núcleo anular entre dos secciones de MMF [15], Y. Zhang et al. informan de una respuesta no lineal en todo el intervalo (de 0.55 a 5.405 m^{-1}). Además, se han implementado sensores de curvatura basados en

una guía de onda óptica reflectante antirresonante; S. Wang et al. [16] fabricaron un sensor cuya sensibilidad a la curvatura era de -15.33 dB/m^{-1} , y el intervalo de curvatura comienza desde 0 m^{-1} hasta 1 m^{-1} , respectivamente. H. Cheng et al. [17] propusieron un sensor capaz de medir curvatura y temperatura, sus sensibilidades fueron de -4.28 dB/m^{-1} (de 10.72 m^{-1} a 11.60 m^{-1}) y $25.76 \text{ pm/}^\circ\text{C}$, respectivamente. R. Gao et al. [18] fabricaron un sensor de flexión vectorial unidimensional infiltrando dos agujeros de aire simétricos en un PCF de núcleo hueco, sus sensibilidades (para dos direcciones positivas) fueron de 4.86 y -4.84 dB/m^{-1} (de 0 a 0.88 m^{-1}). Sin embargo, la mayoría de los estudios anteriores no mostraban la posibilidad de elegir diferentes rangos de curvatura o sensibilidad mediante la modificación de la estructura del sensor de fibra. Por lo tanto, su aplicación industrial podría estar limitada a problemas específicos en los que se necesita una alta sensibilidad o un amplio rango de curvatura. Además, todos ellos requieren materiales o equipos costosos debido a las complejas técnicas de fabricación.

Aquí proponemos y demostramos experimentalmente un sensor MZI en fibra para medir la curvatura. El sensor se fabricó empalmado una sección de CHCF entre dos secciones de MMF. El dispositivo se fijó a una lámina de acero con la ayuda del polímero polidimetilsiloxano (PDMS, por sus siglas en inglés) para garantizar que la dirección de la curvatura se limitara a un plano. El recubrimiento del dispositivo con polímero lo hace resistente (creando un encapsulado para una aplicación real) y abre la posibilidad de ser fijado a cualquier superficie, sin modificar la respuesta del sensor según nuestros resultados experimentales. Se fabricaron diferentes sensores cambiando la longitud del CHCF, y se caracterizaron midiendo los cambios del contraste de las franjas en función de la curvatura inducida.

El interferómetro fabricado con una longitud de CHCF de 2.5 mm mostró la mayor sensibilidad a la curvatura, $-17.28 \pm 2.30 \text{ dB/m}^{-1}$, en un rango de 1.84 m^{-1} a 2.94 m^{-1} . Simplemente modificando la longitud de CHCF a 1 mm , se puede obtener fácilmente un dispositivo con un rendimiento óptimo, es decir, un sensor con una sensibilidad y un rango de medición de la curvatura adecuados. Su sensibilidad de curvatura fue de $-11.80 \pm 1.30 \text{ dB/m}^{-1}$, en un intervalo de 0.95 m^{-1} a 2.68 m^{-1} . A la señal de salida de este sensor se le aplicó la transformada de Fourier, y el análisis muestra que existe una relación uno a uno entre el contraste y la curvatura sin tener ambigüedades en un rango más amplio (de 0 m^{-1} a 2.94 m^{-1}). Además, el contraste de franjas no cambió durante las pruebas de temperatura (de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ a $90 \text{ }^\circ\text{C}$), lo que demuestra que este dispositivo no se vio afectado por la fluctuación de la temperatura.

4.2 Principio de funcionamiento del MZI como sensor de curvatura

Una de las aplicaciones de este MZI es como sensor de flexión, ya que el modo del núcleo y el modo del revestimiento experimentan diferentes pérdidas por flexión a diferentes curvaturas. En la curvatura cero, las intensidades de cada modo determinan el contraste del patrón de interferencia, según la visibilidad $V = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$. Estas intensidades dependen de la alineación de la fibra óptica y de las pérdidas debidas a la técnica de empalme. Cuando el sensor se dobla, cada modo sufre diferentes pérdidas por flexión haciendo que sus intensidades varíen en la salida. Estos cambios en las intensidades de cada modo modifican la visibilidad y esto produce una variación en el contraste de la señal de salida. Al aumentar la curvatura, las pérdidas por flexión aumentan para cada modo, haciendo que la intensidad de cada modo disminuya, produciendo un cambio en el contraste. Así, este dispositivo puede utilizarse para medir curvatura utilizando el contraste del patrón interferométrico. Más adelante se presentarán los resultados al utilizar el dispositivo como sensor de curvatura.

Las propiedades de flexión de los MZI de fibra se investigaron utilizando el montaje experimental mostrado en la Figura 4.1(a). La SMF de entrada se utilizó para acoplar la luz al dispositivo de fibra óptica desde un SLD (diodo superluminiscente), y la SMF de salida recogió la señal resultante y se midió con un OSA (resolución de longitud de onda de 0.02 nm). Los extremos de la lámina de acero se colocaron en la ranura cuadrada, ver Figura 4.1(b). El espesor de la lámina de acero era de 0.7 mm, mientras que el espesor de la ranura cuadrada era de 1.1 mm. Esto permite que la lámina de acero pueda moverse libremente a lo largo del eje z.

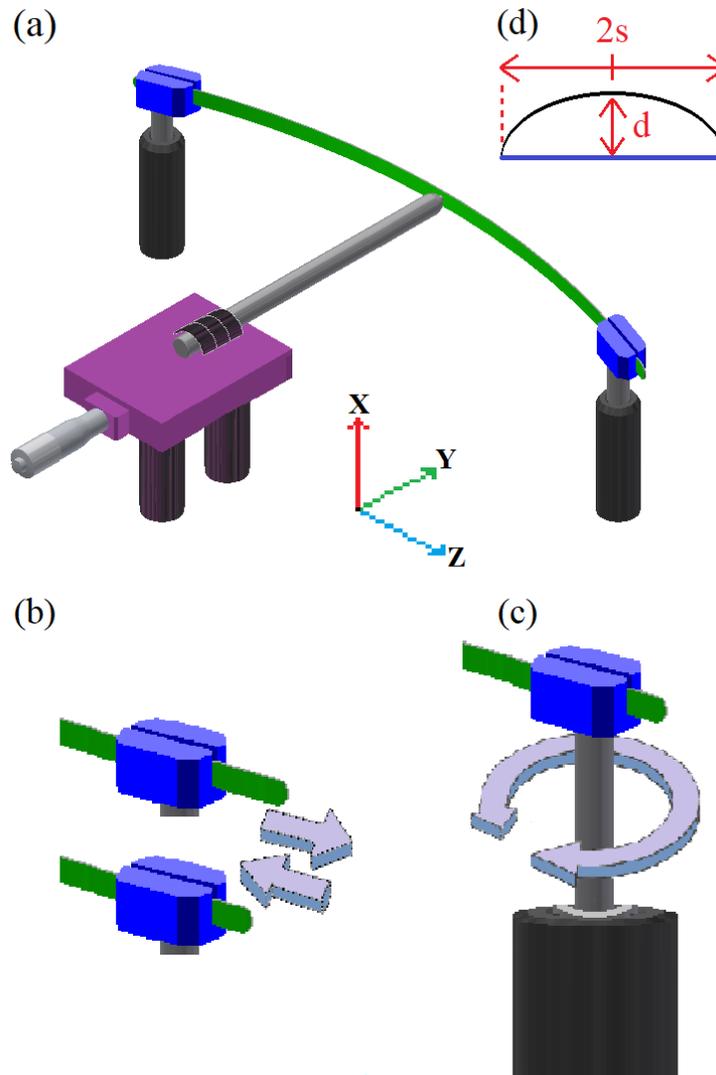


Figura 4.1 (a) Montaje experimental para la medición de curvas, (b) Ranura cuadrada, (c) Sistema de rotación alrededor del eje x, (d) Diagrama esquemático del montaje de flexión.

Estas piezas metálicas se montaron en un sistema rotatorio que se fijó en la parte superior de postes de acero, véase la Figura 4.1(c). Un tubo delgado, de acero, de punta afilada, colocado en la parte trasera, se utilizó para empujar la lámina metálica para cambiar la curvatura de 0 m^{-1} a

2.94 m^{-1} . La pequeña sección del tubo metálico que hacía contacto con la lámina se pegó a esta para asegurarse de que siempre estemos empujando en la misma superficie. La curvatura del sensor puede escribirse como [19]

$$C = \frac{1}{R} = \frac{2d}{d^2 + s^2}, \quad (3)$$

donde C , R , d y s son la curvatura, el radio de curvatura, el desplazamiento de flexión (controlado por la etapa de traslación) y la media distancia entre los bordes de las dos ranuras cuadradas, respectivamente, véase la Figura 4.1(d).

4.3 Proceso de fabricación del MZI como sensor de curvatura

Como se ha mencionado anteriormente, todas las estructuras de este trabajo se fabricaron utilizando SMF (9/125 μm) (SMF-28 G652D), MMF (105/125 μm) (BF05859) y CHCF (los diámetros interior y exterior son de 65.5 y 125 μm , respectivamente, fibra no comercial). Los MZI se fabricaron intercalando diferentes longitudes de CHCF entre dos secciones de MMF, y esta estructura se empalmó entre los SMF de entrada y salida, véase la Figura 3.2(a)-(h). La longitud de los dos segmentos de MMF era de 1 mm, y estas secciones de fibra funcionaban como un acoplador de modos. Se utilizaron seis longitudes diferentes (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3 mm) de CHCF para montar los MZI. Cada sensor se montó en una lámina de acero flexible sujetándolo directamente sobre la lámina de acero con la ayuda de pequeños trozos de cinta adhesiva, véase la Figura 4.2(a). Cabe mencionar que el sensor de fibra óptica y toda la fibra nunca entraron en contacto con la lámina de acero. Por último, el dispositivo se fijó de forma permanente en el centro de la lámina de acero de 3l cm de longitud con la ayuda del PDMS, con una longitud de 13 cm cubierta de PDMS, véase la Figura 4.2(b). El polímero se curó siguiendo las especificaciones del fabricante. Como se mencionó anteriormente, al fijar el sensor a una lámina de acero, garantizamos que la dirección de flexión se realizó en un plano, sin efectos de torsión, lo que nos permite caracterizar el sensor en condiciones de flexión controlada.

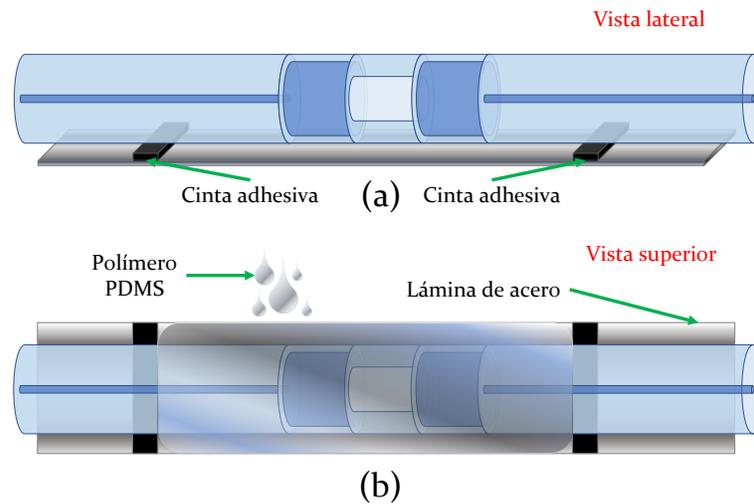


Figura 4.2 Proceso de fabricación: (a) montaje del sensor sobre la lámina de acero (b) recubrimiento del sensor con un polímero.

Durante el diseño del encapsulado de este sensor, se tuvo en cuenta la posición del MZI dentro del polímero para evitar cualquier tensión al curvarlo. Por ejemplo, W. H. PNG et al. fabricaron un sensor de flexión utilizando una fibra cónica incrustada en un polímero y este se pegó en una barra de acero. Los autores explicaron que existe un eje neutro en el interior y a lo largo de este empaque, un eje que no experimenta ninguna elongación cuando se aplica una flexión al segmento [2]. Nosotros, no queremos que el sensor sufra alguna deformación debido al polímero, por lo tanto, el dispositivo se fijó en este eje (en el centro del polímero), véase la Figura 4.3. El espesor del polímero era de 4 mm.

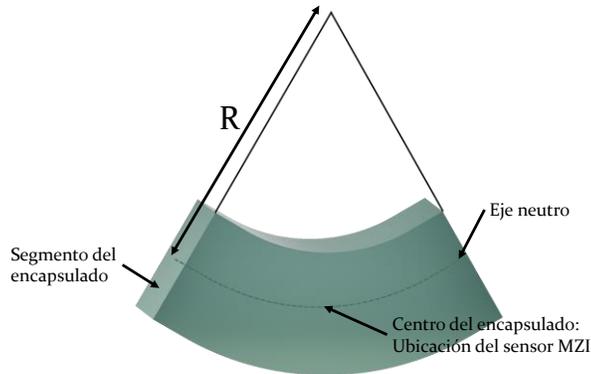


Figura 4.3 Dibujo esquemático que muestra la posición de la fibra óptica dentro del polímero (encapsulado del sensor).

Previo a la caracterización, evaluamos el impacto del PDMS en el espectro del sensor. Esto se logró fabricando un MZI con una longitud de CHCF de 1 mm, fijándolo a la lámina de acero, y tomando su respuesta espectral. Después, cubrimos el sensor con PDMS, curamos el polímero y volvemos a tomar su espectro. Como se muestra en la Figura 4.4, las diferencias de fase y de contraste máximo son de 0.08 nm y 0.57 dB, respectivamente. No hay cambios significativos en estas dos señales.

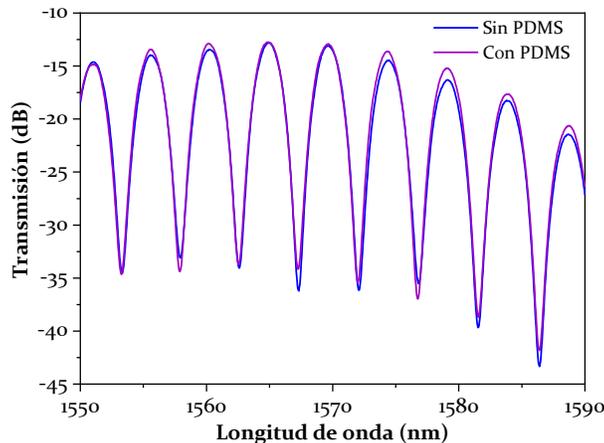


Figura 4.4 Espectro experimental de un MZI de 1 mm de longitud de CHCF, con PDMS y sin PDMS.

4.4 Resultados experimentales

Los seis MZI fueron caracterizados utilizando el montaje experimental mostrado en la Figura 3.4. Se observó que el contraste de franjas del espectro interferométrico varía a medida que cambia la curvatura del sensor, y este comportamiento estuvo presente en todos los MZI que se midieron. La Tabla 4.1 muestra la sensibilidad de los sensores y su error asociado, el rango de curvatura y el R-cuadrado.

Tabla 4.1 Sensibilidades experimentales de los MZI construidos con diferentes longitudes de CHCF.

| L (mm) | Sensibilidad de flexión (dB/m ⁻¹) | Rango de flexión (m ⁻¹) | R-Cuadrado |
|--------|---|-------------------------------------|------------|
| 0.5 | -8.19 ± 0.45 | De 1.56 a 2.94 (1.38) | 0.96 |
| 1 | -11.80 ± 1.30 | De 0.95 a 2.68 (1.73) | 0.96 |
| 1.5 | -7.31 ± 0.30 | De 0.00 a 2.68 (2.68) | 0.99 |
| 2 | -16.23 ± 2.00 | De 2.14 a 2.94 (0.80) | 0.97 |
| 2.5 | -17.28 ± 2.30 | De 1.84 a 2.94 (1.10) | 0.95 |
| 3 | -11.41 ± 0.25 | De 0.95 a 2.42 (1.47) | 0.97 |

El sensor de CHCF de 2.5 mm de longitud tiene la mayor sensibilidad a curvatura (-17.28 ± 2.30 dB/m⁻¹), mientras que el sensor de CHCF de 1 mm de longitud tiene el rango de curvatura más amplio (de 0.95 m⁻¹ a 2.68 m⁻¹). Dado que el sensor fabricado con 1 mm de CHCF mostró el mejor rendimiento (sensibilidad y rango de curvatura), en los siguientes párrafos se presenta una caracterización detallada de este dispositivo. La señal de salida del sensor de CHCF de 1 mm de longitud se midió para diferentes curvaturas (de 0 m⁻¹ a 2.94 m⁻¹), como se muestra en la Figura 4.5(a).

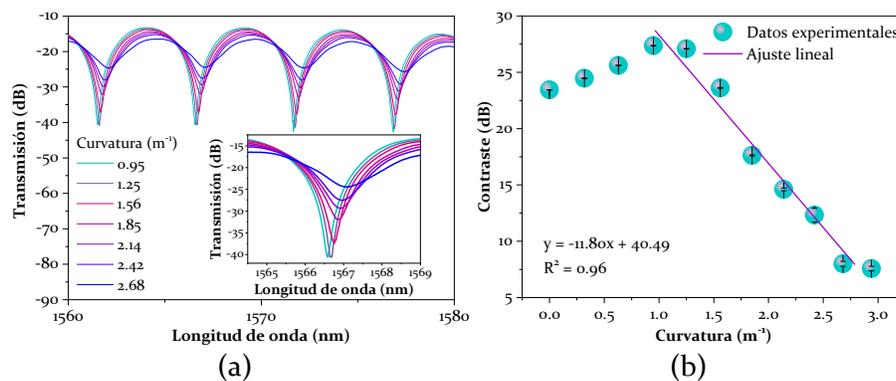


Figura 4.5 (a) La respuesta espectral del dispositivo de 1 mm-CHCF, (b) Variación del contraste de franjas a diferentes curvaturas.

Podemos observar que la amplitud de la señal cambió en diferentes curvaturas, y una forma de cuantificar esta variación es rastreando el contraste de las franjas del patrón de interferencia alrededor de 1570 nm, ver Figura 4.5(b). El contraste de franjas a 0 m⁻¹ (cuando la lámina está en posición recta) es de 22.51 dB, mientras que a medida que la curvatura aumenta hasta 0.95 m⁻¹, el contraste de franjas se incrementa hasta 29.32 dB. A partir de este valor, el contraste disminuye hasta alcanzar un valor mínimo de 7.72 dB. Se puede observar en la Figura 4.5(b) que existe una relación lineal entre la curvatura y el contraste de franjas, y esta respuesta lineal se

produce en el rango de curvatura que comienza desde 0.95 m^{-1} hasta 2.68 m^{-1} con una sensibilidad de curvatura de $-11.80 \pm 1.30 \text{ dB/m}^{-1}$. El principal problema de la Figura 4.5(b) es que no se puede aplicar una curva de ajuste a todo el rango de detección.

Una mejor manera de controlar la variación del contraste de las franjas es aplicando la FFT al patrón de interferencia, véase la Figura 4.6(a). Para su visualización, sólo se representa la región lineal. Es evidente que la traza de datos tiene un ajuste polinómico de segundo grado, pero puede establecerse una relación lineal entre la amplitud del pico de la FFT y la curvatura en el rango de 0.95 m^{-1} a 2.68 m^{-1} , véase la Figura 4.6(b). Su sensibilidad fue de $0.31 \pm 0.02 \text{ u.a.}$. Además, al utilizar la FFT, el rango de medición de la curvatura aumenta (de 0 m^{-1} a 2.94 m^{-1}); en este caso, la relación es una expresión no lineal.

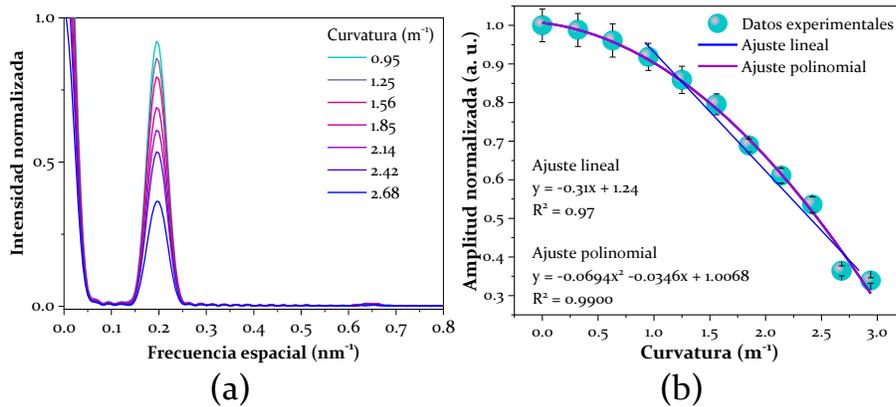


Figura 4.6 (a) FFT calculada de los espectros mostrados en la Figura 4.5(a), (b) Amplitud normalizada de la FFT en función de la curvatura.

El sensor se colocó en una placa caliente (con una curvatura de 0 m^{-1}) para investigar su respuesta a la temperatura. El espectro sufrió un desplazamiento hacia el rojo al aumentar la temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ a $90 \text{ }^\circ\text{C}$, como se muestra en los gráficos insertados de la Figura 4.7(a).

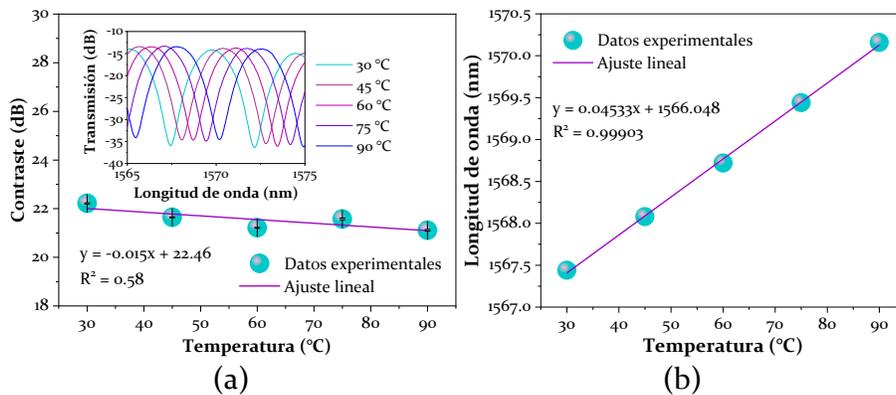


Figura 4.7 Contraste de franjas en función de la temperatura, el inserto muestra los espectros detallados del dispositivo.

Teniendo en cuenta que en nuestro caso se detecta el contraste de franjas o la amplitud de la FFT, un desplazamiento de la longitud de onda no afecta a la medición. Se determinó la variación del contraste de franjas en función del incremento de temperatura, y su sensibilidad a la temperatura fue de $0.015 \pm 0.007 \text{ dB/}^\circ\text{C}$, véase la Figura 4.7(a). Por otro lado, la amplitud del pico del espectro de Fourier se mantiene casi constante mientras se aumenta la temperatura ($8.642 \times 10^{-4} \pm 4.525 \times 10^{-5} \text{ u.a.}$), véase la Figura 4.8. El cambio en el contraste de las franjas o en la amplitud del pico del espectro de Fourier debido a la temperatura es mínimo en comparación con la sensibilidad a la curvatura (-11.8 dB/m^{-1} o 0.31 u.a.) y podría despreciarse cuando realizamos mediciones de curvatura.

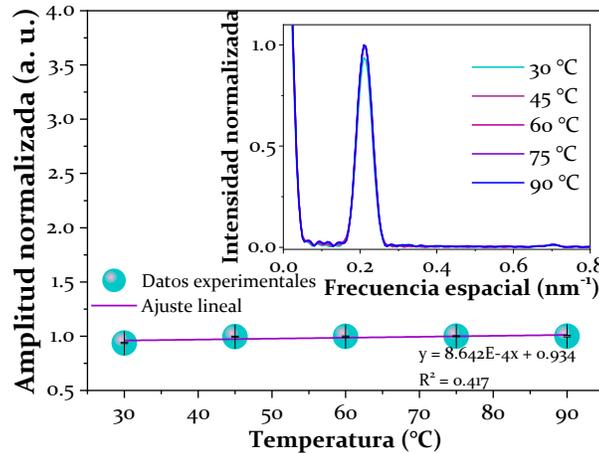


Figura 4.8 Amplitud normalizada de la FFT en función de la temperatura, el inserto muestra la FFT calculada del inserto mostrado en la Figura 4.7.

Suponiendo que alguien fabrique un sensor similar siguiendo los pasos descritos anteriormente, pero si el sensor no está colocado en el eje neutro el sensor sufrirá un aumento de longitud (tensión longitudinal). A continuación, se realizó un último experimento para observar cómo se modificaba la señal de salida del sensor debido a la deformación. El montaje experimental se implementó pegando dos puntos de la fibra óptica en dos etapas diferentes, el sensor estaba en el centro de la sección entre estos dos puntos. Una de estas etapas era una etapa de traslación que podía hacer pequeños desplazamientos causando tensión en el sensor.

La Figura 4.9 muestra los espectros del sensor a diferentes tensiones; se observa un desplazamiento al rojo, pero no afecta a la medición como se ha dicho antes. Se determinó la variación del contraste de las franjas en función del incremento de la deformación, y su sensibilidad a la deformación fue de $-2.07 \times 10^{-3} \text{ dB/}\mu\epsilon$, véase la Figura 4.9. Esto significa que la variación del contraste de franjas debida a la deformación es tres órdenes de magnitud inferior al error asociado a la medición de la curvatura (1.30 dB/m^{-1}). En consecuencia, el error producido por la deformación durante la realización de las mediciones de curvatura puede ser despreciado. Esto hace que nuestro sensor sea más viable y resistente en aplicaciones reales.

Para comparar el comportamiento de nuestro sensor de curvatura con dispositivos similares basados en fibra, elaboramos la Tabla 4.2, que resume las estructuras y los resultados de otros grupos de investigación en los últimos años. El tamaño del nuestro MZI es bastante compacto, siendo el segundo más pequeño de toda la lista, solo superado por el dispositivo 2, quedando el dispositivo 3 como el más grande de todos y por mucho. La sensibilidad de nuestro sensor se

encuentra en el intervalo superior, correspondiendo al tercero más alto, tomando en consideración que podemos fabricar dispositivos de distintos tamaños, valdría la pena comentar que en el caso de elegir un dispositivo con 2.5 mm de CHCF (4.5 mm longitud total) la sensibilidad sería de -17.28 dB/m^{-1} , quedando como la segunda sensibilidad más alta solo por debajo del dispositivo 4. Respecto al intervalo de medición todos los dispositivos resultan ser muy similares, excepto por el dispositivo 2 siendo por mucho el mayor de toda la Tabla 4.2. En cuanto a las perturbaciones como la temperatura, el dispositivo presentado demostró ser el segundo menos sensible a esta característica, solo por debajo del dispositivo 1.

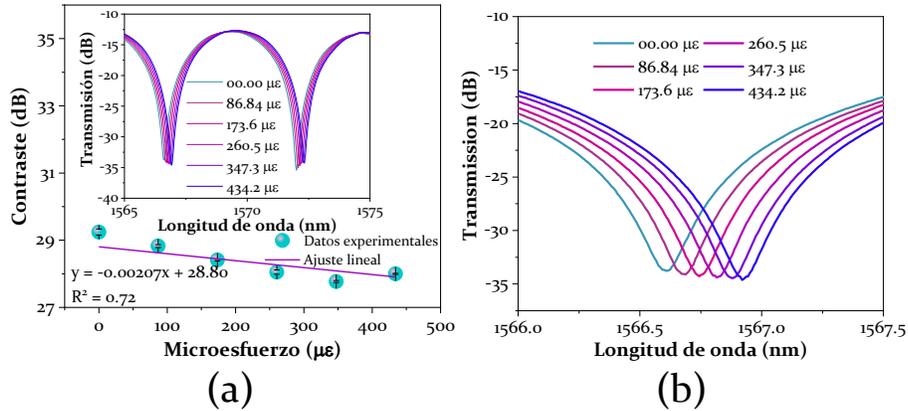


Figura 4.9 (a) Contraste de franjas en función de la deformación, el inserto muestra los espectros detallados del dispositivo, (b) ampliación del grupo de picos del gráfico insertado.

Tabla 4.2 Comparación del desempeño del sensor de curvatura con la literatura

| No. | Estructura | Sensibilidad | Intervalo | Tamaño | Temperatura |
|--------------|--------------|-----------------------------|--------------------------------|---------|------------------------------------|
| 1 [4] | SCF-FBG | -7.27 dB/m^{-1} | $0 - 1 \text{ m}^{-1}$ | 10 mm | $0.001 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ |
| 2 [13] | Taper-FBG | 0.1196 dB/m^{-1} | $0 - 80 \text{ m}^{-1}$ | 0.8 mm | $0.06 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ |
| 3 [6] | SMF-CHCF-SMF | 5.05 dB/m^{-1} | $0.765 - 3.423 \text{ m}^{-1}$ | 50 mm | $-0.018 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ |
| 4 [7] | SMF-MMF-SMF | $-130.37 \text{ dB/m}^{-1}$ | $0.11 - 0.34 \text{ m}^{-1}$ | 36.5 mm | - |
| 5 [16] | ARROW | -15.33 dB/m^{-1} | $0 - 1 \text{ m}^{-1}$ | 20 mm | $0.27 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ |
| 6 [17] | SMF-CHCF-SMF | -4.28 dB/m^{-1} | $10.72 - 11.60 \text{ m}^{-1}$ | 11 mm | $-0.017 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ |
| Este trabajo | MMF-CHCF-MMF | -11.80 dB/m^{-1} | $0.95 - 2.68 \text{ m}^{-1}$ | 3 mm | $0.015 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ |

4.5 Conclusiones

En resumen, hemos propuesto y demostrado experimentalmente un MZI en fibra para medir la deformación por flexión. El MZI se basa en una sección de CHCF empalmada entre dos secciones de MMF. Utilizando el polímero PDMS, el sensor se fijó a una lámina de acero no sólo para tener un mejor control de la curvatura del sensor, sino también para proteger el sensor de las condiciones ambientales y del manejo rudo del dispositivo. Este encapsulado ayuda a prolongar la vida del sensor para su aplicación en el monitoreo preventivo de estructuras civiles y mecánicas. La señal de salida del sensor no sufrió cambios significativos debido al polímero PDMS. Debido a la sencilla fabricación del dispositivo, se probaron diferentes longitudes de

CHCF, y todas ellas funcionan como sensor de curvatura. La mayor sensibilidad a la curvatura fue de -17.28 ± 2.30 dB/m⁻¹ en un rango de curvatura de 1.84 m⁻¹ a 2.94 m⁻¹; la longitud del CHCF fue de 2.5 mm. El sensor que demostró el mejor rendimiento se fabricó con una longitud de CHCF de 1 mm, ya que combinaba una buena sensibilidad a la curvatura (-11.8 ± 1.30 dB/m⁻¹) y un rango de curvatura más amplio (de 0.95 m⁻¹ a 2.78 m⁻¹). Al medir la señal interferométrica de este dispositivo y emplear la FFT, se encontró que prevalece una relación no lineal entre el contraste y la curvatura. No obstante, nos permitió medir la curvatura en un rango más amplio (de 0 m⁻¹ a 2.94 m⁻¹). Además, mostró una baja dependencia de la temperatura del contraste de franjas (de 30 a 90 °C), lo que hace que el dispositivo sea prácticamente insensible a las fluctuaciones de temperatura.

Referencias

- [1] K. Kliewer and B. Glisic, "A curvature based approach using long-gage fiber optic sensors," in *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2016*, 2016, vol. 9805: SPIE, pp. 494-499.
- [2] W. Png *et al.*, "Feasibility use of in-line Mach-Zehnder interferometer optical fibre sensor in lightweight foamed concrete structural beam on curvature sensing and crack monitoring," *Structural Health Monitoring*, vol. 17, no. 5, pp. 1277-1288, 2018.
- [3] S. Sareh, Y. Noh, M. Li, T. Ranzani, H. Liu, and K. Althoefer, "Macrobend optical sensing for pose measurement in soft robot arms," *Smart Materials and Structures*, vol. 24, no. 12, p. 125024, 2015.
- [4] Y. Zhang, W. Zhang, Y. Zhang, S. Wang, L. Yu, and Y. Yan, "Simultaneous measurement of curvature and temperature based on LP11 mode Bragg grating in seven-core fiber," *Measurement Science and Technology*, vol. 28, no. 5, p. 055101, 2017.
- [5] P. Saffari, T. Allsop, A. Adebayo, D. Webb, R. Haynes, and M. M. Roth, "Long period grating in multicore optical fiber: an ultra-sensitive vector bending sensor for low curvatures," *Optics letters*, vol. 39, no. 12, pp. 3508-3511, 2014.
- [6] Y. Zhao, L. Cai, and X.-g. Li, "In-fiber modal interferometer for simultaneous measurement of curvature and temperature based on hollow core fiber," *Optics & Laser Technology*, vol. 92, pp. 138-141, 2017.
- [7] Y. Gong, T. Zhao, Y.-J. Rao, and Y. Wu, "All-fiber curvature sensor based on multimode interference," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 11, pp. 679-681, 2011.
- [8] F. Qi *et al.*, "A hollow core fiber-based intermodal interferometer for measurement of strain and temperature," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 9, pp. 3468-3471, 2013.
- [9] X. Zhang, C. Liu, J. Liu, and J. Yang, "Single modal interference-based fiber-optic sensor for simultaneous measurement of curvature and strain with dual-differential temperature compensation," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 20, pp. 8375-8380, 2018.
- [10] H. Gong, M. Xiong, Z. Qian, C.-L. Zhao, and X. Dong, "Simultaneous measurement of curvature and temperature based on Mach-Zehnder interferometer comprising core-offset and spherical-shape structures," *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 1-9, 2015.
- [11] K. Ni, T. Li, L. Hu, W. Qian, Q. Zhang, and S. Jin, "Temperature-independent curvature sensor based on tapered photonic crystal fiber interferometer," *Optics communications*, vol. 285, no. 24, pp. 5148-5150, 2012.
- [12] B. Sun *et al.*, "Asymmetrical in-fiber Mach-Zehnder interferometer for curvature measurement," *Optics Express*, vol. 23, no. 11, pp. 14596-14602, 2015.
- [13] W. Cui, J. Si, T. Chen, and X. Hou, "Compact bending sensor based on a fiber Bragg grating in an abrupt biconical taper," *Optics Express*, vol. 23, no. 9, pp. 11031-11036, 2015.
- [14] C. Sun *et al.*, "A micro MMF layer embedded in LPFG for simultaneous measurement of curvature and temperature," *Optical Fiber Technology*, vol. 48, pp. 134-137, 2019.
- [15] Y. Zhang *et al.*, "Simultaneous measurement of temperature and curvature based on hollow annular core fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 11, pp. 1128-1131, 2014.

- [16] S. Wang *et al.*, "An inline fiber curvature sensor based on anti-resonant reflecting guidance in silica tube," *Optics & Laser Technology*, vol. 111, pp. 407-410, 2019.
- [17] H. Cheng, S. Wu, Q. Wang, S. Wang, and P. Lu, "In-line hybrid fiber sensor for curvature and temperature measurement," *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 1-11, 2019.
- [18] R. Gao, D. Lu, J. Cheng, and Z.-m. Qi, "Self-referenced antiresonant reflecting guidance mechanism for directional bending sensing with low temperature and strain crosstalk," *Optics express*, vol. 25, no. 15, pp. 18081-18091, 2017.
- [19] S. Marrujo-García, I. Hernández-Romano, M. Torres-Cisneros, D. A. May-Arriola, V. P. Minkovič, and D. Monzón-Hernández, "Temperature-independent curvature sensor based on in-fiber Mach-Zehnder interferometer using hollow-core fiber," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 15, pp. 4166-4173, 2020.

Capítulo 5

Quiero estar, si puedo, tan seguro del mundo -del mundo real- que me rodea como sea posible. Esto sólo se puede lograr hasta cierto punto, pero quiero el mayor grado de control.
- James Randi

En este capítulo se abordará el uso del dispositivo MZI basado en CHCF como sensor de temperatura. Se presentará información relacionada con las adaptaciones técnicas que se le hicieron al sensor para usarlo con los fines antes mencionados. Se abordará el principio de funcionamiento, así como el arreglo experimental utilizado. Este capítulo fue escrito con los datos e información más actuales y precisos para el momento en que se realizó la publicación JCR (en la que se basa este apartado) por lo que es posible que existan discrepancias en datos e información presentados en el Capítulo 3.

Aplicación del MZI como sensor de temperatura

5.1 Introducción

Cómo ha sido antedicho, los sensores de fibra óptica se han convertido en una importante tecnología y un amplio campo de investigación para la comunidad científica y la industria. Los FOS se han utilizado para medir un gran número de variables físicas como el índice de refracción [1], la temperatura [2], la deformación [3], la presión [4] y la curvatura [5], por mencionar algunas. Entre estos parámetros, la temperatura es una variable esencial que debe controlarse en casi todos los procesos de fabricación y experimentos de laboratorio. Se han diseñado un gran número de sensores de temperatura de fibra óptica utilizando tapers de fibra [6], fibra de cristal fotónico [7], FBG [8], LPG [9] e interferencia multimodo [10]. Además, también se han fabricado interferómetros de fibra óptica como los Mach-Zehnder [11], Fabry-Perot [12] y Sagnac [13] para medir temperatura. Estos dispositivos aprovechan los efectos termo-ópticos y de expansión térmica de la sílice para convertir los cambios de temperatura en desplazamientos de la longitud de onda o en variaciones de la potencia del espectro de salida. Aunque estos sensores de temperatura de fibra han mostrado resultados prometedores para la medición de altas temperaturas, han mostrado una baja sensibilidad para temperaturas inferiores a 80 °C. Esta baja sensibilidad se debe a que el coeficiente termo-óptico (TOC) ($8.5 \times 10^{-6}/\text{K}$) [14] y el coeficiente de expansión térmica (TEC) ($4.1 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$) [15] son bajos. Una forma de superar esta limitación es utilizar polímeros, ya que estos materiales presentan un alto TOC y TEC. Se ha demostrado que la sensibilidad a la temperatura se incrementa cubriendo el área de detección de los FOS con un polímero. Esta técnica se ha implementado en sensores basados en tapers de fibra [16], cavidades FP [17], SPR [18] y FBG [19], por mencionar algunas estructuras de fibra, y esto ha mejorado la sensibilidad a la temperatura. Sin embargo, esto también añade más complejidad al proceso de fabricación del sensor.

Recientemente, el efecto Vernier ha sido ampliamente estudiado como un método eficaz para aumentar la sensibilidad de los FOS. El efecto Vernier resulta de la superposición de dos patrones de interferencia que tienen rangos espectrales libres ligeramente diferentes, *FSRI* ~

FSR2, donde *FSR1* y *FSR2* son los *FSR* del interferómetro 1 y 2, respectivamente, véase la Figura 5.1(a) y (b). Suponiendo que cada interferómetro sufre un desplazamiento en longitud de onda cuando una variable física cambia, entonces, se puede determinar la sensibilidad de cada dispositivo. En la configuración de Vernier, la superposición genera una señal con una gran envolvente (*FSR1_2_envolvente*), véase la Figura 5.1(c), que muestra un desplazamiento de longitud de onda mucho mayor (mayor sensibilidad) que el producido por un solo interferómetro. La superposición se consigue conectando los interferómetros, normalmente en una configuración en cascada (en serie) [20], pero también pueden conectarse en paralelo [21, 22]. El parámetro crítico para observar el efecto Vernier es que el *FSR* de los dos patrones de interferencia sea ligeramente diferente. Cuando los *FSR* son bastante similares, la amplificación (*M*) es mayor, y se puede observar una mayor sensibilidad. Por ejemplo, T. Paixão et al. [23] fabricaron un sensor de temperatura utilizando dos FPI, fabricados con un láser de femtosegundo, donde la diferencia de tamaño porcentual (PSD, por sus siglas en inglés) entre las longitudes de las cavidades fue del 1% ($M = 100$, la sensibilidad se incrementó hasta $0.927 \text{ nm}/^\circ\text{C}$). Por otro lado, L. Y. Shao et al. [24] construyeron dos interferómetros Sagnac utilizando fibra conservadora de polarización (PMF, por sus siglas en inglés), y la PSD entre las longitudes de las PMF, que formaban parte de cada interferómetro, fue del 13.17% ($M = 9.15$, experimental; $M = 7.91$, teórico; la sensibilidad aumentó de -1.4 a $-13.36 \text{ nm}/^\circ\text{C}$). Es bien sabido que la longitud del interferómetro de fibra óptica determina el *FSR*. Por lo tanto, su proceso de fabricación debe ser muy preciso para producir dos dispositivos interferométricos con *FSRs* similares.

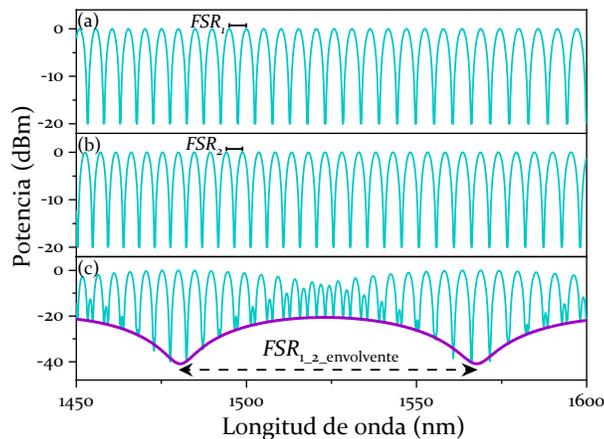


Figura 5.1 Patrones de interferencia de (a) el interferómetro 1 y (b) el interferómetro 2, (c) la superposición de las dos señales de salida ($FSR1 \sim FSR2$), utilizando el efecto Vernier en una configuración en serie.

Por otra parte, se sabe que la combinación de diferentes interferómetros de fibra óptica también puede generar el efecto Vernier. Las combinaciones de interferómetros que se han utilizado para medir temperatura son Sagnac-FPI [25] y FPI-MZI [26]. Al utilizar dos interferómetros diferentes, podríamos, en principio, eliminar el requisito de tener longitudes de fibra bastante similares en los interferómetros, ya que pueden tener requisitos de longitud muy diferentes como en el caso de la combinación Sagnac-FPI [25]. Sin embargo, el efecto Vernier requiere *FSRs* similares para ambos interferómetros, y esto está de nuevo relacionado con el cumplimiento de una longitud de fibra específica. Cabe mencionar que, normalmente, los interferómetros que requieren longitudes de fibra cortas presentan valores *M* mayores, mientras

que los interferómetros con longitudes de fibra más largas tienen valores M menores. Esto último está relacionado con una baja precisión al cortar fibras de longitudes largas ya que los sistemas usados son más complicados de controlar.

En este trabajo, se propuso, mediante demostración numérica y experimental, un sensor de temperatura altamente sensible basado en dos MZIs en cascada que funcionan utilizando el efecto Vernier. Los MZIs hechos completamente de fibra se ensamblaron intercalando un segmento de CHCF entre dos secciones cortas de MMFs. Se encontró que la sensibilidad a temperatura de un solo MZI era de $29.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ en un rango de 10 a $70 \text{ }^\circ\text{C}$, que incrementaba a una sensibilidad de $1.964 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ cuando el sensor se operaba en una configuración Vernier (MZIs en serie). Los resultados experimentales muestran que la sensibilidad a la temperatura del MZI individual se amplificó ~ 67.03 veces, y esta amplificación significativa fue posible gracias a la pequeña diferencia de longitud ($\sim 45 \text{ }\mu\text{m}$, $\text{PSD} = 1.54\%$) entre los segmentos CHCF de los MZI. El mejor desempeño de nuestra configuración en serie está relacionado con la optimización de la estructura de fibra y el sistema de corte de alta precisión que utilizamos durante el proceso de fabricación (lo que permite un control preciso de la longitud del CHCF de cada MZI). Además, la resolución en temperatura de los dos MZI en cascada fue de $0.0153 \text{ }^\circ\text{C}$, utilizando la resolución de nuestro sistema de interrogación que fue de 30 pm . Finalmente, las ventajas de tener una alta sensibilidad, tamaño compacto, alta resolución y rango de temperatura hacen que los dos MZIs en cascada propuestos sean un dispositivo atractivo para aplicaciones biológicas.

5.2 Análisis de simulación de un MZI a diferentes temperaturas y de selección de dispositivo para usar en el efecto Vernier

Como ya se mencionó en el Capítulo 3, sección 3.3.2, es posible simular el espectro de salida del MZI utilizando la Ecuación (1) el ERID de la Figura 3.11(b) y los valores de L_s (véase la Figura 3.12)). Estas simulaciones muestran el desplazamiento en longitud de onda que sufren los patrones de interferencia al cambiar la temperatura de 10 a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ en pasos de $10 \text{ }^\circ\text{C}$, para MZIs cuyas longitudes (L_{OS}) son de 1 , 2 y 3 mm , respectivamente, véase la Figura 3.12(a), (c) y (e). La respuesta lineal de los MZI y su sensibilidad a la temperatura se muestran en la Figura 3.12(b), (d) y (f). La Tabla 3.4 resume estos resultados e incluye la sensibilidad a temperatura de los dispositivos cuyas longitudes son de $0.3 - 0.7$, 1.5 y 2.5 mm . Dado que la sensibilidad a la temperatura de cada dispositivo es bastante similar podemos promediar estos valores y decir que la sensibilidad promedio es de $0.0303 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. Con base en los resultados mostrados en la Tabla 3.4, no es posible elegir cual es el sensor que presente la mejor sensibilidad a temperatura. En lugar de elegir un sensor basado en su sensibilidad a temperatura, seleccionamos el MZI que exhibe el menor error de fabricación (en este trabajo, se utilizó el porcentaje de error relativo a la longitud del sensor, el cual se define como $| \text{valor medido} - \text{valor real} | / \text{valor real}$). Conseguir el menor error posible es un elemento clave que puede aumentar o disminuir el factor M del efecto Vernier, como se verá más adelante.

5.3 Efecto Vernier: Valores a calcular y considerar para diseñar el experimento

Como ha sido ya mencionado, el efecto Vernier se puede observar cuando se colocan dos MZI en serie, con el primer y el segundo sensor etiquetados como los MZI de sensado y de referencia, respectivamente. El MZI de sensado sufre una variación de temperatura, mientras que el MZI de referencia se mantiene a una temperatura constante. La superposición de sus dos patrones de interferencia genera una envolvente cuyo $FSR_{\text{envolvente}}$ puede evaluarse mediante [27]

$$FSR_{envolvente} = \frac{FSR_R FSR_S}{|FSR_R - FSR_S|} \quad (4)$$

donde FSR_S y FSR_R son las FSR de los MZI de sensado y de referencia, respectivamente. Esta ecuación es crucial porque determina el intervalo que se necesitará para observar el desplazamiento en longitud de onda. El factor de amplificación es otro valor importante que se calcula con la ayuda de la siguiente expresión [27]

$$M = \frac{FSR_R}{|FSR_R - FSR_S|} = \frac{L_{OS}}{|L_{OS} - L_{OR}|} \quad (5)$$

donde L_{OS} y L_{OR} son las longitudes de los MZI de sensado y de referencia, respectivamente. Utilizando la fórmula $FSR = \lambda^2 / \Delta n_{eff} L$ es posible calcular el FSR de cada MZI. Es evidente que los FSR_S y FSR_R dependen de los valores de L_{OS} y L_{OR} , respectivamente. Así, la amplificación (M) se hace mayor a medida que las longitudes de las dos MZI se acercan. Se pueden calcular diferentes valores de M utilizando el porcentaje de diferencia de tamaño (PSD) entre L_{OS} y L_{OR} sin necesidad de especificar ninguna longitud. Además, es posible escribir L_{OS} en términos de L_{OR} como $L_{OS} = L_{OR} + L_{OR}(PSD)$, por lo que, utilizando esta ecuación y la segunda parte de la Ecuación (5), la amplificación puede expresarse como $M = (1 + PSD)/PSD$. Hay que tener en cuenta que, si la PSD es inferior al 1%, el valor de M es superior a 100, y si la PSD es superior al 5%, el valor de M es inferior a 20 (véase la Figura 5.2). Por ello, es necesario desarrollar un sistema de corte preciso y fiable capaz de cortar segmentos precisos de CHCF ya que el error de fabricación asociado a este proceso determina el valor de amplificación que se puede alcanzar y está directamente relacionado con el $FSR_{envolvente}$. Tener una PSD igual o menor al 1% genera mayores amplificaciones, pero esto puede ser un problema debido a que se requiere una fuente de luz con un espectro más amplio y un mayor intervalo de longitudes de onda para seguir la envolvente de los MZI en cascada.

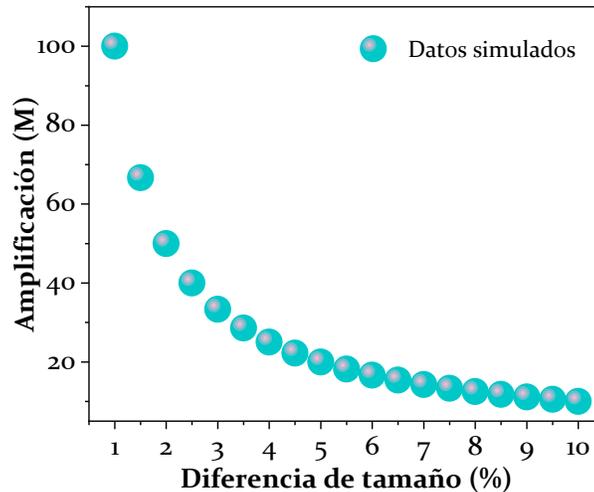


Figura 5.2 Variaciones del aumento (M) en función del porcentaje de la diferencia de tamaño.

5.4 Simulación de dos MZIs en serie usando el efecto Vernier

Esta sección presenta un análisis numérico de dos MZI en una configuración en cascada, como se muestra en la Figura 5.3. El MZI de sensado sufre una variación de temperatura, mientras que el MZI de referencia se mantiene a una temperatura constante.

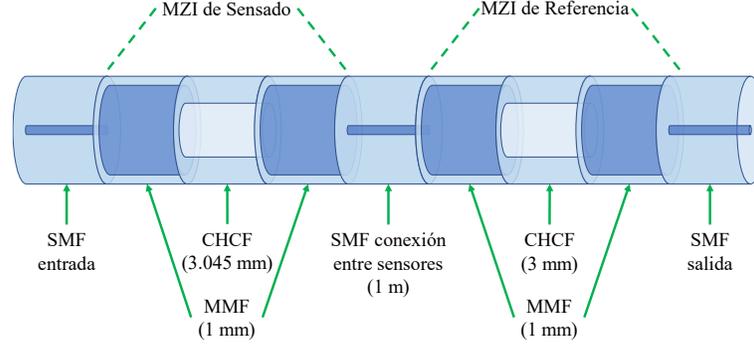


Figura 5.3 Dibujo esquemático de dos MZI en cascada con diferentes longitudes.

El espectro de transmisión de cada MZI se describe mediante la Ecuación (1), y estas expresiones pueden reescribirse de forma similar a las ecuaciones utilizadas en la referencia [27]. Los espectros de interferencia del MZI de sensado y de referencia vienen dados entonces por

$$I_S = A_1 + B_1 \cos \left\{ \frac{2\pi \Delta n_{eff,S}}{\lambda} L_S \right\}, \quad (6)$$

$$I_R = A_2 + B_2 \cos \left\{ \frac{2\pi \Delta n_{eff,R}}{\lambda} L_R \right\}, \quad (7)$$

donde $A_1 = I_{ch,S} + I_{rclad,S}$, $A_2 = I_{ch,R} + I_{rclad,R}$, $B_1 = 2\sqrt{I_{ch,S}I_{rclad,S}}$, y $B_2 = 2\sqrt{I_{ch,R}I_{rclad,R}}$. Aquí suponemos que la longitud del MZI de referencia ($L_{OR} = 3$ mm) es menor que la longitud ($L_{OS} = 3.045$ mm) del MZI de sensado, es decir, que L_{OR} es un 1,5% menor que L_{OS} . Estas longitudes se eligieron porque, como se mostrará más adelante, los errores de fabricación más bajos se obtienen para segmentos CHCF de aproximadamente 3 mm. Por lo tanto, cada MZI genera un FSR específico, que puede observarse en la Figura 5.4(a). El espectro de transmisión de estos dos MZI en cascada se calcula multiplicando las Ecuaciones (6) y (7), y el resultado puede escribirse como [27]

$$I = A_1 A_2 + A_2 B_1 \cos \left\{ \frac{2\pi \Delta n_{eff,S}}{\lambda} L_S \right\} + A_1 B_2 \cos \left\{ \frac{2\pi \Delta n_{eff,R}}{\lambda} L_R \right\} + \frac{1}{2} B_1 B_2 \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta n_{eff,S} L_S + \Delta n_{eff,R} L_R] \right\} + \frac{1}{2} B_1 B_2 \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta n_{eff,S} L_S - \Delta n_{eff,R} L_R] \right\}, \quad (8)$$

Los valores de $\Delta n_{eff,S}$ y L_S cambian a medida que la temperatura varía de 10 a 70 °C, mientras que los valores de $\Delta n_{eff,R}$ y L_R se calculan a una temperatura fija de 30 °C. En la Figura 5.4(b) se muestra la intensidad transmitida dada por la Ecuación (8) en función de la longitud de onda para diferentes valores de temperatura. El espectro de transmisión muestra un patrón de

interferencia de alta frecuencia modulado por una envolvente de baja frecuencia ($FSR_{\text{envolvente}} = 117.9 \text{ nm}$). Para las aplicaciones de detección, el control del desplazamiento de la longitud de onda de la envolvente de baja frecuencia se lleva a cabo ajustando uno de sus picos. Como se muestra en la Figura 5.4(b), el pico de la envolvente experimenta un desplazamiento al rojo a medida que aumenta la temperatura. Cabe mencionar que la sensibilidad a la temperatura de los dos MZI en cascada es de $2.0336 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, lo que puede estimarse a partir de la Figura 5.4(c). Es importante recordar que las sensibilidades a temperatura de los MZIs se simularon en el Capítulo 3 y sus resultados están en la Tabla 3.4. De acuerdo con la Tabla 3.4, la sensibilidad de un MZI de 3 mm es de $0.03028 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. Comparando la sensibilidad a temperatura del MZI de sensado con los dos MZI en cascada ($M = (2.0336 \text{ nm}/^\circ\text{C}) / (0.03028 \text{ nm}/^\circ\text{C})$), es fácil darse cuenta de que la sensibilidad a temperatura de los dos MZI en cascada es ~ 67.16 veces mayor que la sensibilidad del MZI solo.

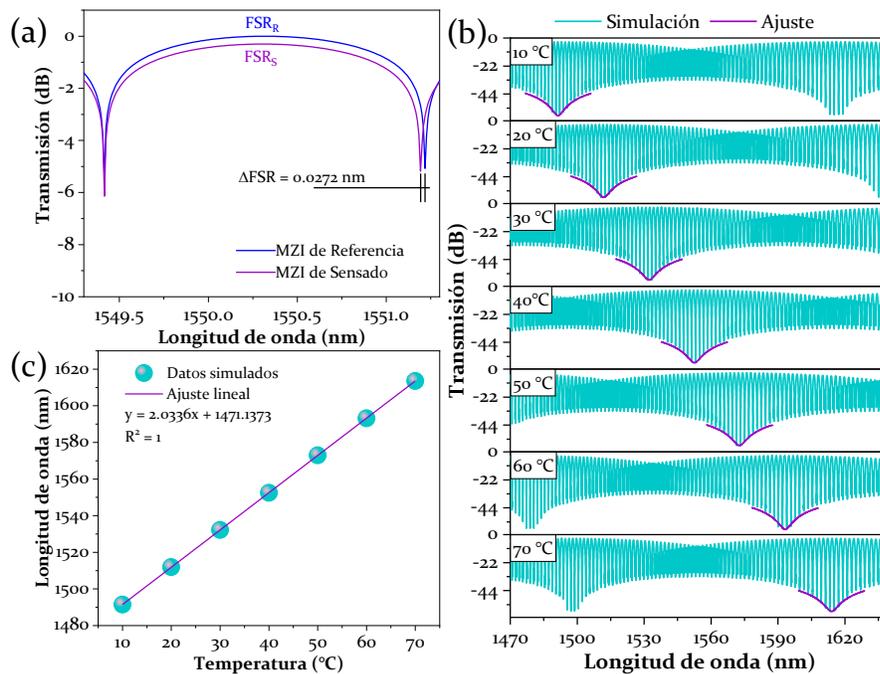


Figura 5.4 (a) Espectros de transmisión de los dos MZI con diferentes longitudes, (b) Espectros de transmisión de los dos MZI en cascada cuando el MZI sensor estaba a diferentes temperaturas, (c) Desplazamiento de la longitud de onda de la envolvente inferior de ajuste en función de los cambios de temperatura.

5.5 Resultados experimentales

5.5.1 Un MZI como sensor de temperatura

Como se ha explicado anteriormente, la fabricación de dos MZIs similares es vital en este trabajo, ya que la conexión de ambos en configuración Vernier genera grandes valores de M . El proceso de fabricación utilizado en esta investigación depende de un montaje experimental diseñado para cortar las longitudes de CHCF con precisión, donde antes de realizar cualquier medición, cada sensor se colocó en un Peltier (Echotherm IC20 Digital, Torrey Pines) a una

temperatura constante (30 °C), véase la Figura 3.4. Por último, decidimos seleccionar longitudes cercanas a los 3 mm para fabricar los MZI, ya que esta longitud es la que presenta un menor error de fabricación (como se muestra en la Tabla 5.1, columna 3). Cabe destacar que se fabricaron MZI con longitudes de CHCF superiores a 3 mm, pero el contraste de la señal de salida era inferior a 10 dB. Además, es importante mencionar que el factor de amplificación (columna 5) aumenta a medida que aumenta la longitud del CHCF. Utilizando este dispositivo, pudimos generar un valor considerablemente mayor de M .

Tabla 5.1 Error de fabricación de cada longitud.

| Longitud (mm) | Error de longitud de fabricación (mm) ¹ | Error de fabricación ² (%) | FSR de la Envolvente basada en el error de fabricación (nm) | Aumento basado en el error de fabricación (M) |
|------------------|--|---------------------------------------|---|---|
| 0.5 | 0.0471 | 9.432 | 106.895 | 11.602 |
| 1.0 | 0.0354 | 3.545 | 157.263 | 29.209 |
| 1.5 | 0.0557 | 3.713 | 96.789 | 26.932 |
| 2.0 | 0.0625 | 3.125 | 85.115 | 33.000 |
| 2.5 | 0.0472 | 1.888 | 125.971 | 53.966 |
| 3.0 | 0.0470 | 1.569 | 107.654 | 64.735 |
| Promedio: | 0.0500 | - | - | - |

¹Error absoluto del proceso de fabricación. ²Porcentaje de error relativo a la longitud del sensor. Nota: Los datos presentados en esta tabla son los más actualizados y precisos al momento de escrito el artículo JCR, por lo que pueden discrepar de los datos mostrados en el Capítulo 3.

El objetivo principal de este trabajo es demostrar que la sensibilidad a la temperatura del MZI sensor se mejora al montarlo en una configuración en cascada con un MZI de referencia a través del efecto Vernier.

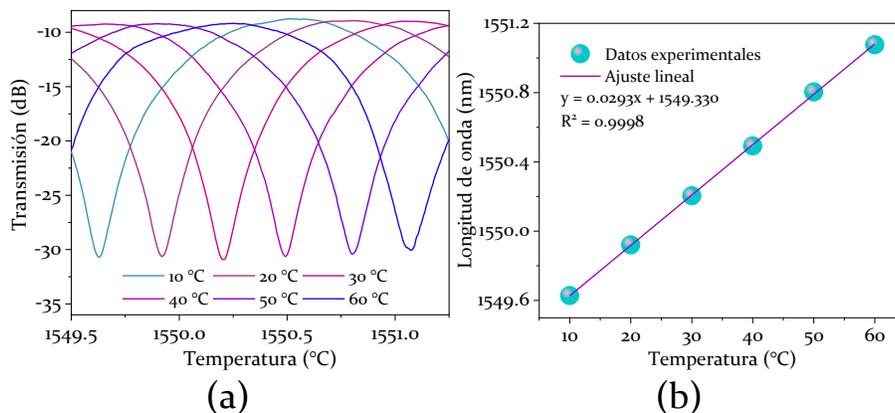


Figura 5.5 (a) Espectros experimentales del MZI de detección a diferentes temperaturas, (b) Desplazamiento de la longitud de onda de uno de los valles del espectro en función de la temperatura.

Por lo tanto, para validar nuestra teoría, el primer paso fue caracterizar el MZI sensor a diferentes temperaturas utilizando el montaje experimental mostrado en la Figura 3.4. La luz

del SLD se acopla al MZI sensor utilizando un SMF de entrada, y la transmisión de salida del dispositivo se entrega a un OSA mediante un SMF de salida. El MZI de detección se montó en un Peltier para incrementar la temperatura de 10 a 60 °C en pasos de 10 °C. La respuesta espectral del MZI de detección a diferentes temperaturas se representa en la Figura 5.5(a), donde se puede observar un desplazamiento del espectro transmitido al seguir uno de los picos del espectro. La Figura 5.5(b) muestra el desplazamiento de la longitud de onda del pico a medida que aumenta la temperatura, y se estimó una sensibilidad a la temperatura de 29.3 pm/°C. Cabe destacar que la diferencia entre las sensibilidades de temperatura simuladas y las experimentales es sólo del 3.24%, lo que significa que nuestro análisis numérico concuerda razonablemente bien con los resultados experimentales

5.5.2 Dos MZIs en cascada y el Efecto Vernier

La respuesta a la temperatura de los dos MZI conectados en una configuración en cascada se probó utilizando la configuración experimental mostrada en la Figura 5.6(a). Esta configuración experimental funciona de la misma manera que la anterior, pero, en este caso, el MZI de detección se colocó sobre un Peltier para aumentar la temperatura de 10 a 70 °C en pasos de 10 °C; mientras tanto, el MZI de referencia se colocó sobre una placa caliente a la temperatura fija de 30 °C (estos sensores estaban separados por 1 m de SMF).

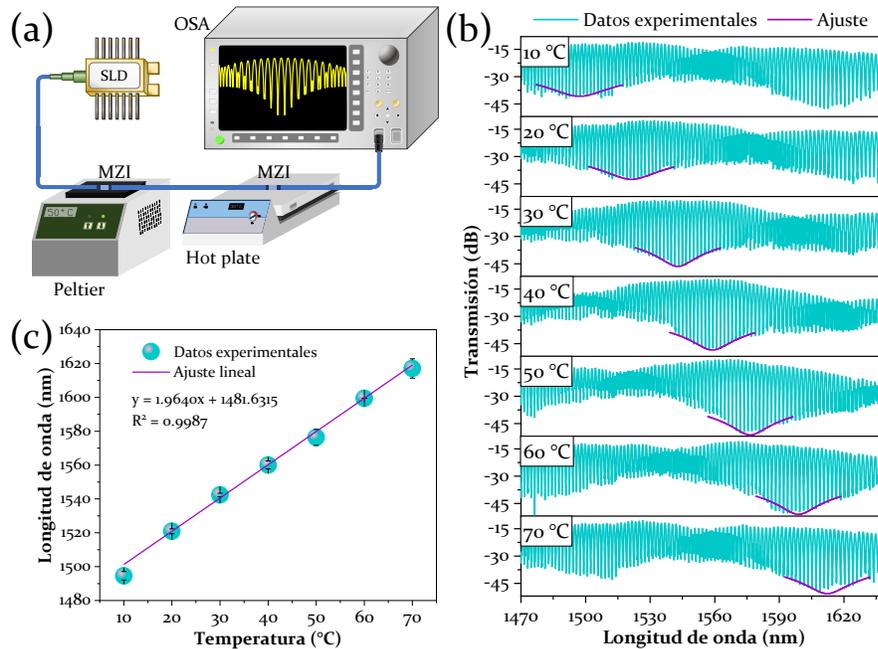


Figura 5.6 (a) Configuración experimental para la medición de la temperatura basada en el efecto Vernier. (b) Espectros experimentales de los dos MZIs cuando el MZI sensor estaba a diferentes temperaturas, (c) Desplazamiento en longitud de onda de la envolvente inferior en función de la temperatura.

La respuesta espectral de los dos MZI en cascada bajo estas condiciones experimentales se muestra en la Figura 5.6(b). Es importante mencionar que se eligieron dos MZIs, y sus espectros de transmisión se representan en la Figura 5.7. Podemos observar que la FSR de cada patrón de interferencia es ligeramente diferente ($FSR_R = 1.859$ nm y $FSR_s = 1.830$ nm), y la diferencia de FSR entre ambos espectros es de 0.029 nm. Utilizando el valor de cada FSR , se encontró que las

longitudes CHCF de los sensores de referencia y de sensado eran $L_{OR} = 2912.656 \mu\text{m}$ y $L_{OS} = 2957.576 \mu\text{m}$ respectivamente. La diferencia de longitud de la CHCF corresponde al 1.54%, siendo solamente 0.04% mayor que la utilizada en la simulación.

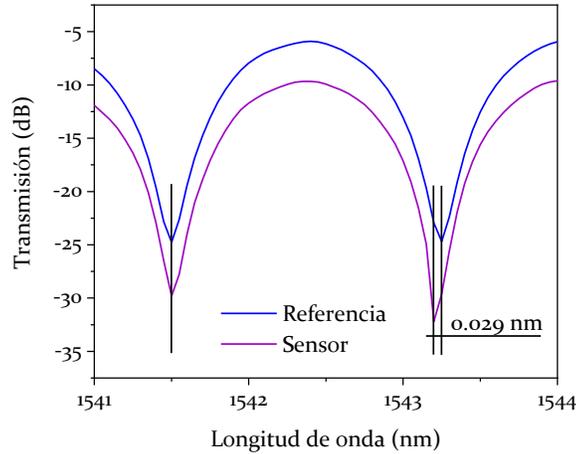


Figura 5.7 Espectro de transmisión de dos sensores fabricados con el sistema mostrado en la Figura 13 a una temperatura de 30 °C.

Observamos que la respuesta espectral de los MZIs concatenados generó un patrón de interferencia modulado con una envolvente de baja frecuencia ($FSR_{envelope} = 113.3 \text{ nm}$). Comparando el valor simulado y el experimental del $FSR_{envelope}$ se observa que la diferencia entre ambos es de 4.6 nm (3.9%). Se monitorizó un pico de la envolvente inferior para medir su desplazamiento en longitud de onda y conocer la sensibilidad a temperatura de los dos MZIs en cascada. Cabe mencionar que el ruido de la señal en los extremos en el eje de la longitud de onda está relacionado con la baja potencia del SLD. Este experimento se repitió tres veces, y los valores medios se representan en la Figura 5.6(c), donde el error máximo asociado a estas mediciones fue del 2.48%. La sensibilidad a temperatura de los dos MZI en cascada fue de 1.964 nm/°C. Cabe destacar que la diferencia entre la sensibilidad a la temperatura simulada y la experimental es del 3.42%, lo que valida de nuevo nuestro análisis numérico, ya que proporciona una excelente concordancia con los resultados experimentales. Aprovechando el efecto Vernier, en el segundo montaje experimental, observamos que la sensibilidad a la temperatura de los dos MZI en cascada es ~67.03 veces mayor que la sensibilidad del MZI sensor por sí mismo. La diferencia entre los factores de amplificación simulados y experimentales es del 0.2%.

5.5.3 Discusión

Se ha demostrado numérica y experimentalmente que la sensibilidad a temperatura de un MZI de una sola fibra puede aumentarse conectando dos MZI en cascada, con una pequeña diferencia entre sus FSR , y la sensibilidad mejorada se debe al efecto Vernier. La sensibilidad a la temperatura predicha por nuestro modelo propuesto muestra una excelente concordancia con los resultados experimentales en ambos casos (un MZI y los dos MZI en cascada).

Durante el diseño de este experimento basado en el efecto Vernier, centramos nuestra atención en tres parámetros: la sensibilidad a la temperatura, el intervalo de temperatura y el factor de amplificación. La mejora de la sensibilidad a temperatura está relacionada con el factor de amplificación; asimismo, el factor de amplificación determina el intervalo necesario para

analizar el espectro óptico, y también afecta al intervalo de detección de temperatura. Por lo tanto, es necesario optimizar estos tres parámetros y la relación entre ellos para mejorar la sensibilidad de los sensores basados en el efecto Vernier.

Tabla 5.2 Diferentes sensores de temperatura solo de fibra basados en el efecto Vernier

| Estructura de la fibra | | Sensibilidad a la temperatura | | | | |
|--------------------------|--|---|-----------------------------------|---------|-----------------------|---------|
| Dispositivo de detección | Dispositivo de referencia | Dispositivo de detección (nm/°C) | Configuración del Vernier (nm/°C) | ΔT (°C) | Factor de aumento (M) | |
| 1 | SMF como FPI (2015) [28] | SHCF como FPI | 0.008 | 1.019 | 250-300 | 127.375 |
| | Interferómetro Sagnac (2015) [24] | Interferómetro Sagnac | -1.46 | -13.36 | 0-10 | 9.15 |
| 3 | Interferómetro Sagnac (2017) [25] | CHCF como FPI | -1.4 | -29.0 | 42-44 | 20.7 |
| | MZI basado en el desplazamiento del núcleo (2017) [20] | Desplazamiento del núcleo basado en MZI | 0.04536 | 0.39736 | 10-75 | 8.7 |
| 5 | FPI de pequeño tamaño (con haz de iones) (2019) [29] | Cavidad FPI-aire | 0,0097 de referencia | -0.654 | 30-120 | 67.42 |
| | CHCF-FPI (2019) [26] | MZI con acopladores de 3dB | 0.0012 | -0.1072 | 30-80 | 89 |
| 7 | FPI utilizando un láser de femtosegundo (2019) [23] | FPI mediante el uso de un Láser | No se menciona | 0.927 | 30-60 | 100 |
| | Microesfera hueca como FPI (2020) [30] | MMF como FPI | 0.0072 | -0.650 | 20-100 | 90.27 |
| 9 | MZI basado en CHCF [22] | MZI basado en CHCF | 0.03015 | 0.5285 | 0-100 | 17.5 |
| | Sensor propuesto CHCF-MZI | CHCF-MZI | 0.0291 | 1.964 | 10-70 | 67.03 |

En este punto, es necesario hacer una revisión de los sensores de fibra óptica basados en el efecto Vernier que se han publicado recientemente. Esta revisión nos permite comparar nuestro sensor con diferentes configuraciones de Vernier, véase la Tabla 5.2. Cabe señalar que los sensores 3 y 6 se construyeron mediante una combinación de interferómetros Sagnac/Fabry-Perot y Fabry-Perot/Mach-Zehnder, respectivamente. Esta es una técnica común utilizada para

separar los dispositivos de detección y de referencia, con el propósito de que el dispositivo de detección se someta a diferentes temperaturas por sí mismo. El problema de esta configuración es el difícil proceso de fabricar interferómetros (Sagnac o un MZI) con un *FSR* similar al del FPI. Los sensores 1, 5 y 8 se basan en los FPI en los que los interferómetros de detección y de referencia están en la punta de la fibra. Aunque estas configuraciones ofrecen las ventajas de un tamaño compacto y un fácil manejo, no es posible separar los sensores de detección y de referencia, lo que hace que ambos FPI experimenten la misma temperatura. Los sensores 2, 4, 7, 9 y nuestra estructura propuesta se construyen utilizando los mismos interferómetros de fibra, Sagnac, MZ, FP, MZ y MZ, respectivamente. Dado que estos sensores se basan en interferómetros con características similares (como la longitud), el error de fabricación de estos dispositivos suele ser pequeño lo que facilita generar dos interferómetros con *FSR* casi iguales.

En cuanto a la sensibilidad a la temperatura de los dispositivos de detección, se puede observar que los sensores 2, 3, 4 y 9 tienen una sensibilidad mayor que la nuestra. Nuestra estructura propuesta tiene mayor sensibilidad a la temperatura en la configuración Vernier que los sensores 1, 4, 5, 6, 7, 8 y 9; sólo los sensores 2 y 3 tienen mayor sensibilidad a la temperatura. Hay que señalar que los sensores 2 y 3 se basan en un interferómetro Sagnac que requiere unos cuantos metros de fibra para su construcción, mientras que nuestro MZI tiene solamente 5 mm de longitud. Debido al pequeño tamaño de nuestro sensor, así como a su intervalo de detección de temperatura, puede utilizarse para monitorizar soluciones biológicas y químicas y dispositivos pequeños como microcanales. Esto gracias a que los dispositivos MZI pueden introducirse en líquidos o polímeros de índice refracción mayores a la fibra y la señal de salida no se ve afectada [31]. Nuestro sensor propuesto tiene un factor de amplificación mayor que los sensores 2, 3, 4 y 9, y tiene un factor similar al 5. Una ventaja de nuestro sensor es que los MZI de detección y de referencia pueden separarse. Esto permite que el MZI de detección se someta a diferentes temperaturas mientras que el MZI de referencia está a una temperatura constante. La comparación anterior nos hace creer que nuestro sensor tiene características iguales o mejores que los sensores de última generación basados en el efecto Vernier.

5.6 Conclusiones

En resumen, propusimos y demostramos un sensor de temperatura altamente sensible basado en dos MZIs hechos completamente de fibra en configuración de cascada que explotan el efecto Vernier. Utilizando esta configuración, fue posible obtener una sensibilidad de temperatura de 1.964 nm/°C en un intervalo de 10 a 70 °C, que es ~67.03 veces mayor que la sensibilidad del MZI aislado. Un análisis numérico verificó estos resultados experimentales. Además, este dispositivo presenta una alta resolución a temperatura, 0.0153 °C (Anritsu MS9740A, resolución de 30 pm). Todas estas destacadas características y la facilidad de fabricación del MZI hacen de este sensor propuesto un excelente candidato para aplicaciones biológicas que requieren alta resolución y sensibilidad.

Referencias

- [1] Q. Wang *et al.*, "High sensitivity refractive index sensor based on splicing points tapered SMF-PCF-SMF structure Mach-Zehnder mode interferometer," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 225, pp. 213-220, 2016.
- [2] Z. Zhang *et al.*, "Hollow-core-fiber-based interferometer for high-temperature measurements," *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 1-9, 2017.
- [3] G. Zuo *et al.*, "Double phase matching in MZI with antiresonant effect for optical fiber sensor application," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 2, pp. 660-666, 2021.
- [4] H. Gao *et al.*, "Antiresonant mechanism based self-temperature-calibrated fiber optic Fabry-Perot gas pressure sensors," *Optics express*, vol. 27, no. 16, pp. 22181-22189, 2019.
- [5] H. Y. Choi, M. J. Kim, and B. H. Lee, "All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber," *Optics Express*, vol. 15, no. 9, pp. 5711-5720, 2007.
- [6] Y. Raji, H. Lin, S. Ibrahim, M. Mokhtar, and Z. Yusoff, "Intensity-modulated abrupt tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for the simultaneous sensing of temperature and curvature," *Optics & Laser Technology*, vol. 86, pp. 8-13, 2016.
- [7] D. Wu, Y. Zhao, and J. Li, "PCF taper-based Mach-Zehnder interferometer for refractive index sensing in a PDMS detection cell," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 213, pp. 1-4, 2015.
- [8] C. Massaroni, M. A. Caponero, R. D'Amato, D. Lo Presti, and E. Schena, "Fiber Bragg grating measuring system for simultaneous monitoring of temperature and humidity in mechanical ventilation," *Sensors*, vol. 17, no. 4, p. 749, 2017.
- [9] C. Sun *et al.*, "A micro MMF layer embedded in LPFG for simultaneous measurement of curvature and temperature," *Optical Fiber Technology*, vol. 48, pp. 134-137, 2019.
- [10] Y. Zhao, L. Cai, and X.-g. Li, "In-fiber modal interferometer for simultaneous measurement of curvature and temperature based on hollow core fiber," *Optics & Laser Technology*, vol. 92, pp. 138-141, 2017.
- [11] H. Gong, M. Xiong, Z. Qian, C.-L. Zhao, and X. Dong, "Simultaneous measurement of curvature and temperature based on Mach-Zehnder interferometer comprising core-offset and spherical-shape structures," *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 1-9, 2015.
- [12] Y. Liu *et al.*, "Simultaneous measurement of gas pressure and temperature with integrated optical fiber FPI sensor based on in-fiber micro-cavity and fiber-tip," *Optical Fiber Technology*, vol. 46, pp. 77-82, 2018.
- [13] Y. Bai, Y. Miao, H. Zhang, and J. Yao, "Simultaneous measurement of temperature and relative humidity based on a microfiber Sagnac loop and MoS₂," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 4, pp. 840-845, 2020.
- [14] J. Komma, C. Schwarz, G. Hofmann, D. Heinert, and R. Nawrodt, "Thermo-optic coefficient of silicon at 1550 nm and cryogenic temperatures," *Applied Physics Letters*, vol. 101, no. 4, p. 041905, 2012.
- [15] X. Li, S. Lin, J. Liang, Y. Zhang, H. Oigawa, and T. Ueda, "Fiber-optic temperature sensor based on difference of thermal expansion coefficient between fused silica and metallic materials," *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 155-162, 2011.

- [16] I. Hernández-Romano, D. Monzón-Hernández, C. Moreno-Hernández, D. Moreno-Hernandez, and J. Villatoro, "Highly sensitive temperature sensor based on a polymer-coated microfiber interferometer," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 24, pp. 2591-2594, 2015.
- [17] I. Hernández-Romano *et al.*, "Optical fiber temperature sensor based on a microcavity with polymer overlay," *Optics express*, vol. 24, no. 5, pp. 5654-5661, 2016.
- [18] J. S. Velázquez-González, D. Monzón-Hernández, D. Moreno-Hernández, F. Martínez-Piñón, and I. Hernández-Romano, "Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a SPR-based fiber optic sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 242, pp. 912-920, 2017.
- [19] Y. Liu, Z. Guo, Y. Zhang, K. S. Chiang, and X. Dong, "Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fibre Bragg grating," *Electronics letters*, vol. 36, no. 6, p. 1, 2000.
- [20] H. Liao *et al.*, "Sensitivity amplification of fiber-optic in-line Mach-Zehnder Interferometer sensors with modified Vernier-effect," *Optics express*, vol. 25, no. 22, pp. 26898-26909, 2017.
- [21] T. Nan *et al.*, "Ultrasensitive strain sensor based on Vernier-effect improved parallel structured fiber-optic Fabry-Perot interferometer," *Optics express*, vol. 27, no. 12, pp. 17239-17250, 2019.
- [22] Z. Wang, L. Huang, C. Liu, H. Wang, S. Sun, and D. Yang, "Sensitivity-enhanced fiber temperature sensor based on Vernier effect and dual in-line Mach-Zehnder interferometers," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 18, pp. 7983-7987, 2019.
- [23] T. Paixão, F. Araújo, and P. Antunes, "Highly sensitive fiber optic temperature and strain sensor based on an intrinsic Fabry-Perot interferometer fabricated by a femtosecond laser," *Optics letters*, vol. 44, no. 19, pp. 4833-4836, 2019.
- [24] L.-Y. Shao *et al.*, "Sensitivity-enhanced temperature sensor with cascaded fiber optic Sagnac interferometers based on Vernier-effect," *Optics Communications*, vol. 336, pp. 73-76, 2015.
- [25] Y. Yang *et al.*, "Sensitivity-enhanced temperature sensor by hybrid cascaded configuration of a Sagnac loop and a FP cavity," *Optics Express*, vol. 25, no. 26, pp. 33290-33296, 2017.
- [26] Y. Ying, C. Zhao, H. Gong, S. Shang, and L. Hou, "Demodulation method of Fabry-Perot sensor by cascading a traditional Mach-Zehnder interferometer," *Optics & Laser Technology*, vol. 118, pp. 126-131, 2019.
- [27] S. Marrujo-García, I. Hernández-Romano, D. A. May-Arrijoja, V. P. Minkovič, and M. Torres-Cisneros, "In-line Mach-Zehnder interferometers based on a capillary hollow-core fiber using Vernier effect for a highly sensitive temperature sensor," *Sensors*, vol. 21, no. 16, p. 5471, 2021.
- [28] P. Zhang *et al.*, "Simplified hollow-core fiber-based Fabry-Perot interferometer with modified Vernier effect for highly sensitive high-temperature measurement," *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 1-10, 2015.
- [29] A. D. Gomes *et al.*, "Multimode Fabry-Perot interferometer probe based on Vernier effect for enhanced temperature sensing," *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 453, 2019.
- [30] A. D. Gomes *et al.*, "Hollow microsphere combined with optical harmonic Vernier effect for strain and temperature discrimination," *Optics & Laser Technology*, vol. 127, p. 106198, 2020.

- [31] S. Marrujo-García, I. Hernández-Romano, M. Torres-Cisneros, D. A. May-Arriola, V. P. Minkovičh, and D. Monzón-Hernández, "Temperature-independent curvature sensor based on in-fiber Mach-Zehnder interferometer using hollow-core fiber," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 15, pp. 4166-4173, 2020.

Capítulo 6

Es un error capital teorizar antes de tener datos. Sin darse cuenta, uno empieza a deformar los hechos para que se ajusten a las teorías, en lugar de ajustar las teorías a los hechos.
- Arthur Conan Doyle

En este capítulo se abordará el uso del dispositivo MZI basado en CHCF como láser sintonizable. Se presentará la información relacionada con las adaptaciones técnicas que se le hicieron al sensor para usarlo con los fines antes mencionados. Se abordará el principio de funcionamiento, así como el arreglo experimental utilizado. Este capítulo fue escrito con los datos e información más actuales y precisos para el momento en que se realizó la publicación JCR (en la que se basa este apartado) por lo que es posible que existan discrepancias en datos e información presentados en el Capítulo 3.

Aplicación del MZI como láser sintonizable

6.1 Introducción

Durante varios años, se ha dedicado un esfuerzo importante al estudio de los láseres sintonizables de fibra dopada con erbio (TEDFLs, por sus siglas en inglés), ya que pueden utilizarse en diversas aplicaciones, como los sistemas de telecomunicaciones [1], la espectroscopia [2] y la tomografía de coherencia óptica [3]. Los TEDFL más atractivos para estas aplicaciones son los que tienen un intervalo sintonizable de longitud de onda largo, un ancho de línea estrecho, buena estabilidad de potencia y alta relación de supresión de modo lateral (SMSR, por sus siglas en inglés) o relación señal-ruido (SNR, por sus siglas en inglés). La mayoría de estos TEDFL se han construido introduciendo un filtro de fibra sintonizable dentro de una cavidad de fibra láser. Es bien sabido que estos filtros son los responsables de las atractivas características de los láseres. Por esta razón, se han propuesto varios dispositivos de fibra óptica que funcionan como un filtro para sintonizar EDFL, como las rejillas de Bragg de fibra [4, 5], los interferómetros Mach-Zehnder (MZI) [6-8] y Sagnac [9, 10], y los componentes no lineales [11]. Los filtros sintonizables también incluyen fibras especiales como las de cristal fotónico [12], las de doble núcleo [6] y las conservadoras de polarización [9]. La optimización del rendimiento de los filtros es fundamental ya que es el componente clave que determina, en última instancia, las características de la salida del láser. Por ejemplo, Q. Zhao et al. [13] utilizaron una estructura en cascada de filtros Sagnac y Lyot de dos segmentos para mejorar la salida del láser, obteniendo una SMSR de 47 dB y un rango de sintonización de 1530 a 1560 nm. Por otro lado, también se han propuesto TEDFLs basados en fibras especiales; por ejemplo, Z. Tang et al. [14] implementaron un interferómetro de modos utilizando una fibra de núcleo suspendido de trébol de cuatro hojas. Colocando este filtro dentro de una EDFL, demostraron que la señal óptica de salida mostraba una SNR de 55 dB y un rango sintonizable de 1581.5 a 1546.6 nm en operación de longitud de onda única. A pesar del buen rendimiento de estos TEDFL, es evidente que la complejidad del proceso de fabricación aumenta, ya sea por los pasos adicionales en el procesamiento de la fibra o cuando se necesitan dos dispositivos ópticos para implementar un

filtro láser óptimo. En el caso de las fibras especiales, el principal inconveniente está relacionado con el coste de la propia fibra óptica.

En los últimos años, se han propuesto varios dispositivos de fibra óptica basados en fibras capilares huecas (CHCF), como el FPI [15] y las guías de ondas ópticas reflectantes antirresonantes (ARROW, por sus siglas en inglés) [16]. Los dispositivos basados en CHCFs son atractivos debido a su bajo coste, a los sencillos métodos de fabricación necesarios para implementar los dispositivos de fibra óptica y a que presentan un buen comportamiento. Nosotros propusimos un TEDFL basado en un MZI que se construye simplemente empalmado una longitud corta de CHCF entre dos secciones de fibras multimodo. Aunque la estructura del filtro de fibra es bastante simple, nos permite conseguir una emisión láser muy estrecha con una alta relación de extinción. La salida óptima del láser muestra una emisión de una sola longitud de onda con un ancho de línea de unos 0.03 nm, una SMSR de 53 dB y una SNR de 66 dB. La emisión del láser también puede sintonizarse térmicamente de 1566.46 a 1570.09 nm cuando el MZI se calienta de 30 a 140 °C. Creemos que este láser puede utilizarse para diferentes aplicaciones, ya que muestra variaciones mínimas de potencia y longitud de onda, a la vez que exhibe una buena SNR.

6.2 Principio de funcionamiento del MZI como láser sintonizable

Una propiedad muy importante de los MZIs es que puede ser usado como un filtro óptico, esto se debe a la característica de dependencia a la longitud de onda, como se muestra en la siguiente ecuación [17]

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{eff} L}, \quad (9)$$

donde $\Delta\lambda$, λ , Δn_{eff} y L son la separación entre dos picos consecutivos del espectro de transmisión, la longitud de onda, la ERID y la longitud del MZI. Es decir, la separación entre los picos del patrón de salida dependerá de la longitud de onda de la luz que entre en el dispositivo. Es debido a esta característica que es posible utilizar el MZI como un filtro seleccionador de longitud de onda [18].

La separación de los picos del espectro de transmisión del MZI puede ser modificada ocasionando un cambio de fase en el dispositivo ($\Delta\phi$), para lograr esto se pueden hacer cambios en la longitud del interferómetro (L) o modificar el índice de refracción efectivo del dispositivo (Δn_{eff}). Es así como de un conjunto de longitudes de onda que entren en el dispositivo solo algunas saldrán de este. Por otro lado, al cambiar alguna característica física del MZI se podrá modificar alguno de los dos parámetros antes mencionados, (Δn_{eff} o L) haciendo posible seleccionar diferentes longitudes de onda a la salida del MZI según se modifiquen las propiedades de este.

Finalmente, aunque podemos fabricar diferentes tamaños de MZIs con gran precisión su tamaño se considera “fijo”, siendo que no se puede modificar bajo demanda la longitud del dispositivo. No obstante, es posible lograr cambios en su longitud y en su ERID utilizando diferentes técnicas, tales como aplicando un esfuerzo físico (torsión, flexión, vibración), cubrir con algún otro material la superficie del MZI o cambiando la temperatura del dispositivo. Siendo esta última la seleccionada para este trabajo, ya que como se vio en el Capítulo 5, al calentar el dispositivo tanto el IR como la longitud del dispositivo se ven afectadas.

6.3 Proceso de fabricación del MZI como láser sintonizable

El montaje experimental utilizado para fabricar los filtros sintonizables es el que se puede observar en la Figura 3.1. Por su parte, el arreglo que se utilizó para probar los dispositivos de fibra se muestra en la Figura 3.4. Se utilizó un diodo superluminiscente como fuente de banda ancha (SLD-1550S-A40, Thorlabs) con un ancho de banda efectivo de 160 nm, centrado en 1550 nm. La señal de salida de los filtros, que se muestra en la Figura 3.7(a), se midió con un analizador de espectros ópticos (MS9740A, Anritsu). Cabe mencionar que se fabricaron tres sensores para cada longitud de CHCF, y sólo se seleccionó uno para mostrarlo en la Figura 3.7(a). La Tabla 6.1 muestra algunos parámetros del espectro de cada filtro. Consideramos que las pérdidas por inserción y el contraste de la señal son parámetros fundamentales para elegir el MZI que será probado en la cavidad del láser. Entonces, con base a los resultados mostrados en la Tabla 6.1, decidimos utilizar el filtro construido con la longitud CHCF de 0.5 mm ya que el contraste de señal es el mayor (31.18 dB); casualmente, presenta la menor pérdida por inserción. Es importante destacar que las longitudes de CHCF de la Tabla 6.1 son las longitudes de diseño. Las longitudes físicas reales se evaluaron utilizando datos experimentales.

Tabla 6.1 Pérdida de inserción y contraste de los diferentes MZI.

| Diseño de la longitud de la CHCF (mm) | FSR (nm) | Pérdida de inserción (dB) | Contraste (dB) | Ancho de banda de 3 dB (nm) |
|---------------------------------------|----------|---------------------------|----------------|-----------------------------|
| 0.3 | 17.06 | -13.30 | 9.38 | 9.92 |
| 0.4 | 13.16 | -10.64 | 21.01 | 6.88 |
| 0.5 | 9.94 | -6.52 | 31.18 | 5.22 |
| 0.6 | 8.45 | -14.2 | 22.17 | 4.52 |
| 0.7 | 7.41 | -13.32 | 16.05 | 3.92 |

Para determinar el número de modos que generan el patrón de interferencia, se aplicó la transformada rápida de Fourier a los espectros, como se muestra en la Figura 3.7(b). En todos los gráficos, se observa una amplitud a frecuencia espacial cero, que indica la presencia del modo fundamental (el modo que viaja en el espacio libre, sección hueca de la CHCF). La otra amplitud cuya frecuencia espacial cambia al variar la longitud de la CHCF está relacionada con un modo específico de revestimiento que viaja en el revestimiento anular (sílice) de la CHCF.



Figura 6.1 Vista lateral del dispositivo fabricado y la sección de empalme entre la MMF y la CHCF.

Como se mencionó en la última sección, el filtro con la longitud de diseño de 0.5 mm (longitud física real de 0.48 mm, véase la Figura 6.1 se utilizó para implementar un TEDFL, véase la Figura 6.2. El láser de cavidad de anillo de fibra consiste en un diodo láser de bombeo (BL976-PAG700, Thorlabs) que emite luz (976 nm) hacia un acoplador WDM (980/1550)

(multiplexación por división de longitud de onda) y este lo dirige hacia 4.5 m de EDF (Er80-8/125, Thorlabs cuyo pico de absorción a 1530 nm es de 80 dB) . Se añadió un controlador de polarización (PC) en la cavidad no sólo para obtener una mayor SNR sino también para conseguir una potencia de salida más estable. Se colocó un aislador en la cavidad del láser para proteger el sistema contra las reflexiones y obtener un funcionamiento unidireccional. Se utilizó un acoplador de fibra óptica (90/10) para controlar la salida del láser, conectando el puerto del 10% al OSA y el resto de la señal (90%) se envió de vuelta a la cavidad para la generación continua del láser. Cabe mencionar que la longitud de la cavidad del láser es de aproximadamente 25 m. Además, el láser se colocó dentro de una caja de acrílico para evitar las fluctuaciones de temperatura, y el MZI se mantuvo a su temperatura de funcionamiento.

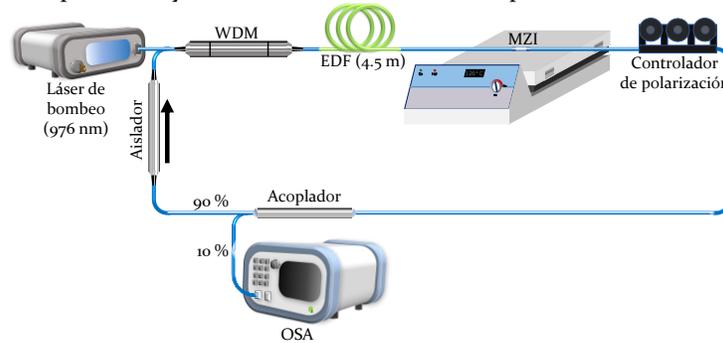


Figura 6.2 Esquema de la cavidad del láser de anillo de fibra desarrollado utilizando un MZI basado en CHCF.

6.4 Resultados experimentales

Es importante destacar que la superposición del espectro de transmisión del MZI y el espectro de ganancia del EDF determinan la longitud de onda de emisión del láser. Sin embargo, se requiere un ajuste inicial de algunos parámetros para un funcionamiento óptimo del láser.

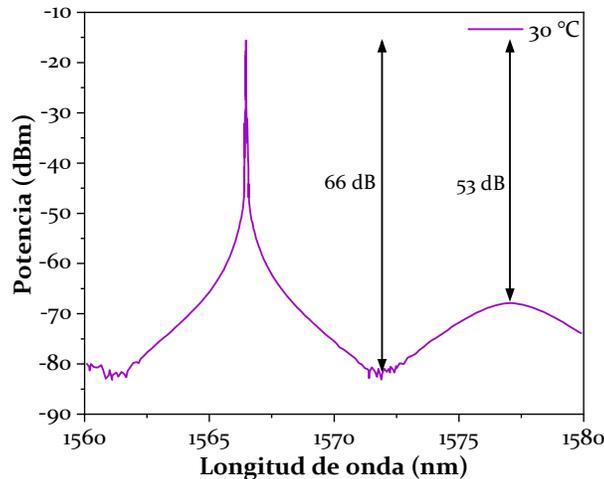


Figura 6.3 Emisión láser obtenida del montaje experimental del láser de fibra en anillo.

Por lo tanto, utilizando este MZI, encontramos una emisión láser estable cuando el diodo de bombeo se encontraba en una corriente de 400 mA. Además, se ajustó el PC para obtener una alta SNR y una potencia de salida estable, aunque el MZI no depende de la polarización. Después de este ajuste inicial en el PC y operando a una temperatura fija (30 °C), fue posible obtener una emisión láser única centrada en 1566.46 nm con una anchura espectral alrededor de 0.03 nm, y con una alta SNR de 66 dB (también tiene una SMSR de 53 dB, ver Figura 6.3. Cabe mencionar que la resolución mínima del OSA es de 30 pm. Estos resultados ponen de manifiesto la utilidad del MZI como filtro dentro de una cavidad láser, ya que genera un ancho de línea estrecho con una elevada SNR. Cabe destacar que las mejoras en la salida del láser se deben al MZI, cuya longitud total es de sólo 2.5 mm. El pequeño tamaño del filtro ofrece una evidencia indiscutible de que nuestra técnica de fabricación es convincente, requiere sólo unos pocos pasos de fabricación y es relativamente sencilla en comparación con otros sistemas [13, 19-22].

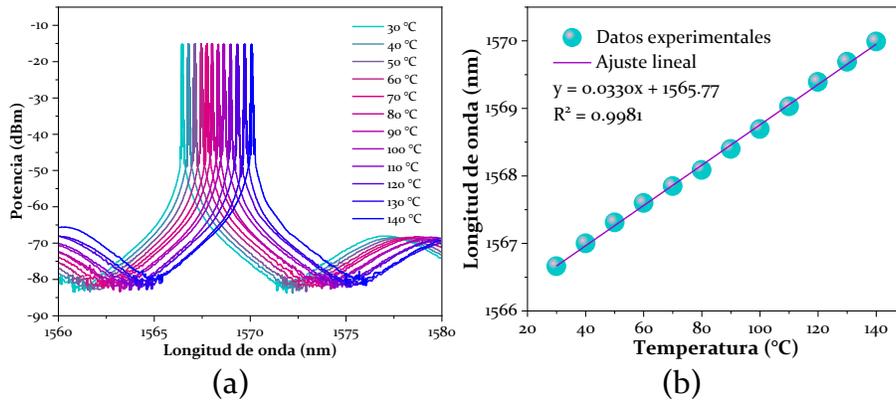


Figura 6.4 (a) Respuesta espectral del láser para temperaturas de 30 a 140 °C, (b) Desplazamiento de la longitud de onda del pico del láser en función de la temperatura aplicada.

Aprovechando la dependencia de la temperatura del MZI, como se mencionó anteriormente, se colocó el filtro en una placa caliente (Thermo Scientific™, modelo HP88854100) para desintonizar la emisión láser a medida que se aumenta la temperatura. Al cambiar la temperatura de 30 a 140 °C, podemos sintonizar la emisión láser de 1566.46 a 1570.09 nm, como se muestra en la Figura 6.4(a).

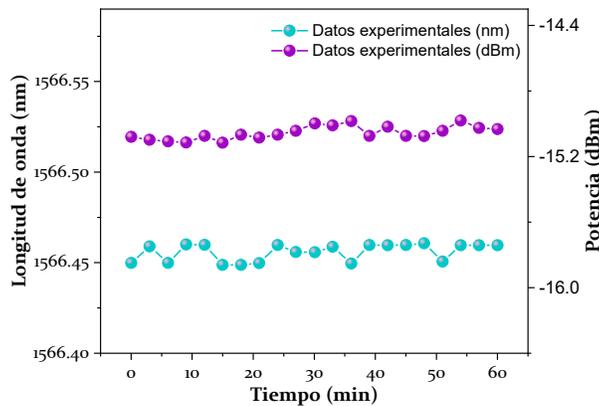


Figura 6.5 Análisis de la estabilidad del láser.

Se comprobó que la sensibilidad a la temperatura era de 33 pm/°C, véase la Figura 6.4(b). Además, se analizó la estabilidad de la emisión única del láser mediante la monitorización de la salida del láser cada 3 minutos durante una hora. Se puede observar en la Figura 6.5 que las variaciones de potencia y longitud de onda fueron de 0.1379 dB y 0.0108 nm, respectivamente. Estas pequeñas variaciones de la emisión láser (amplitud y longitud de onda) se deben a la pequeña sensibilidad a temperatura del sensor, provocando pequeñas fluctuaciones de temperatura (inferiores a 2 °C) que producen ligeros cambios en la emisión láser. Como resultado, se consiguió una emisión láser única, estable y sintonizable.

Para comparar el comportamiento de nuestro láser con sistemas similares basados en dispositivos interferométricos, elaboramos la Tabla 6.2, que resume las estructuras y los resultados de otros grupos de investigación en los últimos años. El ancho de línea del láser es similar en todos los casos, excepto en la estructura 3, que es ligeramente mayor. La SNR y la SMSR de nuestro láser son más altas que las de los otros láseres enumerados en la Tabla 6.2. En cuanto a las fluctuaciones de potencia y longitud de onda, puede decirse que los resultados de todos los láseres son similares, excepto los de la estructura 4, que demuestra un mejor rendimiento. Por último, las sensibilidades reportadas por las estructuras 2 y 4 son más altas que nuestro láser. No obstante, el proceso de fabricación de nuestro filtro es sencillo en comparación con los otros filtros, ya que no necesita métodos costosos y complejos como el revestimiento metálico, el adelgazamiento de fibra o las costosas fibras especiales.

Tabla 6.2 Comparación de los parámetros del láser con la literatura

| No. | Estructura | Ancho de línea | Fluctuaciones | SNR/SMSR | Alcance/Sensibilidad |
|--------|---------------------------------|-------------------|------------------------|--------------|-------------------------------------|
| 1 [19] | MZI (recubrimiento de aluminio) | < 0.05 nm | 0.2 dB | 55 dB/ - | 0 a 90 (90 o C) 28 pm/ o C |
| 2 [23] | MZI (Fibra cónica) | - | - | 50 dB/ - | 55 a 70 (15 o C) 1.09 nm/ o C |
| 3 [24] | SMF-MMF-DCF-SMF | 0.251 nm | - | 44 dB/ - | 20 a 80 (60 o C) 18 pm/ o C |
| 4 [20] | DPFI (cacahuates de fibra) | Acerca de 0.02 nm | 0.03 nm 0.003 dB | -/ 50 dB | De 25 a 35 (10 o C) 1.24 nm/ o C |
| 5 | Nuestro trabajo (MMF-CHCF-MMF) | ~ 0.03 nm | 0.0108 nm 0.1379 dB | 66/ 53 dB | 30 a 140 (140 o C) 33 pm/ o C |

6.5 Conclusiones

En resumen, se propuso e implementó experimentalmente un EDFL de ancho de línea estrecho y sintonizable en longitud de onda basado en MZI. El filtro MZI se fabricó empalmado una longitud corta de CHCF entre dos pequeñas secciones de MMF. Al insertar este filtro en una EDFL, el láser emitió a 1566.46 nm, con una anchura espectral en torno a 0.03 nm y una SNR de 66 dB. El TEDFL mostró bajas fluctuaciones de potencia (0.1379 dB) y prácticamente ninguna variación de la longitud de onda (0.0108 nm). La emisión de una sola longitud de onda

también se sintonizó de 1566.46 a 1570.09 nm aumentando la temperatura del filtro. Cabe destacar que el proceso de fabricación es rentable y altamente reproducible, requiriendo mínimos componentes para su funcionamiento.

Referencias

- [1] Z.-R. Lin, C.-K. Liu, and G. Keiser, "Tunable dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser covering both C-band and L-band for high-speed communications," *Optik*, vol. 123, no. 1, pp. 46-48, 2012.
- [2] H. Y. Ryu, W.-K. Lee, H. S. Moon, and H. S. Suh, "Tunable erbium-doped fiber ring laser for applications of infrared absorption spectroscopy," *Optics communications*, vol. 275, no. 2, pp. 379-384, 2007.
- [3] S. Chinn, E. Swanson, and J. Fujimoto, "Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source," *Optics letters*, vol. 22, no. 5, pp. 340-342, 1997.
- [4] Z. Zhang, C. Mou, Z. Yan, K. Zhou, L. Zhang, and S. Turitsyn, "Sub-100 fs mode-locked erbium-doped fiber laser using a 45°-tilted fiber grating," *Optics express*, vol. 21, no. 23, pp. 28297-28303, 2013.
- [5] X. Feng, H.-y. Tam, and P. K. A. Wai, "Switchable multiwavelength erbium-doped fiber laser with a multimode fiber Bragg grating and photonic crystal fiber," *IEEE photonics technology letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1088-1090, 2006.
- [6] F. Su-Chun, X. Ou, L. Shao-Hua, and J. Shui-Sheng, "Switchable multi-wavelength erbium-doped fiber lasers based on a Mach-Zehnder interferometer using a twin-core fiber," *Chinese Physics Letters*, vol. 26, no. 6, p. 064208, 2009.
- [7] H. Ahmad and A. Jasim, "Stable C-band fiber laser with switchable multi-wavelength output using coupled microfiber Mach-Zehnder interferometer," *Optical Fiber Technology*, vol. 36, pp. 105-114, 2017.
- [8] L. Zhang *et al.*, "Room-temperature power-stabilized narrow-linewidth tunable erbium-doped fiber ring laser based on cascaded Mach-Zehnder interferometers with different free spectral range for strain sensing," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 7, pp. 1966-1974, 2020.
- [9] W. He, C. Shangguan, L. Zhu, M. Dong, and F. Luo, "Tunable and stable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on a double Sagnac comb filter with polarization-maintaining fibers," *Optik*, vol. 137, pp. 254-261, 2017.
- [10] P. Wang, L. Wang, G. Shi, T. He, H. Li, and Y. Liu, "Stable multi-wavelength fiber laser with single-mode fiber in a Sagnac loop," *Applied Optics*, vol. 55, no. 12, pp. 3339-3342, 2016.
- [11] X. Liu and C. Lu, "Self-stabilizing effect of four-wave mixing and its applications on multiwavelength erbium-doped fiber lasers," *IEEE photonics technology letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2541-2543, 2005.
- [12] X. Liu *et al.*, "Tunable and switchable multi-wavelength erbium-doped fiber laser with highly nonlinear photonic crystal fiber and polarization controllers," *Laser Physics Letters*, vol. 5, no. 12, p. 904, 2008.
- [13] Q. Zhao *et al.*, "Tunable and interval-adjustable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on cascaded filters with the assistance of NPR," *Optics & Laser Technology*, vol. 131, p. 106387, 2020.

- [14] Z. Tang, L. Liu, T. Benson, Z. Lian, and S. Lou, "Dual-wavelength interval tunable and multi-wavelength switchable high-performance fiber laser based on four-leaf clover suspended core fiber filter," *Optics & Laser Technology*, vol. 139, p. 106966, 2021.
- [15] S. Marujo-García *et al.*, "Polymer Comparison on Temperature Sensors Based on Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer," in *Latin America Optics and Photonics Conference, 2018: Optica Publishing Group*, p. Tu5B. 5.
- [16] L. A. Herrera-Piada, I. Hernández-Romano, D. A. May-Arriola, V. P. Minkovič, and M. Torres-Cisneros, "Sensitivity enhancement of curvature fiber sensor based on polymer-coated capillary hollow-core fiber," *Sensors*, vol. 20, no. 13, p. 3763, 2020.
- [17] W. Chen *et al.*, "Switchable multi-wavelength fiber ring laser based on a compact in-fiber Mach-Zehnder interferometer with photonic crystal fiber," *Laser physics*, vol. 19, pp. 2115-2119, 2009.
- [18] R. Hui and M. O'Sullivan, *Fiber-Optic Measurement Techniques*. Academic Press, 2022.
- [19] J. Martin-Vela *et al.*, "Switchable and tunable multi-wavelength fiber laser based on a core-offset aluminum coated Mach-Zehnder interferometer," *Optics & Laser Technology*, vol. 125, p. 106039, 2020.
- [20] A. Martínez-Ríos *et al.*, "High sensitivity fiber laser temperature sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 2399-2402, 2014.
- [21] R. I. Álvarez-Tamayo *et al.*, "All-fiber laser curvature sensor using an in-fiber modal interferometer based on a double clad fiber and a multimode fiber structure," *Sensors*, vol. 17, no. 12, p. 2744, 2017.
- [22] H. Wan, Y. Chen, Q. Zhou, Z. Shen, and Z. Zhang, "Tunable, single-wavelength fiber ring lasers based on rare earth-doped, double-peanut fiber interferometers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 6, pp. 1501-1505, 2019.
- [23] X. Li, S. Lin, J. Liang, Y. Zhang, H. Oigawa, and T. Ueda, "Fiber-optic temperature sensor based on difference of thermal expansion coefficient between fused silica and metallic materials," *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 155-162, 2011.
- [24] H. Y. Choi, M. J. Kim, and B. H. Lee, "All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber," *Optics Express*, vol. 15, no. 9, pp. 5711-5720, 2007.

Capítulo 7

*Es muy difícil derrotar a un programa de investigación que esté defendido por científicos imaginativos y de talento.
- Imre Lakatos*

En este capítulo se hará una recopilación condensada de los logros obtenidos durante la realización de estos proyectos. Se hará una revisión de las conclusiones generales y se presentarán las opciones que permiten dar continuidad a estos proyectos.

Conclusiones generales y trabajo a futuro

7.1 Conclusiones generales

Se desarrolló una técnica de fabricación de MZI altamente reproducible con la que es posible fabricar dispositivos multifuncionales que tienen aplicación en diversas áreas de estudio como en la medición de variables físicas, por ejemplo, curvatura y temperatura, así como un filtro para producir un láser sintonizable. Para cumplir el propósito anterior se implementó un sistema preciso de corte conformado por una cortadora estándar, un microscopio, una cámara y una etapa de traslación micrométrica. Además, se desarrollaron programas especiales para una empalmadora FITEL con los cuales se estandarizó el proceso de empalme y se redujeron los problemas al empalmar fibras estándar con fibras especiales (SMF/MMF y CHCF). Lo anterior nos permitió reducir los errores de fabricación en los dispositivos, lo que se traduce en una alta reproducibilidad, un contraste alto ($10 \sim +30$ dB) y FSR de 1.8 nm a 18 nm.

Con esta estructura se implementó:

Un sensor de curvatura (-11.80 ± 1.30 dB/m⁻¹ de 0.95 m⁻¹ a 2.78 m⁻¹).

Un sensor de temperatura usando el efecto Vernier (1.964 nm/°C de 10 a 70 °C).

Un láser sintonizable (Ancho espectral de 0.03 nm, SNR 66 dB de 1566.46 a 1570.09 nm).

7.2 Trabajo a futuro

Reducir el error de fabricación mejorando el sistema de corte, parte de esto puede lograrse por medio de la automatización de la etapa de traslación micrométrica al igual que mejorando la montura de sujeción. Otra vertiente importante sería el uso de fibras capilares de diámetro interno diferente, lo que nos abre las puertas a obtener datos estadísticos necesarios para analizar el comportamiento de los empalmes y la longitud de los acopladores modales, lo que nos permitirá controlar y mejorar el contraste de la señal de salida de los dispositivos. También se planea hacer un análisis experimental de la estructura para tratar de obtener *FSR* menores a 1.8 nm y mayores a 18 nm, con el fin de encontrar otras aplicaciones a estos dispositivos.

ANEXO 1

Como se mencionó en el Capítulo 3, el cambio de temperatura que experimente el MZI produce un cambio en el índice de refracción y en la longitud del dispositivo, lo cual se puede apreciar, en los dos casos, como un cambio en la longitud de onda de uno de los valles del dispositivo. Esto lo podemos apreciar simulando cada efecto por separado. Para observar su funcionamiento se simularon dos dispositivos de diferentes longitudes, uno de 0.3 mm y otro de 3.0 mm.

Las simulaciones del dispositivo de 0.3 mm se obtuvieron usando la expansión térmica para cada temperatura (10 – 60 °C) dejando fijo el índice de refracción del dispositivo a 20 °C, como se observa en la Figura 8.1(a), para posteriormente hacer lo opuesto, dejar fija la expansión térmica a 20 °C y simular el cambio en el índice de refracción respecto a la temperatura, como se ve en la Figura 8.1(c).

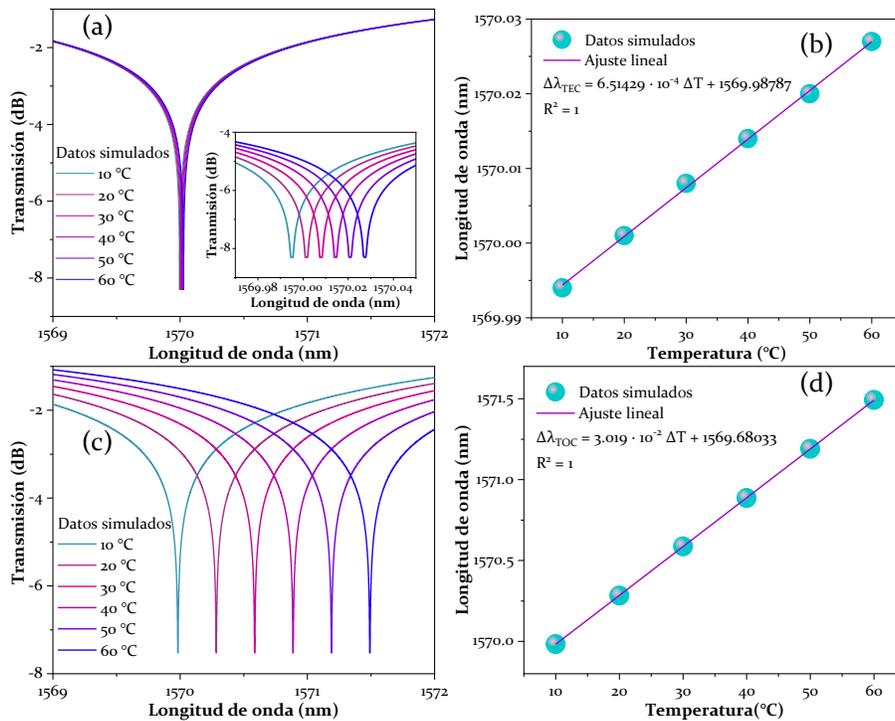


Figura 8.1 Simulaciones del dispositivo de 0.3 mm de longitud. (a) Índice de refracción fijo. (b) Respuesta a temperatura del dispositivo usando solo el TEC. (c) Expansión térmica fija. (d) Respuesta a temperatura del dispositivo usando solo el TOC.

No hace falta calcular las pendientes de cada patrón de interferencia para darse cuenta de que, para el dispositivo con longitud de 0.3 mm, el efecto de la expansión térmica es muy pequeño, observe la Figura 8.1(b), mientras que el cambio de índice de refracción tiene un efecto muy superior sobre el cambio de fase de la señal, como puede observarse en la Figura 8.1(d). Por su parte, las simulaciones del dispositivo de 3.0 mm se llevaron a cabo repitiendo la formula anterior, primero se calculó la expansión térmica dejando fijo el índice de refracción del

dispositivo, como se observa en la Figura 8.2(a), para posteriormente hacer lo pertinente dejando fija la expansión térmica y simular el cambio en el índice de refracción respecto a la temperatura, como se ve en la Figura 8.2(c).

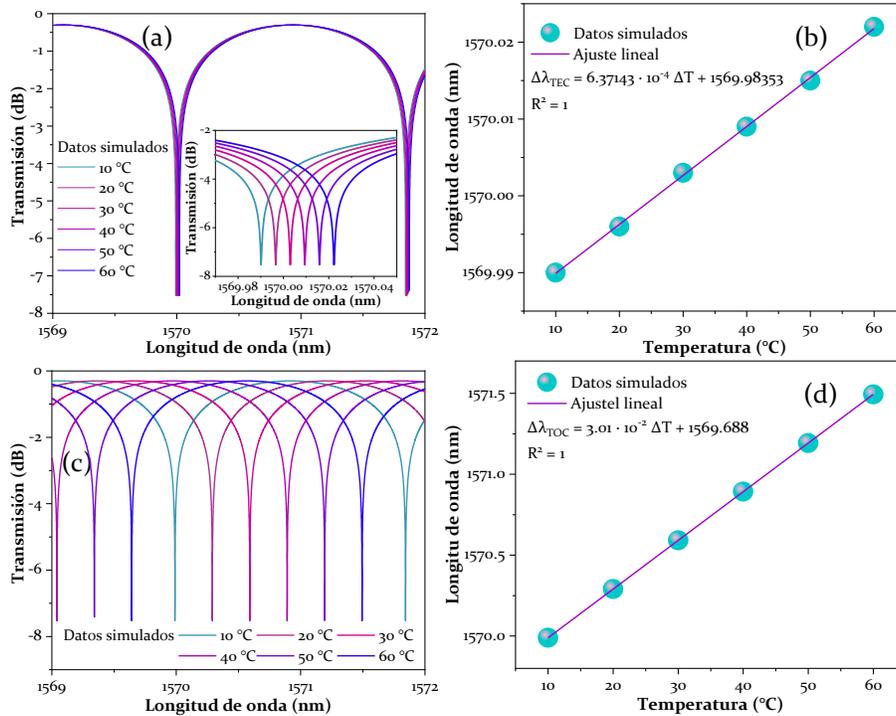


Figura 8.2 Simulaciones del dispositivo de 3.0 mm de longitud. (a) Índice de refracción fijo. (b) Respuesta a temperatura del dispositivo usando solo el TEC. (c) Expansión térmica fija. (d) Respuesta a temperatura del dispositivo usando solo el TOC.

Una vez que se extrae la pendiente de las gráficas, salta a la vista que para ambos dispositivos el comportamiento es muy similar. Para el dispositivo con longitud de 3.0 mm, el efecto de la expansión térmica también es casi despreciable, observe la Figura 8.2(b), mientras que el cambio de índice de refracción nuevamente se muestra ampliamente superior en el cambio de fase de la señal, como puede observarse en la Figura 8.2(d). De las ecuaciones obtenidas ($\Delta\lambda_{TEC}$ y $\Delta\lambda_{TOC}$) se puede decir que el efecto de la expansión térmica sobre los MZI es dos órdenes de magnitud menor que el efecto de cambio de índice de refracción.