



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

Implementación de un interferómetro Mach-Zehnder recubierto de aluminio como sensor de temperatura

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

(Opción: Instrumentación y Sistemas Digitales)

PRESENTA:

Ing. Eliana Isabel Pacheco Chacón

DIRECTORES:

Dr. Roberto Rojas Laguna

Dr. Juan Manuel Sierra Hernández

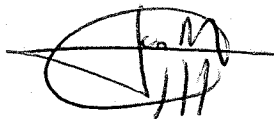
_____, Gto., a 15.09 de Salamanca del 20 17.

M. EN I. J. ANTONIO ALVAREZ JAIME
COORDINADOR DE ASUNTOS ESCOLARES
P R E S E N T E.-

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno (a) Eliana Isabel Pacheco Chacón del Programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica y cuyo número de NUA es: 145573 del cual soy director. El título de la tesis es: Implementación de un interferómetro Mach-Zender recubierto de aluminio como sensor de temperatura

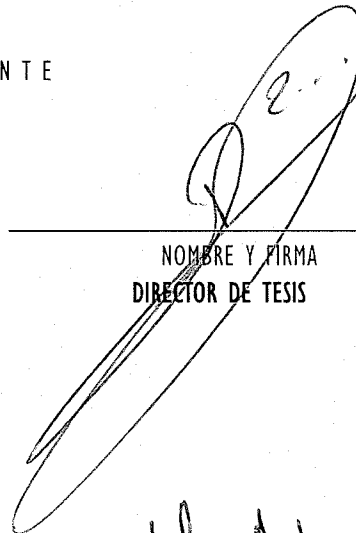
Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los dos sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE

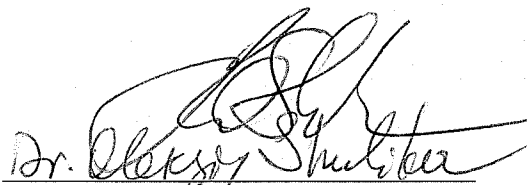


Dr. Juan Manuel Sierra Hernández

NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO



NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS



NOMBRE Y FIRMA
PRESIDENTE

Mario Alberto Ibarra U

NOMBRE Y FIRMA
VOCAL

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres, Eli Omar Pacheco Moreno y Gudilia del Carmen Chacón de Pacheco por la educación y los valores que han brindado y que me han permitido llegar hasta donde estoy hoy

A mis hermana Maria del Carmen Pacheco Chacón, por su compañía leal y ser quien me impulsa cada vez a ser mas y mejor

A mi prometido Miguel Alfonso Vásquez Barrera, por su apoyo incondicional y orientación, en estos años que hemos compartido juntos.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis asesores, el Dr. Juan Manuel Sierra Hernández y el Dr. Roberto Rojas Laguna por su valiosa formación y apoyo en el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Marco Bianchetti y el Dr. Iván Hernández Romano, por su colaboración en el recubrimiento de los interferómetros

Al M.I. Jesús Joaquín Yañez Borjas, quien a través de su excelente desempeño, tuvo la potestad de recomendar mi entrada a este programa. Y por su apoyo y orientación en la admisión al mismo.

Al director del Campus Irapuato-Salamanca División de Ingenierías, el Dr. Victor Ayala por los recursos brindados, tanto para el desarrollo de esta tesis, como para la participación de congresos nacionales e internacionales

A mis sinodales, el Dr. Igor Oleksiy Shulika y el Dr. Mario Ibarra Manzano por dedicar parte de su tiempo en la revisión de éste trabajo.

Agradecimientos Institucionales

A la Universidad de Guanajuato, especialmente a la División de Ingenierías del Campus Irapuato-salamanca por la formación y el apoyo que he recibido. A todos los profesores mis agradecimientos por su guía y orientación durante estos dos años.



Este trabajo fue realizado gracias al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, CONACYT, bajo la beca número 718631/592276. Y con apoyo del proyecto de incorporación de nuevo PTC del PRODEP con número UGTO-PTC-568.



Resumen

Uno de los parámetros más comunes en los procesos industriales es la temperatura. Existen muchas formas comerciales de medirla y muchos dispositivos con diferentes características que se acoplan a las necesidades particulares de cada proceso. Una de las ramas de investigación en esta área es la de sensores de fibra óptica, ya que, estos presentan ventajas como que son a prueba de explosiones, no dependen de electricidad, por lo que son inmunes a interferencia electromagnética. Además, algunas configuraciones, no requieren contacto y son implementables para aplicaciones distribuidas. El fenómeno de interferometría, se logra haciendo coincidir dos haces coherentes entre sí, que viajan por distintos caminos ópticos. Éste es uno de los más utilizados en el sensado por medio de fibra óptica, ya que permite relacionar el índice de refracción del medio por el que viaja la luz, directamente con la fase del haz. A su vez, el índice de refracción es un parámetro dependiente de diversas variables físicas, así que, de esta forma, dichas variables modulan la señal de luz. Uno de los métodos más comunes para utilizar este fenómeno, es mediante la implementación de interferómetros intermodales tipo Mach-Zehnder (MZI). Aquí el objetivo es excitar los modos en el revestimiento de una sección de fibra óptica, para luego recombinar estos modos con el modo fundamental del núcleo. La diferencia de camino óptico en este caso se debe a la diferencia que existe entre el índice de refracción del núcleo y el revestimiento. Se han reportado diversas técnicas para fabricar estos interferómetros, y se ha demostrado que modificaciones en sus estructuras, como el recubrimiento de materiales, pueden mejorar las características de sensado. Sin embargo, se ha realizado poco trabajo en la medición de temperatura con estos dispositivos recubiertos de materiales conductores. Este trabajo propone que el recubrimiento metálico de estos interferómetros puede mejorar su característica de sensado. Para demostrar esto, se han implementado dos estructuras MZI, y se ha evaluado su comportamiento antes y después de ser recubiertas con aluminio. Estos dispositivos son caracterizados en temperatura, y los resultados muestran que el proceso de recubrimiento es exitoso en la mejora de las características de sensado en el 50 % de los casos.

Palabras Clave: fibra óptica, camino óptico, índice de refracción, interferometría, sensor.

Abstract

One of the most common parameters in industrial processes is temperature. There are many commercial ways to measure it and many devices with different characteristics that couple to the particular needs of each process. One of the research branches in this area is that of fiber optic sensors. These have advantages, for example, they are explosion-proof, they don't depend on electricity, so they are immune to electromagnetic interference. In addition, some configurations do not require contact and can be implemented for distributed applications. The interferometry phenomenon is achieved by matching two coherent beams, that go through different optical paths. This allows to relate the refraction index (RI) of the medium through which the light travels, directly with the beam phase. In turn, RI is dependent on various physical variables, so that, in this way, these variables modulate the light signal. One of the most common methods to use this phenomenon is the implementation of Mach-Zehnder intermodal interferometers (MZI). Here the objective is to excite the cladding modes of a section of optical fiber, to then recombine these modes with the fundamental core mode. The optical path difference, in this case, is due to the difference between the core and cladding RI. There are several techniques the fabrication of these interferometers. Also, it has been shown that modifications in their structures, such as coating materials, can improve sensing characteristics. However, little work has been done in the temperature measurement with these devices coated with conductive materials. This work proposes that the metallic coating of these interferometers can improve their sensing characteristic. Two MZI structures have been implemented and their behavior evaluated before and after the coating process. These devices are characterized in temperature, and the results show that the coating process is successful at improving the sensing characteristics 50 % of the times.

Keywords: optical fiber, optical path, refractive index, interferometry, sensors.

Índice general

1. Generalidades	1
1.1. Introducción General	1
1.2. Planteamiento del Problema	2
1.3. Objetivos	3
1.4. Justificación	4
1.5. Estructura del trabajo	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Sensado de Temperatura	6
2.1.1. Antecedentes de la investigación	8
2.2. Fundamento Teórico	9
2.2.1. Principio de Refracción y Reflexión Interna Total	9
2.2.2. Interferometría	11
2.3. Sensores de Fibra Óptica	17
2.4. Amplificador de fibra dopada con Erbio	22
2.4.1. Principio de Funcionamiento de un EDFA	23
3. Materiales y Métodos	26

3.1. Arreglo Experimental	26
3.1.1. Amplificador de fibra dopada con erbio	27
3.1.2. Control de Temperatura	28
3.1.3. Analizador de espectros ópticos	28
3.2. Fabricación de los interferómetros	29
3.2.1. Estructura Tipo Core-Offset	29
3.2.2. Estructura SMF-PCF-SMF	33
3.2.3. Recubrimiento Metálico	35
3.3. Caracterización y Análisis	36
3.3.1. Sensibilidad en Potencia y en Longitud de Onda	36
3.3.2. Transformada de Fourier	36
3.3.3. Linealidad de la curva de caracterización	38
4. Resultados y Discusión	40
4.1. Elaboración de Interferómetros Recubiertos	41
4.1.1. Interferómetros sin recubrimiento	41
4.1.2. Interferómetros Recubiertos	44
4.2. Caracterización de láser y fuente de amplio espectro	48
4.2.1. Láser de Bombeo	48
4.3. Caracterización en Temperatura	51
4.4. Discusión de Resultados	77
4.4.1. Atributos del Patrón Interferencia	77
4.4.2. Análisis de modos en Frecuencia Espacial	79
4.4.3. Caracterización de cambios en Potencia	81

4.4.4. Caracterización de Cambios en Fase	82
5. Conclusiones y Trabajo a Futuro	84
5.1. Conclusiones	84
5.2. Trabajo a Futuro	85
A. Publicaciones	87
A.1. Publicaciones en Congresos	87
A.2. Publicaciones en Revistas Indexadas	87
Bibliografía	88

Índice de figuras

2.1. Estructura de fibra óptica monomodo de índice escalonado	11
2.2. Diagrama de Interferómetro Mach-Zehnder	15
2.3. Configuración básica de interferómetro MZI de 2 fibras separadas . . .	15
2.4. Propagación de modos en estructura basada en rejillas de periodo largo	19
2.5. Propagación de modos en estructura core-offset	20
2.6. Propagación de modos en estructura SMF-PCF-SMF	20
2.7. Propagación de modos en estructuras con núcleos desiguales	21
2.8. Propagación de modos en estructura tipo Taper	21
2.9. Configuración básica del amplificador de fibra dopada	22
2.10. Estructura de Niveles de Energía del Er^{3+} en un fibra de silicio	24
2.11. Espectro de Absorción de una fibra de Germanio-Aluminio-Silicio, dopada con Er^{3+}	24
2.12. Espectro de Emisión Espontanea Amplificada	25
3.1. Diagrama esquemático del montaje experimental	27
3.2. Espectro de Emisión Espontanea Amplificada	27
3.3. Analizador de Espectros Ópticos	29
3.4. Proceso de fabricación de un empalme desplazado	30

3.5. Estructura de Interferómetro MZI tipo core-offset	31
3.6. Espectro óptico de interferómetros simétricos	32
3.7. Corte Transversal de Fibra PCF	34
3.8. Proceso de fabricación de un empalme SMF-PCF	34
3.9. Diagrama Esquemático de Interferómetro Core-Offset Recubierto	35
3.10. Diagrama Esquemático de Interferómetro SMF-PCF-SMF Recubierto	35
3.11. Sensitividad en Longitud de Onda y Potencia de Salida	37
3.12. Espectro Espacial de Interferómetros Simétricos	39
4.1. Espectro de Int. 1	42
4.2. Espectro de Int. 2	42
4.3. Espectro de Int. 3	42
4.4. Espectro de Int. 4	42
4.5. Espectro de Int. 5	42
4.6. Espectro de Int. 6	42
4.7. Espectro de Int. 7	43
4.8. Espectro de Int. 8	43
4.9. Espectro de Int. 9	43
4.10. Espectro de Int. 10	43
4.11. Espectro de Int. 11	43
4.12. Int. 1 Recubierto	45
4.13. Int. 2 Recubierto	45
4.14. Int. 3 Recubierto	45
4.15. Int. 4 Recubierto	45

4.16. Int. 5 Recubierto	46
4.17. Int. 6 Recubierto	46
4.18. Int. 7 Recubierto	46
4.19. Int. 8 Recubierto	46
4.20. Int. 9 Recubierto	46
4.21. Int. 10 Recubierto	46
4.22. Int. 11 Recubierto	47
4.23. Espectro de emisión láser	48
4.24. Potencia de salida Vs. Corriente de entrada	49
4.25. Espectro de EDFA	50
4.26. Potencia pico de Espectro EDFA Vs Corriente de Entrada	51
4.27. Espectro Óptico de Interferómetro 1	52
4.28. Curva ΔP Int. 1	52
4.29. Curva $\Delta \lambda$ Int. 1	52
4.30. Espectro Óptico de Interferómetro 1 Recubierto	53
4.31. Curva ΔP Int. 1	53
4.32. Curva $\Delta \lambda$ Int. 1	53
4.33. Espectro Óptico de Interferómetro 2	54
4.34. Curva ΔP Int. 2	55
4.35. Curva $\Delta \lambda$ Int. 2	55
4.36. Espectro Óptico de Interferómetro 2 Recubierto	56
4.37. Curva ΔP Int. 2	56
4.38. Curva $\Delta \lambda$ Int. 2	56
4.39. Espectro Óptico de Interferómetro 3	57

4.40. Curva ΔP Int. 3	57
4.41. Curva $\Delta\lambda$ Int. 3	57
4.42. Espectro Óptico de Interferómetro 3 Recubierto	58
4.43. Curva ΔP Int. 3	59
4.44. Curva $\Delta\lambda$ Int. 3	59
4.45. Espectro Óptico de Interferómetro 4	59
4.46. Curva ΔP Int. 4	59
4.47. Espectro Óptico de Interferómetro 4 Recubierto	60
4.48. Curva ΔP Int. 4	60
4.49. Espectro Óptico de Interferómetro 5	61
4.50. Curva ΔP Int. 5	61
4.51. Curva $\Delta\lambda$ Int. 5	61
4.52. Espectro Óptico de Interferómetro 5 Recubierto	62
4.53. Curva ΔP Int. 5	62
4.54. Curva $\Delta\lambda$ Int. 5	62
4.55. Espectro Óptico de Interferómetro 6	63
4.56. Curva ΔP Int. 6	63
4.57. Curva $\Delta\lambda$ Int. 6	63
4.58. Espectro Óptico de Interferómetro 6 Recubierto	64
4.59. Acercamiento de Espectro Óptico de Int. 6 Recubierto al pico D	65
4.60. Límite de Detección Int. 6	65
4.61. Curva ΔP Int. 6	65
4.62. Curva $\Delta\lambda$ Int. 6	65
4.63. Espectro Óptico de Interferómetro 7	66

4.64. Curva ΔP Int. 7	66
4.65. Curva $\Delta\lambda$ Int. 7	66
4.66. Espectro Óptico de Interferómetro 7 Recubierto	67
4.67. Curva ΔP Int. 7	67
4.68. Curva $\Delta\lambda$ Int. 7	67
4.69. Espectro Óptico de Interferómetro 8	68
4.70. Curva ΔP Int. 8	68
4.71. Curva $\Delta\lambda$ Int. 8	68
4.72. Espectro Óptico de Interferómetro 8 Recubierto	69
4.73. Acercamiento de Espectro Óptico de Int. 8 Recubierto al pico C	70
4.74. Límite de Detección Int. 8	70
4.75. Curva ΔP Int. 8	70
4.76. Curva $\Delta\lambda$ Int. 8	70
4.77. Espectro Óptico de Interferómetro 9	71
4.78. Curva ΔP Int. 9	71
4.79. Curva $\Delta\lambda$ Int. 9	71
4.80. Espectro Óptico de Interferómetro 9 Recubierto	72
4.81. Curva ΔP Int. 9	72
4.82. Curva $\Delta\lambda$ Int. 9	72
4.83. Espectro Óptico de Interferómetro 10	73
4.84. Curva ΔP Int. 10	73
4.85. Curva $\Delta\lambda$ Int. 10	73
4.86. Espectro Óptico de Interferómetro 10 Recubierto	74
4.87. Espectro Óptico de Interferómetro 11	75

4.88. Curva ΔP Int. 11	75
4.89. Curva $\Delta\lambda$ Int. 11	75
4.90. Espectro Óptico de Interferómetro 11 Recubierto	76
4.91. Curva ΔP Int. 11	76
4.92. Curva $\Delta\lambda$ Int. 11	76
4.93. Pérdidas de Inserción	77
4.94. Contraste de Franja de los Interferómetros	78
4.95. Número de Lóbulos en el Patrón de Interferencia	78
4.96. Transformada FFT Int. 2	79
4.97. Transformada FFT Int. 6	79
4.98. Transformada FFT Int. 8	80
4.99. Transformada FFT Int. 11	80
4.100. Sensibilidad en Potencia	81
4.101. Error de no-linealidad en Potencia	82
4.102. Sensibilidad en Longitud de Onda	83
4.103. Error de no-linealidad en Longitud de Onda	83

Índice de tablas

3.1. Listado de Interferómetros tipo Core-offset	33
4.1. Listado de Interferómetros Fabricados	41
4.2. Atributos de Interferómetros sin Recubrimiento	44
4.3. Atributos de Interferómetros Recubiertos	47

Capítulo 1

Generalidades

1.1. Introducción General

El monitoreo *in situ* de parámetros físicos, químicos y biológicos es de gran importancia para el control de procesos en la industria, seguridad en las operaciones y protección de los ecosistemas. Para muchas aplicaciones, los sensores ideales son ligeros, pequeños, de bajo consumo de potencia, resistentes, inmunes a ruido electromagnético, con buenas especificaciones de desempeño tales como sensibilidad y precisión. En sectores de alto desarrollo tecnológico, estas características pasan de ser una ventaja a ser una necesidad.

A finales del siglo XIX se demostraron varios principios físicos como el confinamiento de la luz por refracción, y el estudio del comportamiento de la luz al viajar por distintos materiales, estos conocimientos fueron la base teórica para la invención de la fibra óptica. Alrededor de los años 60, con la aparición del Láser, se comenzó a proponer la fibra óptica como guía de onda para comunicaciones, desde ese entonces estos dispositivos están en constante desarrollo.

Gracias al desarrollo de las tecnologías de producción, las fibras ópticas se convirtieron en productos muy económicos, lo que impulsó aún más el estudio de estos dispositivos para su utilización en otras áreas. Éstas juegan un papel muy importante en muchas aplicaciones más allá de las comunicaciones, incluyendo medición de variables físicas, control e instrumentación, donde han ocasionado un considerable impacto y siguen siendo el objeto de investigación. A causa de las propiedades de las fibras, las técnicas de sensado no se basan en un solo concepto sino en una variedad de fenómenos ópticos que pueden ser usados para medir un rango amplio de parámetros

físicos y químicos.

Existen muchos tipos de sensores de fibra óptica. Las siguientes son algunas ventajas que hacen a estos dispositivos, especialmente atractivos para su uso en instrumentación: Son eléctricamente pasivos, por lo que son más seguros y tienen menor consumo de potencia. Se pueden fabricar para ser usados de modo remoto con transmisión segura de datos y, además, son resistentes a diferentes tipos de radiación. Uno de los fenómenos más utilizados en sensores de fibra óptica es la interferometría, concepto que se explicará a fondo, más adelante. Existen muchas formas de elaborar este tipo de sensores, en este proyecto se trabajará con interferómetros tipo Mach-Zehnder de fibra óptica.

1.2. Planteamiento del Problema

Uno de los parámetros medibles más comunes en los procesos industriales es la temperatura. Existen muchas formas comerciales de medirla y muchos dispositivos con diferentes características que se acoplan a las necesidades particulares de cada proceso. Sin embargo, con la aparición de nuevos materiales y tecnologías todos los días se desarrollan instrumentos cada vez más precisos, económicos y robustos. Una de las ramas de investigación pioneras en esta área, es el sensado óptico.

Aquí, la interferometría juega un papel muy importante, ya que bajo este principio físico, la luz puede verse modificada por el medio en el que viaja. Se basa en la coincidencia de 2 ondas de luz, que cuando están en fase, sus amplitudes se suman y su intensidad es mayor, pero cuando no lo están, o cuando están en oposición de fase, las amplitudes de signo contrario se restan y se anulan. Si los haces que coinciden son de luz visible, y se proyecta el resultado en una pantalla, se observan franjas o anillos que evidencian lo anteriormente descrito. Por tanto cualquier cambio en la fase de los dos haces es claramente apreciable en el patrón resultante. Los sensores interferométricos, toman ventaja de esto y se basan en la comparación de la fase de un haz de luz con otro de referencia. Pequeños cambios de fase pueden ser detectados con extrema precisión y pueden ser generados por alteraciones en la tensión, forma estructura y/o temperatura, del medio por el que viaja el haz.

En este trabajo, se propone estudiar, para ésta aplicación, el interferómetro intermodal tipo Mach-Zehnder (MZI, por sus siglas en inglés). Aunque ya se ha aplicado este dispositivo para este fin [1], se ha demostrado que interferómetros con

diferentes modificaciones estructurales, mejoran su desempeño, como es el caso de recubrirlos con diferentes materiales [2, 3]. Sin embargo, se ha realizado poco trabajo en materiales conductores como recubrimiento.

Desde esta perspectiva se plantea la siguiente hipótesis: El recubrimiento metálico de interferómetros intermodales tipo Mach-Zehnder, puede mejorar el patrón de interferencia del mismo y, a su vez, sus características de sensado. Esto se comprobará comparando los resultados de los dispositivos con y sin recubrimiento.

1.3. Objetivos

Objetivo General:

Implementar un interferómetro intermodal tipo Mach-Zehnder recubierto de aluminio que pueda ser propuesto para el sensado de temperatura.

Objetivos Específicos:

I. Fabricar interferómetros Mach-Zehnder recubiertos de aluminio, de distintas longitudes, por medio de las técnicas “Core-Offset” y “Microcolapso de Huecos”.

II. Caracterizar el bombeo del sistema a utilizar y la fuente de amplio espectro.

III. Caracterizar los interferómetros fabricados en condiciones de referencia y frente a variaciones controladas de temperatura.

IV. Comparar el comportamiento modal de los interferómetros con y sin recubrimiento metálico, ante cambios de temperatura, sometiendo los espectros obtenidos a la Transformada Rápida de Fourier.

1.4. Justificación

Desde los inicios de la era industrial, el hombre ha tenido la necesidad de conocer y controlar variables en los procesos, tales como temperatura, presión o posición. Con el desarrollo tecnológico, se han invertido esfuerzos y recursos en los métodos del sensado, buscando siempre la optimización entre resolución, sensibilidad, exactitud, costo, tamaño y rango de operación.

A raíz de la revolución que ocasionaron las fibras ópticas en las telecomunicaciones, se perfeccionaron las técnicas para su producción masiva, haciendo que los precios de estos materiales disminuyeran considerablemente. Gracias a ésto, se dio inicio a diversos estudios con el fin de aprovechar al máximo las características que ofrecen las distintas configuraciones de fibras (interferómetros, de tipo fluorescente, por Dispersión Raman). Entre los mencionados estudios se encuentra el desarrollo de sensores de temperatura [4].

Los efectos que ocasionan los cambios de temperatura en la estructura cristalina de la fibra hace que la luz que viaja por ella tenga un comportamiento determinado, y, dependiendo de la configuración, se puede tener gran variedad de rangos y precisión. Se han reportado fibras capaces de medir hasta 4000 °C, capturando la radiación emitida por un cuerpo y transmitiéndola hacia un fotodetector [5], mientras que otros sensores funcionan mediante el cambio del índice de refracción con respecto a la temperatura, por lo que pueden tener alta sensibilidad [6].

Los sensores de fibra óptica tienen un enorme número de ventajas, son muy seguros por el hecho de ser eléctricamente pasivos, son ligeros e inmunes a campos magnéticos. Además, cuentan con versatilidad geométrica del elemento sensible, un amplio rango dinámico y altísima excitabilidad [7]. En los sensores por interferometría, la luz que atraviesa la fibra es modulada por el campo a detectar y por lo general, se tienen muy pocas pérdidas.

Se escoge trabajar con la técnica de recubrimiento metálico ya que, estudios recientes, muestran que la resonancia causada por este fenómeno, puede ocasionar una alta susceptibilidad a variaciones del índice de refracción, y por ende, a cambios de temperatura [8].

1.5. Estructura del trabajo

El trabajo de tesis se encuentra organizado en cinco capítulos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo I.

Contiene una introducción general al tema de investigación, en la cual se sitúa el trabajo en el tiempo y en el espacio. Se plantea el problema detallando el contexto histórico y los resultados esperados, se hace una descripción de la justificación, y se delimitan el objetivo general y los objetivos específicos para llevarlo a cabo.

Capítulo II.

Se hace una descripción de los métodos anteriormente propuestos, incluyendo las bases teóricas sobre las cuales se apoya la investigación. repasando los conceptos de transmisión de la luz por medio de fibra óptica, el principio de interferometría, y la interferencia intermodal, algunas referencias acerca de dispositivos aplicados en el área. Se describe también el fenómeno de plasmón de superficie y como puede mejorar los dispositivos anteriormente descritos.

Capítulo III.

Describe la metodología a utilizar para el cumplimiento de los objetivos, así como aprendizajes y retos encontrados en la elaboración del proyecto.

Capítulo IV.

Presenta el análisis de resultados y su discusión. Es decir, se realiza una comparación entre los resultados de los dispositivos recubiertos, con aquellos sin recubrir. Adicionalmente, se incluye una comparación de los resultados obtenidos en comparación con los anteriormente publicados.

Capítulo V.

Se dictan las conclusiones pertinentes y se hace mención de posibles recomendaciones y observaciones. Finalmente, se proponen nuevos temas de investigación, en base al trabajo realizado en esta tesis.

Capítulo 2

Marco Teórico

Introducción

En ese capítulo, se hace un abreviado reseña histórica de concepto de *Temperatura*. Se describen también, algunos de los procedimientos para sensar esta variable, desde los convencionales hasta los más modernos. Otro punto importante de las bases teóricas de esta investigación, es el estudio de los principios físicos que permiten que la luz sea guiada y manipulada dentro de la fibra óptica. Ya que por medio de ellos, es también posible realizar el sensado de diferentes parámetros, con fibra óptica. En este punto, se parte desde conceptos básicos, como los principios de reflexión y refracción, hasta el análisis de interferencia intermodal, pasando por el fenómeno de interferometría y definiendo las condiciones necesarias para que éste se de.

2.1. Sensado de Temperatura

Existen muchos métodos para clasificar sensores de temperatura, en general, uno de los más utilizados fue presentado por McGhee [4], en donde se clasifica a los sensores a través del uso del mecanismo de transferencia de calor, ya sea por métodos de contacto o no-contacto. Otros criterios de clasificación vienen a definirse por la tecnología a utilizar, por ejemplo, eléctrico o no eléctricos, directos o por métodos inferenciales.

Los sensores no eléctricos de temperatura se basan en la expansión térmica de sólidos, líquidos y gases. Entre ellos tenemos los termómetros, que funcionan por

medio de la expansión térmica del mercurio y pueden tener aplicaciones desde el campo de la medicina, hasta la preparación de alimentos. Sin embargo, por riesgo de envenenamiento con mercurio y contaminación en el proceso de fabricación, se esta dejando atrás dando espacio a nuevas tecnologías [9]. Los termómetros de dilatación de materiales sólidos, tienen un rango más amplio de aplicaciones, dependiendo del material activo que se utilice. Por ejemplo, los dispositivos que trabajan por medio de la dilatación de metales, tienen un rango de hasta 600 °C, mientras que aquellos que utilizan aleaciones o dieléctricos como la porcelana, pueden alcanzar hasta los 1000 °C. La temperatura afecta otras propiedades físicas de los materiales como la densidad, presión o índice de refracción, por lo tanto, por medios no eléctricos, también se puede tomar una medida indirecta, utilizando estos parámetros [4].

La medición de temperatura por medio electricidad se basa en el principio físico de la fuerza termoeléctrica. Uno de los instrumentos mas comunes en utilizar este efecto es el termopar. En él, dos metales están en contacto, uno mantiene su temperatura constante o de referencia mientras que la del otro si varía, esto se puede modelar matemáticamente. En esta unión, se produce una fuerza electromotriz, ante cambio de temperatura, por lo que usualmente se conecta al la salida, un medidor de voltaje de alta sensibilidad. Existen muchas formas de estructurar y fabricar este tipo de sensores, dependiendo de las aleaciones escogidas se puede jugar con el rango de medición. Sin embargo, son elementos que, en general, no tienen muy buena sensibilidad, por ejemplo el valor máximo alcanzado por termopares comerciales es de alrededor de 40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ [10].

Otro principio físico aplicado es el de la dependencia térmica de la resistencia eléctrica de los materiales. En este principio se basan los sensores resistivos. A medida que la temperatura de un metal aumenta, las vibraciones de su núcleo atómico aumentan. Simultáneamente, la probabilidad de colisión entre los electrones libres y los enlaces de iones crece. Estas interrupciones del movimiento de los electrones libres, debido a colisiones cristalinas, hace que la resistencia del material se incremente. La ventaja de este tipo de sensores es su bajo costo, tanto de fabricación como de implementación, son altamente reproducibles y de pequeño tamaño [4].

Con el desarrollo de materiales semiconductores a mediados del siglo 20, se comenzó a estudiar también las características que estos ofrecían como posibles sensores de temperatura y se desarrollaron los termistores. Estos dispositivos son básicamente resistencias con una dependencia no lineal a la temperatura, y cuentan con un coeficiente de temperatura negativo [11], [12]. Tienen un proceso de elaboración muy complicado que involucra altas presiones. Operativamente tienen ventajas sobre los sensores resistivos previos como tamaño más pequeño, mayor sensibilidad, menor inercia

térmica, lo que mojera la respuesta dinámica entre otros. Algunas desventajas que si presenta es que no se pueden desarrollar para un rango tan amplio de temperaturas y se pueden descalibrar a altos valores de la misma, además de que tienen un comportamiento no lineal [4].

2.1.1. Antecedentes de la investigación

La investigación de sensado por medio de fibra óptica, no es una disciplina nueva. El principio de operación consiste en que el elemento sensible modula un parámetro del sistema óptico, como la intensidad, longitud de onda, polarización, fase etc. Lo que ocasiona un cambio en la señal óptica de salida. Un sensor de fibra óptica puede hacer variar uno o más de las características anteriormente mencionadas, y correlacionar algún parámetro particular de interés, a estos cambios en la luz que viaja por la fibra. En las primeras aplicaciones industriales, los sensores de fibra óptica de una sola punta, se usaron como alarmas, para indicar la ausencia o presencia de un objeto. A medida que avanza la tecnología, la funcionalidad incrementó al punto de que se pueden aplicar estos materiales en el sensado de diversos parámetros. La medición de temperatura con fibra óptica, se ha realizado desde muchos enfoques, un ejemplo es el estudio de la interacción entre el esparcimiento de Raman, Rayleigh y componentes de Stokes. [13].

En los últimos años se han presentado trabajos como la implementación de un láser de anillo como sensor de temperatura, donde se usa una rejilla de Bragg como elemento sensible. En este experimento, se usa un interferómetro Mach-Zehnder (MZI, por sus siglas en inglés), como filtro selector de longitud de onda del láser [14]. Entre otros trabajos se tiene el desarrollo de una técnica para la detección de flexión en una articulación mecánica, a través de cambios en la polarización dentro de una fibra óptica [15]. Los MZI, específicamente, se han reportado por su implementación en la sintonización de láseres [16], sensado de torsión [17, 18] y de temperatura [19]. A nivel nacional, se tienen publicaciones orientadas al incremento de la resolución de este tipo de sensores, manteniendo bajos costos [20, 21]; específicamente con el uso de fibras estrechadas [22], puntas estrechadas [23], y rejillas de periodo largo [24].

El sensado de temperatura con fibra óptica se ha realizado desde muchos enfoques, un ejemplo es el estudio de los interferómetros Sagnac y Michaelson en conjunto para detectar puntos calientes en extensiones de cableado de fibra óptica. Aquí, el primero permite estimar la distancia donde ocurre una perturbación y el segundo es el elemento sensible [25]. MZI de distintas estructuras también han sido estudiados para estas aplicaciones, por ejemplo, en un trabajo realizado en 2012, se demostró un MZI fabricado por medio del empalme "Peanut Shape", donde se obtuvo una sensibilidad de 50 pm/°C. Se han utilizado también fibras especiales en la estructura interferométrica; el

año pasado, un MZI fue fabricado usando una fibra de revestimiento hetero-estructurado y núcleo sólido, especialmente diseñada para facilitar el acoplamiento de modos en el revestimiento. Luego de ejecutar distintas pruebas de sensado, en temperatura, se obtuvo una sensibilidad de 90 pm/°C.

Los MZI elaborados con la técnica core-offset han sido reportados como posibles sensores de temperatura, ésta es una técnica ampliamente estudiada debido al bajo costo de fabricación de estos dispositivos [26]. por ejemplo, en 2014, Hao *et. al.* propusieron un esquema láser para el sensado de temperatura basado en una estructura tipo core-offset de fibra monomodo convencional (SMF). Con este experimento obtuvieron una sensibilidad de 45 pm/°C.

La utilización de estructuras de fibra de cristal fotónico (PCF), también se ha hecho popular, ya que otras técnicas pueden ocasionar inestabilidad en el elemento sensible, ya sea a causa de la eliminación parcial del recubrimiento o de un empalme delicado, mientras que con una estructura PCF se tiene interacción modal sin debilitar el dispositivo [27]. En todos estos trabajos mencionados, se persigue el mejoramiento de las propiedades de los dispositivos como sensores. Este proyecto plantea mejorar los resultados presentes al aplicar una capa metálica al dispositivo. Esta técnica, a su vez, se ha implementado anteriormente en diversas estructuras. Como por ejemplo, los prismas clásico, guías de onda de forma plana y recubrimiento metálico de fibras [28].

2.2. Fundamento Teórico

2.2.1. Principio de Refracción y Reflexión Interna Total

Para proceder a definir los conceptos de refracción y reflexión es necesario establecer el significado de índice de refracción. Se denota comúnmente con la letra n y esta definido por las propiedades eléctricas y magnéticas de un material en particular, como se observa en la ecuación 2.1. Donde μ es la permeabilidad magnética y ε corresponde a la permitividad eléctrica; el subíndice 0 indica que es el valor de estos mismos parámetros pero para el espacio vacío. El índice de refracción, describe la velocidad con la que se propaga la luz en el medio, y se relaciona con la velocidad de la luz del siguiente modo: $n = \frac{c}{v}$, donde c es la velocidad de la luz en el espacio y v es la velocidad con la que se mueve en el material [29]. Gracias al estudio y manipulación de este parámetro, surgen tecnologías como guías de onda, lentes ópticos y sensores.

$$n = \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{\mu_0\varepsilon_0}} \quad (2.1)$$

Casualmente, este parámetro tan importante para la elaboración de dispositivos ópticos, es a su vez, susceptible a diversas variables físicas, como presión, tensión y temperatura. Se define refracción como el efecto que ocurre cuando la luz pasa de un medio homogéneo e isotrópico a otro; el rayo de luz se dobla en la interfaz entre los dos medios. La expresión matemática que describe el fenómeno de refracción se conoce como la ley de Snell, descrita en la ecuación 2.2 [30].

$$n_0 \text{sen}(\phi_0) = n_1 \text{sen}(\phi_1) \quad (2.2)$$

Donde n_0 y n_1 representan los índices de refracción de los medios, ϕ_0 corresponde al ángulo de incidencia de la luz con respecto a la normal de la interfaz entre los dos medios y ϕ_1 corresponde al ángulo de propagación de la luz en el segundo medio, referenciado, de igual forma, a la norma de la interfaz, siempre se considera que una parte de la luz se refracta o transmite por el segundo medio y otra parte se refleja. Cuando el índice de refracción del segundo material, es menor, que el del medio por donde se está propagando la luz, gracias a ley de Snell, ocurre el fenómeno de reflexión total, y en lugar de propagarse la luz por el segundo medio, se refleja completamente [30].

La fibra óptica es un material filamentosos que utiliza el principio de reflexión total para transportar haces de luz. La figura 2.1 muestra un diagrama de la estructura de una fibra óptica tipo índice escalonado, que viene a ser una de las configuraciones más comunes. Consiste en un núcleo y un revestimiento concéntrico de índices de refracción n_1 y n_2 respectivamente. Si n_1 es ligeramente mayor que n_2 , la luz contenida dentro del núcleo se propagará solamente por éste, ya que se reflejaría completamente, en la interfaz entre los dos materiales, y se confinaría dentro del núcleo, esto se denomina reflexión interna total.

Como se describe en la ecuación 2.2, el proceso de reflexión, no depende únicamente de los índices de refracción, sino también el ángulo de incidencia. El ángulo crítico, es aquel a partir del cual comienza a ocurrir el fenómeno de reflexión interna total, y está definido en la ecuación 2.3, esta expresión se deriva de la ley de Snell, asumiendo que la luz se propaga en la interfaz entre los dos medios. Cuando la luz incida con un ángulo mayor que el ángulo crítico, se dice que existirá reflexión interna total [31].

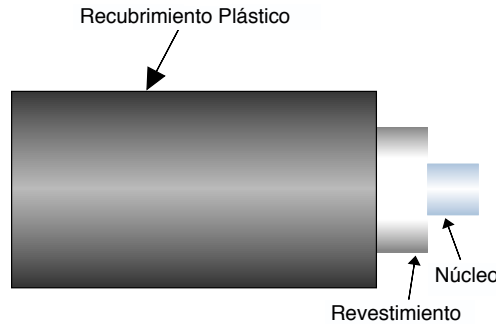


Figura 2.1: Estructura de fibra óptica monomodo de índice escalonado

$$\phi_c = \arcsen(n_2/n_1) \quad (2.3)$$

La condición de que el ángulo de incidencia sea mayor que el ángulo crítico es necesaria pero no suficiente para la transmisión de la luz en la fibra. El haz que se propague deberá cumplir con las condiciones de fase en la frontera entre núcleo y revestimiento. Esto significa que el cambio de fase entre una reflexión y la siguiente debe mantenerse en múltiplos enteros de 2π . La luz con el ángulo más cercano al eje central se denomina el modo fundamental y los haces con ángulos mayores se denominan modos de alto orden. Cuando el radio del núcleo es suficientemente pequeño o la diferencia entre n_1 y n_2 es lo suficientemente pequeña, solo el modo fundamental se propagará. Esta fibra se llama mono modo o SMF. Los otros tipos de fibra se denominan multimodo o MMF. Las características de los modos dependen también de la longitud de onda (λ), una fibra puede ser SMF para λ más grande y MMF λ más pequeña. El término “modos del revestimiento” se utiliza cuando el ángulo incidente es más pequeño que el ángulo crítico y la luz se refracta al revestimiento, pero se refleja en la frontera entre éste y el aire, por lo que se propaga en el revestimiento.

2.2.2. Interferometría

Muchos dispositivos ópticos desarrollados para el sensado están basados en el fenómeno de la interferometría. Hecht (*et al.*, 1998), define la interferencia óptica como “*La interacción entre dos o más ondas de luz que producen una irradiancia que se deriva de la suma de las irradiancias de todas las componentes*” [29]. El fenómeno de interferencia ocurre cuando dos o más ondas idénticas están presentes en la misma región del espacio y del tiempo. En este caso, se dice que la función de onda total está dada por la suma de las funciones de onda individuales. Este principio básico de superposición

se deriva de la linealidad de la ecuación de onda. Para poder definir propiamente el fenómeno de interferencia, es necesario establecer algunas consideraciones generales.

Consideraciones Generales para la Interferencia

Para el estudio de la interferencia se tomará como medida principal la irradiancia, ya que experimentalmente es mucho más fácil de detectar que el campo eléctrico y que el campo magnético. Para el análisis matemático considérese que se tienen dos fuentes de emisión S_1 y S_2 . las cuales emiten ondas monocromáticas, planas y polarizadas linealmente, en un medio homogéneo. Entonces se puede definir la irradiancia como queda expresado en la ecuación 2.4, donde la expresión $\langle \vec{E}^2 \rangle_T$ representa el promedio temporal de la magnitud del campo eléctrico al cuadrado. A su vez, la relación expresada en la ecuación 2.5, también se cumple.

$$I = \langle \vec{E}^2 \rangle_T \therefore \vec{E}^2 = \vec{E} \cdot \vec{E} \quad (2.4)$$

$$\vec{E}^2 = \vec{E}_1^2 + \vec{E}_2^2 + 2 \left(\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \right) \quad (2.5)$$

Aplicando el operador promedio a ambos lados de la igualdad, se tiene que la irradiancia total queda expresada en 2.6. El término I_{12} es conocido como el término de interferencia. Para evaluar su valor específicamente, se definen \vec{E}_1 y \vec{E}_2 como dos ondas armónicas con vector de onda y fase inicial distintos (2.7). Separando por medio de la identidad de la suma de ángulos en el coseno se tiene 2.8. Si se aplica el operador promedio a ambos lados de la igualdad, y recordando propiedades del operador como por ejemplo, $\langle \cos^2(\omega t) \rangle_T = 1/2$; $\langle \sin^2(\omega t) \rangle_T = 1/2$ y $\langle \cos(\omega t) \cdot \sin(\omega t) \rangle_T = 0$, se tiene la expresión 2.9.

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \therefore I_1 = \langle \vec{E}_1^2 \rangle_T; I_2 = \langle \vec{E}_2^2 \rangle_T; I_{12} = 2 \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle_T \quad (2.6)$$

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_1) \times \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_2) \quad (2.7)$$

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \left[\begin{aligned} &\cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \cos(\varepsilon_1) - \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \sin(\varepsilon_1) \\ &\left[\cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \cos(\varepsilon_2) - \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \sin(\varepsilon_2) \right] \end{aligned} \right] \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 &= \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} [\cos(\varepsilon_1)\cos(\varepsilon_2) + \text{sen}(\varepsilon_1)\text{sen}(\varepsilon_2)] \\ &= \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)\end{aligned}\quad (2.9)$$

De la expresión 2.6, se sabe que $I_{12} = 2 \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle_T$, entonces, en función del cálculo obtenido en 2.9, el término de interferencia queda expresado en 2.10. Donde δ corresponde a la diferencia de fase entre las dos ondas. Si se parte del concepto de que ambas ondas se propagan de forma paralela, el término de interferencia puede quedar expresado únicamente en función de las intensidades, si se asume el producto $\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2$ como escalar. Dado que se cumplan las ecuaciones 2.11, se cumple entonces la expresión 2.12. Considerando todo esto, el término de interferencia se convierte en 2.13, y la irradiancia total queda expresada en 2.14.

$$I_{12} = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\delta) \quad \therefore \delta = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \quad (2.10)$$

$$I_1 = \langle \vec{E}_1^2 \rangle_T = \frac{1}{2} E_{01}^2; \quad I_2 = \langle \vec{E}_2^2 \rangle_T = \frac{1}{2} E_{02}^2 \quad (2.11)$$

$$E_{01} E_{02} = 2 \sqrt{I_1 I_2} \quad (2.12)$$

$$I_{12} = 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta) \quad (2.13)$$

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta) \quad (2.14)$$

En varios puntos del espacio, la irradiancia total puede ser mayor, menor o igual que $I_1 + I_2$, dependiendo del valor del término de interferencia, es decir, dependiendo de δ . El valor de I máximo, se obtiene si $\cos(\delta) = 1$; esto ocurre periódicamente en $\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi \dots$. En este caso se dice que existe **interferencia constructiva total**. Cuando las ondas están desfasadas, de tal forma que $0 < \cos(\delta) < 1$, se dice que el valor de I se ubica entre $I_1 + I_2$ e I_{max} y existe **interferencia constructiva**. A partir de $\delta = \frac{\pi}{2}$ el valor de I oscila entre $I_1 + I_2$ e I_{min} , se dice que existe **interferencia destructiva**. En el caso de ser $\delta = \pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi \dots$ entonces el $\cos(\delta)$ es igual a -1 y se tendría **interferencia destructiva total** [29].

La fase de una onda, ε expresada en la ecuación 2.10, se puede definir como el argumento de la una onda plana (2.15), donde K es la constante de propagación

de material y ε_0 es la fase inicial. De acuerdo a ésto, δ queda expresado como en la ecuación 2.16. Dicha constante K se puede reescribir como $K = K_o n$ donde n es el índice de refracción. Ahora, la fase se define como 2.17 en donde la expresión $n(x_1 - x_2)$ es la longitud de camino óptico, como se había definido previamente en ??.

$$\varepsilon_1 = Kx_1 + \varepsilon_0, \quad \varepsilon_2 = Kx_2 + \varepsilon_0 \quad (2.15)$$

$$\delta = (Kx_1 + \varepsilon_0) - (\varepsilon_2 = Kx_2 + \varepsilon_0) \quad (2.16)$$

$$\delta = K_o n(x_1 - x_2) \quad (2.17)$$

El patrón de interferencia de dos ondas dependerá directamente del desfase que exista entre estas, por ejemplo, si dos ondas que se encuentran en el espacio no tienen ningún desfase entre sí, no se presentará el fenómeno de interferencia. Este desfase a su vez, depende de diversos parámetros físicos del medio donde se propagan los haces, como esta descrito en la ecuación 2.17. Esto es importante en aplicaciones de sentido gracias a que por medio del patrón de interferencia se pueden apreciar posibles cambios de fase.

Interferómetros de dos haces

Las ecuaciones de la sección 2.2.2, se adaptan también arreglos en los cuales dos haces de luz que viajan por diferentes caminos ópticos se hacen interferir. Para producir un patrón de interferencia estacionario, las condiciones que afectan la diferencia de fase de ambos haces no deben cambiar con el tiempo; por tanto, los haces intervinientes deben tener la misma longitud de onda. La manera más fácil de lograr esto es obteniendo ambos haces de la misma fuente.

Los métodos más comunes para obtener dos haces de una sola fuente son, por división de frente de onda y por división de amplitud de onda. El primero hace uso de aperturas físicas en haces de luz no coherentes para aislar porciones del frente onda inicial. Fue el método usado por Young en su experimento. En este caso las aberturas se pueden considerar como fuentes secundarias de luz y las franjas de interferencia se pueden ver en una pantalla posicionada en la región de superposición de los haces difractados que salen de las aberturas.

En cambio, en división por amplitud, los dos haces se derivan de una misma fuente, a través de elementos como separadores de haz, rejillas de difracción y prismas

polarizados. Entre los interferómetros de división por amplitud más utilizados están en el de Sagnac, Rayleigh Michaelson y Mach-Zehnder [32] .

Interferómetro Mach-Zehnder

Como se muestra en la figura 2.2, el interferómetro Mach-Zehnder usa un divisor de haz para separar el haz de luz en dos partes, dos espejos para reflejarlos hacia otro divisor de haz en donde, finalmente, se recombinan. En este caso la diferencia de fase que ocasiona el fenómeno de interferencia se logra con una diferencia de camino óptico. Para esto se puede variar tanto la distancia como el medio por el que atraviesan los haces. Aquí, la región de localización de la franja de interferencia es variable, y depende del ajuste de los espejos.

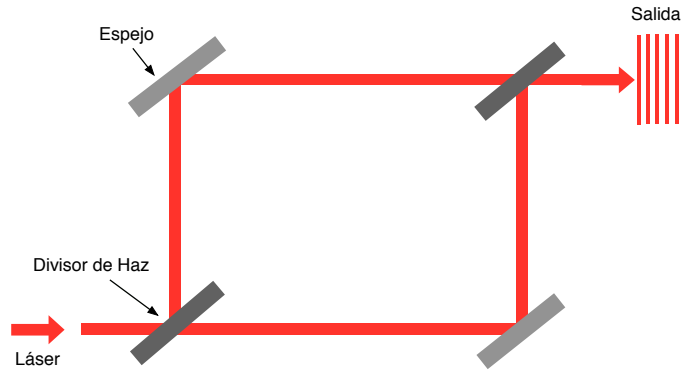


Figura 2.2: Diagrama de Interferómetro Mach-Zehnder [32]

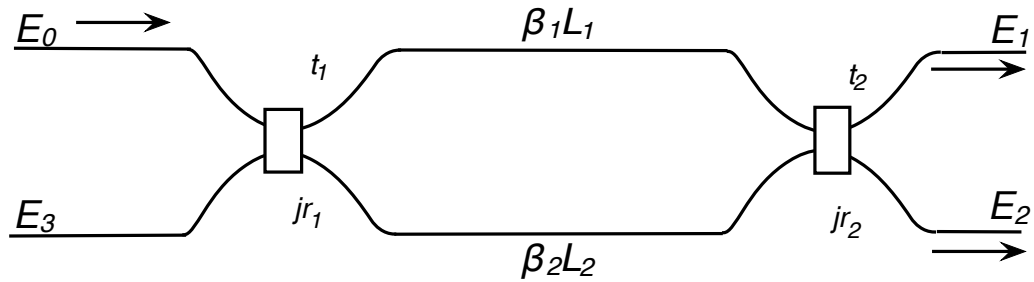


Figura 2.3: Configuración básica de interferómetro MZI de 2 fibras separadas [31]

Para lograr el efecto de interferencia que propone este esquema, en fibra óptica, existen diferentes técnicas. Inicialmente, se comenzaron a implementar estos dispositivos por medio de dos secciones separadas de fibra; en la figura 2.3, se puede ver su configuración básica. Aquí la luz se propaga desde la fuente al terminal E_o , en el primer acoplador se separa en dos caminos y en el siguiente acoplador, los dos haces se vuelen a recombinar excitando las dos salidas E_1 y E_2 . Si se consideran las pérdidas

de inserción de los acopladores y empalmes como nulas las transmisiones se pueden expresar como:

$$E_1 = [t_1 t_2 e^{j\beta_1 L_1} - r_1 r_2 e^{-j\beta_2 L_2}] E_o \quad (2.18)$$

$$E_2 = [t_1 t_2 e^{j\beta_1 L_1} + r_1 r_2 e^{-j\beta_2 L_2}] E_o \quad (2.19)$$

Y la intensidad en cada puerto de salida:

$$I_1 = [(t_1 t_2 - r_1 r_2)^2 + 4t_1 t_2 r_1 r_2 \text{sen}^2(\Delta\phi)] I_o \quad (2.20)$$

$$I_2 = [(t_1 t_2 + r_1 r_2)^2 - 4t_1 t_2 r_1 r_2 \text{sen}^2(\Delta\phi)] I_o \quad (2.21)$$

Donde $\Delta\phi = \beta_2 L_2 - \beta_1 L_1$, y β es la constante de propagación. Ambas salidas son curvas sinusoidales con un cambio de fase de π entre ellas. En este caso, cualquier cambio en las longitudes L_1 y L_2 , o en los índices de refracción de los brazos, ocasionará cambios en las salidas del sistema. Es por esto que el interferómetro Mach-Zehnder es ampliamente utilizado como dispositivo de sensado. Si se puede configurar, usualmente la separación inicial de las fases se pone en $\pi/4$, lo que se llama punto de cuadratura, esto con el fin de obtener una detección lineal del mesurando con la mejor sensibilidad posible.

Por otro lado, cualquier cambio en la longitud de onda también ocasionará variaciones en la intensidad de la salida, ya que $\Delta\phi = 2\pi(n_{eff1}L_1 - n_{eff2}L_2)/\lambda$ varia con la longitud de onda [31]. Como se estableció en la sección 2.2.2, para que se genere el fenómeno de interferencia, se debe lograr una diferencia de camino óptico. Para interferómetros tipo Mach-Zehnder, si se asume que solo dos modos participan en el patrón de interferencia, se puede expresar la diferencia de fase como la ecuación 2.22 [17]. El sensado con este tipo dispositivos normalmente se logra al tomar un brazo como referencia y el otro como elemento sensor.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta n_e L}{\lambda} \quad (2.22)$$

2.3. Sensores de Fibra Óptica

Las fibras ópticas juegan un papel muy importante más allá de las comunicaciones [33]. En áreas como sensado, control e instrumentación, están han tenido un impacto considerable y continúan siendo el objeto de exhaustiva investigación. En general para estas aplicaciones las fibras se hacen más sensibles a mecanismos externos que, lo que las hace menos efectivas para telecomunicaciones, En su forma más simple, un sensor de fibra óptica, está compuesto por una fuente de luz, un elemento sensible y un foto-detector.

Su principio de operación es que el elemento sensible modula algún parámetro de sistema óptico, como intensidad, longitud de onda, polarización, fase, etc. Lo que ocasiona cambios apreciables por el foto-detector; matemáticamente, se pueden correlacionar diversos parámetros físicos como temperatura, tensión, presión con estos cambios medibles. Los sensores de fibra óptica representan una tecnología base que puede ser implementada en diversas aplicaciones de sensado. Algunas características que tienen como ventaja es que son a prueba de explosiones, no depende de electricidad, por lo que son inmunes a interferencia electromagnética, además de que algunas configuraciones no requieren contacto y son implementables para aplicaciones distribuidas [30].

La tecnología de sensores de fibra óptica no es un concepto nuevo, pero si es un proceso en continuo desarrollo. Los diseños de sensado no se basan en un único concepto, sino en una amplia variedad de fenómenos que pueden ser utilizados para medir un amplio rango de parámetros físicos y químicos [30]. Desde los años 90 se detecto un desarrollo acelerado de estas tecnologías gracias a la revolución que tuvo lugar en la industria opto-electrónica y de telecomunicaciones [34].

La penetración inicial de este tipo de sensores en el mercado se ha dado gracias a la ventajas en el desempeño de estos dispositivos con respecto a las soluciones comerciales actuales. Estos ofrecen un enfoque dieléctrico-pasivo que en algunos casos es crucial para ciertas aplicaciones, incluyendo aislamiento eléctrico de pacientes en medicina, eliminación de caminos conductores en ambientes de alto voltaje entre otros.

Termodependencia del Índice de Refracción

El índice de refracción es una variable que depende de factores físicos como temperatura, tal y como se expresa en la ecuación 2.23. Según este modelo el índice de refracción esta modelado en función de E , que es la energía del fotón en electronvolt. a es un parámetro dado por el producto de la fuerza del oscilador por unidad de volumen y b es la energía de resonancia del oscilador. los parámetro a y b son dependientes de

la temperatura, como se expresa en 2.24 [35].

$$n^2 - 1 = \sum_{t=1}^3 \frac{a_t}{b_t^2 - E^2} \quad (2.23)$$

$$a_t = a_{t0} + a_{t1}T + a_{t2}T^2, \quad b_t = b_{t0} + b_{t1}T + b_{t2}T^2 \quad (2.24)$$

Por tanto, si se expone una sección de fibra óptica a cambios de temperatura, el cambio en el índice de refracción ocasionará una variación en la diferencia de fase acumulada, lo cual es apreciable a la salida del sistema.

Interferencia Intermodal

Un claro ejemplo de interferencia intermodal se encuentra en los interferómetros lineales tipo Mach Zehnder, en ellos el objetivo es lograr que la luz que viaja en el núcleo de la fibra se propague por el revestimiento. Gracias a la diferencia entre el índice de refracción efectivo del núcleo y el revestimiento, una diferencia de fase entre los distintos modos se puede producir en una misma distancia física. La luz que se propaga en el revestimiento lo hace con un índice de refracción menor que el de la luz que se propaga por el núcleo. De tal forma, se puede obtener una diferencia entre los caminos ópticos de ambos brazos del interferómetro. La diferencia de fase acumulada en ambos modos gracias a las condiciones anteriormente mencionadas, depende a su vez de la longitud de onda de la luz y de la longitud por la cual se propaguen modos en el revestimiento.

Cuando estos modos, de alguna manera, se recombinan de nuevo; normalmente en el núcleo de otra sección de fibra óptica, ocurre el fenómeno de interferencia. Ya que la diferencia de fase es dependiente de la longitud de onda, la potencia óptica transmitida por el interferómetro será máxima a ciertas longitudes de onda y mínima a otras. La separación entre dos picos consecutivos de un patrón de interferencia donde participan dos modos está dada por 2.25. Donde Δn_e es la diferencia entre los índices de refracción efectivos del núcleo y el revestimiento, L corresponde a la longitud por la cual se propagan ambos modos por separados y λ es la longitud de onda [36].

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta n_e L} \quad (2.25)$$

Estructuras de Interferómetros Intermodales Lineales

En estas configuraciones el objetivo es excitar los modos en el revestimiento provocando la difracción de la luz que viaja por el núcleo de la primera sección de fibra, para luego, por medio de una técnica similar, lograr que se re-acople una parte de los modos del revestimiento nuevamente al núcleo y se produzca interferencia con el modo fundamental.

Estos interferómetros lineales, tienen la misma distancia física en cada brazo, sin embargo, la diferencia entre caminos ópticos se logra gracias a que los modos acoplados en el revestimiento tienen un menor índice de refracción que los que se transmiten por el núcleo [37]. La figura 2.4 muestra una estructura que utiliza rejillas de periodo largo como elementos de difracción de la luz. Un ejemplo de esta estructura implementada como sensor de temperatura se puede encontrar en [38]; en donde se obtuvo una visibilidad de 15 dB aproximadamente y una sensibilidad de $60 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.

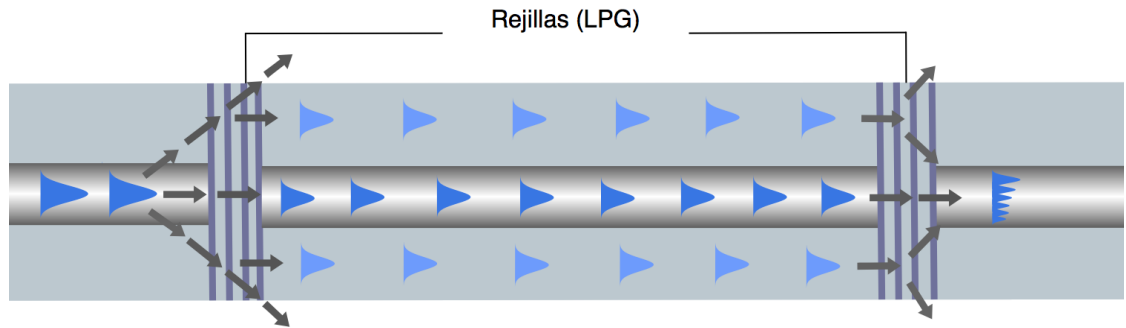


Figura 2.4: Propagación de modos en estructura basada en rejillas de periodo largo

Otra forma de dividir el haz y excitar modos en el revestimiento es al empalmar dos secciones de fibras con un pequeño desplazamiento en el empalme. La figura 2.5, muestra un análisis más detallado del comportamiento modal de esta estructura. Aquí, en la primera unión, parte de la energía que está viajando como modo fundamental, se difracta. La mayor parte se acopla al núcleo de la siguiente sección de fibra, otra parte excita modos en el revestimiento y una porción se propaga hacia el aire, esta última es lo que conocemos como pérdidas de inserción. En el siguiente empalme, parte de la energía acoplada en el revestimiento se re-acopla al núcleo, donde ocurre el fenómeno de interferencia; es importante destacar que en esta unión también ocurren pérdidas de inserción.

El colapso de huecos en la fibra de cristal fotónico, es otra buena manera de hacer un interferómetro Mach-Zehnder lineal. Presenta ventajas gracias a la facilidad de su proceso de fabricación, y que el elemento sensible no se debilita ya que se tiene un empalme lineal; sin embargo, pierde efectividad de costo frente a otras alternativas. Aquí, por medio de una descarga eléctrica se empalman una sección de fibra de cristal

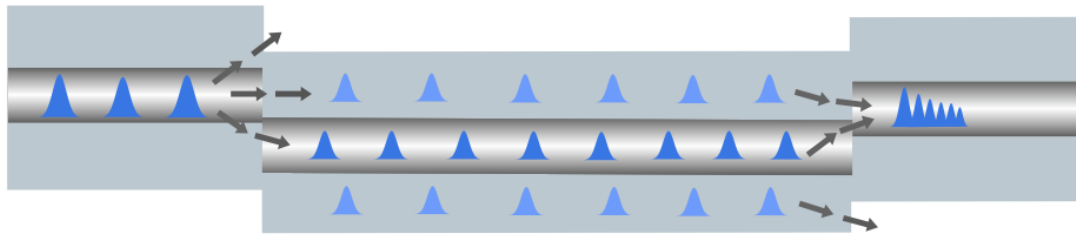


Figura 2.5: Propagación de modos en estructura core-offset

fotónico con una sección de fibra monomodo convencional, ocasionando que, en el punto de fusión la estructura del cristal fotónico colapse.

En este punto, el modo fundamental del núcleo se expande en la región colapsada, de manera que parte de este se acopla al revestimiento de la sección de PCF. El comportamiento modal de esta estructura se puede ver en la figura 2.6. Es visible, a su vez, como esta configuración también incluye pérdidas de inserción. Un ejemplo de este procedimiento se puede encontrar en [17]; en donde se obtuvo una visibilidad de 6 dB y una sensibilidad ante torsión de 10 pm/° C. En [16], se utilizó un dispositivo similar para sintonizar un láser de fibra óptica basado en un amplificador de fibra dopada con erbio.

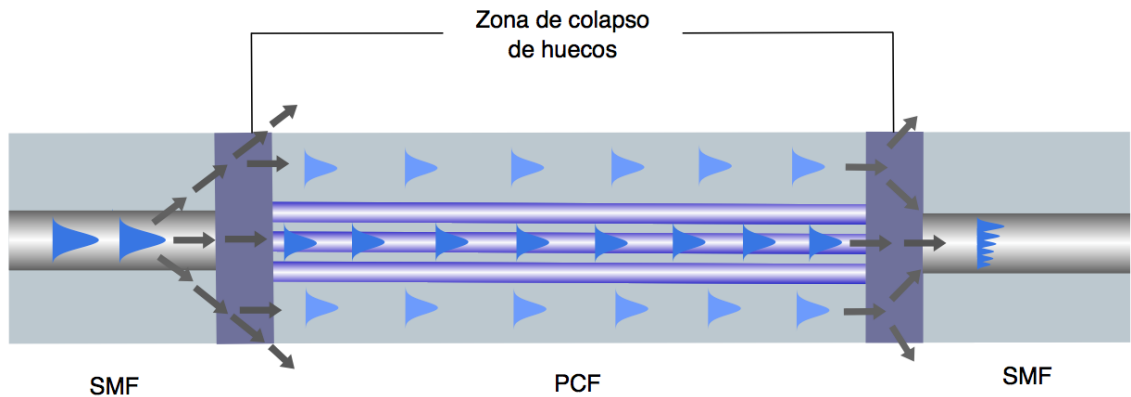


Figura 2.6: Propagación de modos en estructura SMF-PCF-SMF

Si se empalman fibras con diferentes tamaños de núcleo, también se puede dividir el modo fundamental, como se muestra en las figuras 2.7 (a) y (b). En la primer, una fibra SMF de núcleo delgado se empalma entre otros dos segmentos de fibra convencional. En la región de núcleo adelgazado, el haz de luz es guiado o solo por el núcleo sino también como modo en el revestimiento [39]. La figura 2.7 b, muestra otro método, en donde se toma una sección muy pequeña de fibra multimodo y se empalma

entre dos secciones de fibra monomodo. Gracias al gran tamaño del núcleo de la fibra MM, la luz que se propaga por la SMF, se esparce en la región MMF y se acopla tanto al núcleo como al revestimiento de la siguiente sección de fibra SMF, resultados de la implementación de esta técnica se pueden ver en [1]. Es importante denotar que las pérdidas de inserción asociadas a los empalmes siguen presentes en esta estructura.

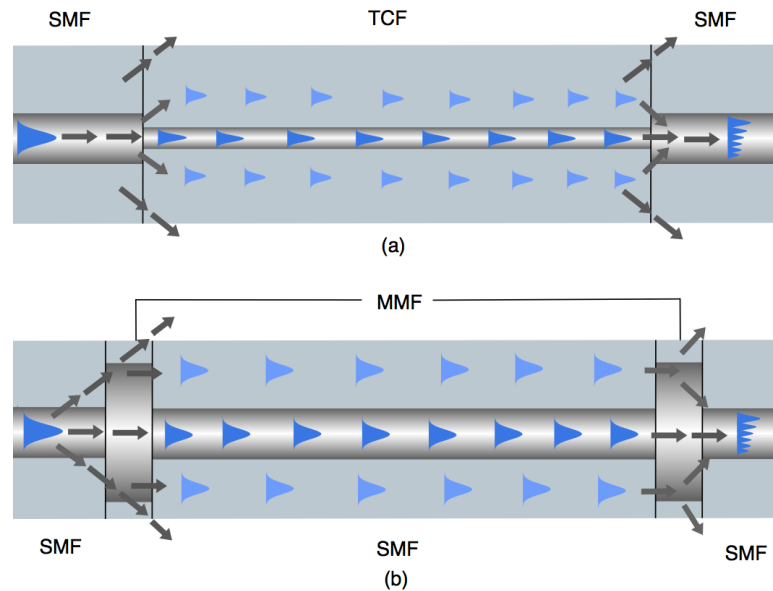


Figura 2.7: Propagación de modos en estructuras con núcleos desiguales

El acoplamiento por diferencia de tamaño de núcleos también se puede lograr en un segmento de la misma fibra, si esta pasa por un proceso de estrechamiento específico, en la figura 2.8 se ilustra este modelo. Gracias al estrechamiento de una sección de la fibra, el diámetro del núcleo se vuelve más pequeño en una sección, y en este punto, se difracta parte de la energía del modo fundamental al revestimiento [6]. Esta configuración presenta la ventaja de que utiliza elementos económicos, sin embargo su método de fabricación es complicado y el dispositivo final es frágil.

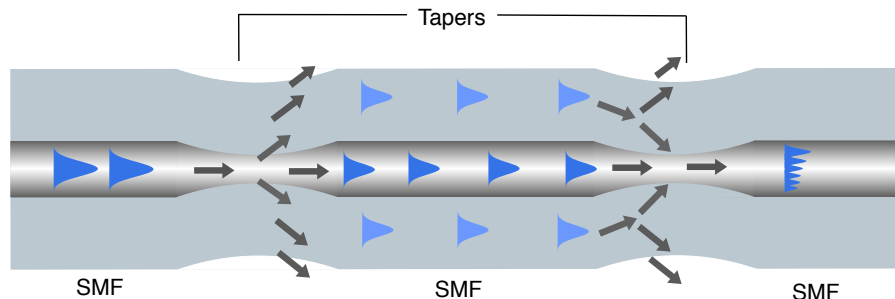


Figura 2.8: Propagación de modos en estructura tipo Taper

2.4. Amplificador de fibra dopada con Erblio

Un amplificador óptico es un dispositivo que amplifica una señal óptica directamente, es decir, sin convertir la señal a eléctrica para luego reproducir la información en una nueva señal óptica. De este tipo de dispositivos el más utilizado es el amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA) [40].

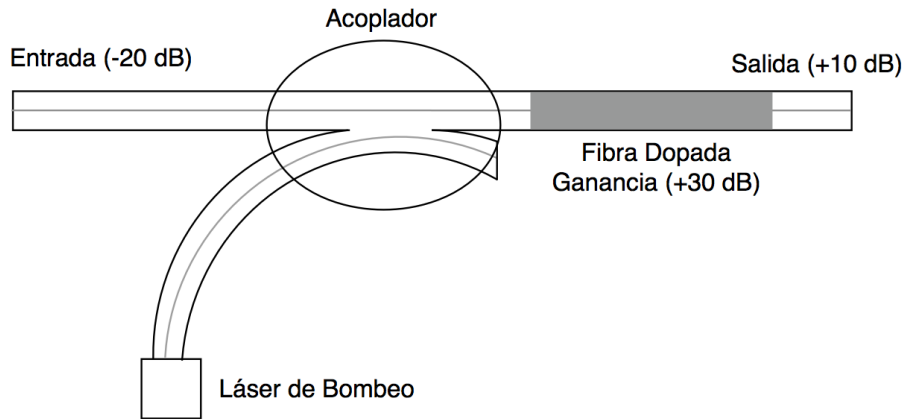


Figura 2.9: Configuración básica del amplificador de fibra dopada [41]

En la figura 2.9 se puede observar la configuración básica de este dispositivo. Aquí, la fibra dopada queda acoplada transversalmente a la fuente de bombeo, de esta forma, la señal débil que entra, es amplificada al atravesar la zona dopada con iones de tierras raras. Normalmente, el acoplador utilizado permite que la radiación de bombeo pase a la región de transmisión, pero evita que parte de la señal se refleje hacia el bombeo. Si la tierra rara es el ion Er^{3+} , existirá una transición láser al rededor de 1536 nm, que corresponde a una banda comúnmente en comunicaciones, de aquí nace el interés comercial por el EDFA.

Estos dispositivos presentan una serie de ventajas frente a otros amplificadores, por una parte, por que es posible conseguir hasta 50 dB de ganancia con bajas potencias en la señal de entrada, con potencias de bombeo moderadas (varias decenas de mW). Por otro lado, la zona espectral en la que operan se encuentra típicamente entre 1530 y 1560 nm, lo que corresponde a una ventana de transmisión en telecomunicaciones, ya que en esta banda se tiene muy baja atenuación en el silicio [41].

Los elementos necesarios para obtener amplificación por medio de una fibra dopada con erbio, son: Una fuente láser de bombeo, aisladores para evitar que posibles reflexiones en dirección contra-propagante puedan ser amplificadas, fibra dopada con erbio y multiplexores ópticos que permitan combinar la señal de entrada con la potencia

de bombeo en la sección dopada. A esta última también se le conoce como medio activo. Es importante destacar que estos dispositivos son unidireccionales [42].

2.4.1. Principio de Funcionamiento de un EDFA

Considerese un sistema atómico con niveles de energía discretos, denotados como 1 y 2. Sus estados de energía correspondientes sería E_1 y E_2 , en donde $E_1 < E_2$. En caso de equilibrio térmico, la densidad de población de electrones de cada nivel queda descrita por la ecuación de Boltzmann 2.26. Donde k_B es la constante de Boltzmann y T es la temperatura absoluta del sistema. De aquí se hace evidente que, en equilibrio térmico, la densidad de población del nivel 2 es menor que la del nivel 1. Cuando un átomo absorbe la energía de un fotón de luz y ésta es equivalente a la diferencia de energía entre los estados E_1 y E_2 , la partícula va del nivel de menor energía al de mayor; a este fenómeno se le conoce como absorción espontánea. Una vez que el átomo está en “gh estado de excitación”, o de no-equilibrio, éste tiene pocas opciones para regresar a su estado original en el nivel 1.

$$N_2 = N_1 e^{-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}} \quad (2.26)$$

Si no existen otros fotones externos, la primera opción es emitir la energía sobrante a través del llamado decaimiento espontáneo. De este proceso se puede derivar la emisión de un fotón o de un fonón. Sin embargo, si existe luz externa con una energía cercana a la diferencia $E_2 - E_1$ mientras gran cantidad de átomos estén excitados en el segundo nivel de energía, dichos átomos pueden pasar a un estado menor de energía a través de un proceso llamado emisión estimulada. La característica principal de este fenómeno es que los fotones producidos por el decaimiento de átomos tienen las mismas frecuencia y fase que la de los fotones que están incidiendo en el sistema [43].

La figura 2.12 muestra las longitudes de onda de emisión y absorción para el un ion de Er^{3+} en silicio. Aquí se puede ver como la fibra dopada con erbio se puede excitar en 1480, 980 y 800 nm. Dependiendo de la longitud de onda de excitación pueden ocurrir diversos procesos en el momento de la emisión. Si se bombea la región dopada con Erblio con fotones en la región de 1480 nm, los átomos pasarán al nivel de energía siguiente y, después de un tiempo, llamado tiempo de decaimiento (aproximadamente 10 ns), el átomo regresa a su estado original emitiendo fotones en la banda de 1550 nm.

Si ahora el bombeo se ubica en 980 nm, los átomos excitados llegan dos niveles de energía más arriba, donde casi inmediatamente decaen al nivel de energía intermedio, de allí, luego de un tiempo retornan a su estado original emitiendo fotones en la región de 1550 nm. Con un bombeo de 800 nm la transición se vuelve un poco más compleja. En este caso, pueden ocurrir dos cosas, la primera es que átomos en equilibrio son

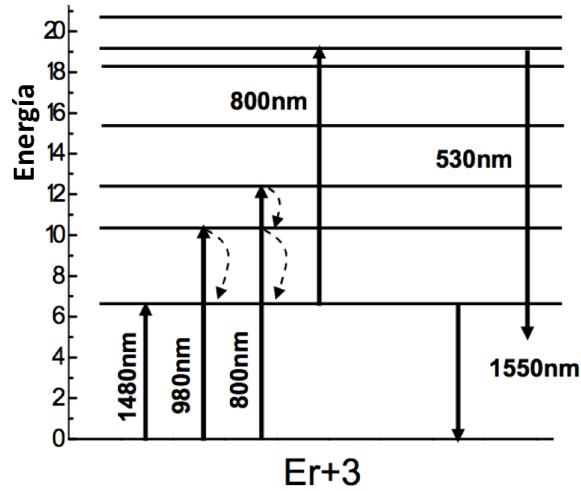


Figura 2.10: Estructura de Niveles de Energía del Er^{3+} en un fibra de silicio [44]

bombardeados por fotones a 800 y de allí pasan a estar tres estados de energía por encima del original.

En la figura 2.11, se muestra con más detalle el espectro de absorción de la EDF. Notese que alrededor de 980 nm, el pico de absorción se ensancha ligeramente, por lo que incluso si se tiene un bombeo entre 975 y 985, aún se puede conseguir la excitación de electrones necesaria para generar la inversión de población de los niveles de energía. Esta región de absorción varia dependiendo de las posibles configuraciones de vidrio huesped. Por ejemplo, si es Fluorozirconato F88 el pico se ubica en 974 nm, mientras que si es en Silicato L-22, el pico se localiza en 981 nm [45].

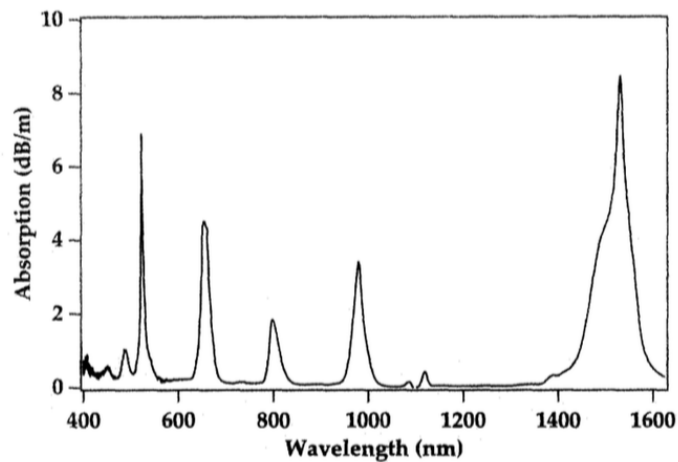


Figura 2.11: Espectro de Absorción de una fibra de Germanio-Aluminio-Silicio, dopada con Er^{3+} [45]

Al tratar de relajarse los átomos pasan por dos estados de transición y finalmente en la última banda se produce emisión en 1550 nm. Si los electrones excitados en el segundo estado de energía son bombardeados con fotones a 800 nm, estos suben aún más hasta 7 niveles por encima de su estado original. En este punto la energía se libera sin estados intermedios y se produce emisión en 530 nm [44]. En la figura 2.12 se puede observar el espectro de emisión espontanea, que es el resultado de bombear una sección de fibra dopada sin incluir una señal de entrada. Este montaje tiene aplicación por sí solo ya que, en aplicaciones de sensado, es un solución económica a la necesidad de una fuente de amplio espectro.

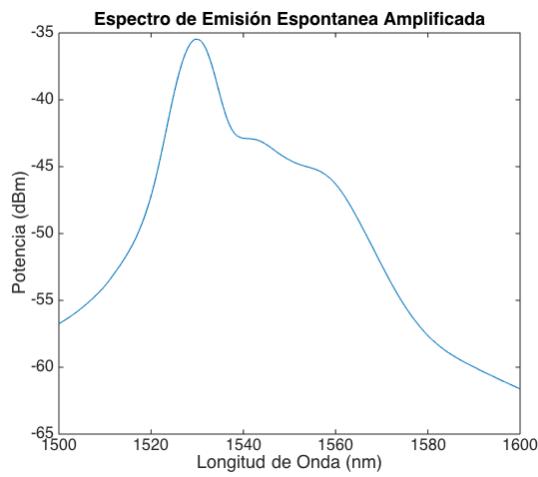


Figura 2.12: *Espectro de Emisión Espontanea Amplificada*

Capítulo 3

Materiales y Métodos

Introducción

En este capítulo se listan los métodos, materiales y equipos necesarios para la ejecución de este proyecto. Describe a detalle los procedimientos realizados, tanto para la fabricación de los interferómetros como para la generación la fuente de amplio espectro que permite que éstos sean caracterizados. Partiendo desde lo más general hacia los aspectos más específicos, ya que se habla primeramente del arreglo experimental describiendo cada una de sus etapas, y luego se profundiza en la fabricación de los dispositivos y las técnicas utilizadas para su análisis.

3.1. Arreglo Experimental

Para la ejecución del proyecto se realizó el esquema experimental mostrado en la figura 3.1. El primer elemento que se puede ver en el lado izquierdo es el diodo láser. Inmediatamente después de la fuente de bombeo se conecta un demultiplexor de longitud de onda (WDM). Esto evita que posibles reflexiones puedan afectar el láser. La salida del multiplexor se conecta a una sección de 3.5 m de fibra dopada con erbio. Esta última, actúa como medio activo para generar una fuente de amplio espectro relativamente plana entre 1500 a 1600 nm (EDFA). La salida de dicha fuente se conecta a la entrada del interferómetro, el cual se posiciona sobre un variador de temperatura. Por último, el extremo faltante va conectado a un analizador de espectros óptico (OSA). Cada una de estas etapas será explicada con mayor detalle a lo largo del capítulo.

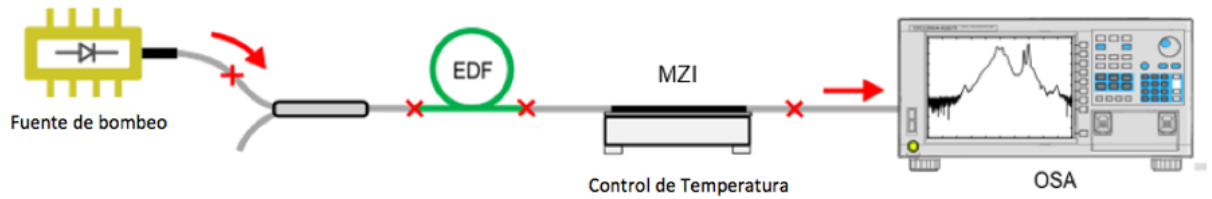


Figura 3.1: Diagrama esquemático del montaje experimental [46]

3.1.1. Amplificador de fibra dopada con erbio

Como se mencionó en la sección 2.4, se puede lograr una fuente de amplio espectro a partir de un amplificador de fibra dopada con Erblio, si no se incluye una señal de entrada sino solo con un láser de bombeo. Para el presente experimento se utiliza un EDFA, no para amplificar una señal, sino para aprovechar el espectro de su emisión espontánea amplificada como fuente de amplio espectro. En la figura 3.2 se puede observar la figura de emisión espontánea obtenida en el laboratorio, al bombear con un diodo láser marca Thorlabs, modelo PL980P330J de 975 nm, una sección de 3.5 metros de fibra dopada con Erblio, marca Thorlabs modelo M5-980-125. Las fuentes corriente y control de temperatura utilizado para operar el diodo láser son también de la marca Thorlabs, modelos LDC 220 y TED 200C. La potencia máxima obtenida con esta configuración es de -38 dBm y con este montaje se realizaron todas la pruebas pertinentes a este proyecto.

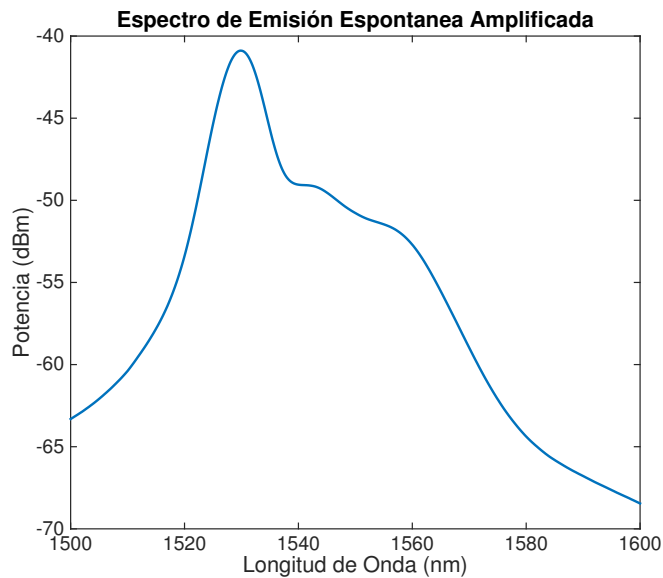


Figura 3.2: Espectro de Emisión Espontánea Amplificada

3.1.2. Control de Temperatura

El objetivo de este elemento del montaje es garantizar que los interferómetros estén sometidos a distintos valores de temperatura precisos, con el fin de que puedan ser caracterizados en función de esta variable. En este punto se cuenta con información específica del valor de temperatura al que se está sometiendo el sensor, para tomar dichos valores como referencia en el momento de la caracterización. El sistema utilizado consiste en dos celdas peltier alimentadas por una fuente de 12 VDC y controladas por medio de un modulador de ancho de pulso. Dichas placas cerámicas están posicionadas sobre un disipador de calor que permite enfriar el sistema y mantener una temperatura constante. La unidad central de procesamiento es un sistema de adquisición de datos Arduino, que procesa los valores de temperatura en tiempo real, mientras que, a su vez, permite la modificación del valor deseado de temperatura.

El sistema en general tiene una precisión de 1 °C, en un rango dinámico de 23 a 43 °C. El sensor de temperatura del sistema es un dispositivo infrarrojo que se conecta directamente a la placa Arduino. Para asegurar el buen comportamiento del control, se coloca directamente sobre las celdas una lámina de cobre. De este modo, se captura la temperatura de la lámina de cobre, incluyéndose así un retardo al sistema, que permite que el control sea más preciso.

Para poder caracterizar los interferómetros en un rango dinámico más amplio, se hace uso de una parrilla de laboratorio. En este caso, se fija el interferómetro junto con un termopar a la plancha de calentamiento y se van tomando mediciones a medida que aumenta la temperatura. Éste es un método menos exacto que el anterior, sin embargo el rango dinámico con el que se puede trabajar oscila entre los 25 y 150 °C.

3.1.3. Analizador de espectros ópticos

El último elemento del montaje experimental es el analizador de espectros ópticos. Con él se obtiene la información del contenido espectral de una determinada fuente de luz. Este equipo hace uso de un monocromador sintonizable que detecta la potencia de entrada para cada longitud de onda en un rango determinado. En el laboratorio se cuenta con el equipo Yokogawa AQ6370C, que se puede ver en la figura 3.3. Las configuraciones utilizadas para las medidas de este experimento fueron de 1500 a 1600 nm, ya que es en este rango donde se podían apreciar con mayor claridad el patrón de interferencia sobre la fuente de amplio espectro producido por el amplificador EDFA. Por último la resolución utilizada fue de 1 nm.

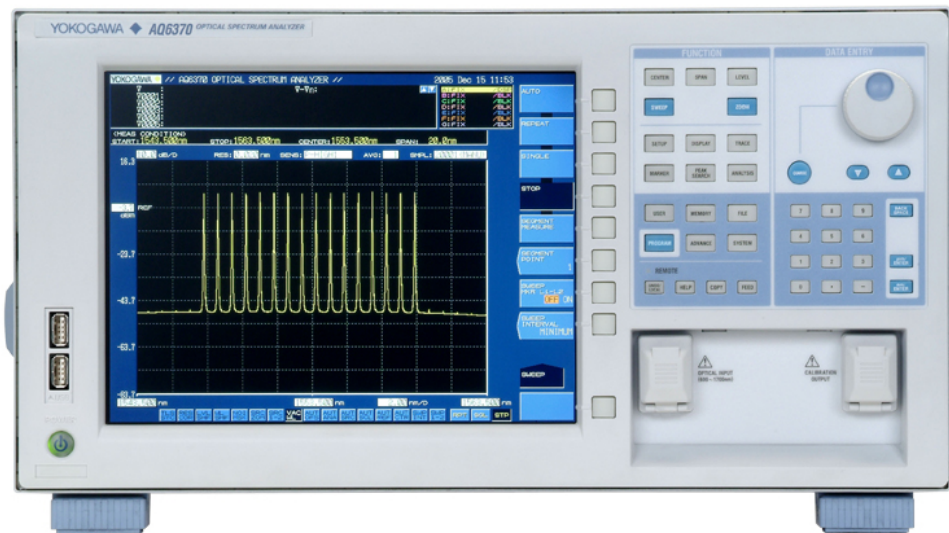


Figura 3.3: Analizador de Espectros Ópticos

3.2. Fabricación de los interferómetros

Como se había descrito en la sección 2.3, los interferómetros de estructura lineal o “in line” son de los más utilizados en sensado de fibra óptica por su fácil fabricación, reducido tamaño y por que presentan las características sobresalientes de los dispositivos ópticos en general, como su robustez ante interferencia electromagnética. En esta sección se describen los métodos utilizados para la fabricación de los interferómetros utilizados en este proyecto.

3.2.1. Estructura Tipo Core-Offset

Proceso de Fabricación

El equipo principal utilizado es una empalmadora de descarga eléctrica marca FITEL modelo S175, y el material es fibra convencional monomodo SM-28. En primer lugar se toma una sección de fibra monomodo de una metro aproximadamente. Esta distancia se escoge así para que permita conectar y desconectar el dispositivo del arreglo las veces que sea necesario.

Este segmento se quiebra por la mitad y un extremo de cada una de estas nuevas secciones se despoja del recubrimiento plástico por medio de una pinza tipo stripper o una navaja. A uno de estos dos terminales se le elimina una sección más grande

de recubrimiento plástico, esta sección “pelada” será la parte central del interferómetro. Luego, se procede a realizar dos cortes rectos en estos extremos, ya sea con una cortadora comercial, o con una cerámica especial diseñada para este fin. Para realizar este empalme se utiliza el programa básico del equipo para fibra monomodo que consiste en: Potencia de arco 71 mW, tiempo de prefusión 240 ms, y duración de arco, 750 ms. Una vez escogido el programa deseado, se configura la emplamadora en modo manual y se posicionan los extremos de las fibras de modo que sean visibles en la pantalla.

La figura 3.4, muestra un diagrama de flujo de la fabricación de un empalme desplazado, a partir de este punto. En la fotografía de la parte superior izquierda, se tienen visibles ambos cortes rectos de la fibra. Luego se procede a alinearlos perfectamente y centrar las caras en la pantalla, en la zona de descarga eléctrica. Una vez alineadas las fibra, se desplaza un terminal y el otro permanece fijo, por medio de la operación de los motores ZR, ZL, Align X y Align Y. Básicamente, la fibra se puede mover en cuatro direcciones perpendiculares al núcleo. en este caso el desfaseamiento se hace en un solo extremo y en una sola dirección. Una vez se tiene la distancia deseada, se unen las fibras por medio de los motores a pasos, utilizando movimientos pequeños, asegurando que las fibras se toquen más no se genere presión entre ellas.

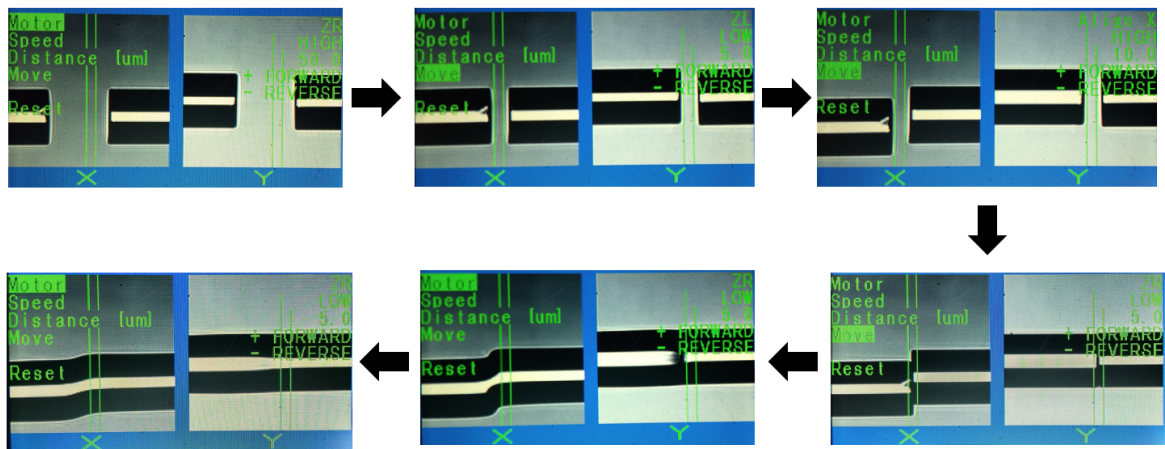


Figura 3.4: *Proceso de fabricación de un empalme desplazado*

Y es aquí donde se procede a aplicar varias descargas consecutivas hasta conseguir el efecto deseado. La penúltima fotografía muestra el empalme con apenas una descarga. A pesar que la fibra ya esta unida se puede observar que el núcleo apenas se fusionó de un lado y del otro se ve una región oscura, presuntamente material del recubrimiento. Sin embargo, la última figura muestra un empalme completamente terminado a la cuarta descarga. En este punto se garantiza una buena potencia de transmisión y excitación de lo modos en el revestimiento.

Para realizar el siguiente empalme del interferómetro, se realiza el mismo

procedimiento que se acaba de mencionar, con la diferencia de que, en este caso, al salir el primer empalme se marca el punto de unión con tinta indeleble y desde esta marca, se mide la distancia correspondiente a la longitud del interferómetro más 5 mm, para asegurar que el corte no afecte dicha longitud. Es en este punto donde hace útil el corte con la piedra cerámica manual, ya que es más fácil tener un control preciso de la distancia del interferómetro, que no es el caso con el uso de una cortadora comercial. Una vez finalizada la fabricación del dispositivo es importante que se almacene completamente recto, y que no sufra estrés mecánico de ninguna forma.

Interferómetros Fabricados

La figura 3.5 muestra un esquema de dispositivo donde se evidencian los parámetros de fabricación. La distancia de desplazamiento en los dos empalmes (D y d) se variaron con el fin de obtener una respuesta óptima en términos de visibilidad, uniformidad y potencia en el patrón de interferencia.

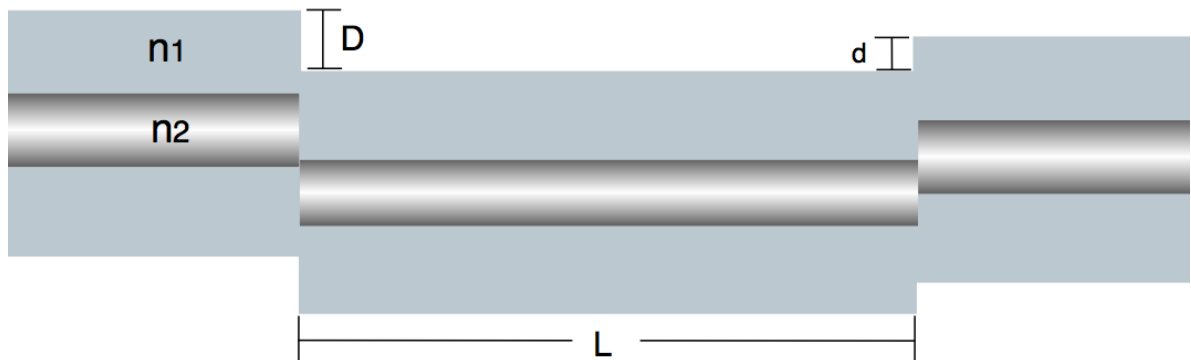


Figura 3.5: Estructura de Interferómetro MZI tipo core-offset [46]

Los parámetros de desplazamiento óptimos se hallaron por medio de un proceso experimental que consistió en dos partes. Primero se varió el desplazamiento de forma simétrica ($D=d$) para conseguir la distancia con la cual se lograba un mayor acoplamiento modal. Los desplazamientos trabajados fueron 10, 20, 30 y 40 μm . Se tomó como fija la distancia del interferómetro en 5 cm, ya que de este modo se observaban mejor forma en el patrón de interferencia y menos pérdidas en la señal de salida. Los espectros de interferómetros con diferente desplazamiento simétrico, se pueden observar en la figura 3.6. Para cortas distancias de desplazamiento, como 10 μm , se observa una buena potencia de transmisión, y, con respecto a la fuente de amplio espectro sólo presentan 6.47 dB en pérdidas de inserción. Estas se toman comparando la potencia del pico máximo de la fuente amplio espectro con el pico máximo del espectro del interferómetro.

Sin embargo, la profundidad de los lóbulos, también conocido como contraste

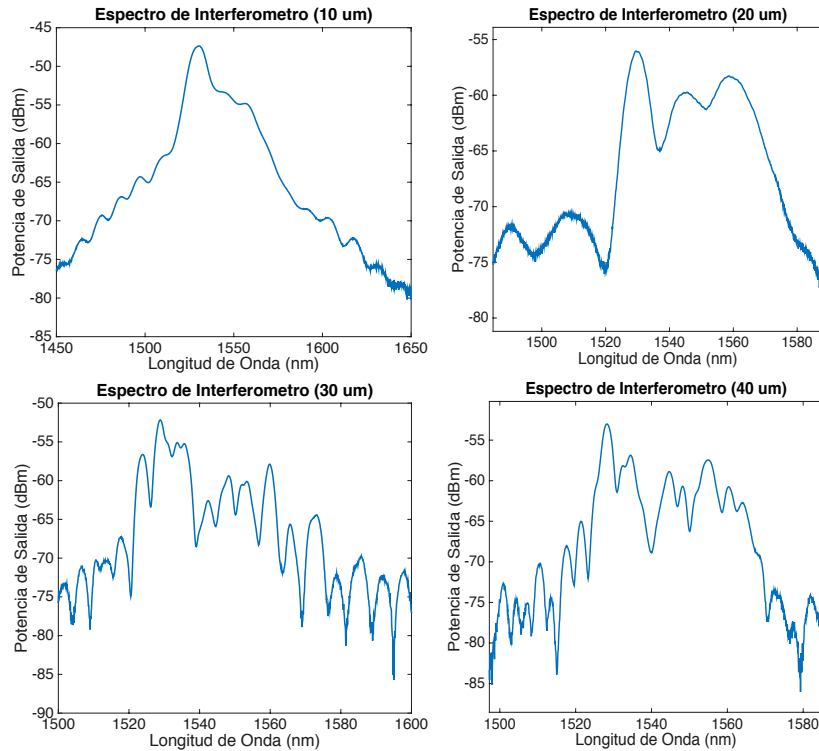


Figura 3.6: *Espectro óptico de interferómetros simétricos [46]*

de franja, no es el más óptimo, estando por debajo de 1 dB. En el espectro del dispositivo fabricado con $20 \mu m$ de desplazamiento, comienza a aparecer patrón de interferencia de valles más pronunciados, pero con una pérdida de inserción de 15.23 dB. Al trabajar con un desplazamiento de 30 m se observa que aparecen más franjas y, a su vez, la visibilidad (contraste de franja), incrementa hasta alcanzar los 9 dB en promedio; este dispositivo tiene una pérdida de inserción de 11.5 dB. Finalmente, cuando el desplazamiento alcanza los $40 \mu m$ se observa que permanecen esas las franjas pero su visibilidad disminuye hasta los 6 dB y aumentan las pérdidas de inserción a 12.29 dB. De este análisis, se puede concluir que la distancia de desplazamiento a la cual, se acoplan mejor los modos al revestimiento es $30 \mu m$.

Una vez detectada la distancia ideal de acoplamiento modal al revestimiento, se procedió a evaluar diferentes desplazamientos en el segundo empalme con el objetivo de conseguir la mejor calidad en el patrón de interferencia posible, (Distancia d en la figura 3.5). Este corrimiento se evaluó en 10, 20, 30 y $40 \mu m$. El resultado de esta experimentación es que los mejores parámetros de fabricación son: longitud de 5 cm, distancia D de $30 \mu m$ y distancia d de $20 \mu m$. Esta configuración da como resultado una visibilidad promedio de 11 dB en un patrón uniforme con la menor pérdida de inserción entre las muestras estudiadas. Más detalle de estos resultados se pueden encontrar en [46].

En la fabricación de los interferómetros para ser recubiertos, la longitud del dispositivo (L) se vio limitada por la capacidad de los equipos de recubrimiento metálico y la cantidad de material disponible para este procedimiento. La longitud de los interferómetros oscila entre 2 y 4 cm, en la tabla 3.1 se listan los dispositivos de acuerdo a su longitud y distancia de desplazamiento.

Tabla 3.1: *Listado de Interferómetros tipo Core-offset*

INTERFERÓMETROS				
Nro.	Long. (L)	Distancia (D)	Distancia (d)	Descargas
1	2 cm	30	30	4
2	2 cm	30	20	4
3	2.5 cm	30	30	3
4	2.5 cm	30	20	4
5	3 cm	30	30	4
6	3 cm	30	20	4
7	3.5 cm	30	30	4
8	3.5 cm	30	20	4
9	4 cm	30	30	3

3.2.2. Estructura SMF-PCF-SMF

Los interferómetros de PCF elaborados trabajan bajo el principio de funcionamiento mencionado en la sección 2.3. Su elaboración es similar al de los dispositivos core-offset, con la diferencia de que en este caso, el segmento central es una sección de fibra de cristal fotónico. Para el presente experimento se trabajó con PCF de las siguientes características: diametro de hueco 6 micrometros, separación entre huecos 17 micras y diametro del nucleo 5 micrometros. En la figura 3.7 se puede encontrar un corte transversal de esta fibra.

Igual que en el caso anterior, se toma una sección de fibra monomodo de aproximadamente un metro de longitud y se fracciona en dos partes, eliminando el recubrimiento plástico de los extremos y haciendo un corte recto en cada uno de ellos. Luego se toma una sección de PCF y se despoja de su recubrimiento plástico. La idea en este caso es que esta sección de fibra sea el elemento sensible y se posicione en el centro de las otras dos partes de fibra monomodo.

El empalmado de los extremos del interferómetro se hace con el mismo equipo Fitel S175, con la diferencia de que en este caso el programa se modifica con los siguientes parámetros: potencia de arco 61 mW, tiempo de pre-fusión 240 ms, y duración de arco, 650 ms. En la figura 3.8 se puede ver el proceso de elaboración de un empalme de este interferómetro. Primeramente, se alinea el núcleo de ambas fibras en el equipo, luego se

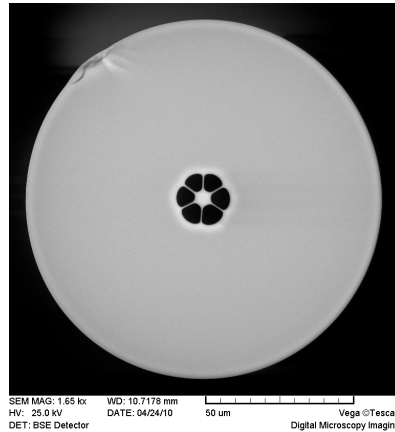


Figura 3.7: Corte Transversal de Fibra PCF

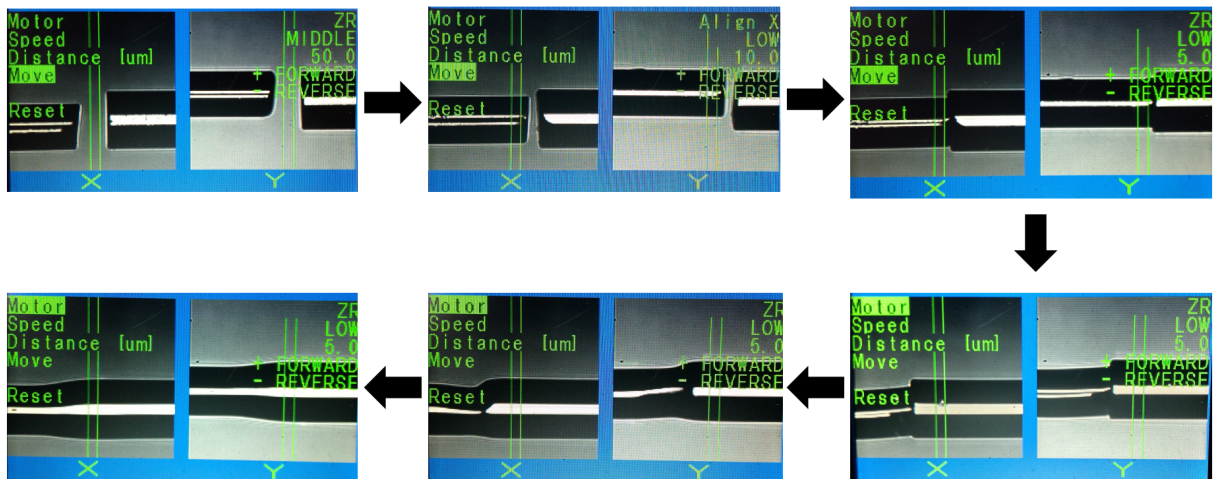


Figura 3.8: Proceso de fabricación de un empalme SMF-PCF

acercan hasta que apenas se tocan, para asegurar la unión de ambos núcleos se puede ejercer un poco de presión con los motores de la empalmadora, y, seguidamente, se aplican descargas sucesivas.

En la primera descarga apenas se unen las fibras, en la siguiente se puede observar el efecto de colapso de huecos en el núcleo de la fibra de cristal fotónico. Aquí es un poco más difícil que los núcleos se unan completamente por lo que hay que hacer más descargas que en el caso de fibra desplazada, para este interferómetro se aplicaron 10 descargas en cada terminal, hasta que los núcleos se unieron completamente como muestra la última fotografía del proceso. De este tipo de dispositivos se fabricaron solamente dos ejemplares de 5 cm de longitud, por disponibilidad de material.

3.2.3. Recubrimiento Metálico

El proceso de recubrimiento metálico se llevó a cabo en una cámara de deposición física en fase de vapor (PVD). La cámara puede ser evacuada a alto vacío (alrededor de 10^{-6} Torr), usando una combinación de bomba rotatoria y turbonuclear. El sistema de evaporación consiste en alimentar con 400A, un sujetador de tungsteno donde se colocan las capsulas de aluminio, este sujetador se posiciona en el fondo de la cámara. Una bandeja operada manualmente permite controlar el flujo de vapor desde el sujetador a la parte superior de la cámara y así tener un tiempo preciso de recubrimiento.

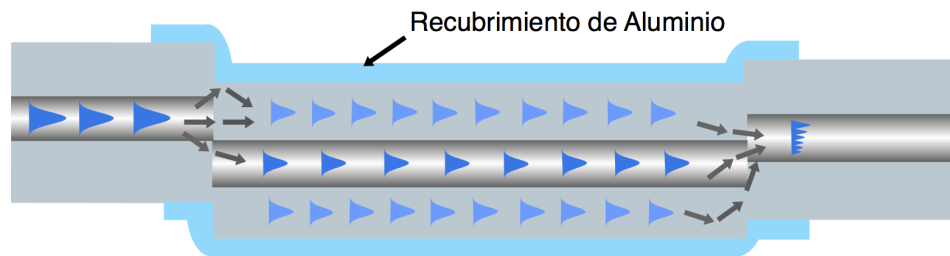


Figura 3.9: Diagrama Esquemático de Interferómetro Core-Offset Recubierto

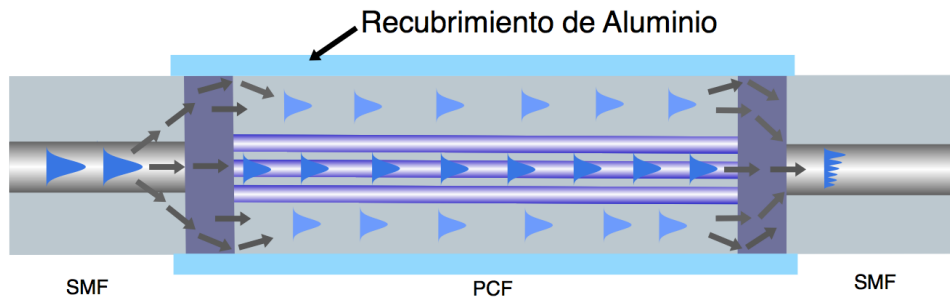


Figura 3.10: Diagrama Esquemático de Interferómetro SMF-PCF-SMF Recubierto

Los interferómetros se ubican en un soporte suspendido en la parte superior, aproximadamente 50 cm por encima del sujetador de tungsteno. Luego de que se tenga un vacío de entre 10^{-5} y 10^{-6} , la corriente se incrementa gradualmente hasta el el aluminio en la placa se derrite, esto curre aproximadamente a 100A. En este punto, se abre la bandeja y la fibra queda expuesta al vapor por un total de 1 minuto. Pasado este tiempo, se cierra la bandeja interrumpiendo el flujo de vapor y se deja que el sistema se enfríe por unos minutos. Los interferómetros están sostenidos al soporte por medio de una placa plástica con una ventana en donde se expone la porción deseada de fibra,

luego de terminado el proceso de recubrimiento, se abre la cámara, se voltea esta base y comienza todo el procedimiento de nuevo para recubrir por completo el interferómetro.

En la figura 3.9 se puede ver un esquema diagrama esquemático del interferómetro tipo core-offset recubierto. Gracias a la alta reflectividad del aluminio depositado por evaporación, en la región infrarroja, [47], se considera que parte de los modos que antes se estaban perdiendo en los empalmes ahora se acoplan al revestimiento mejorando así el patrón de interferencia del dispositivo. De igual manera se ilustra este principio para los interferómetros de fibra de cristal fotónico, como se muestra en la figura 3.10.

3.3. Caracterización y Análisis

3.3.1. Sensibilidad en Potencia y en Longitud de Onda

Los parámetros comúnmente reportados en sensores de fibra óptica normalmente son la sensibilidad en longitud de onda y en potencia de salida. La primera se refiere a la tasa de cambio de la longitud de onda de un pico o valle del espectro, con respecto cambios en la variable medida, y la segunda, corresponde al cambio de nivel en potencia de un determinado punto ante variaciones del mesurando. En la figura 3.11, se puede observar estas sensibilidades en forma de $\Delta\lambda$ y ΔP .

En este experimento, por cada dispositivo, se grafican las curvas de caracterización, tanto de longitud de onda, como de potencia con respecto a la temperatura. Tomando en cuenta todos los picos en los que sea medible un desplazamiento y todos los puntos en donde sean apreciables cambios en la potencia.

3.3.2. Transformada de Fourier

Para determinar los modos participantes en el patrón de interferencia se aplica la transformada de rápida de Fourier (FFT). Matemáticamente, la Transformada de Fourier (FT) se define tal y como se muestra en la ecuación 3.1. Se dice también que $w(t)$ y $W(f)$ constituyen un *par de transformada de Fourier*, donde $w(t)$ es la descripción de la señal en el dominio del tiempo y $W(f)$ es la descripción en el dominio de la frecuencia [48]. En el caso de las señales ópticas, la señal sometida a esta transformación es el espectro obtenido en el analizador de espectros ópticos, que en este caso representa la descripción de la señal en el dominio del espacio (nm). Por tanto, al finalizar la transformación, se tiene información de la señal en el dominio de la frecuencia espacial, cuyas unidades corresponden a nm^{-1} . La FFT es un algoritmo matemático que permite

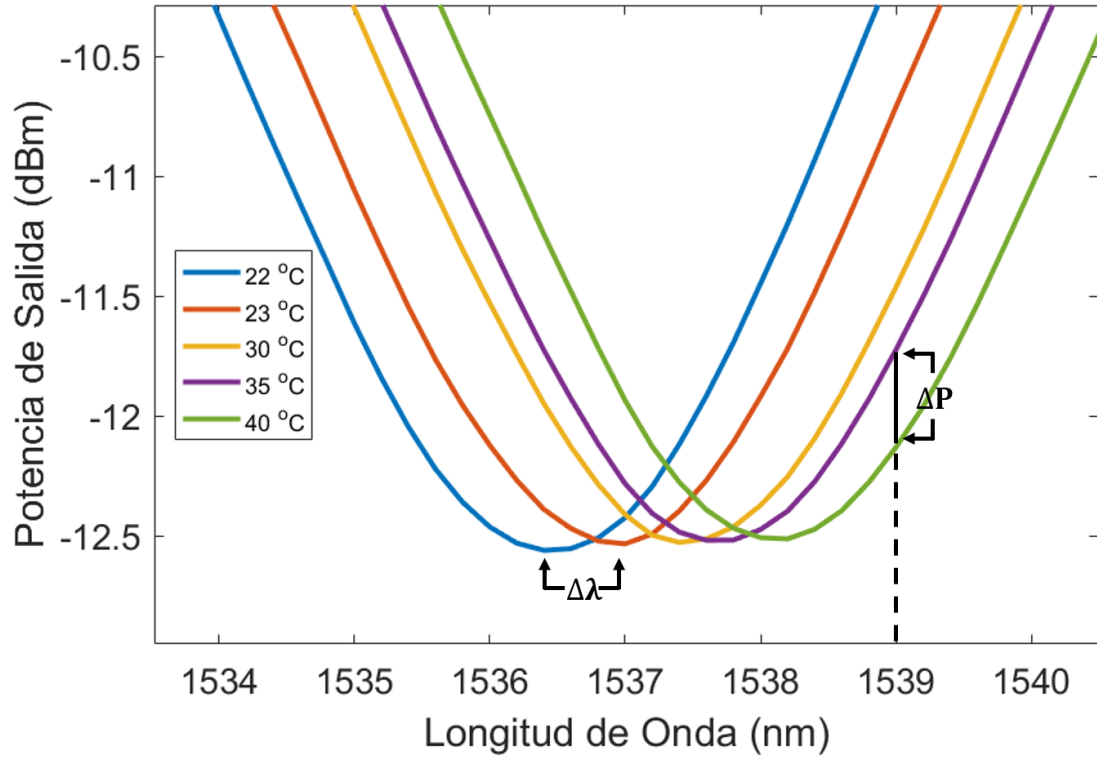


Figura 3.11: *Sensitividad en Longitud de Onda y Potencia de Salida*

a dispositivos de computo calcular una aproximación de la FT.

$$W(f) = \mathfrak{F}[w(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} [w(t)] e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.1)$$

De un espectro óptico, las componentes sinusoidales que componen el espectro interferométrico, se verán representadas, en forma de picos, en la FT o, en este caso, la FFT. Dentro de las propiedades de la FT, una de las más importantes es que esta transformación es lineal. Por tanto la amplitud de estos picos es directamente proporcional a la amplitud de la componente sinusoidal o modo, de la señal original que los genera. Otra información que se puede obtener de la FT es sobre la energía de la señal. El Teorema de energía de Rayleigh, esta descrito en la ecuación 3.2, donde se establece una relación directa entre la energía de la señal, su cálculo en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia [48].

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |w(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |W(f)|^2 df \quad (3.2)$$

A pesar de que el teorema está definido para integrales infinitas, es valido para

señales previamente filtradas en ambos dominios. Es decir, que si se aísla un solo pico de en el dominio de frecuencia, en el dominio del tiempo se observará solo la componente sinusoidal que genera este pico, y el teorema de Rayleigh permite calcular entonces, la energía relativa a esta componente o modo, que es equivalente a la energía del modo aislado en el dominio de la frecuencia espacial. Por lo tanto se puede decir que el la energía de un modo en el dominio del espacio, es directamente proporcional al área bajo la curva del pico que lo representa en el dominio de la frecuencia espacial.

En la figura 3.12, se visualiza el espectro espacial calculado por medio de la FFT, de los patrones de interferencia mencionados en la figura 3.6. Se puede observar que en 0 se centra el modo fundamental predominante y los picos que aparecen más adelante corresponden a los modos de alto orden. Aquí se aprecia claramente que los interferómetros con un desplazamiento de 10 y 20 μm casi no presentan modos de alto orden o, si existen, estos son de amplitud muy pequeña en comparación con los dispositivos que tienen un desplazamiento entre 30 y 40 μm .

Al comparar este últimos entre ellos, el dispositivo con un desplazamiento de 30 μm , tiene un modo de alto orden que predomina sobre los demás, mientras que en el de 40 μm existen diversos modos mas o menos de la misma amplitud que compitiendo entre sí. En la figura 3.6, donde se grafica el espectro de estos interferómetros, es visible que el espectro del tercer dispositivo es más uniforme que el del cuarto. Esto es gracias a la predominancia de un solo modo de alto orden, mientras que en el cuarto interferómetro se observa un espectro mucho más caótico y la calidad del patrón de interferencia es menor, en comparación.

3.3.3. Linealidad de la curva de caracterización

En teoría de sensores, la linealidad describe la cercanía entre una curva de caracterización una línea recta; esto depende de la definición de línea recta que se utilice. Se pueden utilizar diversas estrategias, una de la mas comunes de la aproximación por mínimos cuadrados, en donde se busca el mínimo error entre los puntos del conjunto de datos y la línea recta que los modela. La linealidad de una curva de caracterización indica en que medida la sensibilidad de un sensor es constante, facilitando así la interpretación del valor del mesurando [49].

Para medir la diferencia entre los valores modelados en una línea recta, y los datos reales medidos, existen diferentes estrategias, una de las más comunes es el error de no linealidad (ENL). Se presenta en la ecuación 3.3 y presenta una medida porcentual de la diferencia entre los datos modelados y medidos. Aquí la medida de *Span* corresponde a la diferencia entre el valor mínimo de máximo de la magnitud medida en función de la temperatura, es decir, el eje Y. En este caso esto puede ser desplazamiento en longitud de onda o en potencia.

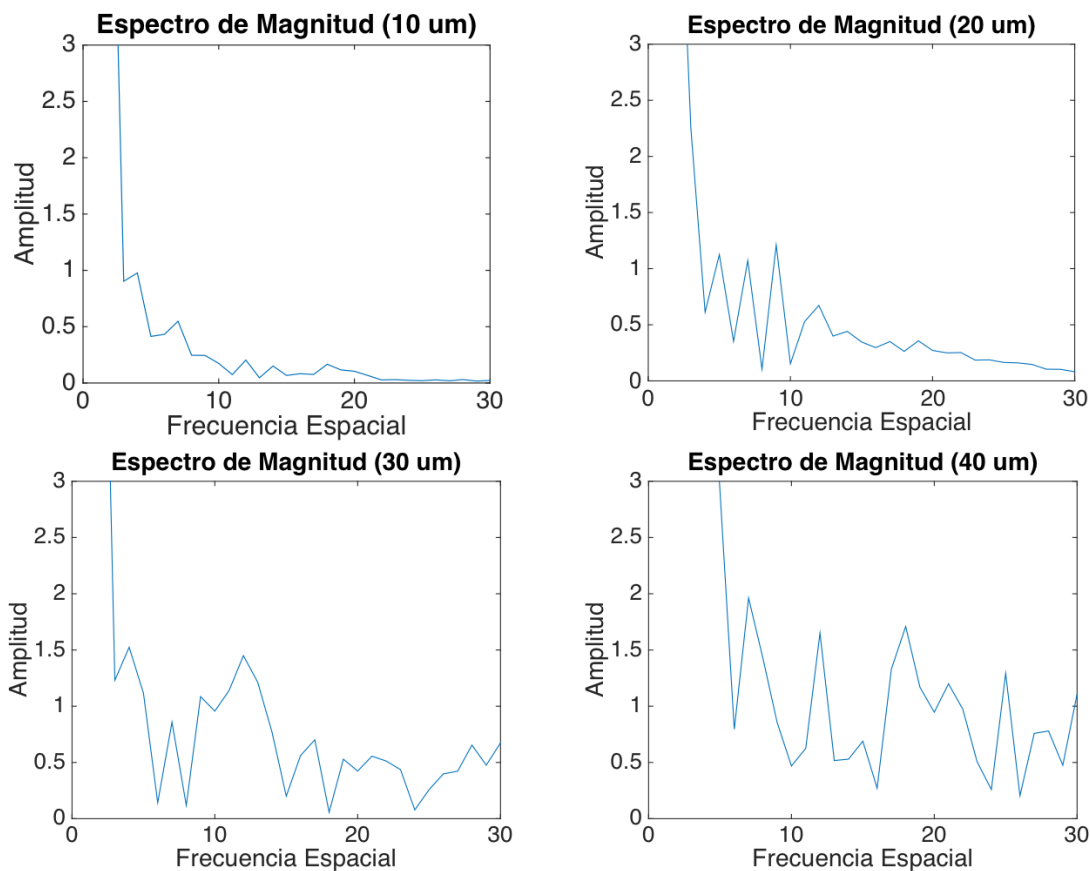


Figura 3.12: *Espectro Espacial de Interferómetros Simétricos*

$$NL = \sum \frac{X_{med} - X_{mod}}{Span} \quad (3.3)$$

Como criterios de comparación de los diferentes interferómetros, y de su comportamiento al ser recubiertos con metal, se utilizará la sensibilidad en longitud de onda y potencia que estos presenten, además de este parámetro de error, tanto en las curvas de potencia como en las de longitud de onda [50].

Capítulo 4

Resultados y Discusión

Introducción

En este capítulo, se despliegan, analizan y discuten los resultados obtenidos de la realización de este experimento, desglosando estos resultados para cada etapa del proyecto. Primeramente se discute sobre los recursos disponibles para la caracterización, especialmente, la fuente de amplio espectro fabricada. Además, se justifica la selección de los parámetros de operación de la misma.

Posteriormente se procede a describir los espectros interferométricos, obtenidos de los dispositivos sin recubrimiento. Haciendo énfasis en la capacidad de transmisión (pérdidas de inserción), contraste de franja y número de lóbulos en el patrón de interferencia. Estos datos se estudian también en los interferómetros recubiertos. Con respecto a la caracterización en temperatura, aquí se estudia por separado cada interferómetro, con el fin de comparar directamente el desempeño del dispositivo antes y después de ser recubierto. Como se había mencionado en el capítulo anterior, se toma en cuenta en este punto, características como sensibilidad de la potencia de salida y de la longitud de onda, ante cambios de temperatura. Se estudia también el error de no linealidad en cada curva de caracterización.

En la sección de discusión de resultados, se hace un análisis comparativo del desempeño de los dispositivos, como interferómetros, antes y después de ser recubiertos. Para esto se hace uso de los datos previamente capturados de pérdidas de inserción, contraste de franja y número de lóbulos presentes en el patrón de interferencia. Seguidamente, se procede a hacer un análisis de la interacción modal y su modificación con el recubrimiento metálico. Este estudio se hace haciendo uso de la FFT, tal y como se menciona en el capítulo 3. Para finalizar se proyecta este mismo análisis comparativo pero en las características del interferómetro como sensor, es decir, la sensibilidad en

potencia, fase y la linealidad en cada caso.

4.1. Elaboración de Interferómetros Recubiertos

Como se mencionó en la sección 3.2.1, se fabricaron una serie de interferómetros Mach-Zehnder por las técnicas core-offset y colapso de huecos. En la tabla 4.1 se listan todos los dispositivos elaborados, con sus respectivos parámetros de fabricación.

Tabla 4.1: *Listado de Interferómetros Fabricados*

INTERFERÓMETROS				
Nro.	Long. (L)	Distancia (D)	Distancia (d)	Descargas
1	2 cm	30	30	4
2	2 cm	30	20	4
3	2.5 cm	30	30	3
4	2.5 cm	30	20	4
5	3 cm	30	30	4
6	3 cm	30	20	4
7	3.5 cm	30	30	4
8	3.5 cm	30	20	4
9	4 cm	30	30	3
10	5 cm	0	0	10
11	4.5 cm	0	0	10

Notese, que los dos últimos interferómetros no tienen distancia de desplazamiento lateral, esto se debe a que son los fabricados con fibra de cristal fotónico, y su principio de operación se basa en el colapso de huecos. Además el numero de descargas considerablemente mayor el de los demás, sin embargo, el programa de la empalmadora en este caso es distinto, como se menciona en la sección 3.2.1.

4.1.1. Interferómetros sin recubrimiento

Las siguientes figuras de la 4.1 a la 4.11, muestran los espectros de transmisión de cada uno de los interferómetros fabricados antes de que fueran recubiertos con aluminio. Ésto se calcula restandole a la fuente original EDFA el espectro de salida del interferómetro. Así, se puede tener una idea clara de las pérdidas de inserción que se presentan.

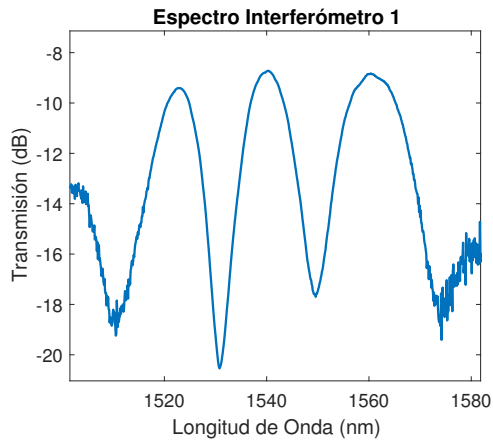


Figura 4.1: Espectro de Int. 1

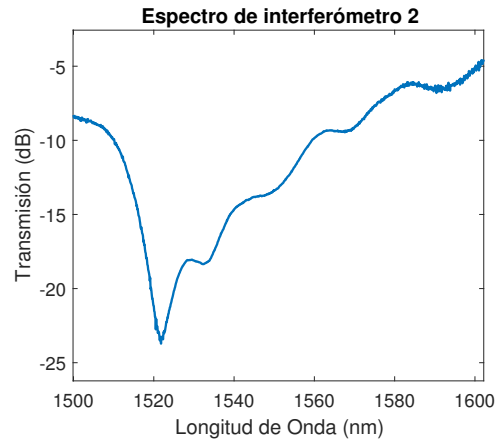


Figura 4.2: Espectro de Int. 2

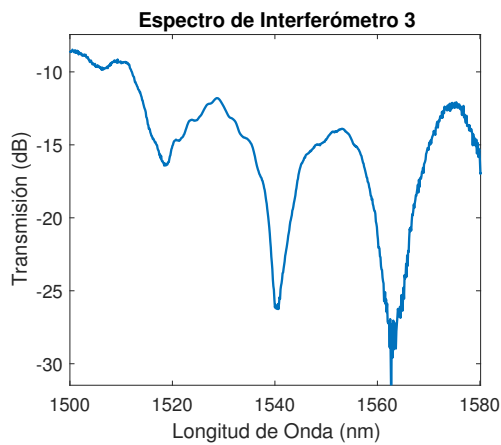


Figura 4.3: Espectro de Int. 3

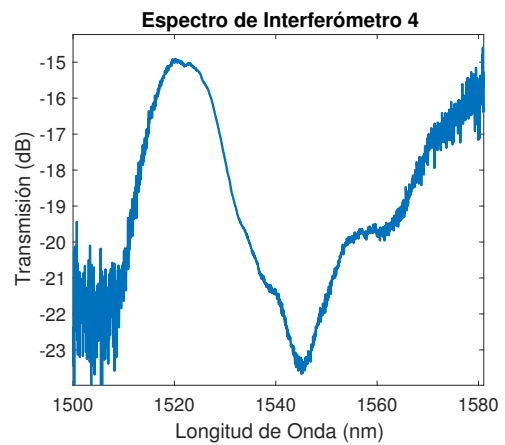


Figura 4.4: Espectro de Int. 4

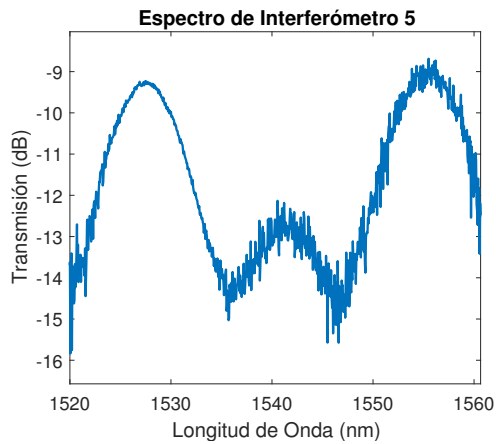


Figura 4.5: Espectro de Int. 5

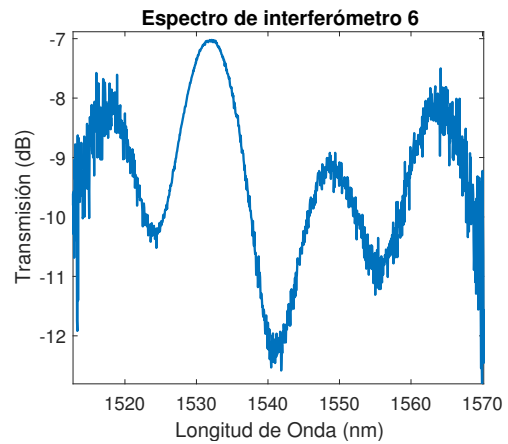


Figura 4.6: Espectro de Int. 6

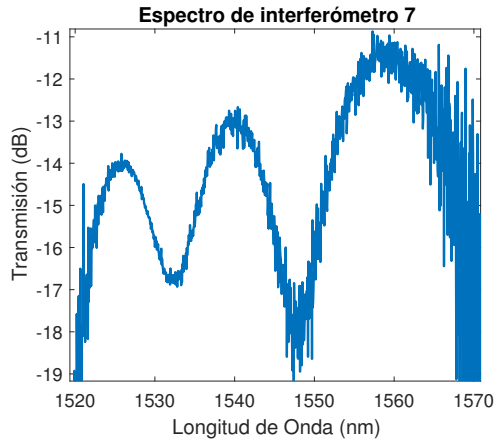


Figura 4.7: Espectro de Int. 7

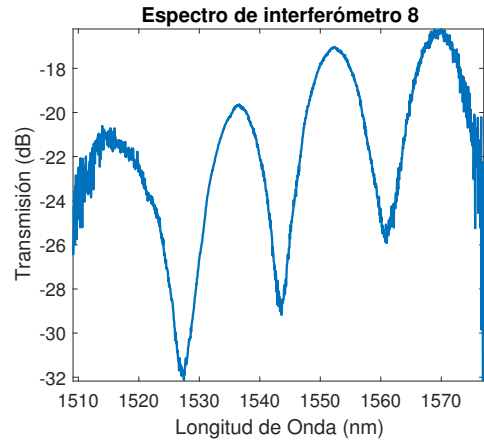


Figura 4.8: Espectro de Int. 8

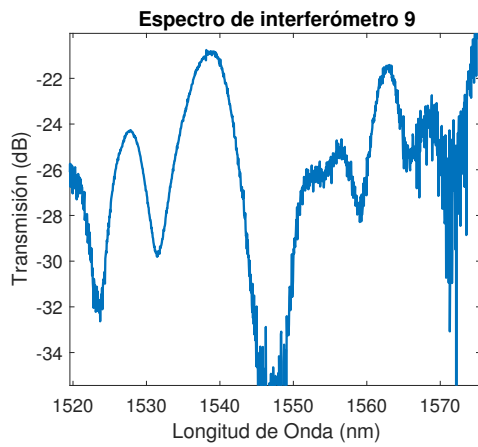


Figura 4.9: Espectro de Int. 9

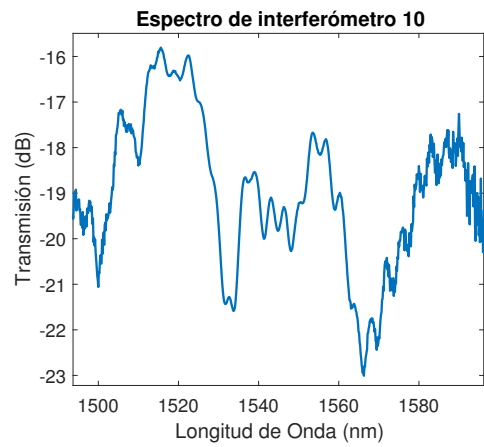


Figura 4.10: Espectro de Int. 10

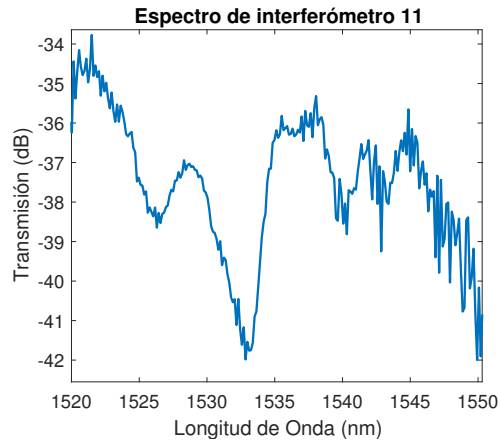


Figura 4.11: Espectro de Int. 11

En la tabla 4.2 se muestran los parámetros característicos de los interferómetros fabricados. En primer lugar se expone las pérdidas de inserción detectadas, capturadas por medio de la diferencia entre el pico máximo de la fuente de amplio espectro y el pico máximo del espectro obtenido.

Se lista también, la cantidad de lóbulos presentes en el patrón de interferencia. Esto es de gran importancia dependiendo de la aplicación, por ejemplo, patrones de interferencia con gran profundidad usualmente no cuentan con gran cantidad de lóbulos, esto es bueno en sensado pero en sintonización de láseres, mientras mayor el número de picos y valles, mayor la cantidad de longitudes de onda de emisión que se pueden obtener.

El contraste de franja se presenta también en 3 formas, mínimo máximo y promedio. Comparando estos tres valores y evaluando que tan separados están, se puede hacer una idea de la uniformidad del patrón de interferencia.

Tabla 4.2: *Atributos de Interferómetros sin Recubrimiento*

Interferómetros sin Recubrimiento					
Int. Nro.	PI (dB)	Lóbulos	Contraste de Franja (dB)		
			Mínimo	Máximo	Promedio
1	8.72	4	6	11	8.75
2	4.16	1	0.1	15.2	3.38
3	8.65	4	8	15	11.5
4	13.06	3	2	5	3.66
5	8.24	3	3	9	5.5
6	7.02	3	1.5	5	2.66
7	11.47	2	2.5	5	3.75
8	16.35	4	9	11	9.5
9	23	5	3	9	5.5
10	19.05	15	0.1	8	1.9
11	33.77	4	3	5	4

4.1.2. Interferómetros Recubiertos

El siguiente paso es caracterizar los dispositivos sin recubrir, los resultados de ese procedimiento se discutirán en la sección 4.3. Una vez caracterizados y recubiertos estos dispositivos, los patrones de interferencia obtenidos se muestran en figuras de la 4.12 a la 4.22.

Aquí a simple vista, es notorio que en algunos casos aparecen nuevos lóbulos en el patrón de interferencia, como se había comentado esto es deseable dependiendo

de la aplicación. Físicamente, esto quiere decir que de alguna manera nuevos modos están participando en el patrón de interferencia. En secciones posteriores se realizará un análisis considerando los cambios en las pérdidas de inserción, contraste de franja y tomando en cuenta las características de sensibilidad de los interferómetros antes y después del proceso de recubrimiento.

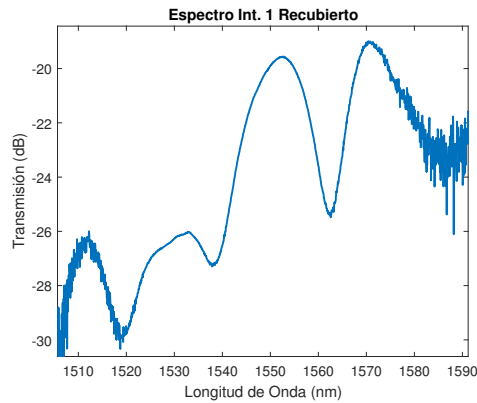


Figura 4.12: *Int. 1 Recubierto*

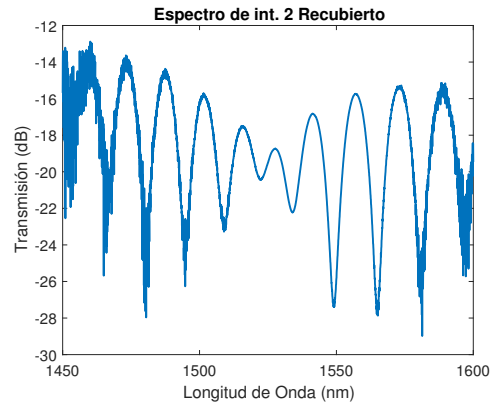


Figura 4.13: *Int. 2 Recubierto*

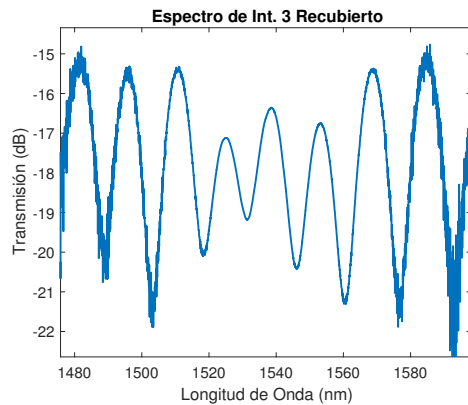


Figura 4.14: *Int. 3 Recubierto*

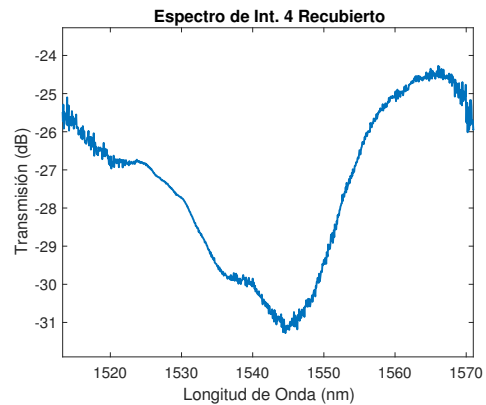


Figura 4.15: *Int. 4 Recubierto*

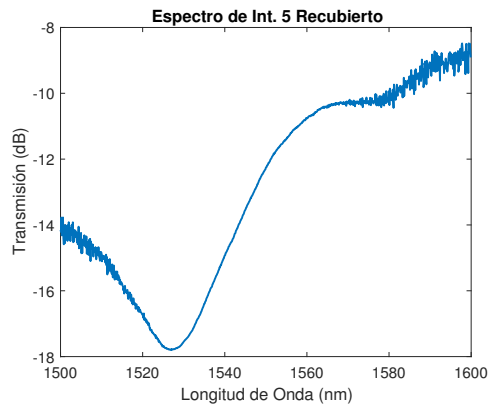


Figura 4.16: *Int. 5 Recubierto*

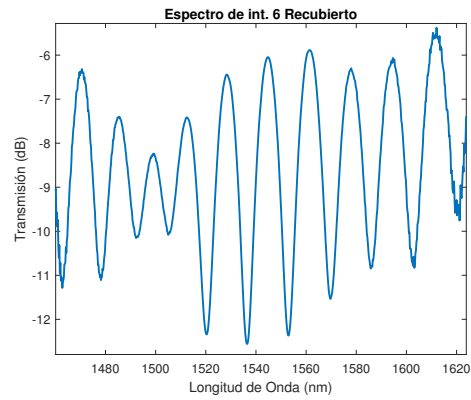


Figura 4.17: *Int. 6 Recubierto*

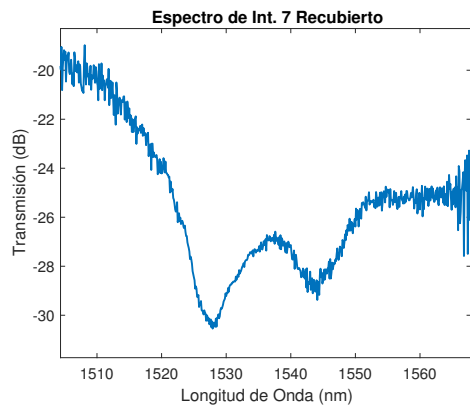


Figura 4.18: *Int. 7 Recubierto*

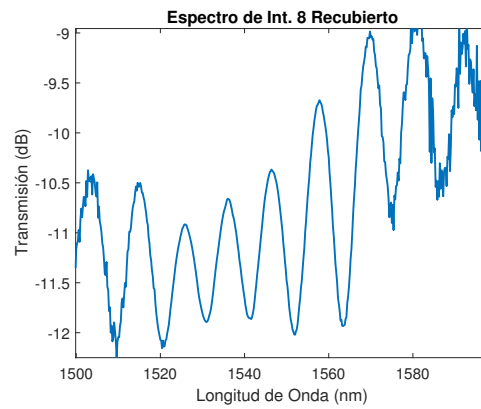


Figura 4.19: *Int. 8 Recubierto*

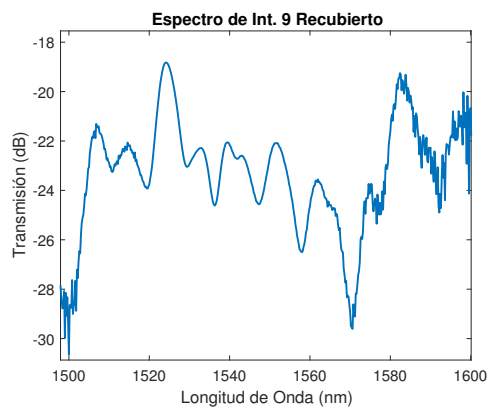


Figura 4.20: *Int. 9 Recubierto*

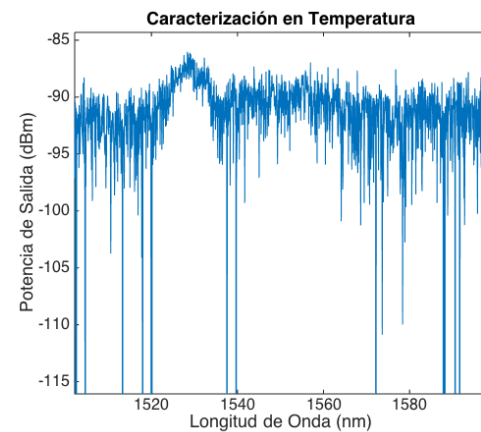


Figura 4.21: *Int. 10 Recubierto*

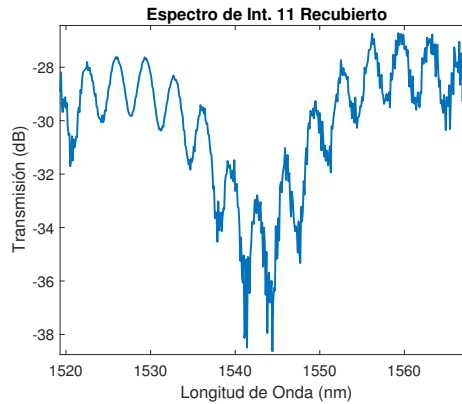


Figura 4.22: *Int. 11 Recubierto*

Igualmente en este caso se analizan estas gráficas con el fin de obtener los parámetros característicos mencionados de la tabla 4.2. Los resultados de dicho análisis se encuentra en la tabla 4.3

Tabla 4.3: *Atributos de Interferómetros Recubiertos*

Interferómetros Recubiertos					
Int. Nro.	PI (dB)	Lóbulos	Contraste de Franja (dB)		
			Mínimo	Máximo	Promedio
1	18.27	2	1	6	3.5
2	12.88	10	3	13	8.4
3	15.08	8	2	6	4.8
4	24.85	1	-	-	14
5	10.32	1	-	-	4
6	4.9	12	2	6	4.7
7	18.43	1	-	-	3
8	7.68	12	1	2	1.7
9	15.91	10	2	6	3.5
10	88	-	-	-	-
11	26	14	2.2	6	3

4.2. Caracterización de láser y fuente de amplio espectro

4.2.1. Láser de Bombeo

Para la visualización del espectro de la fuente de bombeo, se tomaron muestras del contenido espectral en un barrido del valor de la corriente de entrada, partiendo de 0 a 320 mA, en la figura 4.23 se puede observar el resultado de este procedimiento. Aquí es visible como a medida que aumenta la corriente el nivel de potencia cercano a la longitud de onda de emisión aumenta.

En la figura 4.24 se puede observar la potencia de salida detectada a 975.3 nm a distintos valores de la corriente de entrada. Existen 3 regiones claras en esta curva, en la primera, la potencia aumenta con una razón de cambio constante hasta alcanzar los -45 dB a 80 mA. Entre 80 y 90 mA aparece el pico de emisión láser, y la potencia de salida crece abruptamente.

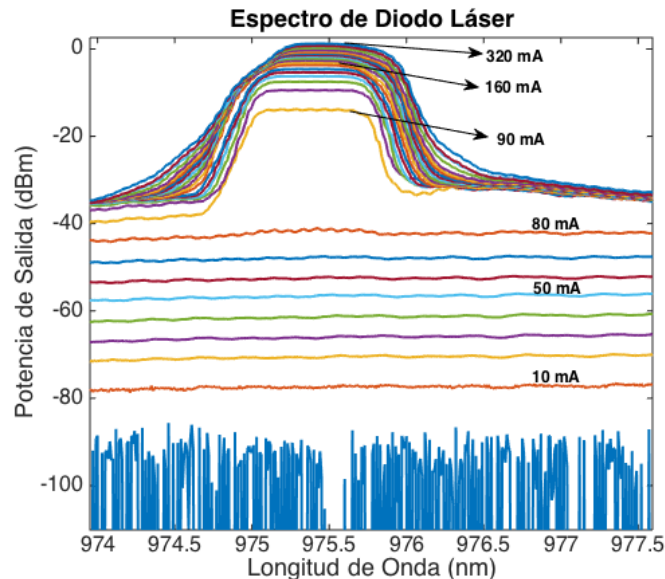


Figura 4.23: Espectro de emisión láser

Posteriormente, se vuelve a tener un crecimiento continuo constante hasta el punto máximo de corriente probado que fue al rededor de 350 mA, se hizo así ya que el dispositivo tiene como potencia máxima 720 mA por lo que trabajo hasta una zona operativa que no fuera a afectar al láser [51].

La fuente de amplio espectro, como se mencionó en la sección 3.1.1 se logra

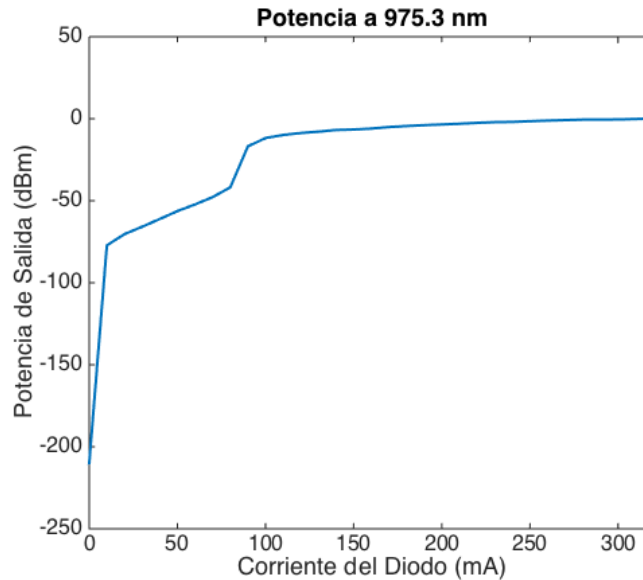


Figura 4.24: *Potencia de salida Vs. Corriente de entrada*

utilizando una sección de fibra dopada con Erblio, alimentada por el láser anteriormente descrito. El modelo de la fibra dopada con erblio, concuerda con la teoría mencionada en la sección 2.4.1, ya que a pesar de que tiene un pico de absorción centrado en 980 nm, éste presenta cierto nivel de ensanchamiento, que permite utilizar el bombeo de 975 nm [52].

En la figura 4.25 se puede observar el aumento de la potencia del espectro de emisión a medida que aumenta la corriente de entrada del diodo. El objetivo de este experimento es determinar la potencia máxima que puede entregar la sección de fibra dopada con Erblio, luego de la cual se satura. Esto con el fin de operar el diodo en una región estable que evite posibles sobrecalentamientos, y asegurar el máximo aprovechamiento de la fibra dopada con Erblio.

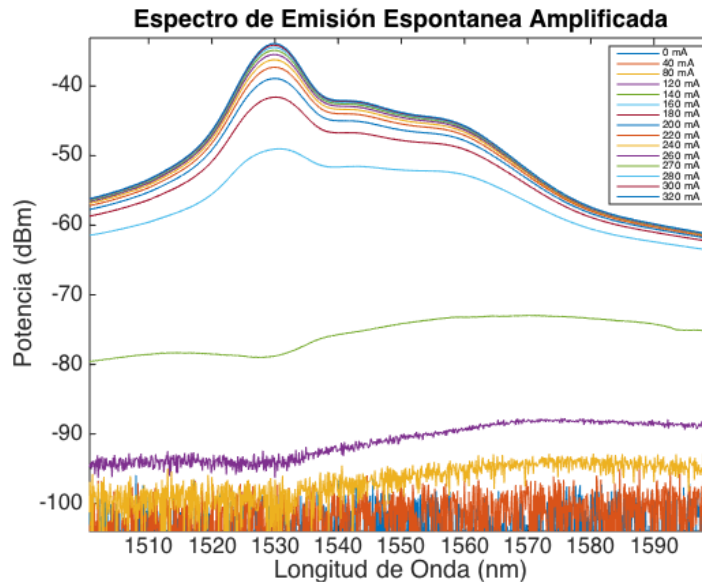


Figura 4.25: *Espectro de EDFA*

se puede observar también, que antes de 120 mA no existe ningún tipo de emisión, y a partir de 140 mA comienza a aparecer el espectro de emisión espontánea. A partir de 160 mA el espectro entre 1500 y 1600 nm se dispara y se puede decir que esta es aproximadamente la corriente umbral. Es en ese punto donde se alcanza la inversión de población entre los niveles de energía y comienza a darse el proceso de decaimiento rápido en los electrones, lo que ocasiona emisión de fotones.

A partir de 270 mA el cambio en este espectro se hace mínimo con lo que se puede decir que la fibra dopada ha entrado en su región de saturación, lo que se comprueba en la curva 4.26 que presenta la potencia pico en 1529 nm en función de la corriente de entrada. Aquí se observa que a partir de 250 mA en adelante se mantiene más o menos la misma potencia pico y se puede asumir que el espectro no aumentará mucho más.

En función de este estudio se escoge trabajar con una corriente de entrada de 300 mA para asegurar que se aprovechan al máximo la potencia de emisión de la fuente de amplio espectro y además se garantiza que el diodo opere en su región estable que está situada entre 0 y 400 mA.

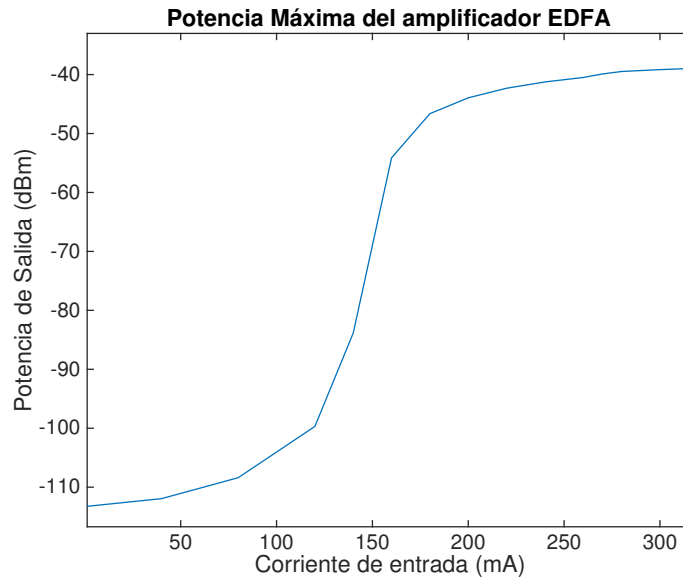


Figura 4.26: *Potencia pico de Espectro EDFA Vs Corriente de Entrada*

4.3. Caracterización en Temperatura

En la sección 3.1.2 se describe el procedimiento para realizar la caracterización de estos interferómetros ante cambios de temperatura, y aquí se muestra el resultado de este procedimiento.

Antes de ser recubiertos, cada interferómetro fue caracterizado en temperatura; aquí se muestran los resultados de esta caracterización. De acuerdo a lo mencionado en la sección 3.3.3, los parámetros de estudio de los interferómetros serán la sensibilidad en longitud de onda, en potencia y el error de no-linealidad de las curvas de caracterización. A continuación se presentará esta información por cada uno de los dispositivos trabajados.

Interferómetro 1

Dispositivo Sin Recubrimiento

En la figura 4.27, se puede observar el espectro óptico del interferómetro 1, específicamente la región entre 1510 y 1585 nm, ya que es en este punto donde se aprecia más claramente el patrón de interferencia y se tiene menos ruido. Con estos datos se capturaron las curvas 4.28 y 4.29. Para el desplazamiento en potencia se hizo un estudio de los cambios de nivel de la señal de salida a 1523, 1527 y 1530 nm. Se puede observar que el dispositivo tiene una sensibilidad máxima en potencia de 0.16

dB/°C, que se presenta a 1530 nm exactamente, con un ENL de 8.9% . En longitud de onda, se estudió el desplazamiento de los valles A y B, en este caso, la sensibilidad máxima obtenida es de 46 pm/°C y es tomada del pico B, esta curva, a su vez, presenta un ENL de 6.7%.

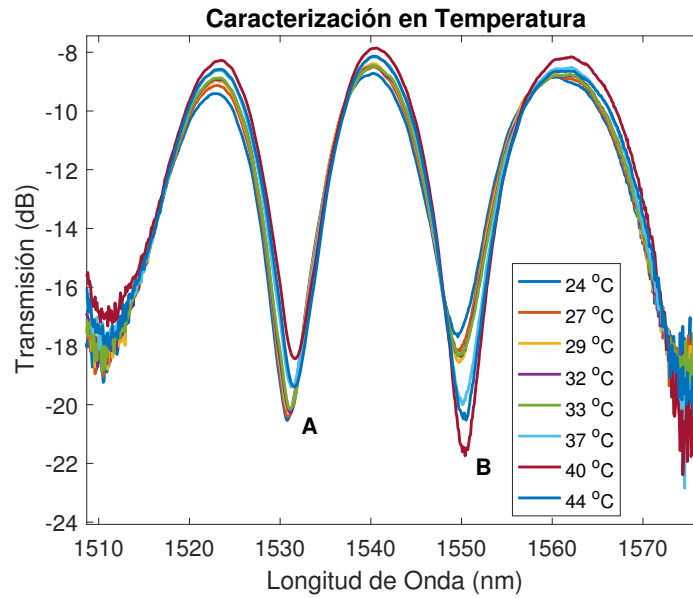


Figura 4.27: Espectro Óptico de Interferómetro 1

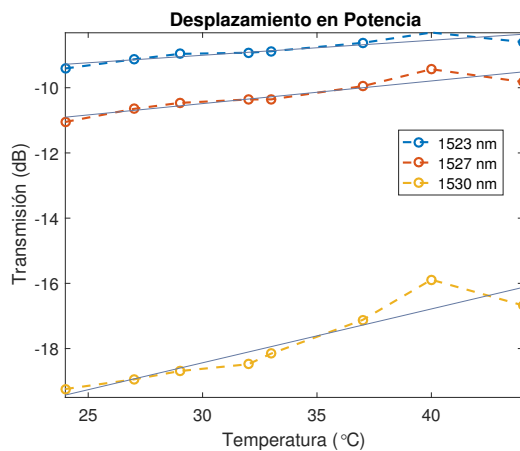


Figura 4.28: Curva ΔP Int. 1

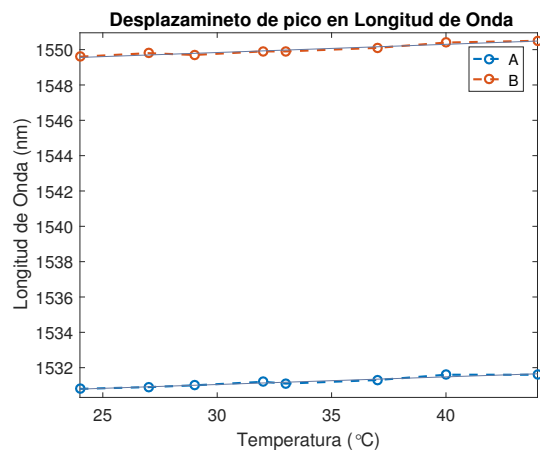


Figura 4.29: Curva $\Delta \lambda$ Int. 1

Dispositivo Recubierto

Luego de ser recubierto con una capa delgada de aluminio, el dispositivo presenta un incremento en las pérdidas de inserción de alrededor de 10 dB. Se observa

también que desaparecen algunos de los lóbulos y disminuye el contraste de franja. Los espectros capturados a distintos valores de temperatura se presentan en la figura 4.30.

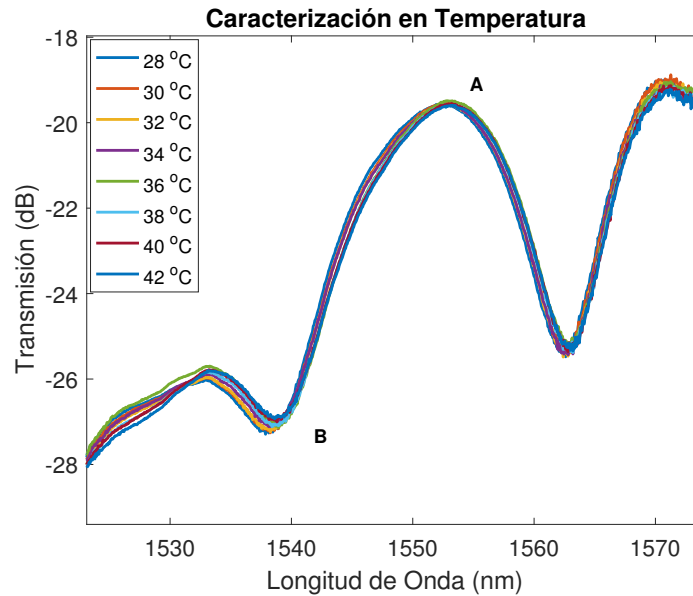


Figura 4.30: Espectro Óptico de Interferómetro 1 Recubierto

El desplazamiento en longitud de onda se estudió en el pico A y valle B, obteniéndose una sensibilidad máxima de 68.7 pm/°C, con un ENL de 8.84%, en el valle B. Los cambios en potencia con respecto a la temperatura fueron observados a 1530, 1557 y 1542 nm. De estos estudios, se obtuvo una sensibilidad máxima de 0.050 dB/°C con un ENL de 11.80% en 1557 nm.

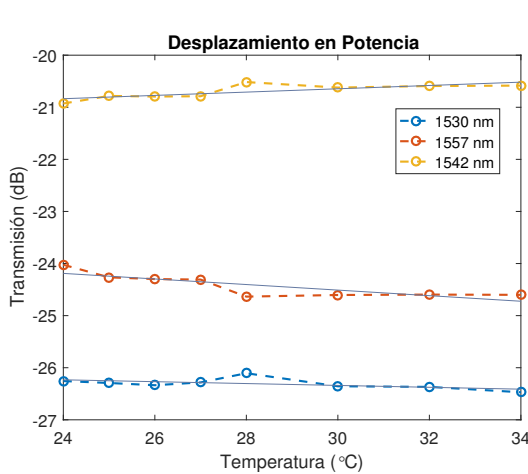


Figura 4.31: Curva ΔP Int. 1

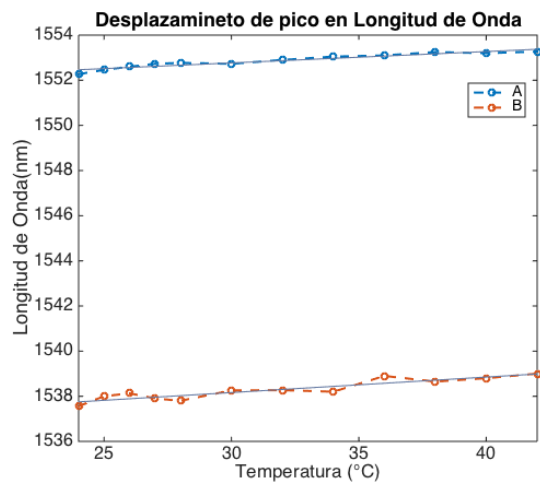


Figura 4.32: Curva $\Delta \lambda$ Int. 1

Interferómetro 2

Dispositivo Sin Recubrimiento

La figura 4.33 muestra el espectro óptico obtenido del interferómetro 2. Aquí se puede observar que el dispositivo no tiene un patrón de interferencia muy definido, aunque si cuenta con un valle de alrededor de 15 dB cerca de 1520 nm, y leves oscilaciones en la región ubicada entre 1530 y 1580 nm.

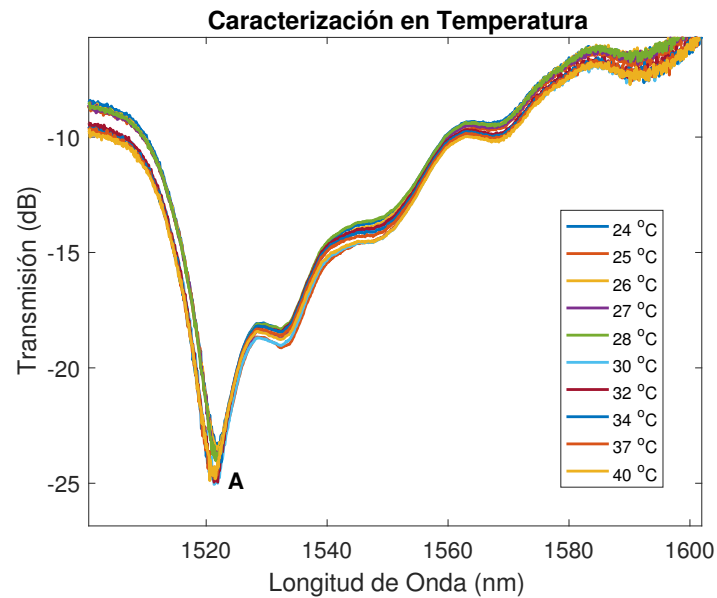


Figura 4.33: *Espectro Óptico de Interferómetro 2*

En el valle A se hizo un estudio del desplazamiento en longitud de onda, dando como resultado una sensibilidad de $42.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, y un ENL de 19.73% . Esta curva de caracterización se puede observar en la figura 4.35. El desplazamiento en potencia se estudió en 3 puntos: a 1526, 1534 y 1547 nm, tal y como se muestra en la figura 4.34. La sensibilidad máxima obtenida fue de $0.027 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ hacia los 1547 nm. En este caso, el error de no linealidad corresponde al 26.64% .

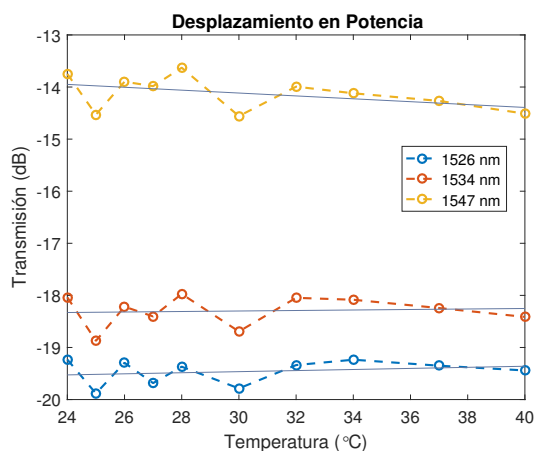


Figura 4.34: Curva ΔP Int. 2

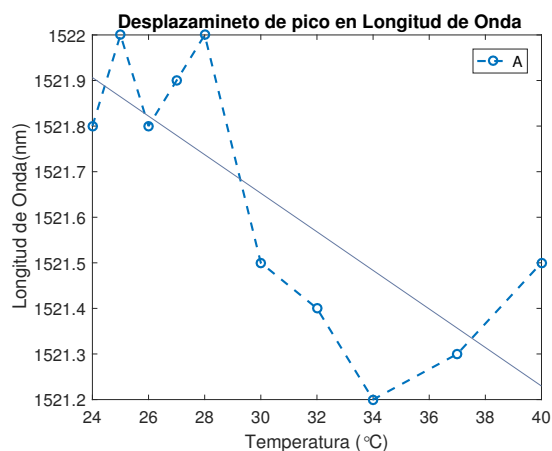


Figura 4.35: Curva $\Delta \lambda$ Int. 2

Dispositivo Recubierto

Al aplicar el recubrimiento metálico al interferómetro 2, se puede observar en la figura 4.36, la aparición de nuevos lóbulos en el patrón de interferencia. Nuevamente se tiene un aumento en las pérdidas de inserción, sin embargo existe un aumento en el contraste de franja promedio de alrededor de 5 dB.

Gracias a la uniformidad del patrón de interferencia se pudo estudiar el desplazamiento en longitud de onda en 5 puntos, corresponden a los picos A, B, D, E y valle C de la figura 4.36. Para los cambios de potencia se consideraron las longitudes de onda 1513, 1525, 1538.5 y 1551.5.

Las curvas de caracterización para este dispositivo se pueden observar en la figura 4.38 y 4.37. Para el desplazamiento en potencia se obtuvo una sensibilidad máxima de 0.32 dB/°C con un ENL de 8.94% en 1551.5 nm. Mientras que para el cambio de fase, se obtuvo una sensibilidad de 143.8 pm/°C, con un ENL de 7.12% en el pico D.

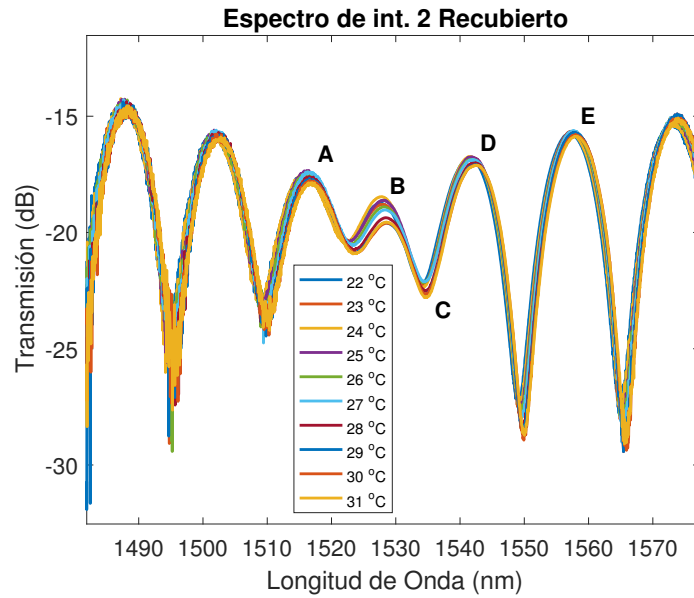


Figura 4.36: Espectro Óptico de Interferómetro 2 Recubierto

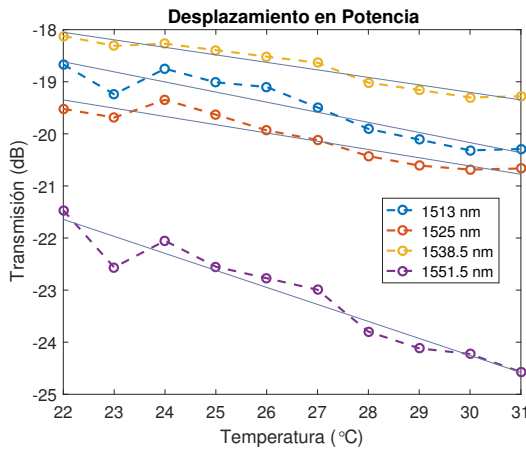


Figura 4.37: Curva ΔP Int. 2

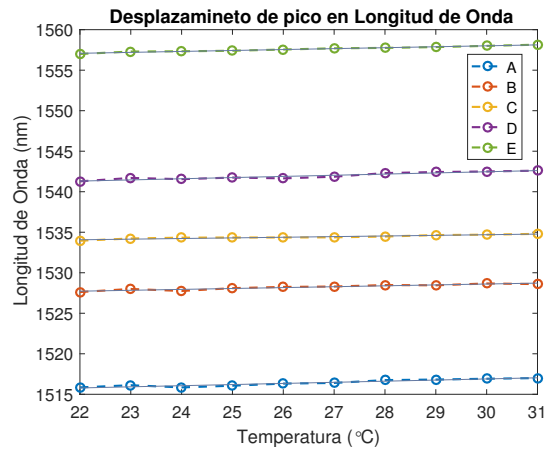


Figura 4.38: Curva $\Delta \lambda$ Int. 2

Interferómetro 3

Dispositivo Sin Recubrimiento

El espectro óptico del interferómetro 3, obtenido a distintos valores de temperatura se muestra en la figura 4.39. Este dispositivo presenta picos profundos pero el patrón de interferencia no es uniforme y, a pesar de que tiene grandes desplazamientos ante cambios de temperatura, la linealidad es mejorable.

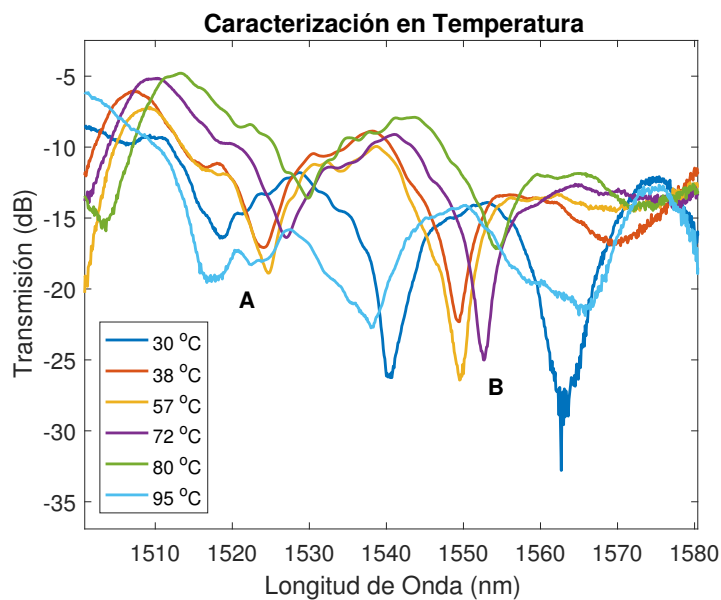


Figura 4.39: Espectro Óptico de Interferómetro 3

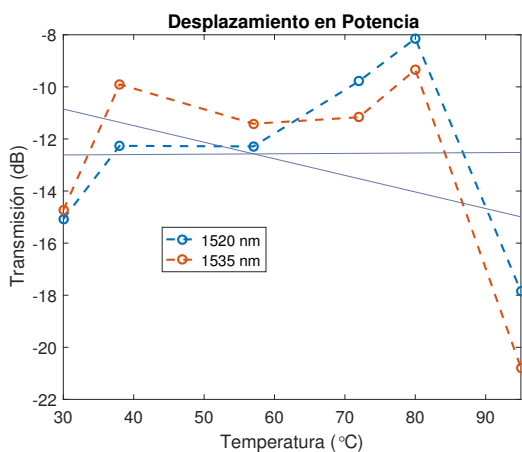


Figura 4.40: Curva ΔP Int. 3

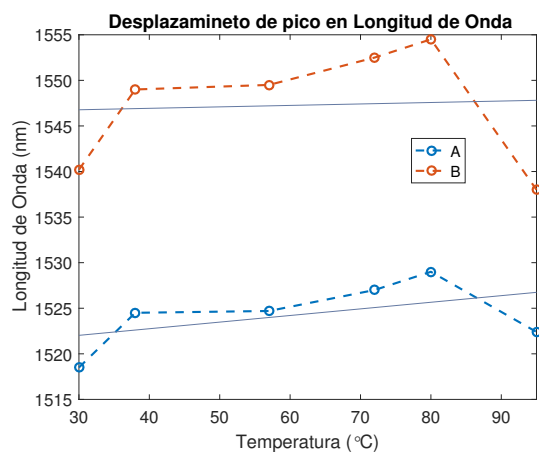


Figura 4.41: Curva $\Delta \lambda$ Int. 3

Esto se puede apreciar claramente en las figuras 4.40 y 4.41. Las sensibilidades detectadas fueron $0.063 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ en potencia y $72 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ en longitud de onda, con ENLs de 27.46 % y 29.04 % respectivamente. El desplazamiento en potencia se máximo capturado se obtuvo a 1535 nm, y la variación máxima en longitud de onda corresponde al pico A.

Dispositivo Recubierto

En la figura 4.42, se puede observar el espectro óptico del interferómetro 3

recubierto, obtenido a distintos valores de temperatura. Aquí es apreciable una mejora importante en la uniformidad del patrón de interferencia, con respecto a la figura 4.39. El corrimiento en longitud de onda se estudió en el valle A, y los picos B y C.

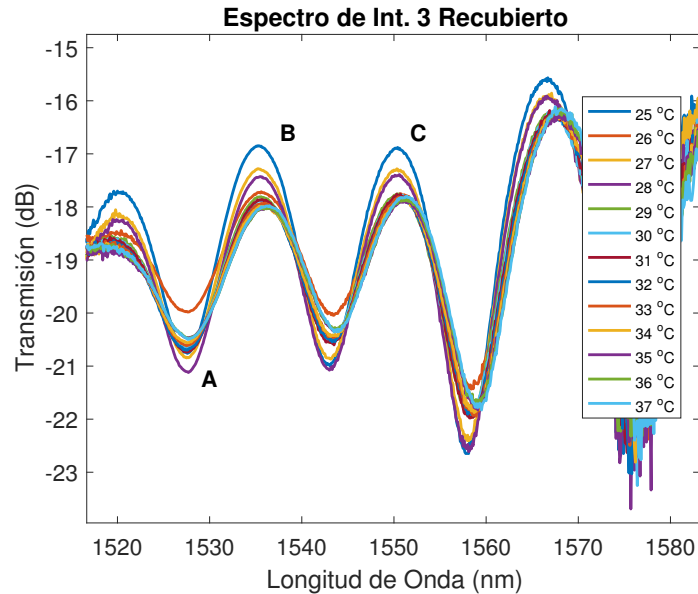


Figura 4.42: Espectro Óptico de Interferómetro 3 Recubierto

De aquí se obtuvo una sensibilidad máxima de $96.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, con un ENL de 12.20% . Esto representa una mejora tanto en sensibilidad, como en linealidad, con respecto al dispositivo sin recubrir. Las curvas de caracterización de los cambios en potencia se pueden apreciar en la figura 4.43. Se hizo estudio de potencia en 1533 , 1547 y 1562 nm respectivamente.

La mayor sensibilidad obtenida fue de $0.115 \text{ dB}/^\circ\text{C}$, con un ENL de 9.2% en 1562 nm . Igual que para el parámetro de longitud de onda esto representa una mejora en la linealidad y sensibilidad. Con respecto a las pérdidas de inserción, en este caso también se tiene un aumento de alrededor de 10 dB , con respecto al espectro del dispositivo sin recubrir.

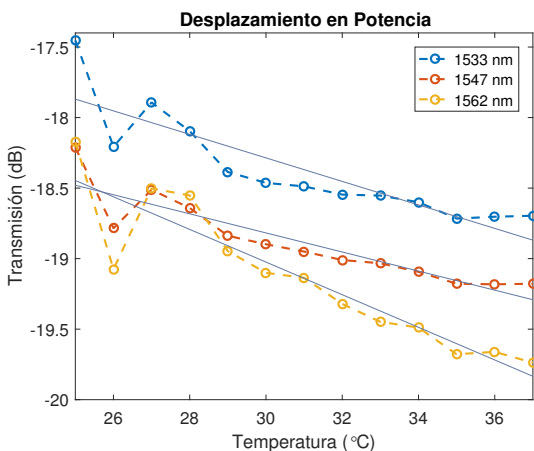


Figura 4.43: Curva ΔP Int. 3

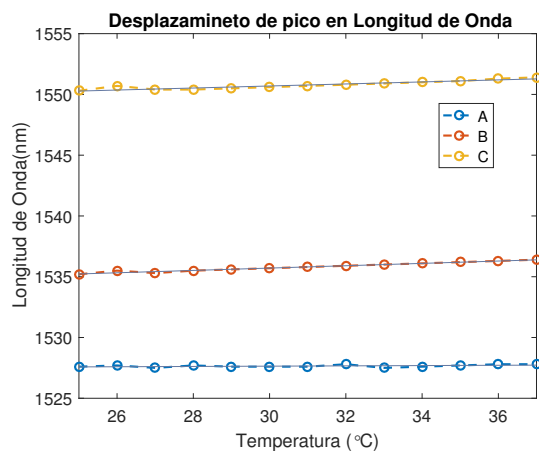


Figura 4.44: Curva $\Delta \lambda$ Int. 3

Interferómetro 4

Dispositivo Sin Recubrimiento

Se puede observar en la figura 4.45, que este interferómetro tiene un incipiente patrón de interferencia, con grandes pérdidas de inserción (al rededor de 14 dB), donde se presenta sólo un lóbulo y un valle. Con el cambio de temperatura, el espectro cambia muy poco y no es apreciable un desplazamiento de longitud de onda significativo en ningún punto del espectro.

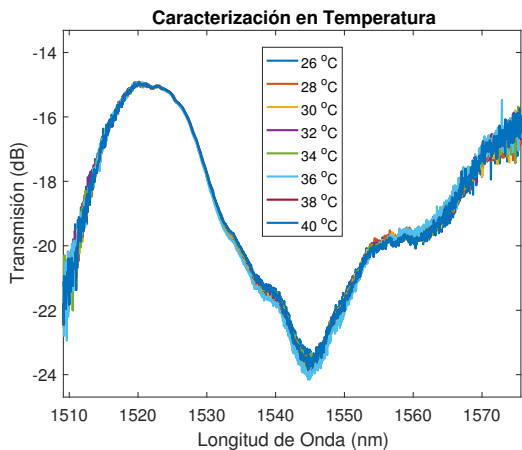


Figura 4.45: Espectro Óptico de Interferómetro 4

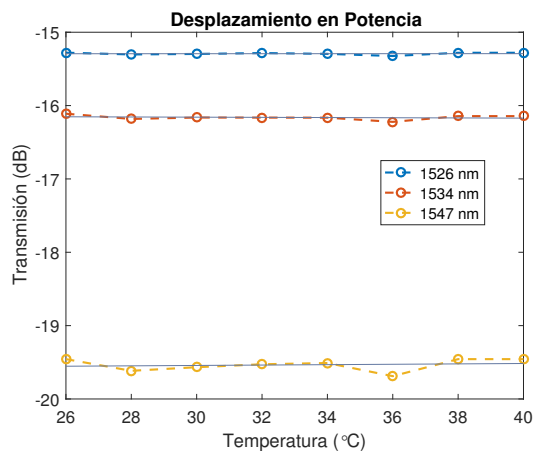


Figura 4.46: Curva ΔP Int. 4

Sin embargo, se hace un estudio del desplazamiento en potencia en 1525, 1527 y 1533 nm, y el resultado se muestra en la figura 4.46. La sensibilidad máxima obtenida

fue de $0.0027 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ correspondiente a los valores medidos en 1533 nm y el error de no linealidad en este caso es de 24.85% .

Dispositivo Recubierto

El espectro óptico de este interferómetro luego del proceso de recubrimiento asemeja en gran medida al del interferómetro sin recubrir, teniendo como única característica un valle pronunciado. Luego del proceso de recubrimiento, las pérdidas de inserción aumentan al rededor de 10 dB .

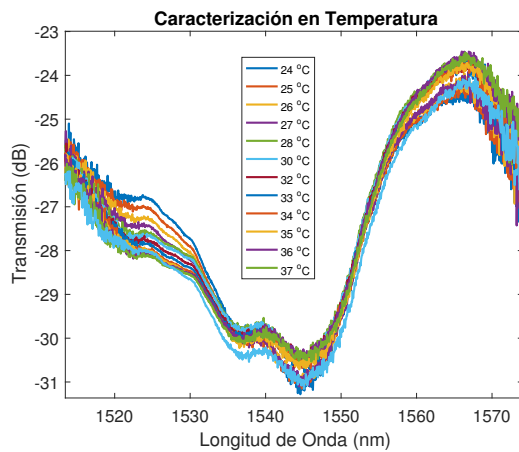


Figura 4.47: Espectro Óptico de Interferómetro 4 Recubierto

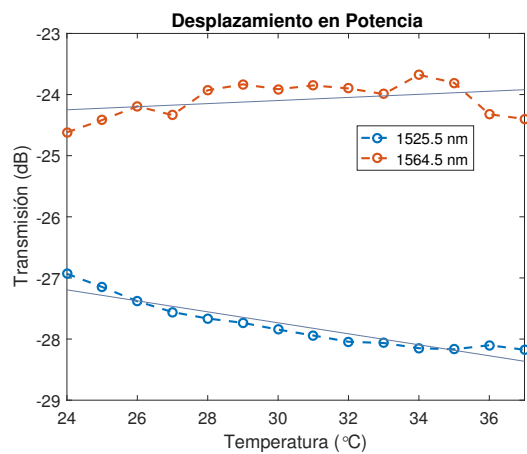


Figura 4.48: Curva ΔP Int. 4

Igual que en el caso sin recubrir, no se puede observar un desplazamiento claro en longitud de onda, y solo se evalúan cambios de potencia. Las longitudes de onda escogidas para este estudio fueron 1525.5 nm y 1564.5 nm , y las curvas de caracterización se pueden observar en la figura 4.48. De aquí se obtuvo una sensibilidad máxima de $0.089 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ con un ENL de 16.45% .

Interferómetro 5

Dispositivo Sin Recubrimiento

El patrón de interferencia del interferómetro 5 cuenta con 3 lóbulos claramente definidos tal y como se muestra en la figura 4.49. Sin embargo, gracias al ruido, solo se pueden estudiar los cambios en la longitud de onda de un solo lóbulo, denotado con la letra A. Con respecto a los cambios en la potencia si se estudiaron diversos puntos; específicamente a $1525, 1529$ y 1531 nm .

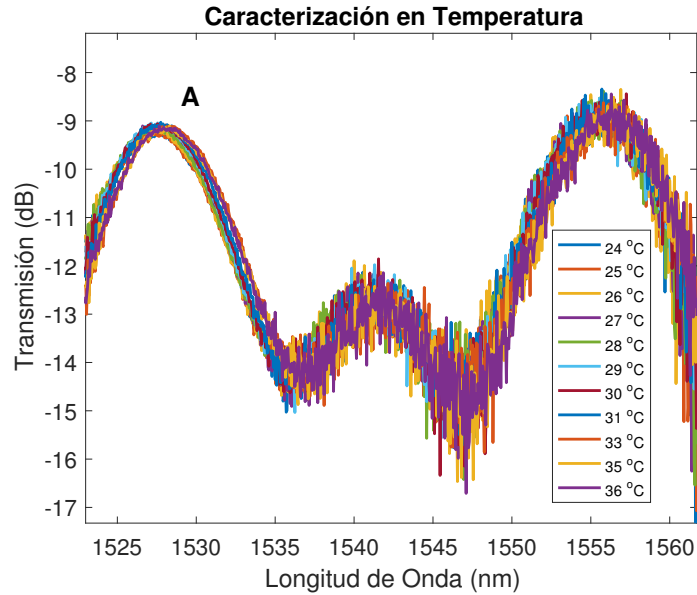


Figura 4.49: Espectro Óptico de Interferómetro 5

Las curvas representativas se muestran en las figuras 4.50 y 4.51. La sensibilidad en potencia máxima obtenida es de 0.0621 dB /°C, con un ENL de 13.57 %, y la sensibilidad en longitud de onda en el punto A fue de 47.6 pm/°C y ENL de 12.79 %. Igualmente que en el dispositivo anterior, la linealidad en ambos casos es mejorable.

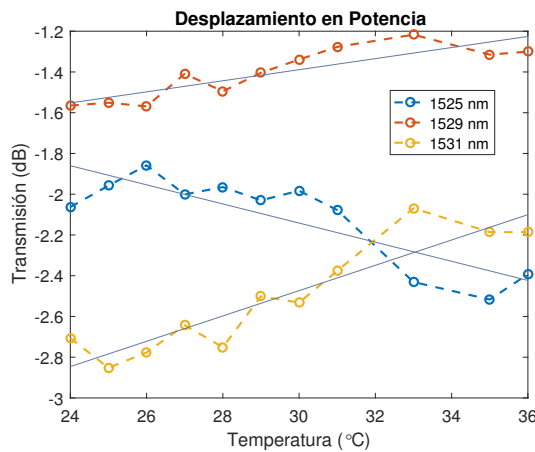


Figura 4.50: Curva ΔP Int. 5

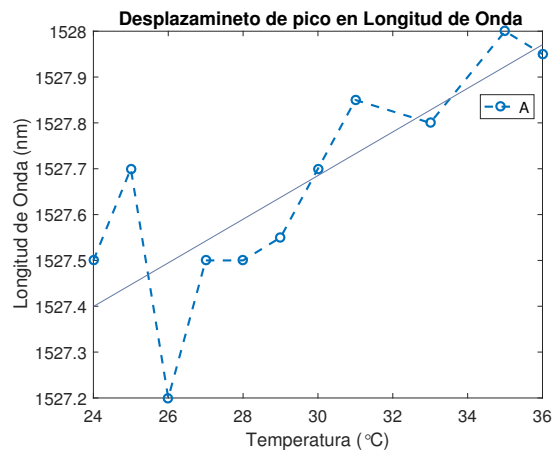


Figura 4.51: Curva $\Delta \lambda$ Int. 5

Dispositivo Recubierto

En este caso el proceso de recubrimiento no introduce grandes pérdidas de inserción, sino que se mantiene una diferencia constante de alrededor de 10 dB con

respecto a la fuente de entrada. El espectro a distintas temperaturas del interferómetro 5 recubierto se puede apreciar en la figura 4.52.

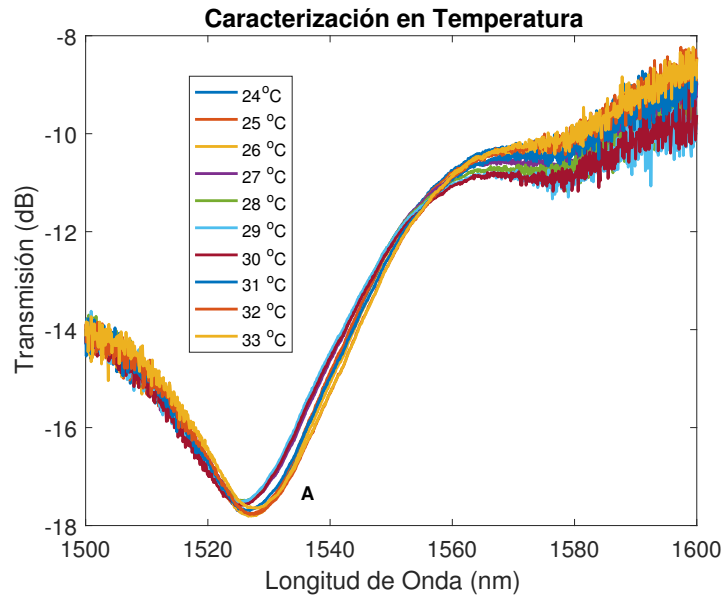


Figura 4.52: Espectro Óptico de Interferómetro 5 Recubierto

Aquí se puede observar que existe un solo valle pronunciado en cuyo extremo inferior se estudiaron los cambios en longitud de onda. Esto dio como resultado una sensibilidad de 47.6 pm/°C con un ENL de 12.79%. Los desplazamientos en potencia fueron estudiados en las longitudes de onda 1547 y 1564 nm, en este caso se tuvo una sensibilidad de 0.0341 dB /°C, con un ENL de 13.57% a 1547 nm.

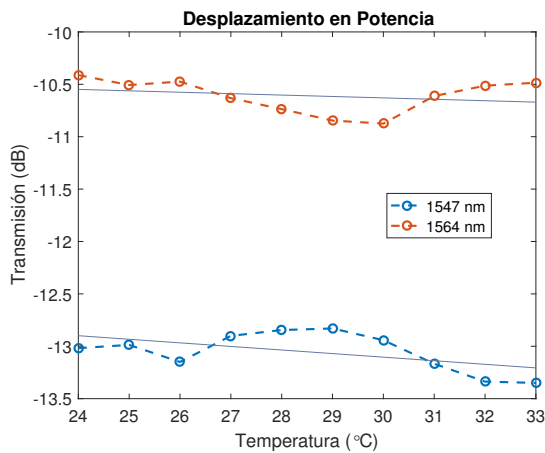


Figura 4.53: Curva ΔP Int. 5

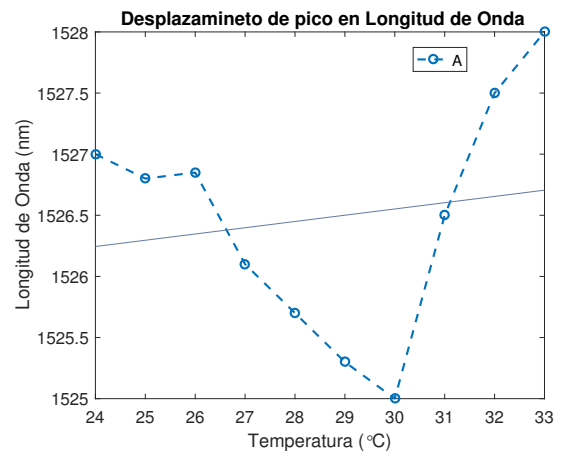


Figura 4.54: Curva $\Delta \lambda$ Int. 5

Interferómetro 6

Dispositivo Sin Recubrimiento

La figura 4.55 muestra el espectro óptico, a distintos valores de temperatura, del interferómetro 6. Para este dispositivo, el corrimiento de fase estudió en el valle A y en el lóbulo B; dando como resultado una sensibilidad máxima de 62.4 pm/°C, en B. Con respecto a la linealidad, esta curva presenta un ENL de 14.84 %.

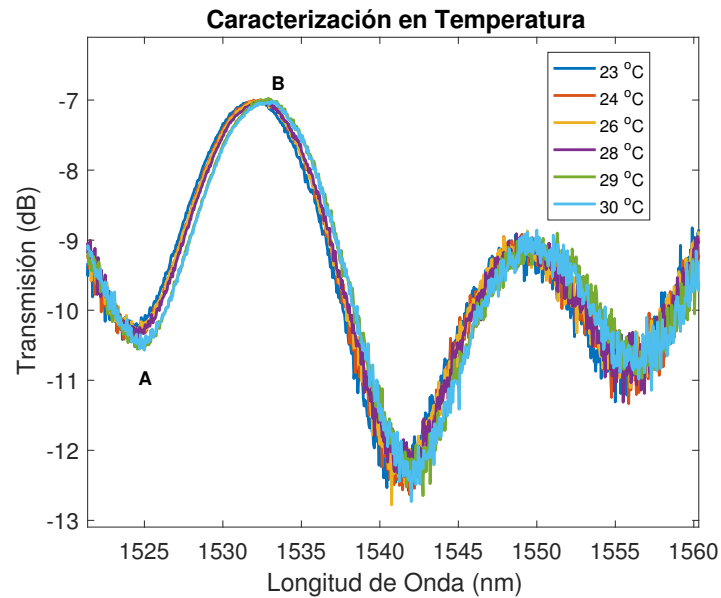


Figura 4.55: Espectro Óptico de Interferómetro 6

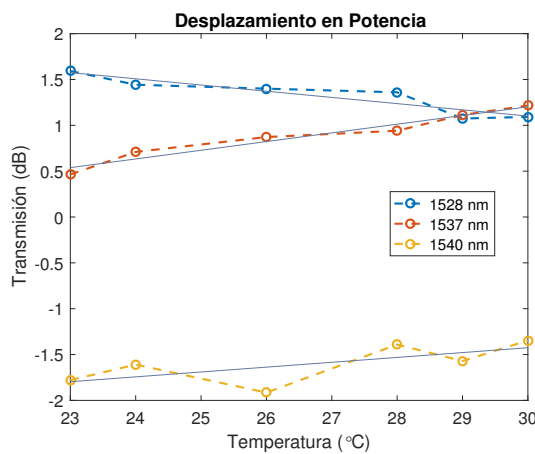


Figura 4.56: Curva ΔP Int. 6

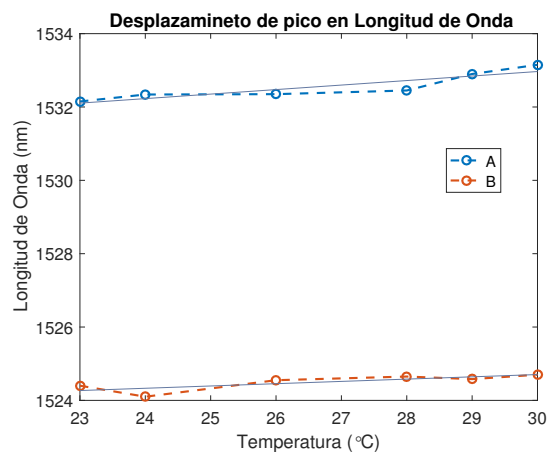


Figura 4.57: Curva $\Delta \lambda$ Int. 6

El desplazamiento en potencia se estudió en 1528,1537 y 1540 nm. Aquí, se obtuvo una curva con una sensibilidad de 0.094 dB/°C y ENL de 13.81 %. Estos datos fueron extraídos en 1537 nm. Se puede observar que, a pesar de que el espectro también presenta bastante ruido, la linealidad de las curvas de caracterización es relativamente buena.

Dispositivo Recubierto

El espectro capturado a distintas temperaturas del interferómetro 6 recubierto se puede observar en la figura 4.58. Aquí se puede ver, cómo de un patrón de interferencia inicial, en el que se tienen dos lóbulos claros, aparecen al menos 10.

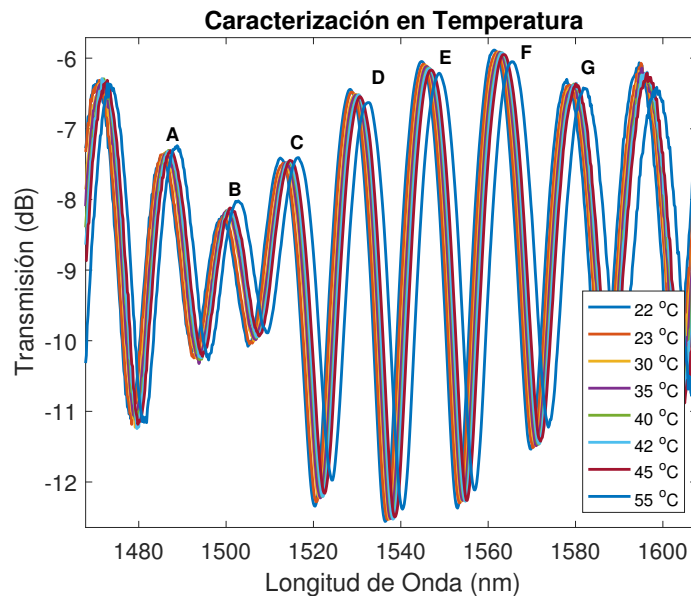


Figura 4.58: Espectro Óptico de Interferómetro 6 Recubierto

Para este dispositivo en específico disminuyen las pérdidas de inserción y el contraste de franja promedio aumenta en 2 dB con respecto al dispositivo sin recubrir. Gracias a la uniformidad del patrón de interferencia, fue posible estudiar el desplazamiento de longitud de onda en distintos puntos, denotados por las letras de la A a la G en la figura 4.58.

En la figura 4.59, se hace acercamiento al pico D. Aquí se puede observar que el desplazamiento es constante y hacia la derecha. Gracias al amplio desplazamiento y a la uniformidad del patrón de interferencia, fue posible, con los recursos disponibles, llevar el interferómetro al límite de solapamiento tal y como se muestra en la figura 4.60.

Aquí se puede observar, que a partir de los 166 °C, cada lóbulo del espectro

se solapa completamente con el siguiente, haciendo muy difícil diferenciarlos entre sí. Por lo que se puede decir que límite de detección para este interferómetro es de 144 °C, que proviene de la resta del rango de solapamiento observado (166 - 22 °C).

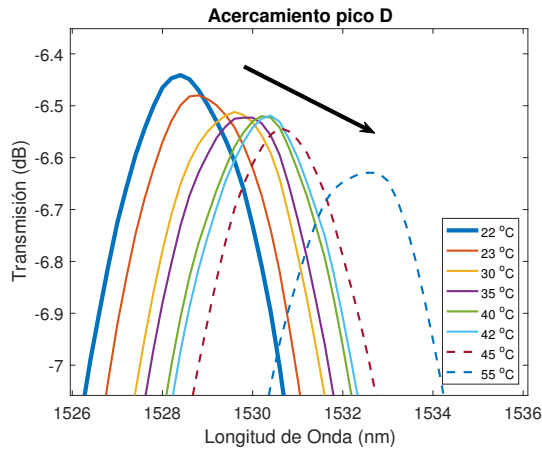


Figura 4.59: Acercamiento de Espectro Óptico de Int. 6 Recubierto al pico D

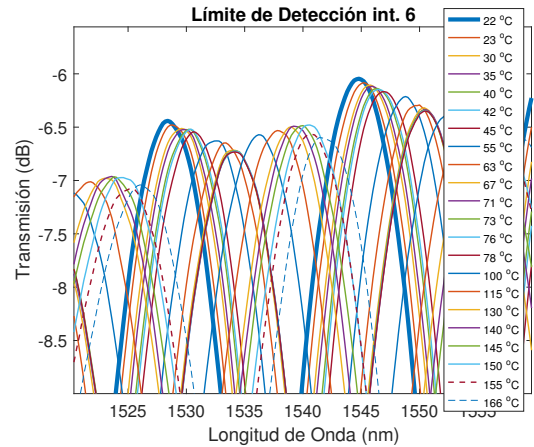


Figura 4.60: Límite de Detección Int. 6

Las curvas de caracterización de dichos puntos se observan en la figura 4.62. Aquí se obtuvo una sensibilidad máxima de 118 nm/°C, con un ENL de 4.14 %, en el pico B. En cuanto al desplazamiento en potencia, las curvas de caracterización se pueden observar en la figura 4.61. La mayor sensibilidad registrada para este parámetro fue de 0.092 dB/°C, con un ENL de 9.5 %.

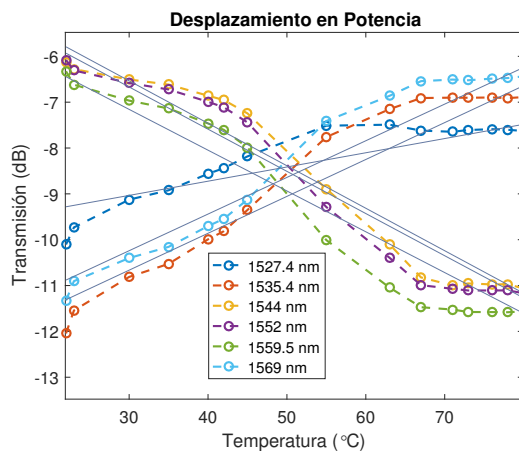


Figura 4.61: Curva ΔP Int. 6

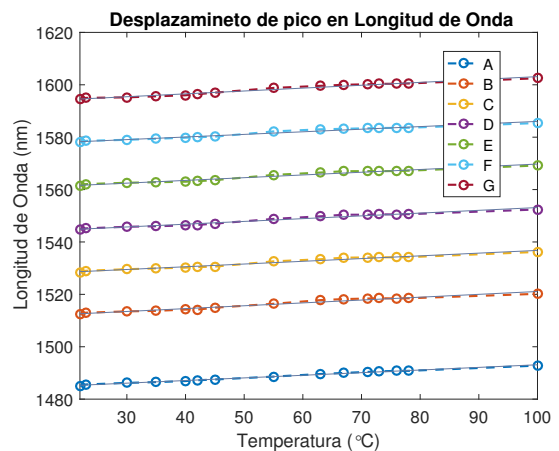


Figura 4.62: Curva $\Delta \lambda$ Int. 6

Interferómetro 7

Dispositivo Sin Recubrimiento

Este interferómetro presenta mucho ruido en el espectro, como se puede ver en la figura 4.63. A pesar de que se observan 3 lóbulos claros, el corrimiento de fase solo se puede estudiar en el valle A, dando como resultado una sensibilidad de 60.9 pm/°C, con un ENL de 17.24%, la curva de caracterización de este parámetro, se puede observar en la figura 4.65.

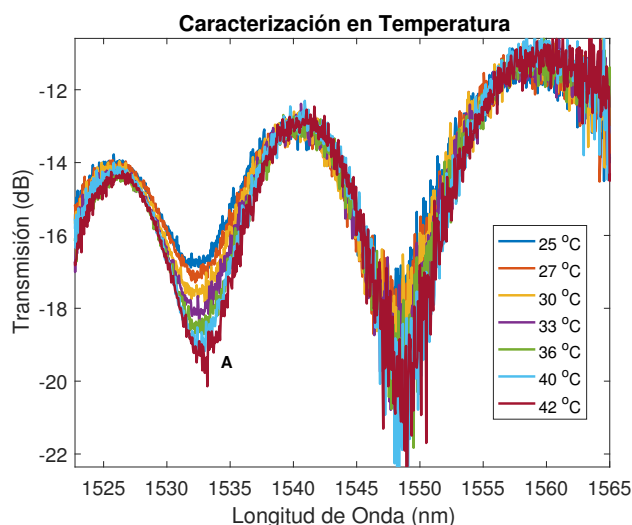


Figura 4.63: Espectro Óptico de Interferómetro 7

Los cambios en potencia se estudiaron en 3 puntos; exactamente, a 1523, 1529 y 1533 nm. Curvas que se muestran en la figura 4.64. La sensibilidad máxima obtenida para este parámetro fue de 0.16 dB/°C, en 1533 nm con ENL de 10.86 %.

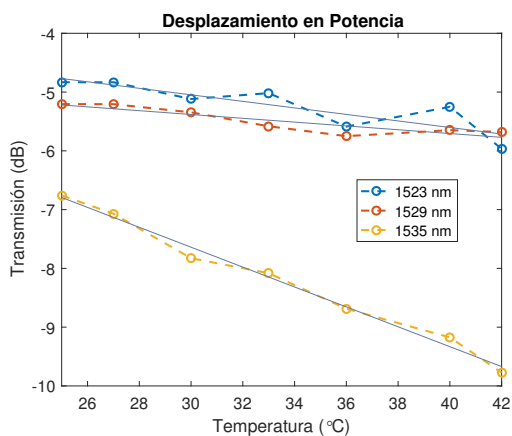


Figura 4.64: Curva ΔP Int. 7

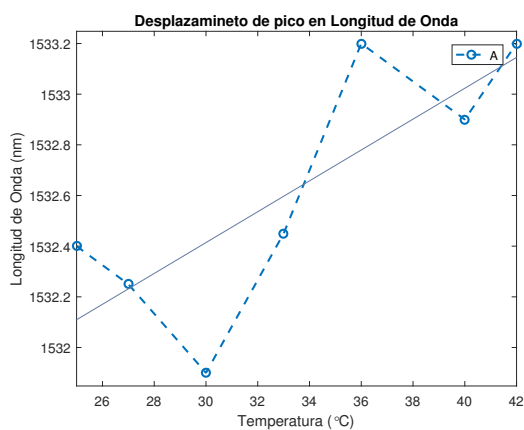


Figura 4.65: Curva $\Delta \lambda$ Int. 7

Dispositivo Recubierto

los espectros ópticos capturados a distintas temperaturas del interferómetro 7 recubierto se muestran en la figura 4.66. El ruido presente en el patrón de interferencia del dispositivo sin recubrir sigue presentándose, y aquí, en lugar de tener los 3 lóbulos claramente definidos que se observaban en la figura anterior, se tiene solo 1.

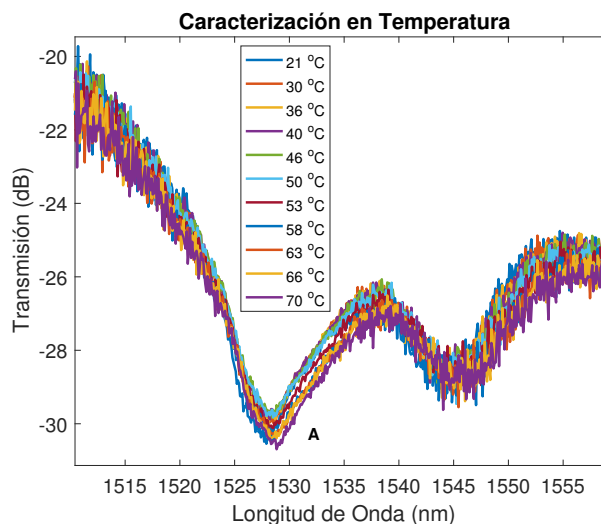


Figura 4.66: Espectro Óptico de Interferómetro 7 Recubierto

El desplazamiento en longitud de onda se estudió en el valle A; donde se obtuvo una sensibilidad de 13.4 pm/°C, con un ENL de 14.5 %, esta curva se puede ver en la figura 4.68. Los cambios de potencia se estudiaron a 1532 nm, y dieron como resultado una sensibilidad de 0.021 dB/°C, con ENL de 16.08 %, que se muestran en la figura 4.67.

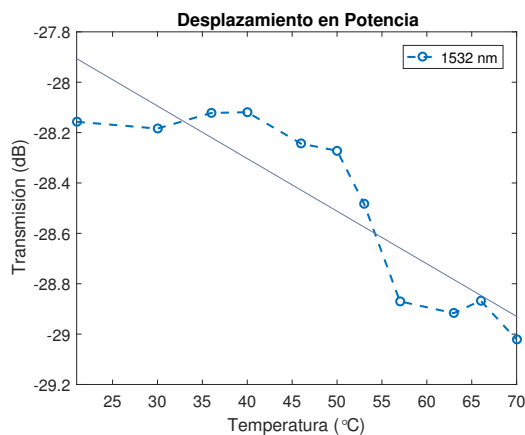


Figura 4.67: Curva ΔP Int. 7

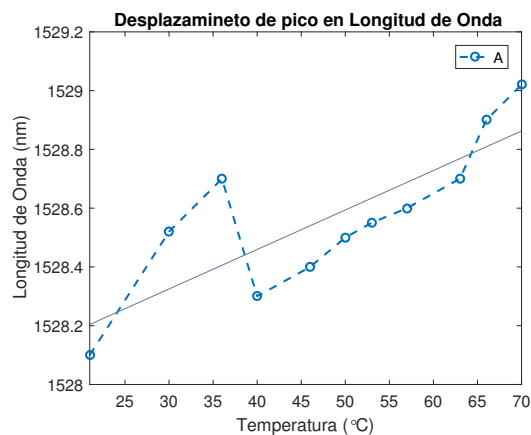


Figura 4.68: Curva $\Delta \lambda$ Int. 7

Interferómetro 8

Dispositivo Sin Recubrimiento

A pesar de las altas pérdidas de inserción observadas el espectro del interferómetro 8 en la figura 4.69, se puede observar un patrón de interferencia, bien definido, de 3 lóbulos y dos valles entre 1520 y 1560 nm. En este espacio se hace el estudio de corrimiento de fase en los valles A, B y en el pico C. Este dispositivo presenta un corrimiento uniforme, lo que indica que existe un modo predominante en revestimiento, participando en el patrón de interferencia.

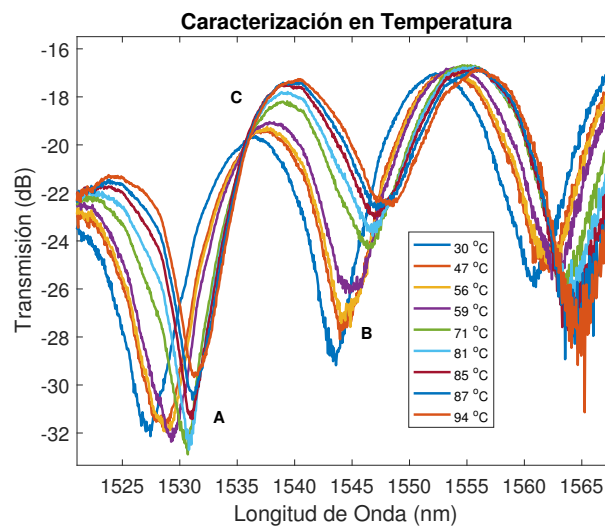


Figura 4.69: Espectro Óptico de Interferómetro 8

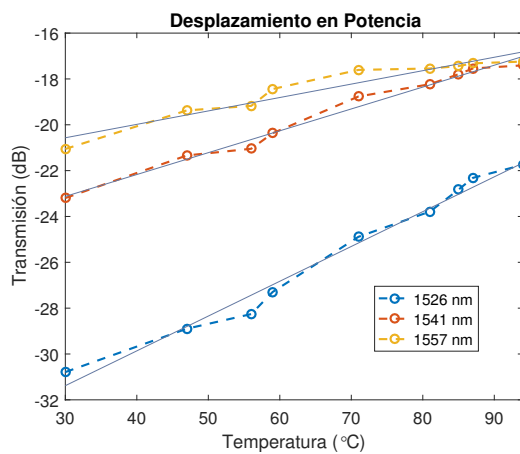


Figura 4.70: Curva ΔP Int. 8

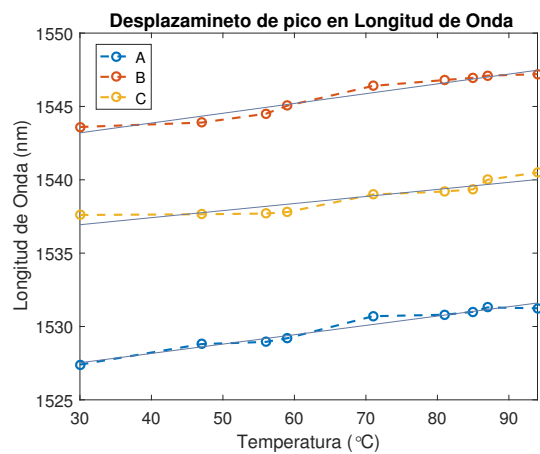


Figura 4.71: Curva $\Delta \lambda$ Int. 8

Las curvas de caracterización del desplazamiento en longitud de onda se pueden ver en la figura 4.71. Aquí se obtuvo una sensibilidad máxima de 66.7 pm/°C, con un ENL de 4.7 %, se puede decir que es una buena linealidad, y se da gracias a que el desplazamiento del espectro es constante. El corrimiento en potencia dio como resultado una sensibilidad de 0.15 dB/°C, igualmente con una buena característica de linealidad (ENL 8.25 %), esto se puede observar en la figura 4.70.

Dispositivo Recubierto

Al ser recubierto el interferómetro 8, se reducen las pérdidas de inserción en al menos 8 dB, con respecto al espectro del dispositivo sin recubrimiento. Aparecen, también nuevos lóbulos, pero disminuye el contraste de franja promedio en 8 dB aproximadamente.

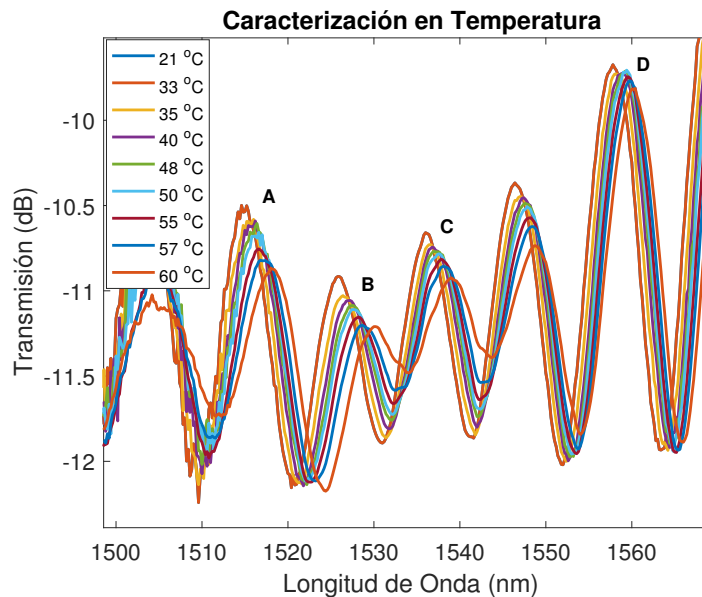


Figura 4.72: Espectro Óptico de Interferómetro 8 Recubierto

Un acercamiento al pico C, se puede observar en la figura 4.73. Aquí es visible cómo como en aumento de la temperatura las franjas se desplazan a la derecha, de forma uniforme. El amplio desplazamiento en longitud de onda que presenta este interferómetro ante cambios de temperatura, permite buscar el límite de detección o de solapamiento.

En la figura 4.74, se observa que a partir de los 90 °C, cada lóbulo del espectro se comienza a solapar con el siguiente, haciendo muy difícil distinguirlos entre sí. Restando el límite inferior del superior de las temperaturas trabajadas, es decir, de 21 a 90 °C, se puede decir que el límite de detección de este dispositivo es de 69 °C.

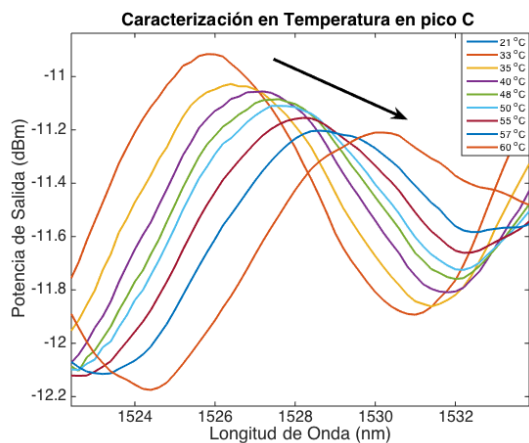


Figura 4.73: Acercamiento de Espectro Óptico de Int. 8 Recubierto al pico C

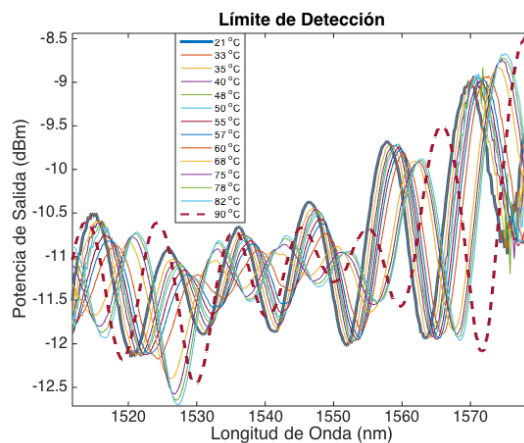


Figura 4.74: Límite de Detección Int. 8

Con respecto a los cambios de temperatura se sigue teniendo un comportamiento uniforme y las curvas de caracterización tanto en potencia como en longitud de onda se pueden apreciar en las figuras 4.75 y 4.76. Con respecto a los cambios en potencia, se obtuvo una sensibilidad de 0.048 dB/°C, con un ENL de 10.09%, y de los cambios en longitud de onda, una de 157.8 pm/°C, con un ENL de 9.9%.

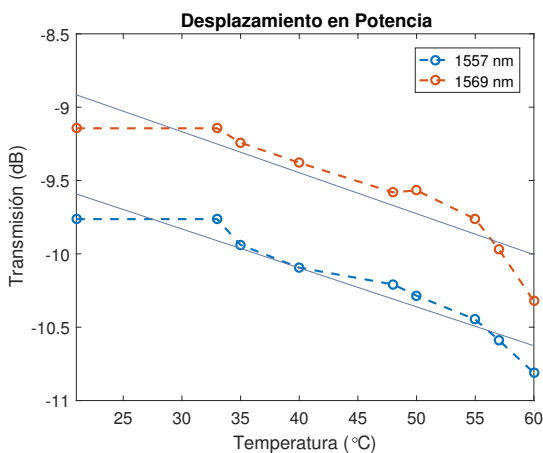


Figura 4.75: Curva ΔP Int. 8

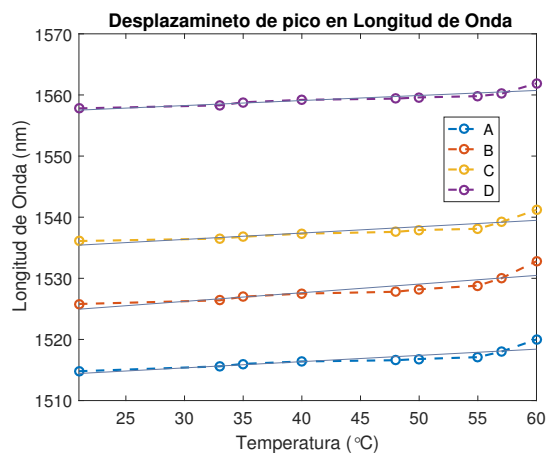


Figura 4.76: Curva $\Delta \lambda$ Int. 8

Interferómetro 9

Dispositivo Sin Recubrimiento

El interferómetro 9 presenta altas pérdidas de inserción y un espectro relativamente caótico tal y como se observa en la figura 4.77. Sin embargo, se logra

hacer el estudio de desplazamiento en longitud de onda para los picos A, C y el valle B. Estas curvas son visibles de la figura 4.79, donde se obtuvo una sensibilidad de 3.5 pm/°C en el pico C, con un ENL de 29.64 %.

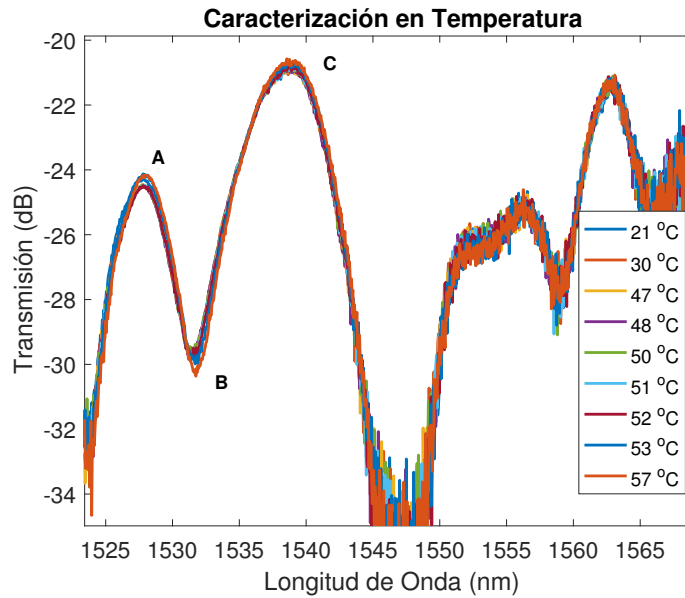


Figura 4.77: Espectro Óptico de Interferómetro 9

El desplazamiento en potencia se estudia a 1529 y 1539 nm, como se puede ver en la figura 4.78, dando como resultado una sensibilidad de 0.005 dB/°C a 1539 nm. El ENL para este punto es de 23.07 %, finalmente, estos resultados sitúan al este interferómetro como el menos sensible de todos los trabajados.

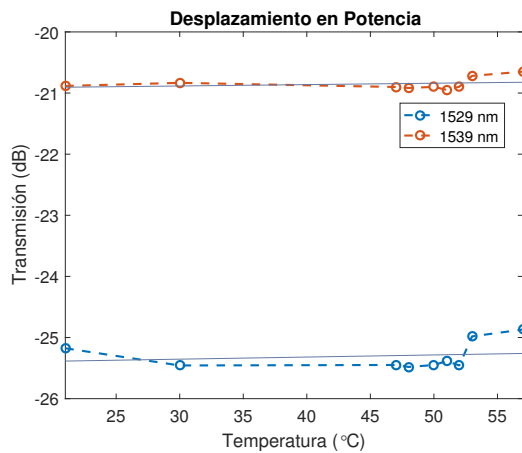


Figura 4.78: Curva ΔP Int. 9

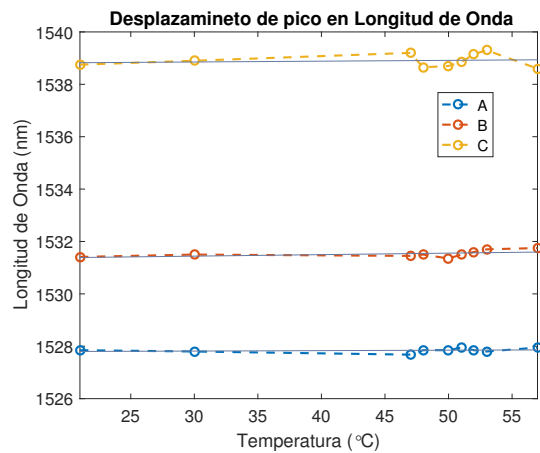


Figura 4.79: Curva $\Delta \lambda$ Int. 9

Dispositivo Recubierto

La figura 4.80 muestra el espectro del interferómetro 9, luego del proceso de recubrimiento, a distintos valores de temperatura. En este caso, el dispositivo casi no presenta cambios con respecto a la potencia transmitida y mantiene las pérdidas de inserción originales.

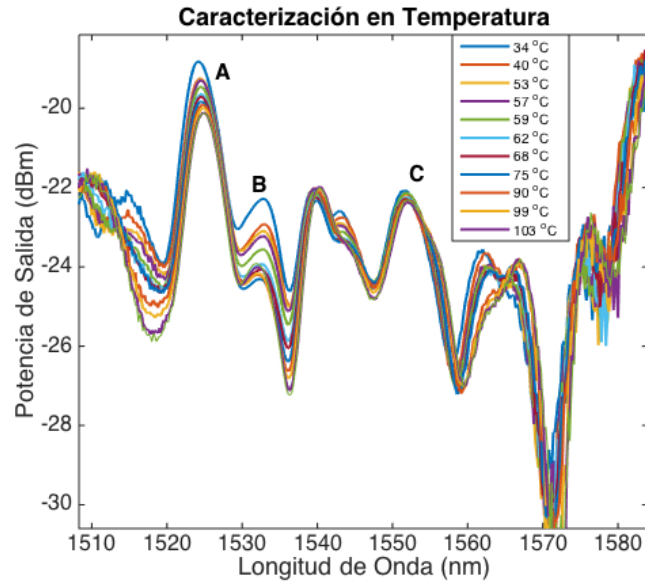


Figura 4.80: Espectro Óptico de Interferómetro 9 Recubierto

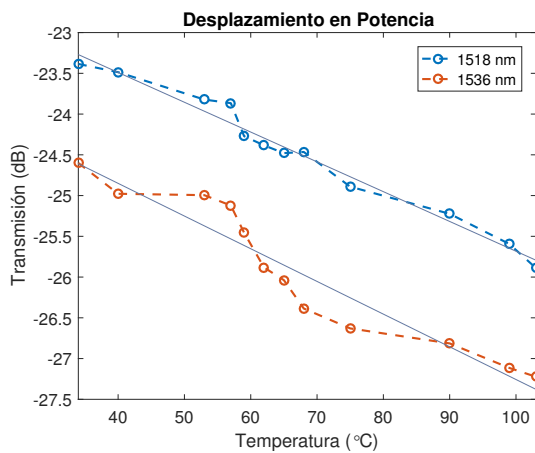


Figura 4.81: Curva ΔP Int. 9

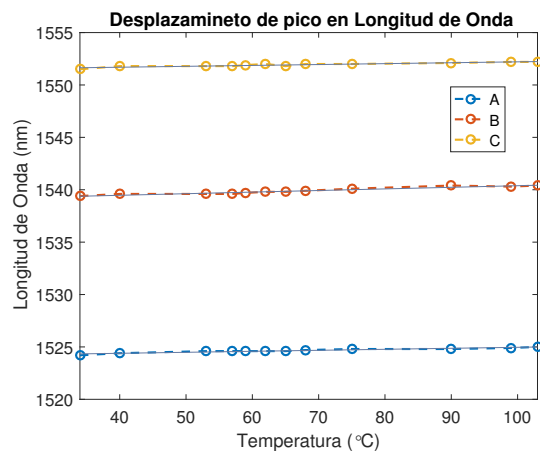


Figura 4.82: Curva $\Delta \lambda$ Int. 9

El desplazamiento en longitud de onda se estudió en los picos A, B y C, y la variación en potencia a 1518 y 1536 nm. Los resultados de estos procedimientos se

pueden observar en la figuras 4.82 y 4.81. Para el primero, se obtuvo una sensibilidad de 15.2 pm/°C, con un ENL de 14.15 %. Mientras que para las variaciones en potencia, se obtuvo una sensibilidad de 0.04 dB/°C, con un ENL de 7.06 %.

Interferómetro 10

Dispositivo Sin Recubrimiento

La figura 4.83 presenta los espectros ópticos a distintos valores de temperatura del interferómetro 10. Se puede observar que a pesar de tener varios lóbulos el patrón de interferencia es relativamente caótico. Sin embargo, el comportamiento ante cambio de temperatura tiene una tendencia lineal, que se puede observar en las figuras 4.84 y 4.85.

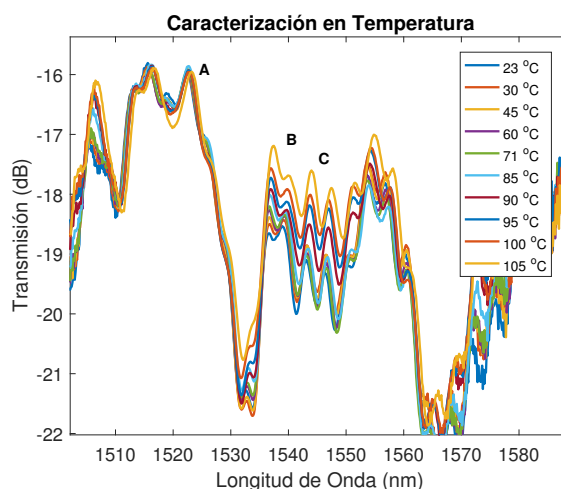


Figura 4.83: Espectro Óptico de Interferómetro 10

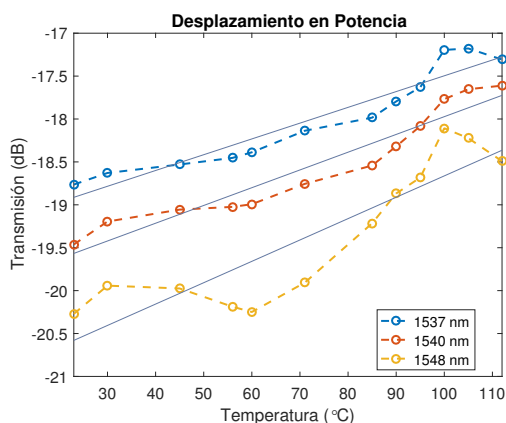


Figura 4.84: Curva ΔP Int. 10

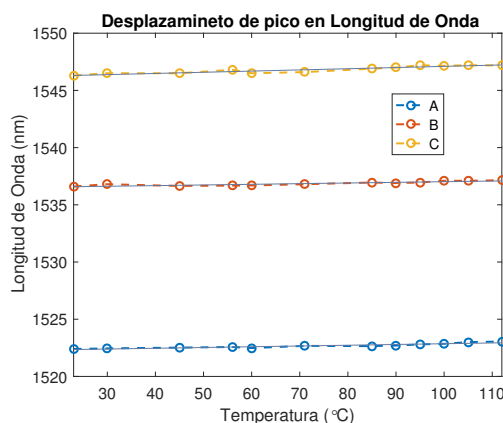


Figura 4.85: Curva $\Delta \lambda$ Int. 10

Para el desplazamiento en longitud de onda se estudiaron los picos A, B y C, de los cuales, se obtuvo una curva con sensibilidad máxima de 10.3 pm/°C y ENL de 10.34%, correspondiente al punto C. Los cambios fueron de potencia estudiados estuvieron ubicados en 1537, 1540 y 1548 nm, respectivamente, aquí la sensibilidad máxima obtenida fue de 0.026 dB/°C, ubicada en 1548 nm, y con un ENL de 10.43%.

Dispositivo Recubierto

El interferómetro 10, al someterse al proceso de recubrimiento perdió la capacidad de transmitir luz, aumentando las perdidas de inserción en casi 70 dB, como se muestra en la figura 4.86. Siendo detectable únicamente una figura de ruido a la salida del sistema. Esto puede ser causado por un fractura en el dispositivo al momento de recubrirlo. Por lo tanto, no se considerará este interferómetro dentro de los análisis comparativos ya que no posible extraer de él las características mínimas necesarias, y se asume como pérdida.

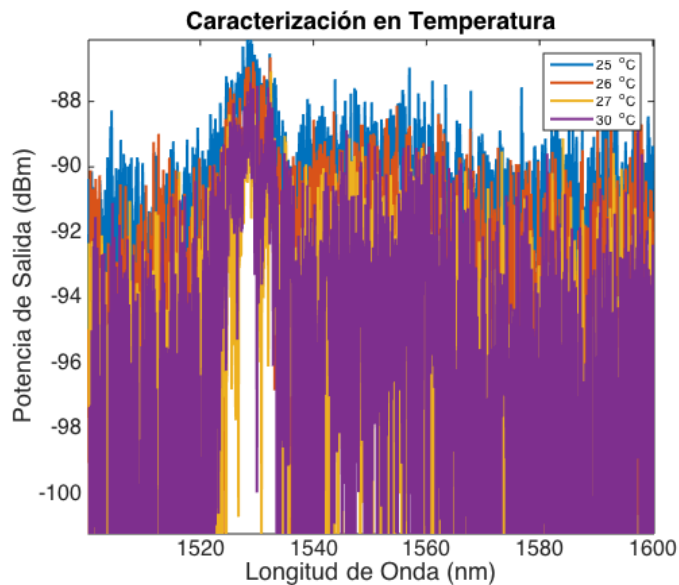


Figura 4.86: Espectro Óptico de Interferómetro 10 Recubierto

Interferómetro 11

Dispositivo Sin Recubrimiento

Los espectros ópticos a distintas temperaturas del interferómetro 11 se presentan en la figura 4.87. Este dispositivo presenta grandes pérdidas de inserción y el espectro es bastante caótico. El corrimiento en longitud de onda en este caso se estudió en el valle A, dando como resultados una sensibilidad de 9.3 pm/°C.

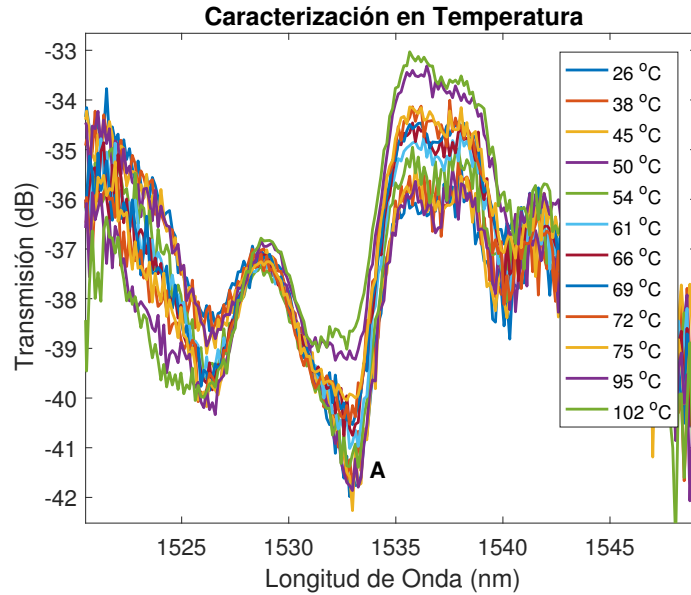


Figura 4.87: Espectro Óptico de Interferómetro 11

Los cambio en potencia se estudiaron en 1536 nm, obteniéndose una sensibilidad en potencia de 0.048 dB/°C. A pesar de la caoticidad del espectro, los ENL son relativamente bajos: 5.44 % para la curva de potencia y 5.78 % para la curva de longitud de onda. Las curvas de caracterización de ambos parámetros se pueden observar en las figuras 4.88 y 4.89

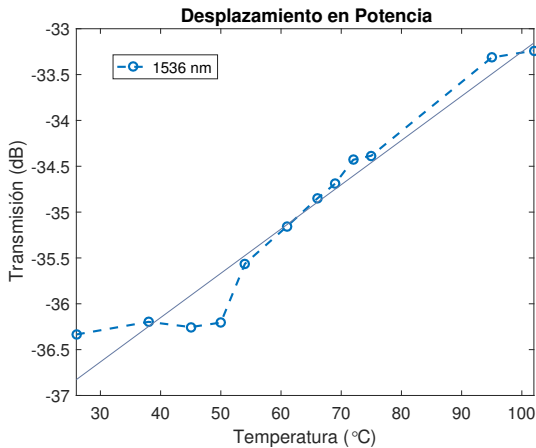


Figura 4.88: Curva ΔP Int. 11

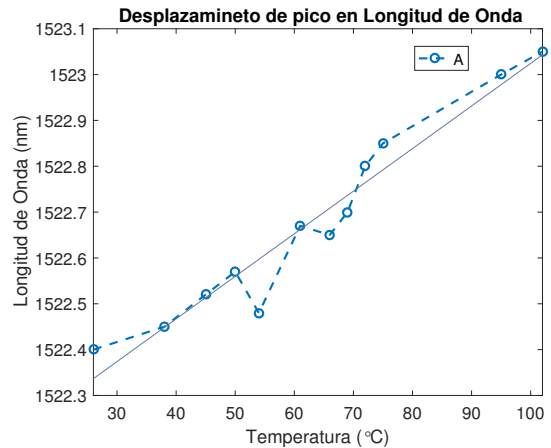


Figura 4.89: Curva $\Delta \lambda$ Int. 11

Dispositivo Recubierto

Luego del proceso de recubrimiento, se registra en el dispositivo una

recuperación de la energía transmitida de alrededor de 7 dB, como se puede observar en la figura 4.90. Así como también, se observa la aparición de nuevas franjas en el patrón de interferencia. A pesar de que se detecta ruido en el espectro, se puede decir que se tiene un patrón de interferencia con una forma más uniforme, que la del detectado en el interferómetro sin recubrir.

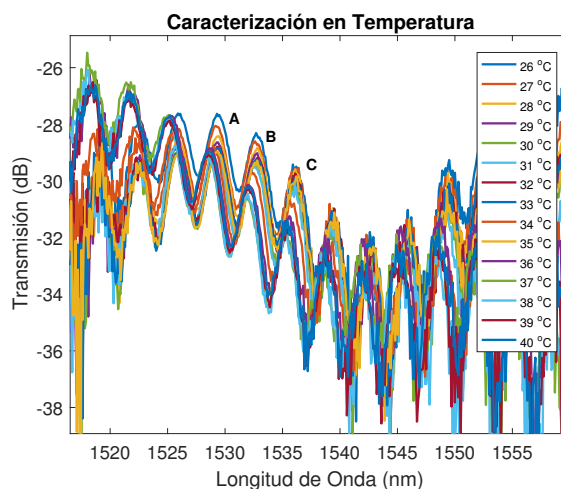


Figura 4.90: Espectro Óptico de Interferómetro 11 Recubierto

El resultado de caracterizar los cambios en potencia a 1519 y 1557 nm, se muestran en la figura 4.91. Aquí se obtuvo una sensibilidad máxima de 0.34 dB/°C, para los 1557 nm, con un ENL de 10.57%. Se pueden ver, a su vez, en la figura 4.92, las curvas de caracterización del desplazamiento en longitud de onda de los picos A, B y C. En este caso se obtuvo una sensibilidad máxima de 67.9 pm/°C, en el pico B, con un ENL de 13.38%.

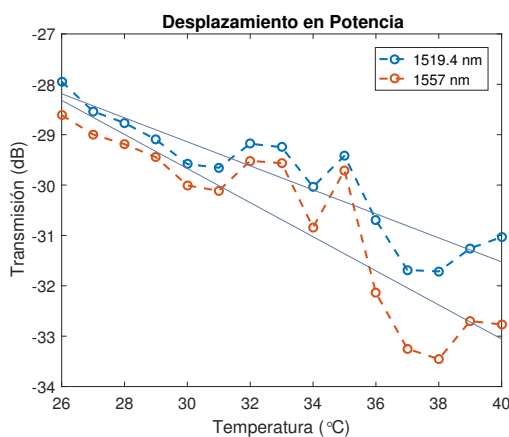


Figura 4.91: Curva ΔP Int. 11

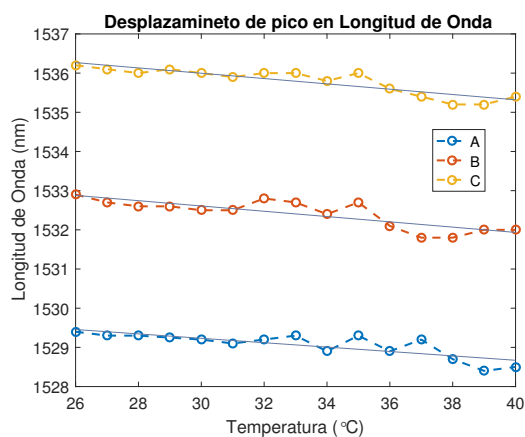


Figura 4.92: Curva $\Delta \lambda$ Int. 11

4.4. Discusión de Resultados

Para comparar el desempeño de los interferómetros como sensores de temperatura se tomaron los parámetros descritos en la sección 3.3.3. En las siguientes secciones se tratará por separado los atributos del patrón de interferencia, y las características de sensado tanto en los cambios en potencia, como en el corrimiento de fase.

4.4.1. Atributos del Patrón Interferencia

En las tablas 4.2 y 4.3 se listan los atributos de los interferómetros fabricados antes y después del proceso de recubrimiento. La figura 4.93, muestra un gráfico comparativo de las pérdidas de inserción antes y después del recubrimiento metálico. Considerando todos los casos, este parámetro aumento al rededor de 1.90 dB en promedio, esto se debe a que hubo muchos dispositivos en los que aumentaron las perdidas de inserción.

Sin embargo, si se analiza por separado, en los interferómetros en los que aumento, este parámetro, lo hizo en un promedio de 7.5 dB, mientras que en los que disminuyo, lo hizo con una media de 6.41 dB. En la gráfica se puede observar también que los dispositivos de menor distancia tendieron a aumentar las perdidas de inserción mientras que en los más largos, es donde se observa el efecto contrario.

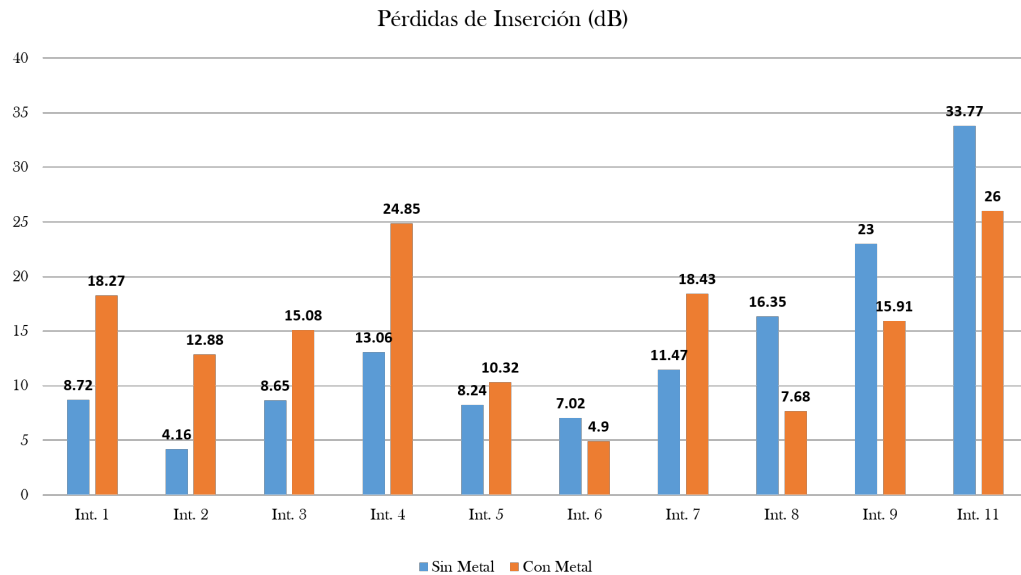


Figura 4.93: Pérdidas de Inserción

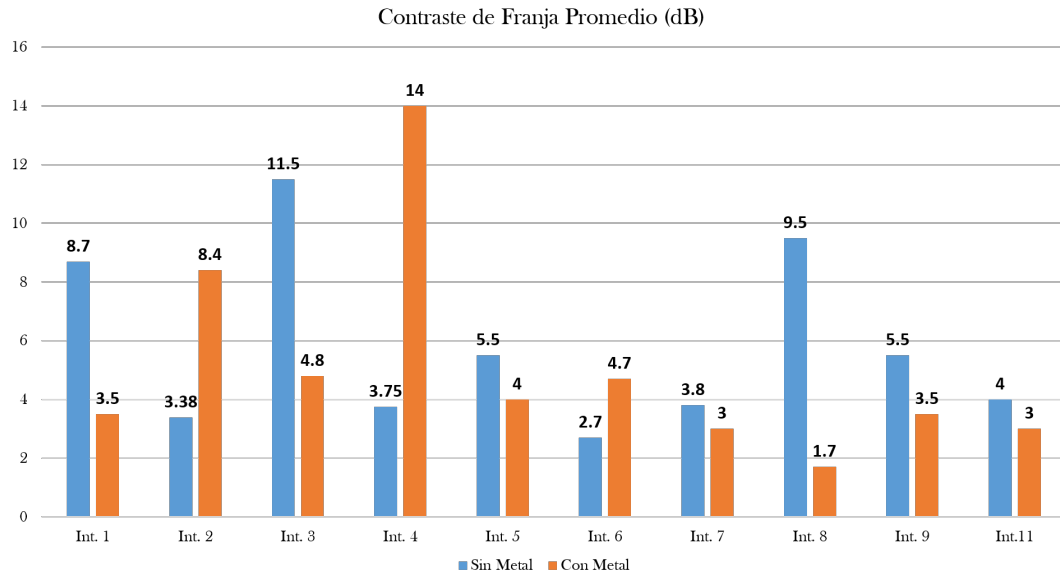


Figura 4.94: *Contraste de Franja de los Interferómetros*

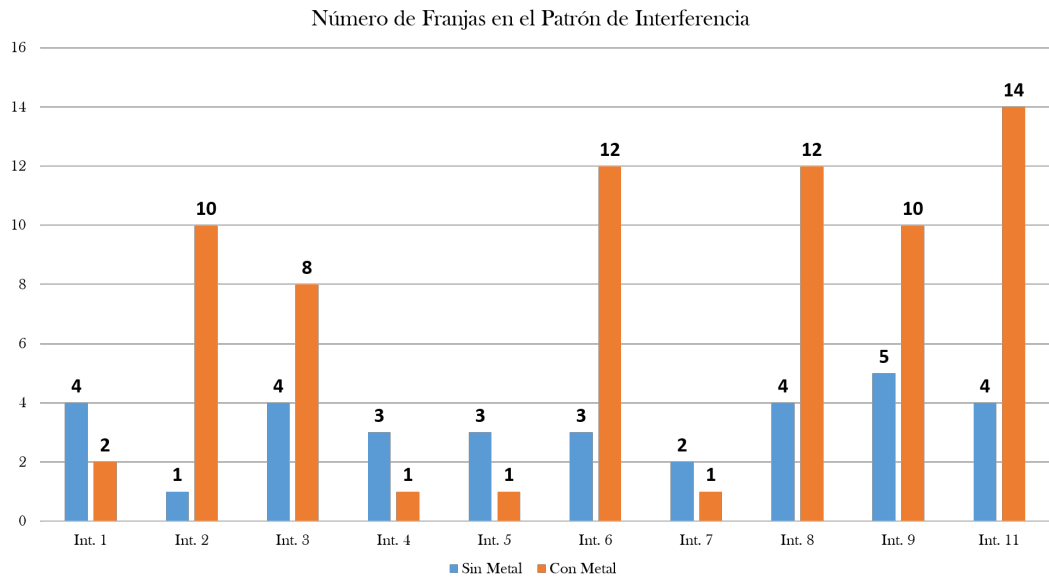


Figura 4.95: *Número de Lóbulos en el Patrón de Interferencia*

La figura 4.94 muestra un gráfico comparativo ahora de la diferencia que existe entre el contraste de franja promedio de los dispositivos sin recubrir, con el de los recubiertos. Aquí se observa una disminución del contraste de franja en la mayoría de los casos, este decremento tuvo una media de 3.57 dB. Lo que se puede deber a que el efecto de reflexión del metal, que en algunos casos, consigue recuperar modos de alto

orden. Por lo tanto, parte de la energía se disuelve en estos modos y ésto se ve reflejado en la pérdida de energía de algunos modos iniciales.

En la figura 4.95, se puede ver evidencia de la aparición de estos modos de alto orden, ya que en el 60 % de los casos, hubo un incremento en el número de lóbulos que aparecen en el patrón de interferencia. Dicho incremento tuvo un promedio de 7.5 lóbulos. En la siguiente sección, a través del estudio de la transformada de Fourier de algunos dispositivos, se explicará como la aparición de nuevos lóbulos es indicador de la interacción de nuevos modos de alto orden.

4.4.2. Análisis de modos en Frecuencia Espacial

Para analizar el comportamiento de modos ante el recubrimiento metálico, se seleccionaron los interferómetros 2, 6, 8 y 11. En el primer caso, el de la figura 4.96, se observa que inicialmente existía un modo predominante en el revestimiento pero de baja energía. Con el recubrimiento metálico Este modo crece en energía y aparecen nuevos modos de alto orden; aunque estos últimos, no alcanzan a competir con el modo predominante, por lo que se observa un patrón de interferencia uniforme, tal como se muestra en la figura 4.13.

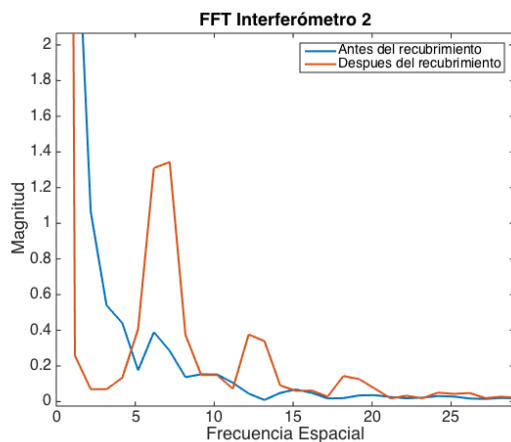


Figura 4.96: Transformada FFT Int. 2

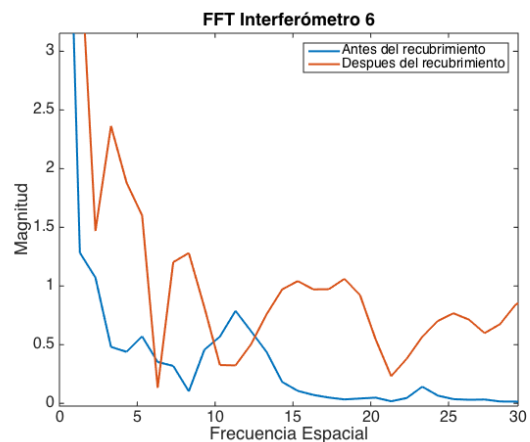


Figura 4.97: Transformada FFT Int. 6

Al someterse al proceso de recubrimiento el número de franjas en este dispositivo, aumenta en 9. Así como el contraste franja también aumenta en 5 dB. Esto se corrobora con la información observada en el espectro espacial, ya que aparecen nuevos modos de alto orden, lo que ocasiona la aparición de franjas, así como también hay un aumento en la energía de los nuevos modos acoplados, lo que es directamente proporcional con el aumento en el contraste de franja.

En el caso del interferómetro 6, como se muestra en la figura 4.97, se tiene un comportamiento similar. Se observa la aparición de modos de alto orden en el patrón de interferencia, por lo que aparecen 8 nuevas franjas luego ser recubierto el dispositivo. Aquí sin embargo, se observa que, a pesar de que exista un modo predominante en el revestimiento, hay otros modos de amplitud media que compiten por la energía del patrón de interferencia, esto ocasiona que el contraste de franja no aumente tanto como en el caso anterior. Además hay que considerar que los modos en el revestimiento antes de ser recubierto el dispositivo tenían mayor energía que en el caso del interferómetro 2, por lo que el aumento en el contraste de franja no es tan pronunciado.

La figura 4.98 muestra el espectro espacial del interferómetro 8. Aquí, el caso que se observa es muy diferente. En primer lugar, antes del recubrimiento metálico, se tenía un modo predominante en el revestimiento de alta energía, cercano al modo fundamental, por lo que observan pocos lóbulos (baja frecuencia espacial) y un alto contraste de franja.

Con el revestimiento, esta energía se dispersa y se excita únicamente un modo predominante, un poco más alejado del modo fundamental, que el modo de alto orden original en el revestimiento, pero de baja energía. Esto hace que aparezca un patrón de interferencia con una frecuencia espacial más alta y por tanto con más lóbulos, pero el contraste de franja se hace muy pequeño debido a la baja energía de este nuevo modo, disminuyendo en 8 dB aproximadamente.

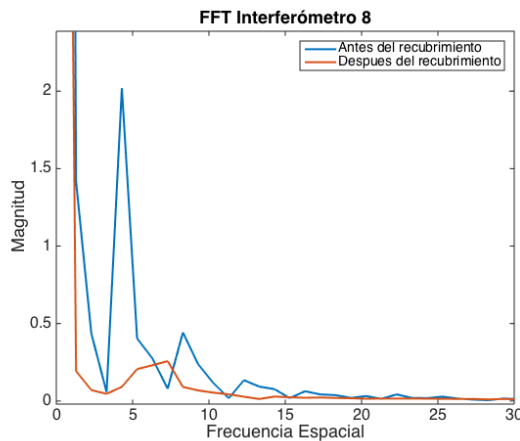


Figura 4.98: Transformada FFT Int. 8

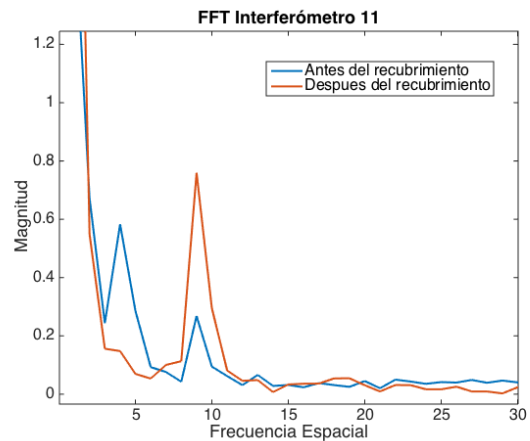


Figura 4.99: Transformada FFT Int. 11

En el interferómetro 11, se observa un fenómeno distinto, como se muestra en la figura 4.99. Inicialmente, se tenía un modo de alto orden predominante cercano al modo fundamental, lo que ocasiona pocos lóbulos en el patrón de interferencia. Luego de ser recubierto, este modo se disipa y surge otro, de amplitud similar pero mayor frecuencia espacial. Esto se traduce en la aparición de 10 nuevos lóbulos, el contraste de

franja en este caso igualmente disminuye ya que, el área bajo la curva del modo original sigue siendo ligeramente mayor que la del nuevo modo.

4.4.3. Caracterización de cambios en Potencia

Como se menciona en la sección 3.3 para la comparación de las características de sensado se tomará en cuenta tanto la sensibilidad del interferómetro, como su error de no linealidad. En las figura 4.100 se muestra un resumen comparativo de la sensibilidad, en potencia, detectada antes y después del proceso de recubrimiento. De los diez interferómetros que se recubrieron y mantuvieron un espectro de transmisión suficiente, el 50% tuvo un incremento en la sensibilidad del nivel de potencia ante cambios de temperatura.

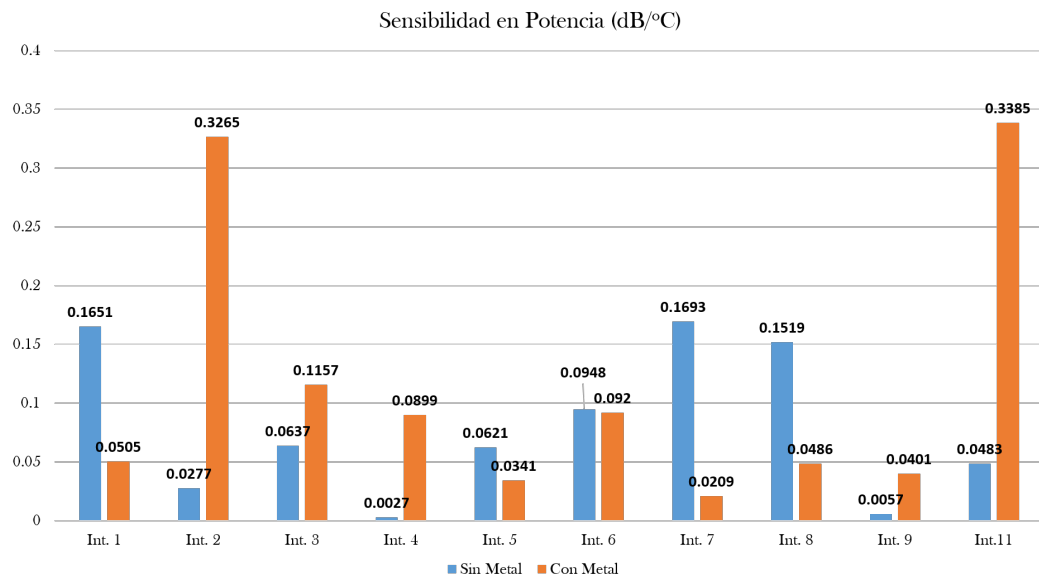


Figura 4.100: *Sensibilidad en Potencia*

Evaluando los dispositivos en los que este parámetro incrementó, se observa que este incremento tuvo un promedio de 0.152 dB/°C, con un máximo de 0.2988 dB/°C, para el interferómetro 2. En cuanto a los dispositivos que tuvieron un decremento de este parámetro, lo hicieron con una media de 0.079 dB/°C, y un máximo de 0.148 dB/°C. Desde una perspectiva porcentual, el máximo incremento detectado fue de 3230% para el interferómetro 4. Con respecto al error de no linealidad, igualmente, en el 50% de los casos presentó una mejora. De los dispositivos mejorados, este error disminuyó en un promedio de 12.95% y en el caso de los dispositivos desmejorados, solo aumentó en un promedio de 5.79%.

Notese que, de acuerdo a los resultados obtenidos, mostrados en la figura 4.101 el alto error de no-linealidad reportado en los dispositivos de corto tamaño es más propenso a reducirse con la aplicación del recubrimiento metálico. Mientras que en los interferómetros de mayor longitud, que presentaban un error de no linealidad relativamente bajo en comparación, se nota que éste tiende a aumentar luego del proceso de recubrimiento.

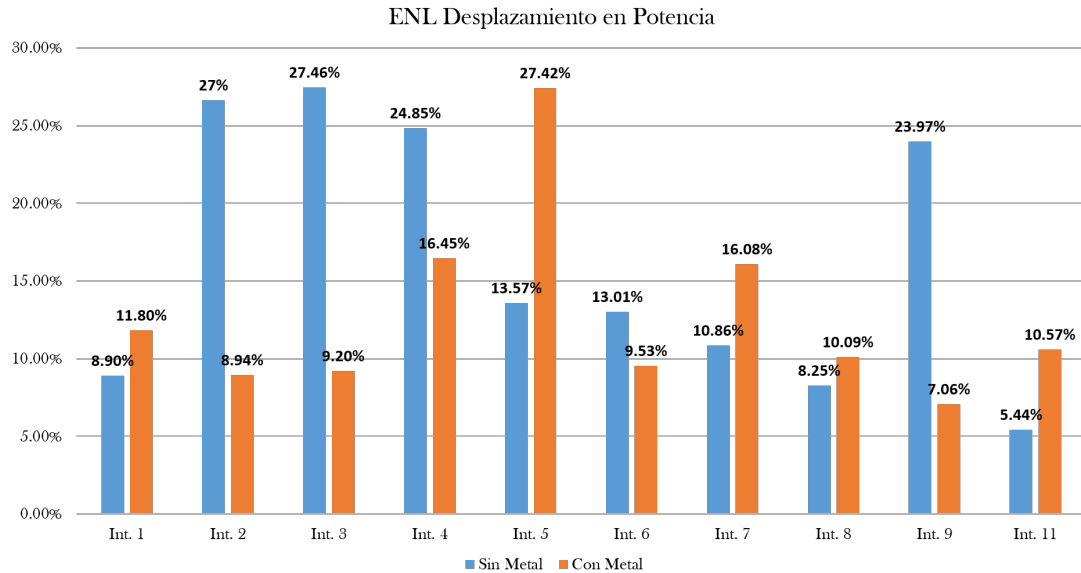


Figura 4.101: Error de no-linealidad en Potencia

4.4.4. Caracterización de Cambios en Fase

La figura 4.102 muestra un gráfico comparativo de la sensibilidad en longitud de onda de pico, antes y después del proceso de recubrimiento metálico. De este gráfico se excluyó el interferómetro 4, ya que de su espectro no fue posible discernir un cambio claro en la longitud de onda del espectro. De los 9 interferómetros analizados en este punto 8 resultaron en un aumento de la sensibilidad en corrimiento de fase, con un promedio de 46 pm/°C. El incremento máximo que se tuvo fue de 101.5 pm/°C, para el interferómetro 2. El error de no linealidad, en este caso, disminuyó para el 55 % de los interferómetros. Con un promedio de reducción de 11.7%. Mientras que para los dispositivos para los que empeoró, lo hizo con una media de 7.04%. La disminución máxima que se tuvo fue de 16.84 % para el interferómetro 3.

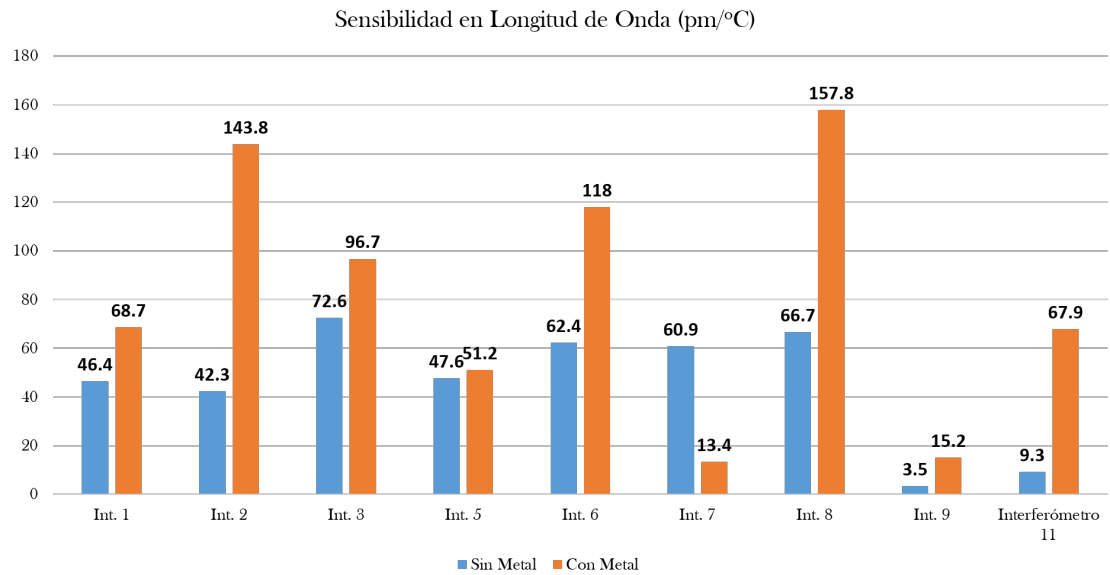


Figura 4.102: Sensibilidad en Longitud de Onda

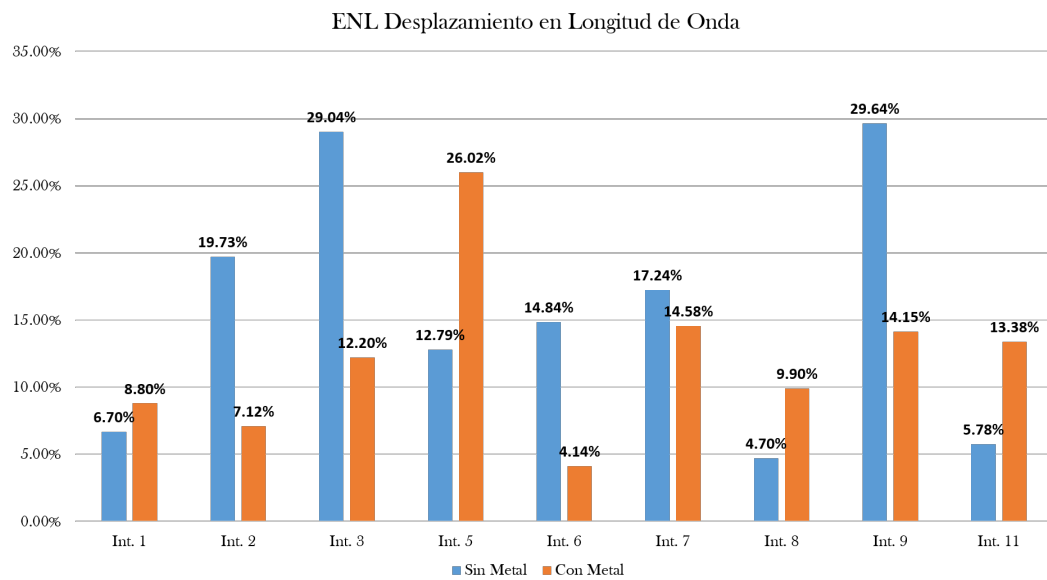


Figura 4.103: Error de no-linealidad en Longitud de Onda

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajo a Futuro

5.1. Conclusiones

Un sensor de temperatura fue experimentalmente demostrado, utilizando un interferómetro intermodal tipo Mach-Zehnder recubierto de aluminio. Para su fabricación se utilizaron dos técnicas, la primera fue por medio de núcleo desplazado utilizando únicamente SMF. En la segunda se aplicó el principio de difracción en la zona de colapso de huecos.

Los interferómetros fueron caracterizados ante cambios de temperatura antes y después del proceso de recubrimiento metálico, con el fin de estudiar los cambios que ocurrían en el desempeño de los dispositivos al ser recubiertos. Se estudiaron 11 interferómetros, de los cuales 10 conservaron, relativamente, sus características de transmisión.

Como fuente de amplio espectro se utilizó un EDFA. Éste se logra al bombear un sección de 3.5 m de fibra dopada con erbio a 980 nm. La caracterización del diodo láser de bombeo demuestra que la longitud de onda de emisión esta centrada en 975.5 nm, sin embargo, gracias al espectro de absorción del erbio, el bombeo en esta longitud de onda permite que se provoque la emisión del espectro del EDFA entre 1520 y 1580 nm.

Para la fabricación de los interferómetros de núcleo desplazado, se concatenaron tres segmentos de fibra monomodo convencional, con un ligero desplazamiento de la pieza central. El acoplamiento modal óptimo, en el revestimiento, fue experimentalmente demostrado para un desplazamiento de la sección central de 30 μm . De aquí, la distancia para el reacoplamiento de modos en el núcleo se varió entre 20 y 30 μm y la longitud de los dispositivos se seleccionó entre 2 y 4.5 cm.

Algunos de estos interferómetros, demostraron una buena característica de sensado, especialmente el número 8, el cual presenta una sensibilidad en longitud de onda de $66.7 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, con un ENL de 4.7%; y una sensibilidad en potencia de $0.151 \text{ dB}/^\circ\text{C}$, con un ENL, en este caso de 8.25%. Esta es una buena respuesta en ambos parámetros, considerando la relación sensibilidad, linealidad.

En el caso de los interferómetros basados en PCF, se concatenó un segmento de fibra de cristal fotónico entre dos secciones de fibra SMF, sin ningún desplazamiento. De estos se fabricaron dos dispositivos, que aunque tenían buena característica de linealidad en general (entre 5 y 10% de ENL), no tenían una sensibilidad muy alta, ya que esta oscilaba entre los 9.3 y $10.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, para el corrimiento en longitud de onda y 0.025 y $0.048 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ en desplazamiento en potencia.

Al aplicar el recubrimiento metálico, se observa que en el 60% de los dispositivos hubo un aumento en el número de franjas, aunque existió una disminución en el contraste de franja inicial. En cuanto a las pérdidas de inserción, se observa que estas aumentaron para los dispositivos de longitudes cortas, mientras que disminuyeron para los interferómetros más largos. Esto se da, gracias a la alta reflectividad reportada para el aluminio depositado por evaporación térmica, en la región infrarroja.

Ejecutando la transformada rápida de Fourier sobre los espectros antes y después del recubrimiento metálico, se observa que existen claras modificaciones en la interacción modal de los dispositivos, en las que se puede observar frecuentemente la excitación de modos de alto orden en el espectro espacial, con amplitudes variantes.

Con respecto a las características de sensado, se detectaron mejoras en las sensibilidades de los parámetros longitud de onda y potencia. El aumento promedio en la sensibilidad en longitud de onda fue de $46 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, con un máximo de $101.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ para el interferómetro 2. En potencia, también se detectaron mejoras en la sensibilidad, con un promedio de $0.152 \text{ dB}/^\circ\text{C}$, y un máximo de $0.2988 \text{ dB}/^\circ\text{C}$, también para el interferómetro 2.

Desde una perspectiva estadística, en el 50% de los casos, se detectó un aumento de la sensibilidad en potencia, con una mejora en el error de no linealidad igualmente en el 50% de los dispositivos. La sensibilidad en longitud de onda presentó mejoras en el 88% de los dispositivos. Aquí el ENL disminuyó en el 55% de los casos.

5.2. Trabajo a Futuro

Los resultados obtenidos en este experimento abren puertas en diferentes ámbitos de la investigación en fibras ópticas. Por ejemplo, el aumento de franjas en un patrón de interferencia tiene utilidad en la sintonización de láseres de fibra, ya que

se pueden conseguir más picos de emisión.

Queda también abierta la posibilidad de explorar el comportamiento de estos dispositivos ante diferentes parámetros, como torsión, índice de refracción, estrechamiento, entre otros. Así, como también se puede estudiar los efectos del recubrimiento metálico sobre diversas estructuras interferométricas, no cubiertas por este trabajo, como por ejemplo el uso de fibras especializadas o tapers.

Existe también la posibilidad de observar el efecto que tendría sobre estos dispositivos el no hacer el recubrimiento con aluminio sino con otros metales e incluso con diferentes materiales como polímeros, que a, al igual que el metal tengan un coeficiente térmico distinto al del silicio.

Apéndice A

Publicaciones

A.1. Publicaciones en Congresos

”Temperature sensing setup based on an aluminum coated Mach-Zehnder Interferometer”. Poster presentado en SPIE Optics + Optoelectronics 2017. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2628564>

”Torsion sensing setup based on a Mach-Zehnder interferometer with photonics crystal fiber”. Presentación oral en SPIE Photonics West 2017. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2605919>

”Optimización De Los Parámetros De Fabricación De Interferómetros Mach Zehnder Simétricos Y Asimétricos Tipo Core-Offset, Por Medio De Su Caracterización En Temperatura” Poster presentado en el Congreso XIV encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia 2017.

A.2. Publicaciones en Revistas Indexadas

”Temperature sensing setup based on an asymmetric core-offset aluminum coated Mach-Zehnder Interferometer”. Artículo submitido a revista IOP Journal of Physics D, con facotr de impacto de 2.7.

Bibliografía

- [1] L. Nguyen, D. Hwang, S. Moon, D. Moon, and Y. Chung. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch. *Optics express*, 16(15):11369–11375, 2008.
- [2] A. Urrutia, J. Goicoechea, A. Ricchiuti, D. Barrera, S. Sales, and F. Arregui. Simultaneous measurement of humidity and temperature based on a partially coated optical fiber long period grating. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 227:135–141, 2016.
- [3] A. Socorro, I. Del Villar, F. Arregui, and I. Matias. Mode transition in complex refractive index coated single-mode-multimode-single-mode structure. *Optics express*, 21(10):12668–82, 2013.
- [4] L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski, and J. McGhee. Temperature measurement, 1991.
- [5] P. Childs, J. Greenwood, and C. Long. Review of temperature measurement. *Review of scientific instruments*, 71(8):2959–2978, 2000.
- [6] P. Lu, Li. Men, K. Sooley, and Q. Chen. Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature. *Applied Physics Letters*, 94(13), 2009.
- [7] Eric Udd et al. *Fiber optic sensors*. Wiley Online Library, 1993.
- [8] M. Schmidt, L. Sempere, H. Tyagi, C. Poulton, and P. Russell. Waveguiding and plasmon resonances in two-dimensional photonic lattices of gold and silver nanowires. *Physical Review B*, 77(3):033417, 2008.
- [9] Wikipedia. Termómetro de mercurio — wikipedia, la enciclopedia libre, 2016. [Internet; descargado 28-noviembre-2016].
- [10] Wikipedia. Termopar — wikipedia, la enciclopedia libre, 2016. [Internet; descargado 5-diciembre-2016].

-
- [11] C. Droms. *Thermistors for temperature measurement*. Reinhold Publ. Co., 1962.
- [12] K. Stanley. *Non-Linear Resistors*. Radio and Electronics Eng., 1973.
- [13] J. Dakin, D. Pratt, G. Bibby, and J. Ross. Distributed optical fibre raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector. *Electronics letters*, 21(13):569–570, 1985.
- [14] M. Gonzalez-Reyna, J. Alvarado-Mendez, E. and Estudillo-Ayala, E. Vargas-Rodriguez, M. Sosa-Morales, J. Sierra-Hernandez, D. Jauregui-Vazquez, and R. Rojas-Laguna. Laser Temperature Sensor Based on a Fiber Bragg Grating. 27(11):1141–1144, 2015.
- [15] F. Flores-Hernandez. *Técnica para la detección de flexión de en una articulación utilizando fibra óptica*. Universidad de Guanajuato, July 24 2015.
- [16] J. Sierra-Hernandez, R. Rojas-Laguna, E. Vargas-Rodriguez, J. Estudillo-Ayala, D. Jauregui-Vazquez, D. Guzmán-Chávez, and P. Zaca-Moran. A tunable multi-wavelength erbium doped fiber laser based on a Mach-Zehnder interferometer and photonic crystal fiber. *Laser Physics*, 23(12):125103, 2013.
- [17] J. Sierra-Hernandez, A. Castillo-Guzman, R. Selvas-Aguilar, E. Vargas-Rodriguez, E. Gallegos-Arellano, J. Estudillo-Ayala, and R. Jauregui-Vazquez, D. and Rojas-laguna. Torsion sensing setup based on a three beam path Mach-Zehnder interferometer. *Microwave and optical technology letters*, 57(8):1857–1861, 2015.
- [18] E. Huerta-Mascotte, J. Sierra-Hernandez, R. Mata-Chavez, D. Jauregui-Vazquez, A. Castillo-Guzman, J. Estudillo-Ayala, A. Guzman-Chavez, and R. Rojas-Laguna. A Core-Offset Mach Zehnder interferometer based on a non-zero dispersion-shifted fiber and its torsion sensing application. *Sensors*, 16(856), 2016.
- [19] M. Gonzales-Reyna. *Sensor de temperatura basado en un interferómetro modal de tipo Mach-Zehnder de fibra óptica*. Universidad de Guanajuato, July 24 2015.
- [20] V. Minkovich, J. Villatoro, D. Monzón-Hernández, S. Calixto, A. Sotsky, and L. Sotskaya. Holey fiber tapers with resonance transmission for high-resolution refractive index sensing. *Optics express*, 13(19):7609–7614, 2005.
- [21] J. Villatoro and D. Monzón-Hernández. Low-Cost Optical Fiber Refractive-Index Sensor Based on Core Diameter Mismatch. *Journal of Lightwave Technology*, 24(3):1409–1413, 2006.
- [22] M. Cano-Contreras, A. Guzman-Chavez, R. Mata-Chavez, E. Vargas-Rodriguez, D. Jauregui-Vazquez, D. Claudio-Gonzalez, J. Estudillo-Ayala, R. Rojas-Laguna, and E. Huerta-Mascotte. All-fiber curvature sensor based on an abrupt tapered fiber and a Fabry-Perot interferometer. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(22):2213–2216, 2014.

-
- [23] D. Monzón-Hernández, J. Villatoro, and D. Luna-Moreno. Miniature optical fiber refractometer using cladded multimode tapered fiber tips. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 110(1):36–40, 2005.
- [24] E. Vargas-Rodriguez, A. Guzman-Chavez, M. Cano-Contreras, E. Gallegos-Arellano, D. Jauregui-Vazquez, J. Hernández-García, J. Estudillo-Ayala, and R. Rojas-Laguna. Analytical modelling of a refractive index sensor based on an intrinsic micro Fabry-Perot interferometer. *Sensors*, 15(10):26128–42, 2015.
- [25] A. Ukil, H. Braendle, and P. Krippner. Distributed temperature sensing: Review of technology and applications. *IEEE Sensors Journal*, 12(5):885–892, 2012.
- [26] Q. Yao, H. Meng, W. Wang, H. Xue, R. Xiong, B. Huang, C. Tan, and X. Huang. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer combined with a fiber Bragg grating. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 209:73–77, 2014.
- [27] B. Kuhlmeiy, K. Pathmanandavel, and R. Mcphedran. Multipole analysis of photonic crystal fibers with coated inclusions. In *2006 European Conference on Optical Communications Proceedings, ECOC 2006*, volume 14, pages 1655–1661, 2006.
- [28] X. Yu, Y. Zhang, S. Pan, P. Shum, M. Yan, Y. Leviatan, and C. Li. A selectively coated photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor. *Journal of Optics*, 12(1):015005, 2010.
- [29] E. Hecht. *Optics*. Addison Wesley, 4 edition, 2003.
- [30] D. Krohn, M. Trevor, and M. Alexis. *Fiber Optic Sensors Fundamentals and Applications*. SPIE, 2014.
- [31] Z. Fang, K. K.Chin, R. Qu, and H. Cai. *Fundamentals of Optical Fiber Sensors Wiley Series in Microwave and Optical Engineering*. Wiley, 2012.
- [32] P. Hariharan. *Optical Interferometry*, volume 1. Academic Press, 2010.
- [33] J. Harrington. *Infrared Fibers and Their Applications*. The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers All, 2003.
- [34] B. Gupta, S. Srivastava, and R. Verma. *Fiber optic sensors based on plasmonics*. World Scientific, 2 edition, 2013.
- [35] J. Matsuoka, N. Kitamura, S. Fujinaga, T. Kitaoka, and H. Tamashita. Temperature dependence of refractive index of SiO₂ glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 135:86–89, 1991.

- [36] W. Chen, S. Lou, S. Feng, L. Wang, H. L. Li, T. Guo, and S. Jian. Switchable multi-wavelength fiber ring laser based on a compact in-fiber Mach-Zehnder interferometer with photonic crystal fiber. *Laser Physics*, 19(11):2115–2119, 2009.
- [37] B. Lee, Y. Kim, K. Park, J. Eom, M. Kim, B. Rho, and H. Choi. Interferometric fiber optic sensors. *Sensors*, 12(3):2467–2486, 2012.
- [38] Y. Kim, U. Paek, and B. Lee. Measurement of refractive-index variation with temperature by use of long-period fiber gratings. *Optics Letters*, 27(15):1297, 2002.
- [39] L. Li, L. Xia, Z. Xie, and D. Liu. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications. *Optics Express*, 20(10):11109, 2012.
- [40] G. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, 3 edition, 2006.
- [41] P Torres. Análisis por elementos finitos del amplificador de fibra óptica dopada con erbio. *MOMENTO-Revista de Física*, (11):27–36, 1995.
- [42] P. Martín-Ramos, J. Martín-Gil, and P. Chamorro-Posada. *Dpto. de Teoría de la Señal e Ingeniería Telemática, y Dpto. de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid mendeley-groups = References Thesis, title = mplificadores de fibra óptica dopada con Erblio e Iterbio (EDFAs y YEDFAs)., year = 2002.*
- [43] V. Valerii and T. Mikirtychev. *Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers*. Springer Series in Optical Sciences, 1 edition, 2014.
- [44] J. Causado-Buelvas, N. Gomez-Cardona, and P. Torres. Practical Method for engineering Erbium-doped fiber lasers from step-like pulse excitations. *Journal of Physics: Conference Series*, 274:012017, 2011.
- [45] Philippe M Becker, Anders A Olsson, and Jay R Simpson. *Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology*. Academic press, 1999.
- [46] E. Pacheco, J. Sierra-Hernandez, E. Gallegos-Arellano, J. Estudillo-Ayala, and R. Rojas-Laguna. Optimización De Los Parámetros De Fabricación De Interferómetros Mach Zehnder Simétricos Y Asimétricos Tipo Core-Offset, Por Medio De Su Caracterización En Temperatura. In *Encuentro de la Mujer en la Ciencia 2017*, 2017.
- [47] H E Bennett, M Silver, and E J Ashley. Infrared Reflectance of Aluminum Evaporated in Ultra-High Vacuum. *Journal of the Optical Society of America*, 53(9):1089–1095, 1963.
- [48] León W León W Couch. *Sistemas de comunicación digitales y analógicos*. Pearson Educación,, 2008.

- [49] Ramón Pallás Areny. *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo, 2004.
- [50] William Bolton. *Mediciones y pruebas eléctricas y electrónicas*. Marcombo, 1995.
- [51] ThorLabs Products. 975 nm pigtailed laser diode, 2012.
- [52] ThorLabs Products. M5-980-125 - erbium doped c band fiber, 2013.