



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
DIVISION DE INGENIERIAS

“Sensor de temperatura basado en un
interferómetro intermodal tipo Michelson
con fibra óptica monomodo”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO EN MECATRÓNICA

PRESENTA:

Calderón Ambriz José Manuel

DIRECTOR (ES):

Dr. Juan Manuel Sierra Hernández

Dr. Daniel Jáuregui Vázquez

SALAMANCA, GTO.

ENERO, 2019

Sensor de temperatura basado en un interferómetro intermodal tipo Michelson con fibra óptica monomodo.

Por

José Manuel Calderón Ambriz

Dr. Juan Manuel Sierra Hernández.

Co-ASESOR: Dr. Daniel Jáuregui Vázquez.

Universidad de Guanajuato, DICIS

Enero 2019

Resumen

En este trabajo se presenta un sensor de temperatura basado en un interferómetro tipo Michelson, fabricado por dos técnicas “core-offset” y “burbuja”. El interferómetro fue hecho de 1 a 3 cm de fibra óptica monomodo (SMF, Single Mode Fiber). Se implementa en la configuración del arreglo experimental un reflector que funciona como un interferómetro Fabry-Perot con el fin de disminuir las pérdidas y obtener un buen patrón de interferencia. Los interferómetros propuestos como sensores de temperatura pueden operar en un rango de 0 a 50 °C. La estabilidad del sistema es investigada en forma experimental.

PALABRAS CLAVE: Temperatura, fibra óptica monomodo, Amplificador de fibra dopada con erbio, interferómetro Michelson, interferómetro Fabry Perot.

Agradecimientos.

Le agradezco a Dios por haberme brindado fortaleza y coraje para combatir mis miedos y debilidades, por haberme guiado a lo largo de mi carrera dándome sin fin de aprendizajes, retos y experiencias.

Le doy gracias a mis padres Raúl y Ma.Teresita por todo el apoyo dado en todo momento, por los principios y valores inculcados, y por haberme dado la oportunidad de estudiar una carrera como esta. A mis hermanos Víctor, Diana y Estefanía por ser parte de mi vida y por ser un gran ejemplo a seguir. A Jannethe por ser una parte muy importante en mi vida, por haberme apoyado en todas circunstancias buenas o malas, por la motivación, paciencia y sobre todo el cariño y amor que me ha dado.

Gracias a mi asesor y amigo el Dr. J. Manuel Sierra por creer en mí, por el apoyo y la oportunidad brindada de trabajar con él, por darnos las facilidades y conocimientos para el desarrollo de este trabajo de tesis.

Gracias a mi co-asesor y amigo el Dr. Daniel Jáuregui por su apoyo, confianza y sobre todo paciencia. Por haber compartido sus conocimientos y su amistad.

A mi equipo de laboratorio Marco, Astrid, Paloma, Eliana, Canchola y Javier les agradezco por su confianza, apoyo, dedicación, y sobre todo gracias por su más sincera amistad.

A mis roomies Alejandro (Nava) y Abraham (El amarillo) por haber sido mi segunda familia durante toda la carrera, dándome su apoyo, comprensión, motivación y sobre todo su valiosa amistad que perdurará por siempre.

En general a todos mis amigos y familiares que siempre creyeron en mí.

José Manuel Calderón Ambriz.

Agradezco de manera muy especial a la Universidad de Guanajuato la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado (DAIP), por el proyecto otorgado con No. CIIC 220/2108.



A la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, por haber puesto a mi disposición todos los recursos y medios necesarios para continuar mis estudios y desarrollar mi trabajo de tesis.

Contenido

<i>Capítulo I: Introducción</i>	1
1.1 Introducción General.....	1
1.1.1 Tipos de fibras ópticas.....	1
1.1.2 Fibra óptica dopada.....	3
1.1.3 Sensores de fibra óptica.....	4
1.2 Antecedentes.....	7
1.3 Objetivo.....	10
1.3.1 Objetivo General.....	10
1.3.2 Objetivos Específicos.....	10
1.4 Hipótesis.....	10
1.5 Justificación.....	10
1.6 Organización.....	12
<i>Capítulo II: Marco Teórico</i>	16
2.1 Introducción.....	16
2.2 Interferometría.....	19
2.3 Tipos de interferómetros.....	22
<i>Capítulo III: Metodología</i>	28
3.1. Introducción.....	28
3.2 Caracterización del diodo láser semiconductor.....	28
3.3 Caracterización de la fibra dopada con erbio.....	30
3.4 Circulador óptico.....	33
3.5 Multiplexor por división de onda (WDM).....	35
3.6 Fabricación del Interferómetro intermodal tipo Michelson.....	35
3.7 Principio de operación del interferómetro intermodal tipo Michelson.....	39
<i>Capítulo IV: Pruebas y resultados</i>	47
4.1 Introducción.....	47
4.2.1 Transformada rápida de Fourier.....	47
4.2.2 Contraste de franja.....	49

4.3 Arreglo experimental.	51
4.4 MI implementados con empalme tipo Core-offset.	52
4.5. Patrones de interferencia de interferómetros con empalme tipo Burbuja.....	62
4.6. Arreglo experimental para detección de temperatura.	75
4.6.1 Control de temperatura.	75
4.7 Resultados.	78
Interferómetro IntB1.	78
Interferómetro IntA3.....	82
Interferómetro IntBD1.	87
<i>Capítulo V: Conclusiones y trabajo a futuro.</i>	<i>93</i>
5.1 Conclusiones.	93
5.2 Trabajo a futuro.....	93

Índice de figuras.

Figura 1. Distintas configuraciones de fibras ópticas y su perfil de índice de refracción. , (a) Fibra de salto de índice multimodo, (b) Fibra de índice graduado multimodo y (c) Fibra de salto de índice mono modo .	3
Figura 2. Sensor extrínseco.	5
Figura 3. Sensor intrínseco.	5
Figura 4. Sensor de Intensidad .	6
Figura 5. Sensor de fase o interferométrico.	6
Figura 6. Sensor de polarización .	7
Figura 7. Experimento de John Tyndall.	16
Figura 8. Sección transversal y frontal de una fibra óptica monomodo.	17
Figura 9. Fenómeno de reflexión y refracción al incidir un haz de luz de un medio a otro con diferente índice de refracción.	18
Figura 10. Comportamientos del haz a diferentes ángulos de incidencia, donde: (a) $\theta_i < \theta_c$, (b) $\theta_i = \theta_c$ y c) $\theta_i > \theta_c$.	18
Figura 11. Ondas de dos fuentes puntuales superpuestas espacialmente.	19
Figura 12. Dos ondas en fase formando interferencia constructiva total y dos ondas desfasadas 180° formando interferencia destructiva total.	21
Figura 13 . Ondas circulares formadas al caer un objeto pequeño en un estanque de agua tranquila.	22
Figura 14. Interferómetro Mach-Zehnder.	23
Figura 15. Interferómetro Sagnac.	24
Figura 16. Interferómetro de Michelson.	25
Figura 17. Interferómetro Fsbry-Perot.	25
Figura 18. Arreglo experimental para la caracterización del láser semiconductor.	29
Figura 19. Caracterización diodo laser.	30
Figura 20. Fluorescencia de la fibra dopada con erbio.	31
Figura 21. Arreglo experimental para la caracterización de la EDFA.	32
Figura 22. Caracterización de la amplificación con un EDFA con una fuente de bombeo de 980nm.	32
Figura 23. Esquema de un circulador óptico de cuatro puertos con sus entradas y salidas .	33
Figura 24. Diagrama de un circulador óptico con cuatro puertos de lente de fibra, cuatro placas birrefringentes, dos divisores de polarización, dos prismas reflectivos, un rotador de Faraday y un rotador óptico activo .	34
Figura 25. Seccion transversal de una fibra óptica monomodo .	35

Figura 26. Procedimiento para realizar un empalme Core-Offset entre dos fibras SMF-28.....	36
Figura 27. Imágenes tomadas del empalme Core-Offset realizado con una empalmadora manual, (a) Imagen antes de aplicar la descarga eléctrica y (b) Imagen después de aplicar la descarga eléctrica.	37
Figura 28. Procedimiento para realizar un empalme tipo burbuja entre dos fibras SMF-28.....	38
Figura 29. Imágenes tomadas del empalme tipo burbuja realizado con una empalmadora manual, , (a) Imagen antes de la descarga y (b) Imagen después de la descarga	39
Figura 30. Equivalente Interferómetro Michelson todo de fibra óptica	40
Figura 31. Equivalente FPI todo de fibra óptica	40
Figura 32. Reflexión y refracción de ondas planas en una interfaz óptica	41
Figura 33. Interferómetro tipo Michelson de fibra óptica con empalme Core-Offset.	43
Figura 34. Interferómetro tipo Michelson de fibra óptica con empalme de burbuja.	43
Figura 35. Interferómetro tipo Michelson de fibra óptica con reflector al final. Con (a) empalme Core-Offset y (b) empalme Burbuja.....	44
Figura 36. Oblea de silicio.....	44
Figura 37. Contraste de franja máximo en patrón de interferencia.	50
Figura 38. Arreglo experimental para obtener el patrón de interferencia de interferómetros fabricados.....	52
Figura 39. Patrón de interferencia de interferómetro Int10, a) sin reflector y b) con reflector.....	54
Figura 40. Patrón de interferencia de interferómetro Int11, a) sin reflector y b) con reflector.....	56
Figura 41. Patrón de interferencia de interferómetro Int12, a) sin reflector y b) con reflector.....	57
Figura 42. Patrón de interferencia de interferómetro Int16, a) sin reflector y b) con reflector.....	59
Figura 43. Patrón de interferencia de interferómetro Int19, a) sin reflector y b) con reflector.....	60
Figura 44. Patrón de interferencia de interferómetro Int211, a) sin reflector y b) con reflector.....	61
Figura 45. Patrón de interferencia de interferómetro IntA2, a) sin reflector y b) con reflector.....	64

Figura 46. Patrón de interferencia de interferómetro IntA3, a) sin reflector y b) con reflector.....	65
Figura 47. Patrón de interferencia de interferómetro IntA5, a) sin reflector y b) con reflector.....	67
Figura 48. Patrón de interferencia de interferómetro IntA6, a) sin reflector y b) con reflector.....	68
Figura 49. Patrón de interferencia de interferómetro IntB1, a) sin reflector y b) con reflector.....	70
Figura 50. Patrón de interferencia de interferómetro IntB2, a) sin reflector y b) con reflector.....	71
Figura 51. Patrón de interferencia de interferómetro IntB3, a) sin reflector y b) con reflector.....	73
Figura 52. Patrón de interferencia de interferómetro IntBD1, a) sin reflector y b) con reflector.....	74
Figura 53. Arreglo experimental para la detección de temperatura.	75
Figura 54. Celda Peltier	76
Figura 55. Control de temperatura.....	76
Figura 56. a) Parte superior del control de temperatura con la celda Peltier color blanco, b) reflector montado en el soporte, c) montaje de interferómetro y reflector sobre el control de temperatura.	77
Figura 57. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntB1 a 1530 nm utilizando el reflector. a) Corrimiento de franjas, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm).	79
Figura 58. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntB1 a 1550 nm utilizando el reflector. a) Corrimiento de franjas, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm) y c) Comportamiento °C contra Potencia de salida (dBm) ..	81
Figura 59. Espectro obtenido de la caracterización del interferómetro IntA3.	82
Figura 60. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntA3 en el pico P1 a 1550 nm utilizando el reflector. a) Corrimiento de franjas, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm).	83
Figura 61. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntA3 en el pico P3 a 1534 nm utilizando el reflector. a) Corrimiento de franjas, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm).	85
Figura 62. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntA3 en el pico P4 a 1574 nm utilizando el reflector. a) Corrimiento de franjas, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm).	86

Figura 63. Espectro obtenido de la caracterización del interferómetro IntBD1 sin reflector.....	87
Figura 64. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntBD1 en el P1 sin el reflector. a) Corrimiento de franjas en Int BD1, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm)	88
Figura 65. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntBD1 en el P2 sin el reflector. a) Corrimiento de franjas en Int BD1, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm).	90
Figura 66. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntBD1 utilizando el reflector. a) Patrón de interferencia, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm).	91

Capítulo I:

Introducción

1.1 Introducción General.

El hombre siempre ha tenido la necesidad de estar en constante comunicación con los demás, debido a esto, durante los últimos años, utilizó la luz como forma de comunicación a larga distancia, por medio de fogatas, antorchas, hogueras, faros, linternas, etc. [1]. En años recientes, la luz ha tenido una gran importancia en las telecomunicaciones, ya que la demanda de transmitir grandes cantidades de información ha aumentado con los años, lo que hace que transferir datos por medio del uso de fibra óptica sea la mejor opción sobre otros medios convencionales. Por otra parte, se han encontrado diversos beneficios del uso de las fibras ópticas, por ejemplo: tiene una mayor capacidad de transmisión que la comunicación por ondas de radio y microondas, la transmisión de datos puede ser bidireccional, cuentan con una alta flexibilidad, tienen la capacidad de transmitir en largas distancias con bajas pérdidas, son inmunes al ruido electromagnético, tienen mayor ancho de banda, son de peso y tamaño reducido, tienen bajo costo, etc. [2-3].

1.1.1 Tipos de fibras ópticas.

Las fibras ópticas hoy en día se aplican para la transmisión directa (a corta distancia), proporcionan una gama de guías de ondas y sirven como núcleo de una nueva familia de sensores. En las telecomunicaciones ha empezado a reemplazar los cables de cobre y la electricidad como vía de transmisión de datos [4].

Existen diversos tipos de fibras ópticas las cuales se pueden dividir o clasificar dependiendo de sus características ópticas y geométricas; se pueden clasificar acorde el perfil de índice de refracción variable o constante, también dependiendo del número de modos que pueden transmitir, en este caso existen fibras monomodo o

multimodo, también se pueden clasificar por los tipos de materiales con lo que están hechas, estas pueden estar dopadas con tierras raras (Erbio, Iterbio, etc.).

Las configuraciones importantes de fibras ópticas son:

- Fibra de salto de índice. Cuenta con un núcleo de entre 50 y 150 micrómetros o más y con un revestimiento cuyo diámetro esta entre 100 y 250 micrómetros. Su núcleo comparativamente grande hace que sea resistente y fácil de introducirle la luz además de poderse adaptar y acoplar sin problemas. Es la menos costosa pero también la menos eficaz con inconvenientes para aplicaciones a largo alcance (Figura 1a) [4].
- Fibra de gradiente de índice multimodo. Según el ángulo de incidencia, pueden existir miles de trayectorias de rayos o modos diferentes de propagación en el núcleo y por lo tanto un tiempo de transito ligeramente distinto. Los rayos con ángulos más elevados se desplazan a lo largo de caminos más largos, estos tardan más en alcanzar el extremo de la fibra que los rayos que se mueven a lo largo del eje, a esto se le llama dispersión intermodal. Este problema de las diferencias de retraso puede reducirse variando gradualmente el índice de refracción del núcleo, disminuyendo radialmente hacia el exterior hasta el revestimiento. En lugar de seguir caminos en zigzag pronunciados, los rayos podrán moverse en espiral alrededor del eje central. El índice es más elevado a lo largo del centro, los rayos que escogen caminos más cortos, disminuyen la velocidad en cantidades proporcionalmente más elevadas mientras que los que viajan cerca del revestimiento se desplazan más rápidamente en caminos más largos. (Figura 1b) [4].
- Fibra mono modo. Cuenta con un núcleo pequeño (menos de 10 micrómetros) que proporciona un solo modo de propagación según el cual los rayos pueden viajar paralelamente al eje central eliminando la dispersión intermodal (Figura 1c) [4].

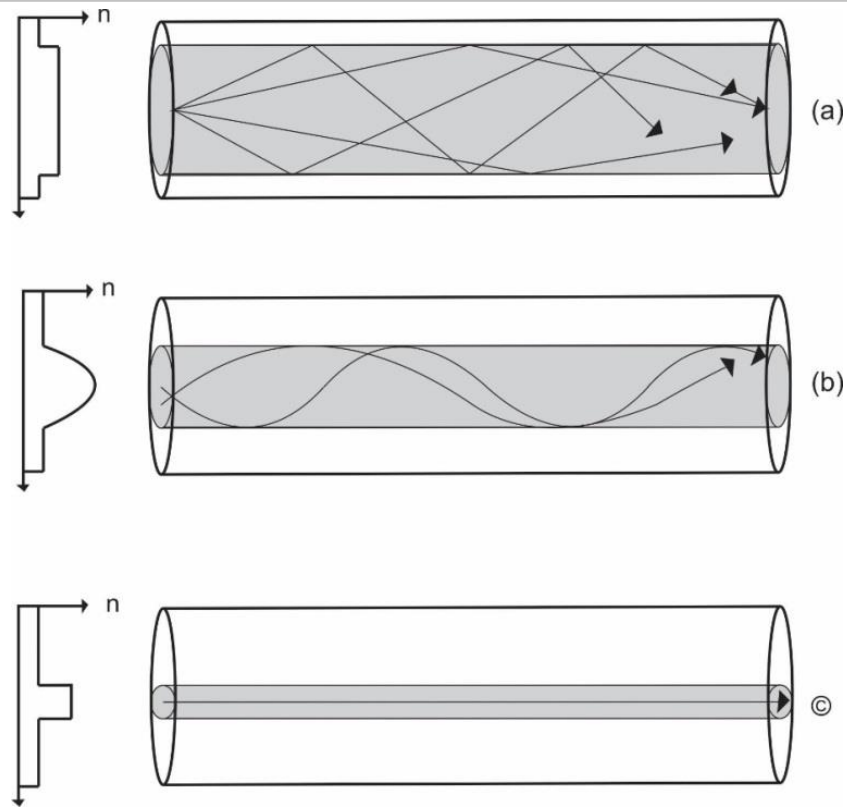


Figura 1. Distintas configuraciones de fibras ópticas y su perfil de índice de refracción. , (a) Fibra de salto de índice multimodo, (b) Fibra de índice graduado multimodo y (c) Fibra de salto de índice monomodo [4].

1.1.2 Fibra óptica dopada.

Las fibras ópticas pueden ser dopadas con tierras raras para ser utilizadas como amplificadores ópticos. Los elementos dopantes utilizados comúnmente son: el holmio (Ho), neodimio (Nd), samario (Sm), tulio (Tm), iterbio (Yb) y erbio (Er) [5]. Para este trabajo de tesis se utilizó como amplificador óptico una fibra dopada con erbio (EDFA, Erbium-doped fiber amplifier) ya que puede amplificar la señal a una longitud de onda cercana a los 1550 nm, que es la más utilizada y donde menos pérdidas hay en telecomunicaciones. En la amplificación con fibra óptica no se requieren de circuitos electrónicos para amplificar la señal. La señal se amplifica ópticamente de forma simple a medida que atraviesa el amplificador [6]. La amplificación con un EDFA es mediante la emisión estimulada, en donde una fuente de bombeo proporciona la energía necesaria para pasar los átomos dopantes del estado base (es el estado normal del átomo cuando no es perturbado) al estado

excitado. A esta acción se le llama inversión de población. Los sistemas de bombeo que se utilizan proporcionan luz con longitudes de onda de 980nm o 1480 nm [7].

Las ventajas de los amplificadores ópticos de fibra son diversas, por ejemplo, pueden transmitir simultáneamente sin necesidad de modificar el canal de transmisión, la potencia de la señal en diferentes longitudes de onda puede ser impulsada simultáneamente por un mismo amplificador y permite el trabajo en sistemas de multiplexión de longitud de onda [8].

Por otra parte, el desarrollo de sensores de fibra óptica es una alternativa que presenta varias ventajas sobre los sensores eléctricos convencionales; entre las ventajas de los sensores de fibra son: tamaño pequeño, alta sensibilidad con inmunidad a la interferencia electromagnética, una fácil fabricación, por su tamaño y bajo peso tienen una gran facilidad de adaptabilidad a diferentes ambientes de monitoreo como en el campo, la industria farmacéutica, alimentaria, química, etc. Por lo cual pueden medir una amplia gama de parámetros físicos y químicos como torsión, tensión, compresión, curvatura, cambio de índice de refracción, PH, viscosidad, humedad, vibraciones, presión, rotación, aceleración, temperatura, etc. [9-13]. Algunas desventajas que tienen los sensores de fibra óptica por ejemplo son: altos costos, sistemas de detección complejos y costosos, el desarrollo de sistemas de medición utilizables es complejo, falta de familiaridad con el usuario final, etc. [14].

1.1.3 Sensores de fibra óptica.

Los sensores de fibra óptica son clasificados en dos grupos, en extrínsecos e intrínsecos dependiendo de la modificación del haz de luz que pasa a través de ellos respecto a los cambios de su entorno. En un sensor extrínseco (Figura 2), la fibra solo guía el haz de luz al elemento sensor óptico, este es externo a la fibra, en donde se modula el haz de luz dependiendo de los efectos de los cambios de su entorno [13] [15].

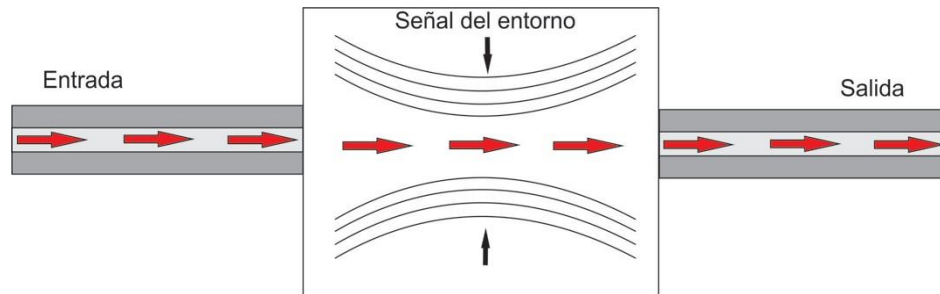


Figura 2. Sensor extrínseco.

En un intrínseco (Figura 3), la fibra además de ser la guía del haz de luz también es el elemento sensor, donde el haz de luz se modula directamente por los cambios de su entorno sin abandonar la fibra [13] [15].

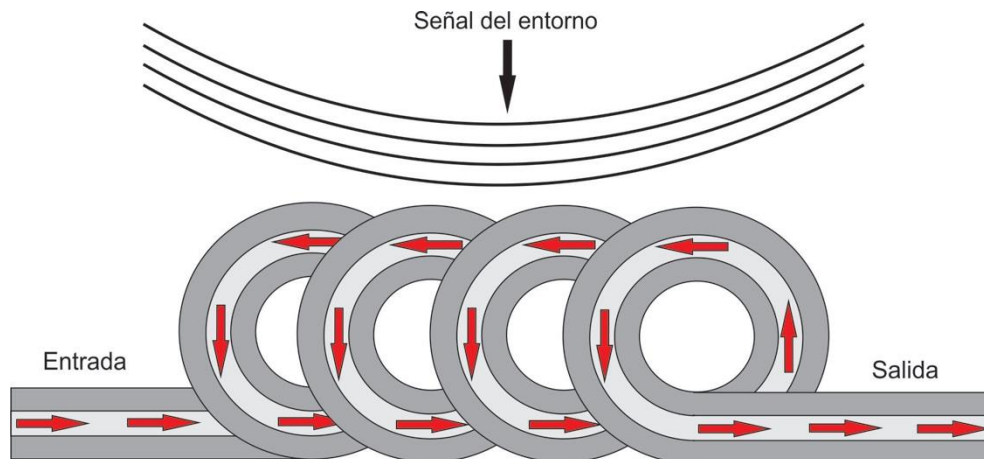


Figura 3. Sensor intrínseco.

Los sensores de fibra óptica se pueden dividir de acuerdo a su principio de operación. Por ejemplo: sensores de intensidad, de fase o interferométricos y de polarización [16].

Los sensores de intensidad (Figura 4) se basan en la atenuación de la señal mediante la absorción o la dispersión frente a un objetivo [17-18].

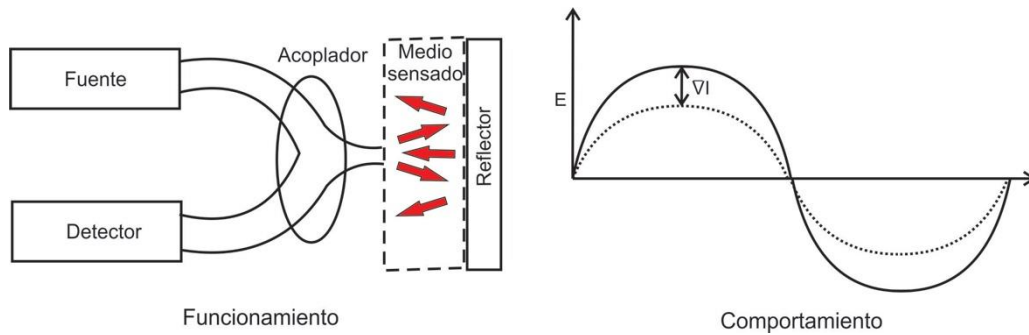


Figura 4. Sensor de Intensidad [17-18].

Los sensores de fase o interferométricos (Figura 5) usan la interferencia de dos haces de luz coherentes que se propagan por diferentes caminos ópticos en donde uno de ellos es el camino de referencia y el otro es el camino sensor provocando un desfase entre las señales de acuerdo al parámetro medido. Estos sensores pueden estar contruidos por interferómetros como: Fabry-Perot (FPI, Fabry-Perot Interferometer), Mach-Zehnder (MZI, Mach - Zehnder Interferometer), Sagnac (SI, Sagnac Interferometer), Michelson (MI, Michelson Interferometer), etc. Para este trabajo de tesis se utilizó un interferómetro tipo Michelson (MI) [3] [18].

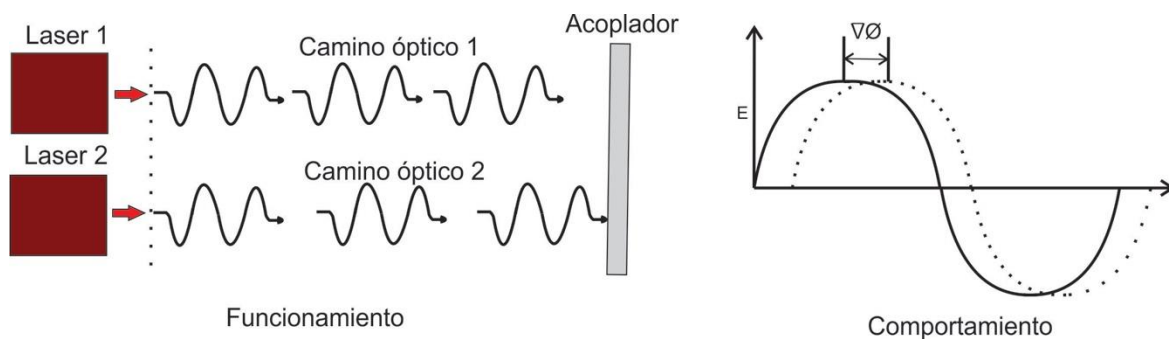
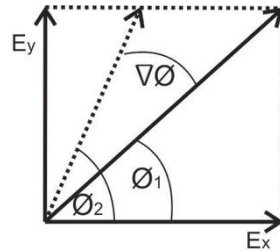


Figura 5. Sensor de fase o interferométrico [17-18].

Los sensores de polarización se basan en el cambio de estado de polarización de la luz. Las fibras sometidas a estrés o tensión tienden a cambiar el índice de refracción y por lo tanto existe una diferencia de fase entre las diferentes direcciones de polarización del campo eléctrico (Figura 6.) [17-18].



Comportamiento

Figura 6. Sensor de polarización [17-18].

1.2 Antecedentes.

En los últimos años se han investigado y desarrollado ampliamente los sensores de fibras ópticas, ya que presentan características únicas como multiplexado, detección remota, detección simultánea, alta flexibilidad, alta sensibilidad, etc. [3]. Estos atributos los hacen muy atractivos para gran variedad de aplicaciones. Estos mismos van mejorando cada vez más con el desarrollo de nuevas formas de detección utilizando rejillas de fibra, fibras micro estructuradas, nanohilos, interferómetros de fibra óptica, etc. [3]. Algunos de los sensores desarrollados en años recientes están basados en su mayoría en interferómetros de fibra óptica, por ejemplo, se reportó un sensor de torsión desarrollado con un interferómetro Mach-Zehnder con sección de fibra desplazada con dispersión (NZ-DSF, Non-Zero Dispersion Shifted Fiber), empalmada por fusión core-offset entre dos segmentos de fibra mono modo (SMF, Single Mode Fiber) con una sensibilidad de 0.070 nm° [9]. Para la medición esta misma variable, otro sensor basado en un MZI fabricado con fibra de cristal fotónica de doble revestimiento dopada con Iterbio (Yb-d-DPCF, Ytterbium doped Double cladding Photonic Crystal Fiber), se desarrolló con una estructura de Yb-d-DPCF empalmada entre dos segmentos de fibra mono modo (SMF). En este arreglo, el segmento Yb-d-DPCF, está actuando como el MZI y el medio de ganancia, teniendo una sensibilidad de 0.001 nm° [10].

En este orden de ideas, para la detección de temperatura, fue propuesto un sensor basado en un láser de anillo de fibra. Como cabeza del sensor, se utilizó una rejilla de fibra de Bragg y un MZI como filtro selectivo para mejorar la detección. El

interferómetro cuenta con fibra fotónica de cristal empalmada entre dos segmento de fibra mono modo logrando así una sensibilidad de $18.8\text{pm}/^\circ\text{C}$ en un rango de 20 a 90°C [11]. Un sensor desarrollado para humedad basado en un MZI formado por un segmento de fibra multimodo empalmado entre dos fibras mono modo, logró obtener una sensibilidad de $-0.119\text{ dB}/\% \text{ RH}$ en un rango de $35\text{-}90\% \text{ RH}$ [12].

Entre los sensores reportados para la medición de índice de refracción se encuentra un sensor basado en un MZI, realizado mediante la concatenación de dos conos juntos de fibra ultra abrupta, consiguiendo una sensibilidad de $664.57\text{nm} / \text{RIU}$ para un rango de índice de refracción de 1.3348 a 1.3858 [19]. Otro sensor con un MZI asimétrico fue fabricado mediante la concatenación de una sección de SMF reducida abruptamente y un empalme core-offset [2]. También se fabricó un sensor ultra compacto y de alta sensibilidad para medir índice de refracción, logrando una sensibilidad de $1100\text{nm}/\text{RIU}$. El MZI fue realizado usando una nanofibra con diámetro de 700nm [20]. Otro sensor para índice de refracción fabricado por empalme core-offset con una estructura SMF-SMF-SMF, obtuvo una sensibilidad de $78.7\text{nm}/\text{RIU}$ en un rango de 1.333 a 1.374 [21].

Se propuso un sensor capaz de medir simultáneamente índice de refracción y temperatura en un rango de 1.3325 a 1.3720 y $22\text{-}82^\circ\text{C}$ respectivamente, utilizando un MZI una estructura de empalme de SMF-MMF-TAPER-MMF-SMF [22]. Se presenta un sensor de temperatura basado en un interferómetro con fibra multimodo sin núcleo sellado en líquido. Su operación consiste en que la variación de temperatura hace cambiar el índice de refracción del líquido y por lo tanto hace cambiar el espectro de salida. Este sensor obtuvo una sensibilidad de $5.15\text{nm}/^\circ\text{C}$ [23]. Un sensor de temperatura con un MZI construido con fibra SMF-28 fue realizado y caracterizado en un rango de temperatura de 23° a 50°C [24]. Un MZI para temperatura fabricado con un tipo de fibra Kagomé-lattice hollow-core photonic cristal fiber (HC-PCF) que contiene un núcleo central de aire, logró una sensibilidad de $23.3\text{ pm}/^\circ\text{C}$ [25]. Otro MZI propuesto como sensor para medir

índice de refracción y temperatura fabricado con (MMF) empalmada con una fibra multi núcleo (MCF) y éstas dos a su vez empalmadas entre dos fibras SMF, donde el empalme SMF-MCF esta desalineado axialmente, logró una sensibilidad de temperatura y de índice de refracción de 52.3 pm/°C y 11.22 dB/RI respectivamente [26]. Un interferómetro tipo Michelson (MI) propuesto como sensor de temperatura fue construido con fibra convencional SMF. Su empalme fue realizado con un segmento de fibra con corte modificado por pre fusión con descarga eléctrica. A este segmento se le introdujo una microcurvatura en su extremo, ocasionando una desalineación entre los núcleos al ser empalmados con alineación axial. Se reportó para este sensor un rango de medición de 55° a 600°C con una sensibilidad de 115.34 pm/°C [27]. Otro sensor propuesto para medir índice de refracción y temperatura basado en el interferómetro MI, este cuenta con una acoplador de 3 dB 2 x 2 y una sección de fibra de alta birrefringencia que sirve como elemento sensor. Este sensor logro tener una sensibilidad de -30.1 dB/RIU y -1.057nm/ ° [28]. Es propuesto un sensor para altas temperaturas basado en un MI fabricado con fibra de zafiro. Al enviar una onda modulada por microondas a este interferómetro, se reconstruye un espectro de interferencia de alta calidad en el dominio de microondas. Este sensor se reportó con una buena sensibilidad, reversibilidad y estabilidad en un rango de medición de 100 a 1400C° [29]. Un MI propuesto como sensor de temperatura fue fabricado con una ranura estrecha e inclinada dentro de una fibra monomodo, que cumple la función de divisor y acoplador de haz. Este dispositivo es de tamaño ultra compacto, robusto en resistencia mecánica. Este sensor tiene una buena estabilidad a altas temperaturas hasta 1000C° [30]. Un interferómetro MI con SMF empalmado con fibra dopada con Germanio (Ge-Fiber) por medio de un taper es propuesto como sensor de temperatura. Se reportó una sensibilidad de 100 pm/C° dentro de un rango de medición de 30 a 400C° [31]. Un sensor de humedad fabricado por un empalme ensanchado cubierto por quitosano hidroespápico. La sensibilidad alcanzada reportada es de 135 pm/% [33].

1.3 Objetivo.

1.3.1 Objetivo General.

Fabricar, caracterizar e implementar un interferómetro intermodal tipo Michelson para ser propuesto como sensor de la variable física de temperatura.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Fabricar interferómetros tipo Michelson por medio de las técnicas “Core-Offset” y de “burbuja”, de distintas longitudes.
- Caracterizar los interferómetros fabricados en condiciones de referencia y frente a variaciones controladas de temperatura.
- Realizar un análisis del comportamiento modal de los distintos dispositivos, sometiendo los espectros obtenidos a la Transformada Rápida de Fourier.

1.4 Hipótesis.

Sensar el efecto físico de temperatura basada en interferómetros intermodales tipo Michelson implementada con fibras monomodo como elemento principal.

1.5 Justificación

Uno de los parámetros físicos más medidos con frecuencia es la temperatura. Los cambios de temperatura pueden ser indicadores de cambios físicos que ocurren en otros parámetros de interés, como torsión, presión, desplazamientos, etc. La medición en tiempo real de los cambios de temperatura puede ayudar a detectar o prevenir daños a sistemas de diferentes categorías por sobrecalentamiento. Por esta razón, el monitoreo de temperatura en diversos equipos es muy importante para tener un óptimo funcionamiento.

En muchas aplicaciones es necesario monitorear temperatura en presencia de condiciones poco favorables para los sensores térmicos convencionales como termopares, termistores, detectores de temperatura por resistencia (RTD), etc. Por ejemplo, en algunas aplicaciones médicas deben funcionar junto a conjuntos de

equipo de imagen de resonancia magnética y tomografía computarizada que ocasionan campos electromagnéticos fuertes. Los sensores convencionales con cables metálicos en dichos entornos tendrían inexactitudes en sus mediciones por presencia de ruido electromagnético, en cambio, los sensores ópticos de fibra no lo tendrían ya que son inmunes a las perturbaciones electromagnéticas [33]. También los sensores ópticos son ideales para ambientes corrosivos ya que no presentan elementos metálicos. En entornos inflamables, por su ausencia de corriente eléctrica, son adecuados ya que no pueden generar chispa.

El interferómetro tipo Michelson presentado en este trabajo de tesis, es un interferómetro que a diferencia de otros interferómetros, por ejemplo el Mach-Zehnder, funciona por reflexión y no por transmisión, lo que lo convierte en un sensor ideal para entornos peligrosos en donde la medición debe ser remota; en la medición de temperatura de hornos de todas clases o en equipos de soldadura automatizada de la industria manufacturera; también en el monitoreo de contenedores o ductos de sustancias peligrosas de la industria petroquímica.

Los sensores de temperatura de fibra óptica tienen una amplia gama de aplicaciones en diversos tipos de industrias, por esta razón, existe una gran área de oportunidad para desarrollar, mejorar e implementar nuevas técnicas de fabricación y detección.

El interferómetro Michelson es de una fácil y sencilla fabricación con muy bajo costo, lo que lo hace una buena opción para ser implementado como sensor de temperatura, ya que cuenta con todas las ventajas mencionadas de los sensores de fibra óptica descritas anteriormente.

Por estas razones surge el interés de estudiar y diseñar un sensor de temperatura hecho todo de fibra óptica utilizando fibra convencional monomodo (SMF) ya que es una fibra sencilla, accesible y relativamente de bajo costo.

El objetivo de este trabajo de tesis es implementar como sensor de temperatura un tipo de interferómetro (Michelson) que ha sido poco desarrollado, elaborándolo con

técnicas de fabricación sencillas como core-offset y burbuja, para poder detectar rangos de temperatura no muy altos, con buena sensibilidad y que sea lineal.

1.6 Organización.

- Capitulo II.

En este capítulo se presenta el marco teórico con los conceptos más relevantes y necesarios para la comprensión de este trabajo de tesis. Posteriormente se mostrara la fabricación y funcionamiento de los interferómetros.

- Capitulo III.

En esta sección se presenta las técnicas de fabricación de los interferómetros así como sus principios de operación. Posteriormente se mostrara sus caracterizaciones.

- Capitulo IV.

En este capítulo se presenta los patrones de interferencia generados por los diferentes interferómetros fabricados, su análisis por la transformada rápida de Fourier y su comportamiento al ser caracterizados con temperatura.

- Capitulo V.

En este último capítulo se presenta las conclusiones y trabajos a futuro sobre este trabajo de tesis.

Referencias

- [1] John Crisp, “Introduction to Fiber Optics”, Newnes, 2001.
- [2] G. L. Yin, S. Q. Lou, H. Zou, "Refractive index sensor with asymmetrical fiber Mach–Zehnder interferometer based on concatenating single-mode abrupt taper and core-offset section", *Opt. Laser Technol.*, vol. 45, pp. 294-300, Feb. 2013.
- [3] B.H. Lee, Y.H. Kim, K.S. Park, J.B. Fom, M.J. Kim, B.S. Rho, H.Y. Choi, “Interferometric fiber optic sensors”, *Sensors* 2012, 12, 2467–2486.
- [4] E. Hecht and A. Zajac, *Optics* (Addison-Wesley, Iberoamericana, 2000).
- [5] Lopez Dieguez Yanelis, “Fabricación de un interferómetro de fibra optica para su implementacion como sensor”, Tesis para el grado de Maestro en Ingenieria Electrica, Universidad de Guanajuato, México, 2015.
- [6] P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, “Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology”. New York: Academic, 1999.
- [7] D. Bailey and E. Wright, “Practical Fiber Optics”, ButterworthHeinemann, 2003.
- [8] M. Bass and E. W. Van Stryland, *Fiber Optics Handbook: Fiber, Devices, and Systems for Optical Communications* (McGraw-Hill, 2002).
- [9] E. Huerta-Mascotte et al., "A core-offset Mach–Zehnder interferometer based on a non-zero dispersion-shifted fiber and its torsion sensing application", *Sensors*, vol. 16, no. 6, pp. 856, Jun. 2016.
- [10] J. M. Sierra-Hernandez et al., "Torsion sensing setup based on a three beam path Mach–Zehnder interferometer", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 57, no. 8, pp. 1857-1860, Aug. 2015.
- [11] M. A. Gonzalez-Reyna et al., "Laser temperature sensor based on a fiber Bragg grating", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 27, no. 11, pp. 1141-1144, Jun. 2015.
- [12] M. Shao, X. Qiao, H. Fu, H. Li, J. Zhao, Y. Li, "A Mach–Zehnder interferometric humidity sensor based on waist-enlarged tapers", *Opt. Laser Eng.*, vol. 52, pp. 86-90, Jan. 2014.
- [13] Francis T.S. Yu and Shizhuo Yin, Eds, “Fiber Optic Sensors: optical engineering”, Mercel Dekker Inc., 2002.

- [14] S. Thakral, P. Manhas, “Fiber optic sensors technology and their applications”, *International Journal on Electronics and Communication Technology*, 2 (2) pp. 126-128 (2011).
- [15] Optical Fiber Sensor: An Overview.
<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/29100.pdf>
- [16] X. Li, C. Yang, S. Yang, G. Li, “Fiber-optical Sensors: Basics and Applications in Multiphase”, *Reactors. Sens.* 2012, 12(9), 12519–12544.
- [17] K. Fidanboyly, H.S. Efendioglu, “Fiber Optic Sensors and Their Applications”, In *Proceedings of 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS’09)*, Karabuk, Turkey, 13–15 May 2009.
- [18] D. A. Krohn, “Fiber Optic Sensors: Fundamental and Applications”, *Instrument Society of America*, Research Triangle Park, North Carolina, 1988.
- [19] B. Li, L. Jiang, S. Wang, J. Yang, M. Wang, and Q. Chen, “High sensitivity Mach-Zehnder interferometer sensors based on concatenated ultra-abrupt tapers on thinned fibers,” *Opt. Laser Technol.* 44(3), 640–645 (2012).
- [20] L. Li, X. Li, Z. Xie, Z. Liao, F. Tu, D. Liu, “Simultaneous measurement of refractive index and temperature using thinned fiber based Mach-Zehnder interferometer” *Opt. Commun.* 2012, 285, 3945–3949.
- [21] H. Q. Yu, L. B. Xiong, Z. H. Chen, Q. G. Li, X. N. Yi, Y. Ding, F. Wang, H. Lv, and Y. M. Ding, “Ultracompact and high sensitive refractive index sensor based on Mach-Zehnder interferometer,” *Opt. Lasers Eng.* 56, 50–53 (2014).
- [22] Y. Zhao, X-G. Li, L. Cai, “High sensitive Mach-Zehnder interferometric refractive index sensor based on core-offset single mode fiber”, *Sens, Actuators A* 2015, 223, 119–124.
- [23] P. Hu, Z. Chen, M. Yang, J. Yang, C. Zhong, “Highly sensitive liquid-sealed multimode fiber interferometric temperature sensor”, *Sens, Actuators A Phys*, 2015, 223, 114–118.
- [24] R. Peñaloza-Delgado, R. M. Sierra-Hernández, E. Pacheco-Chacón, L. J. Cuchimaque-Lugo and E. Hernández-Rodríguez, "Temperature sensor based on a

- core-offset Mach-Zehnder interferometer with single mode fiber," 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, 2017, pp. 1-2.
- [25] H. Yu, Y. Wang, X. Jiang, X. Cheng, J. Ma and Y. Zheng, "All fiber Mach-Zehnder interferometer for temperature sensing based on Kagome hollow-core photonic crystal fiber," 2017 IEEE SENSORS, Glasgow, 2017, pp. 1-3.
- [26] H. Yi-Hui, X. Guo, M. Min, S. Si-Mei, G. Xiao-Shan, L. Ji-Bing, J. Chao, "Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer," 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Wuzhen, 2017, pp. 1-3.
- [27] H. Cao and X. Shu, "Miniature all-fiber high temperature sensor based on Michelson interferometer formed with a novel core-mismatching fiber joint," IEEE Sensors J., vol. 17, no. 11, pp. 3341–3345, Jun. 2017.
- [28] J. Zhang et al., "Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a Michelson fiber interferometer with a Hi-Bi fiber probe," IEEE Sens. J., vol. 13, no. 6, pp. 2061–2065, Jun. 2013.
- [29] J. Huang, X. Lan, Y. Song, Y. Li, L. Hua, and H. Xiao, "Microwave interrogated sapphire fiber Michelson interferometer for high temperature sensing," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 27, no. 13, pp. 1398–1401, 2015.
- [30] Y. Liu and D. N. Wang, "Fiber in-line Michelson interferometer based on inclined narrow slit crossing the fiber core," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 30, no. 3, pp. 293–296, Feb. 1, 2018.
- [31] L. Bao, X. Dong, P. P. Shum, C. Shen, "Compact Temperature Sensor With Highly Germania-Doped Fiber-Based Michelson Interferometer", Sensors Journal IEEE, vol. 18, no. 19, pp. 8017-8021, 2018.
- [32] X. Y. Dong and P. Hu, "Optical fiber humidity sensor based on michelson interferometric structures," in Proc. Int. Conf. Adv. Infocomm Technol., 2013, pp. 116–117.
- [33] K. A. WICKERSHEIM and R. B. ALVES, 'Recent advances in optical temperature measurement', Ind. Res./Dev., 1979, pp. 82-89.

Capítulo II: Marco Teórico

2.1 Introducción.

En el siglo XIX el físico Irlandés John Tyndall descubrió que la luz se podía transmitir a través del agua. Su descubrimiento fue demostrado con un experimento que consistía en iluminar un recipiente con agua, el cual tenía un pequeño orificio inferior por donde se escapaba y generaba un chorro de agua (Ver, Figura 7). Se observó que la luz viajaba a través y a lo largo de él, hasta llegar al sitio de impacto siguiendo una trayectoria curva provocada por la gravedad [1].

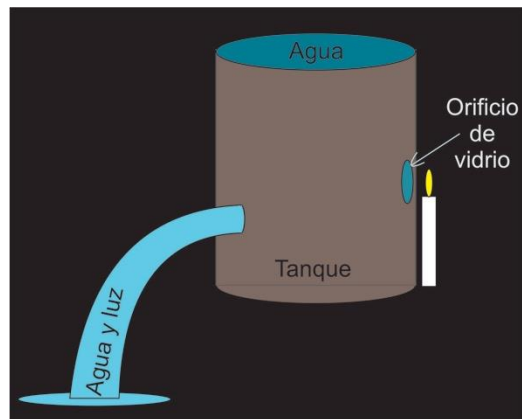


Figura 7. Experimento de John Tyndall.

Un siglo después, el físico Narinder Singh Kapany, en apoyo de los estudios de Tyndall, realizó experimentos que condujeron al desarrollo de la fibra óptica ya que trabaja bajo este mismo fenómeno físico conocido como reflexión interna de la luz [2].

La fibra óptica consiste en dos regiones concéntricas, una llamada núcleo (región interior) y la otra llamada revestimiento (región exterior) (Ver Figura 8). Estas regiones están hechas de cuarzo o plástico, en donde el índice de refracción (n_1) del núcleo es mayor que el del revestimiento.

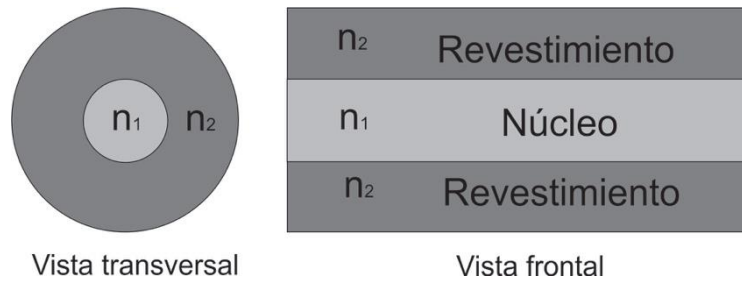


Figura 8. Sección transversal y frontal de una fibra óptica monomodo.

Con estas características, el principio de operación de la fibra óptica consiste en que el haz de luz incidente dentro y en un extremo de la fibra, podrá viajar a través de ella reflejándose internamente en el límite entre el núcleo y el revestimiento hasta salir al otro extremo [3].

En la transmisión de la luz ocurren dos fenómenos físicos, la reflexión y la refracción. La reflexión es la desviación o cambio de dirección del haz de luz que incide en la superficie del medio. La refracción es el cambio de dirección y velocidad del haz de luz al pasar de un medio a otro con diferentes índices de refracción como se puede apreciar en la figura 9. La velocidad de la luz depende del material por donde viaja.

En el vacío, la luz tiene una velocidad constante máxima, pero cuando pasa a través de un material transparente, se ralentiza en una cantidad dependiente de una propiedad del material llamado índice de refracción (n). El índice de refracción del medio es la relación entre la velocidad de la onda luminosa en el vacío y la velocidad de la onda luminosa propagada en el medio (Ecuación 2.1.1) [3].

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1.1)$$

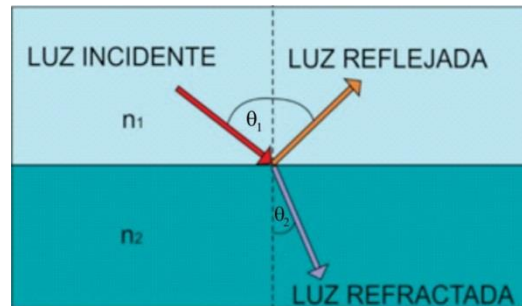


Figura 9. Fenómeno de reflexión y refracción al incidir un haz de luz de un medio a otro con diferente índice de refracción.

Dependiendo del ángulo de incidencia del haz, éste tendrá un comportamiento y dirección diferente. El ángulo crítico es el ángulo de incidencia del haz en donde este no se refracta y viaja a través del límite entre los dos medios de propagación. Si el ángulo de incidencia es menor que el ángulo crítico, se tendrá un haz dividido, donde una parte se refractará y la otra se reflejará (Figura 10 (a)). Si el ángulo de incidencia es igual al ángulo crítico, el haz viajara a lo largo del límite entre el medio con índice de refracción uno (n_1) y el medio con índice de refracción dos (n_2) (Figura 10 (b)). Por último, cuando el ángulo de incidencia es mayor al ángulo crítico, se produce un comportamiento de reflexión interna total (Figura 10 (c)). El comportamiento de refracción se da por la ley de Snell, Ecuación 1.2.1 [4]. En la figura 10, si $n_1 > n_2$, se cumple la ecuación de Snell para tener reflexión interna total.

$$n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}\theta_2 \quad (2.1.2)$$

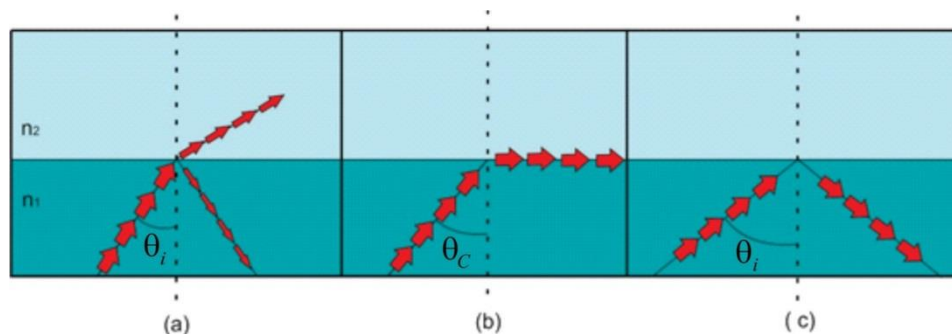


Figura 10. Comportamientos del haz a diferentes ángulos de incidencia, donde: (a) $\theta_i < \theta_c$, (b) $\theta_i = \theta_c$ y (c) $\theta_i > \theta_c$.

2.2 Interferometría.

La irradiancia se puede decir que es la cantidad de luz en una superficie o la cantidad de energía en un área por unidad de tiempo. La interferometría es el fenómeno que resulta de la interferencia que tienen dos o más ondas de luz que producen una irradiancia resultante que se desvía de la suma de las irradiancias componentes [4]. Cuando dos ondas separadas llegan al mismo sitio en donde se superponen, simplemente se suman o se restan algebraicamente en cada punto de la zona de superposición. Después de que pasen la zona de superposición, cada onda saldrá y se alejará sin alguna alteración.

En el análisis de este fenómeno de acuerdo a la referencia [4] (Ver Figura 11),

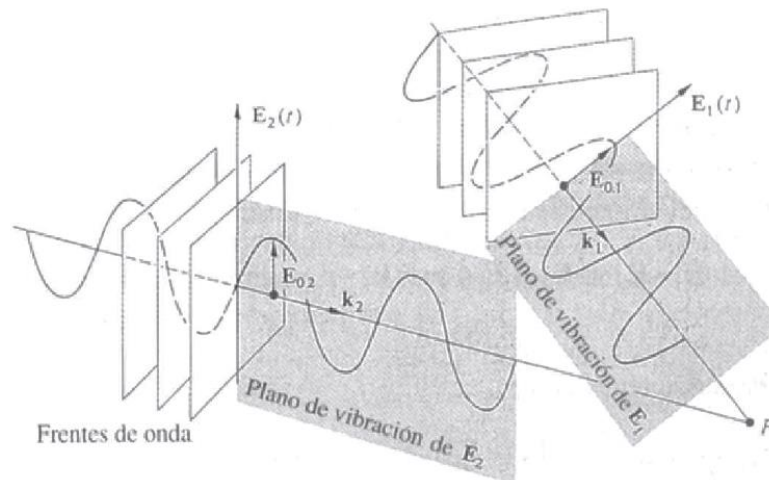


Figura 11. Ondas de dos fuentes puntuales superpuestas espacialmente [4].

el campo eléctrico total de la interferencia de dos ondas en un punto p en el espacio está dado por la ecuación 2.2.1., donde E_1 y E_2 son los campos eléctricos de cada onda descritos por las ecuaciones 2.2.2 y 2.2.3[4].

$$E = E_1 + E_2 \quad (2.2.1)$$

$$E_1(r, t) = E_{01} \cos(k_1 \cdot r - \omega t + \varepsilon_1) \quad (2.2.2)$$

$$E_2(r, t) = E_{02} \cos(k_2 \cdot r - \omega t + \varepsilon_2) \quad (2.2.3)$$

Donde el término E son los vectores espaciales de los campos eléctricos, K es la constante de propagación, r es el vector posición, ω es la frecuencia angular, y ϵ constantes dieléctricas del material de propagación.

La irradiancia se describe por la ecuación 2.2.4. Esta ecuación se resume a la ecuación 2.2.5 ya que solo será la irradiancia relativa del mismo medio de propagación.

$$I = \epsilon v \langle E^2 \rangle_T \quad (2.2.4)$$

$$I = \langle E^2 \rangle_T = \langle E \cdot E \rangle_T \quad (2.2.5)$$

El término $\langle E^2 \rangle_T$ es el promedio temporal de la magnitud de la intensidad de campo eléctrico. Dónde:

$$E^2 = E \cdot E = (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2) = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2 \quad (2.2.6)$$

Por lo tanto, la irradiancia total está dada por la ecuación 2.2.7, donde el término 2.2.10 se le denomina término de interferencia.

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (2.2.7)$$

Donde

$$I_1 = \langle E_1^2 \rangle_T = \frac{E_{01}^2}{2} \quad (2.2.8)$$

$$I_2 = \langle E_2^2 \rangle_T = \frac{E_{02}^2}{2} \quad (2.2.9)$$

$$I_{12} = 2E_1 \cdot E_2 \quad (2.2.10)$$

Como $\langle E_1 \cdot E_2 \rangle_T = \frac{1}{2} E_{01} \cdot E_{02} \cos(k_1 \cdot r + \epsilon_1 - k_2 \cdot r - \epsilon_2)$, el término 2.2.10 queda como la ecuación 2.2.11 despejando y sustituyendo los términos 2.2.8 y 2.2.9, donde δ es la diferencia de fase de los dos haces.

$$I_{12} = E_1 \cdot E_2 \cos \delta = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.2.11)$$

Sustituyendo este término en la ecuación 2.2.7 resulta la ecuación 2.2.12 [4].

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.2.12)$$

Si el ángulo de fase de las ondas es un múltiplo de $\pm 2\pi$ se dice que hay interferencia constructiva total. Cuando el coseno del ángulo de fase está en el intervalo de (0,1) las ondas están fuera de fase y se dice que hay interferencia constructiva, si el ángulo de fase está en el intervalo (0,-1) hay interferencia destructiva. Si el ángulo de fase tiene múltiplos impares de $\pm\pi$, se dice que hay interferencia destructiva total (Figura 12) [4].

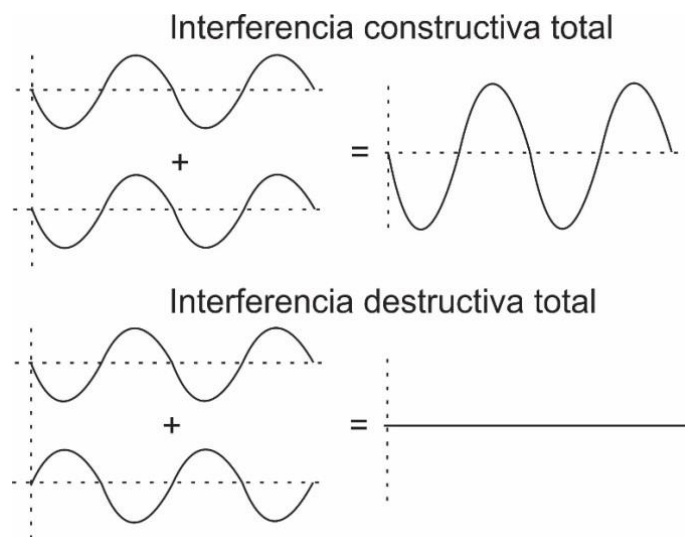


Figura 12. Dos ondas en fase formando interferencia constructiva total y dos ondas desfasadas 180° formando interferencia destructiva total.

Los fenómenos de interferencia son de movimiento ondulatorio en un medio como el aire o el agua. Un ejemplo común de movimiento ondulatorio es el que ocurre en una superficie de agua tranquila, que al arrojarle un objeto pequeño en ella, el impacto del objeto produce una deformación compuesta por una depresión y una elevación de agua (olas), que aumenta de diámetro propagándose a su alrededor como una onda de forma circular (Figura 13). Si se producen ondas circulares como éstas en dos puntos cercanos, en ciertos lugares suman sus efectos y producen una deformación constructiva, porque las depresiones y las elevaciones de las dos ondas coinciden, mientras que en otros sus efectos se cancelan porque la depresión de una onda coincide con la elevación de la otra [5].

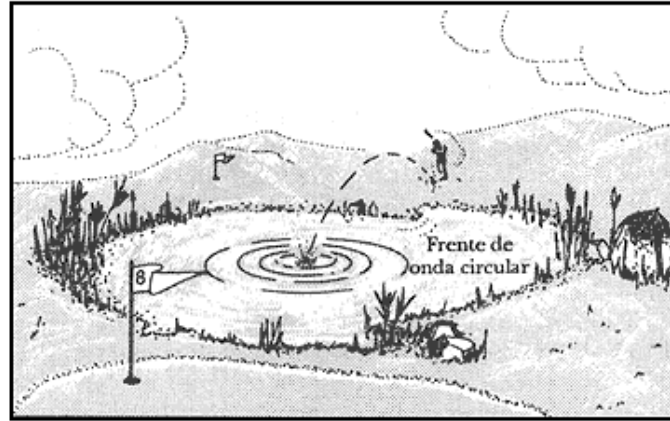


Figura 13 . Ondas circulares formadas al caer un objeto pequeño en un estanque de agua tranquila [5].

En 1815, el físico inglés Thomas Young, realizó un experimento sobre interferometría llamado ranura o rendija doble, que consiste en pasar luz de una fuente por dos ranuras o rendijas estrechas contiguas. Este sistema interferométrico se dice que es por división de frente de onda, ya que al pasar por las rendijas, la luz se difracta y las nuevas dos ondas tienen la misma intensidad. Con este experimento obtuvo un patrón de interferencia [6].

El comportamiento del experimento de Young es muy similar al comportamiento del fenómeno que se produce al arrojar dos objetos pequeños (cerca entre sí) al agua tranquila como se describió anteriormente. Estos dos objetos, en el experimento de Young, son el equivalente a las dos rendijas por donde se difractan las dos ondas que se dividen de la onda de la fuente que se van propagando en el medio hasta el punto donde se superponen una con otra, generando un patrón de interferencia.

Por lo tanto, brevemente se puede decir que, la interferencia óptica equivale a la interacción de dos o más ondas de luz que producen una irradiación resultante que se desvía de la suma o resta de las irradiancias componentes [4].

2.3 Tipos de interferómetros.

Los sistemas interferométricos por división de amplitud son en donde la onda que proviene de la fuente se secciona en dos segmentos que viajan por caminos

diferentes antes de recombinarse e interferir [4]. Hay que recordar, que si dos haces deben interferir para producir una distribución estable, la frecuencia de estos haces tiene que ser casi igual ya que si presentan diferencias significativas resultaría en un desfase.

El **interferómetro de Mach-Zehnder** es un dispositivo de división de amplitud. Consta de dos divisores de haz y de dos espejos reflectores como se muestra en la figura 14. Las dos ondas viajan por caminos separados. Si se modifica un poco la longitud del camino de uno o de los dos haces, o se inclina un poco uno de los divisores de haz, pueden obtenerse diferentes franjas de interferencia. Por estas características este interferómetro puede aplicarse a miles de situaciones [4].

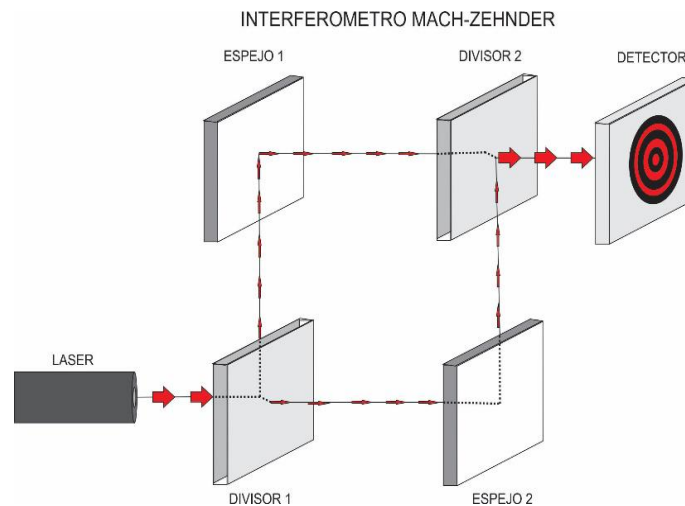


Figura 14. Interferómetro Mach-Zehnder.

El **interferómetro de Sagnac** es un dispositivo de división de amplitud muy estable. En este interferómetro, los haces de luz toman el mismo camino pero en direcciones opuestas, con la característica de que estos son caminos cerrados como se puede observar en la figura 15. Un desplazamiento o giro en alguna de las dos direcciones de los haces, producirá una diferencia en el recorrido por el camino óptico del haz, produciendo un patrón de interferencia [4].

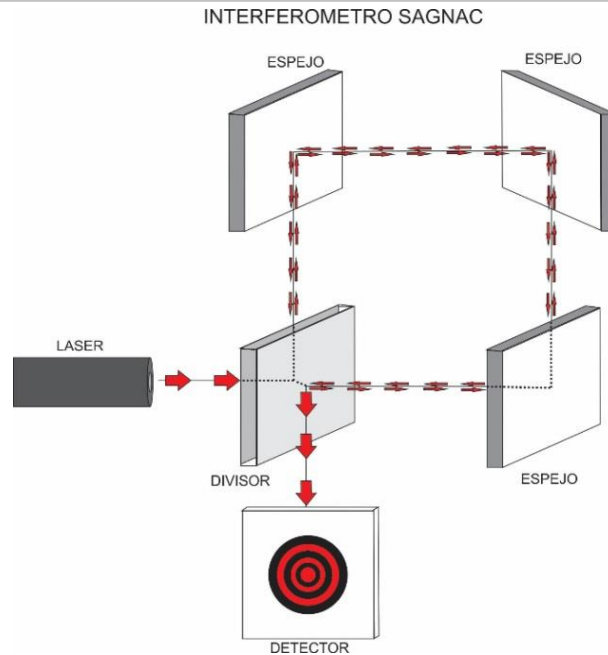


Figura 15. Interferómetro Sagnac.

El **interferómetro de Michelson** es un dispositivo de división de onda. Se constituye por un divisor de haz y dos espejos reflectivos. El haz de luz se divide en dos en el divisor, viajan por caminos diferentes hasta llegar a un espejo donde se reflejan y regresan al divisor, donde un haz pasa a través del divisor hacia el detector y parte del haz que viene del segundo espejo es desviada hacia el detector en donde se unen y forman las franjas de interferencia [4]. Esta configuración se puede observar en la figura 16.

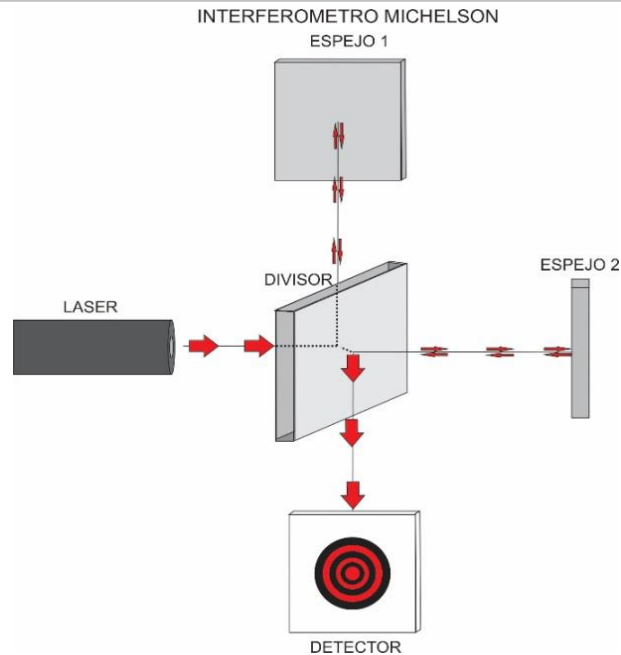


Figura 16. Interferómetro de Michelson.

El **interferómetro Fabry-Perot (FPI)** es un dispositivo que consiste en dos espejos casi totalmente reflejantes. El haz de luz incidente se divide al llegar al espejo 1, una parte se refleja y otra se transmite. El haz que se transmite llega al espejo 2 donde ocurre otra división de haz, una parte del haz se refleja y otra se transmite, la parte que se refleja llega de nuevo al primer espejo y vuelve a suceder de nuevo una división de haz. Este comportamiento sucede hasta el infinito, lo que provoca que se obtenga un patrón de interferencia [4]. Esta configuración se puede observar en la figura 17.

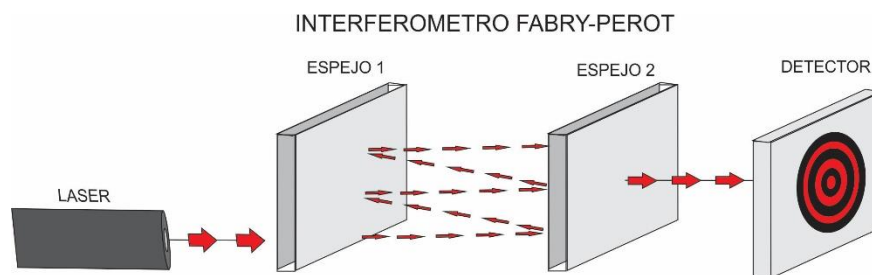


Figura 17. Interferómetro Fabry-Perot.

En este trabajo de tesis se trabajó con el interferómetro de Michelson por su configuración sencilla y su facilidad de implementación. En el tercer capítulo se

mencionará su configuración equivalente con fibra óptica, la forma de fabricación y los métodos utilizados. También se utilizó una oblea parcialmente reflectiva para ayudar a disminuir las pérdidas. Esta oblea se comporta como un interferómetro Fabry-Perot el cual también en el tercer capítulo se presenta su equivalente en fibra óptica.

Referencias

- [1] John Crisp, “Introduction to Fiber Optics”, Newnes, 2001.
- [2] Fibra Óptica.
https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_%C3%B3ptica
- [3] M. Bass and E. W. Van Stryland, Fiber Optics Handbook: Fiber, Devices, and Systems for Optical Communications (McGraw-Hill, 2002).
- [4] E. Hecht and A. Zajac, Optics (Addison-Wesley, Iberoamericana, 2000).
- [5] Virgilio Beltrán L. “Para atrapar un fotón” Ciencia para todos, biblioteca virtual.
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/107/htm/sec_10.htm
- [6] Experimento de Young.
https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Young

Capítulo III: Metodología.

3.1. Introducción.

En este capítulo se presenta el funcionamiento y caracterización de los diferentes dispositivos ópticos utilizados, así como el proceso de fabricación de interferómetros con las diferentes técnicas de empalme implementadas.

El primer dispositivo utilizado es el diodo láser semiconductor, que se utiliza para bombear la fibra dopada con erbio (EDFA). Se muestra la caracterización de la fibra dopada con erbio. La explicación del funcionamiento de un circulador óptico en el arreglo experimental y por último el funcionamiento y proceso de fabricación del MI utilizando SMF.

3.2 Caracterización del diodo láser semiconductor.

El láser es un dispositivo que emite luz coherente (en fase), monocromática (de una sola longitud de onda) y colimada (en una sola dirección). El diodo laser es un dispositivo que está constituido por materiales semiconductores como el silicio o germanio [1]. Un material semiconductor como el silicio tiene cuatro electrones de valencia. El silicio que a bajas temperaturas se comporta como un aislador pero a temperatura ambiente se puede desprender algunos electrones, quedando libres dejando huecos con carga positiva. Para aumentar la conductividad de un semiconductor se dopa con átomos de bario que tienen cinco electrones de valencia, llamado semiconductor tipo N. Los semiconductores dopados con galio que tiene tres electrones de valencia son de tipo P. Se le llama diodo a la unión de un semiconductor tipo N con uno tipo P. Así, si se le aplica una diferencia de potencial al material semiconductor, el polo positivo conectado al material tipo N y el negativo al tipo P, circulará una corriente eléctrica debido a que los electrones son atraídos por el polo positivo y a los huecos por el polo negativo [1]. Este dispositivo

será utilizado como diodo laser de bombeo para estimular los iones de la fibra dopada con erbio que será utilizada como fuente de amplio espectro.

En la figura 18 se presenta el arreglo experimental realizado para obtener la caracterización del diodo láser.

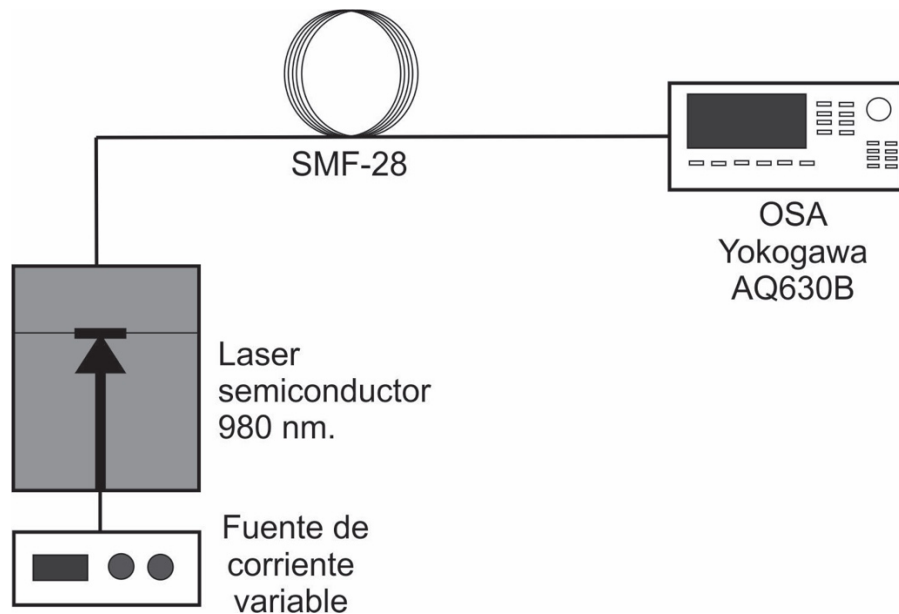


Figura 18. Arreglo experimental para la caracterización del láser semiconductor.

En esta configuración se tiene una fuente variable de corriente, que es utilizada para modular la corriente hacia el diodo laser que está conectado por medio de fibra SMS-28 al analizador de espectros ópticos (OSA, Optical Spectrum Analyzer) Yokogawa AQ630B.

La caracterización del láser se obtuvo variando la corriente en intervalos iguales, utilizando la fuente de corriente variable conectada al diodo laser. El comportamiento obtenido está en la figura 19 en donde se puede observar la longitud de onda contra potencia de salida a diferentes corrientes.

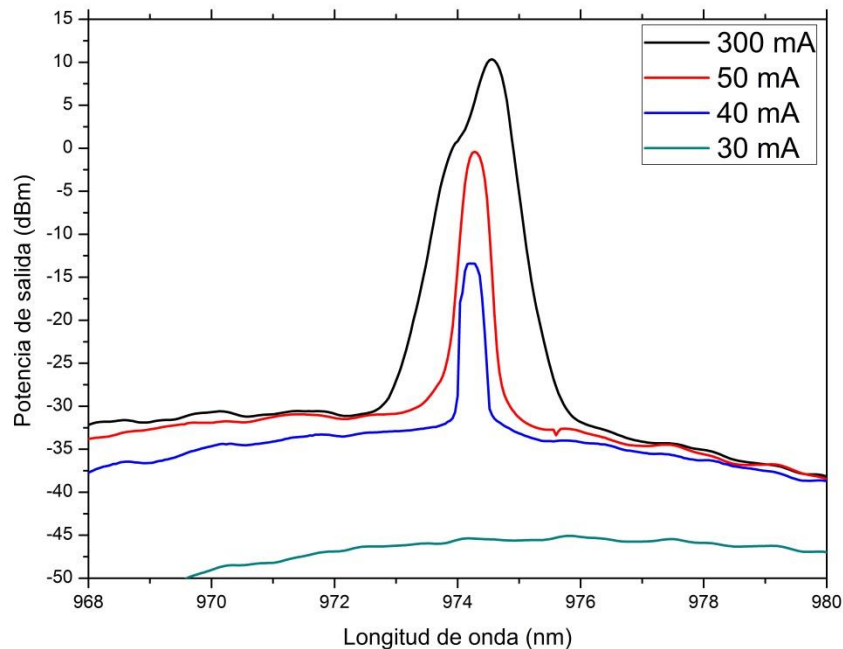


Figura 19. Caracterización diodo láser.

El rango de corriente utilizado para la caracterización fue de 0 a 300 mA, haciendo mediciones del espectro óptico cada 10 mA. En la figura 19 se puede observar que el pico del diodo láser comienza a formarse aproximadamente a 40 mA con una potencia de salida de -13.62 dBm y en una longitud de onda centrada en 974.23 nm. A partir de los 180 mA el pico del diodo láser comienza a estabilizarse. A 300 mA, con una potencia de salida de 10.08 dBm, su pico se centra a una longitud de onda de 974.56 nm.

3.3 Caracterización de la fibra dopada con erbio.

La fibra dopada es una fibra que contiene impurezas de iones de tierras raras (normalmente en el núcleo) con el fin de amplificar la luz a través de la emisión estimulada. Estos iones absorben la luz de la fuente de bombeo y son excitados a otros niveles de energía [2]. En este caso la fibra dopada con erbio es la que se utiliza como amplificador. En la figura 20 se puede observar la fluorescencia de la fibra dopada con erbio conectada a una fuente de bombeo. Esta fibra dopada es la que se utilizó en este trabajo de tesis, proporcionada en el laboratorio de la división.

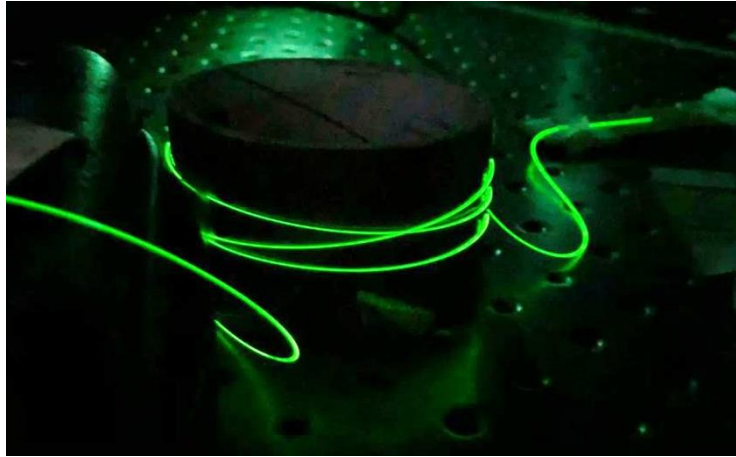


Figura 20. Fluorescencia de la fibra dopada con erbio.

El principio de operación de la fibra dopada con erbio consiste en que los iones de Er^{3+} son excitados desde el nivel E_1 por el sistema de bombeo hacia los niveles E_2 o E_3 dependiendo de la longitud de onda de bombeo. Si la longitud de onda de bombeo es de 980 nm pasan del E_1 a E_3 , o si es de 1480 nm pasan del E_1 al E_2 . Con esto se obtiene la inversión de población entre los niveles E_1 y E_2 . Cuando el flujo de fotones o la señal óptica de entrada (1550 nm) incide en el EDFA, esta estimula las transmisiones del nivel E_2 al E_1 , obteniendo una emisión estimulada en fase con la luz incidente y con la misma longitud de onda así se produce el efecto de amplificación [3].

La caracterización del EDFA se presenta en la figura 22, para la cual se utilizó un arreglo experimental como el de la figura 21 en donde se utilizó la misma fuente de corriente variable de la sección anterior. La configuración del arreglo experimental presenta al diodo laser conectado a un multiplexor por división de onda (WDM), en donde la salida del WDM está conectado al EDFA por medio de fibra SMF-28, y esta a su vez al OSA. El diodo laser funciona como fuente de bombeo para la amplificación del EDFA

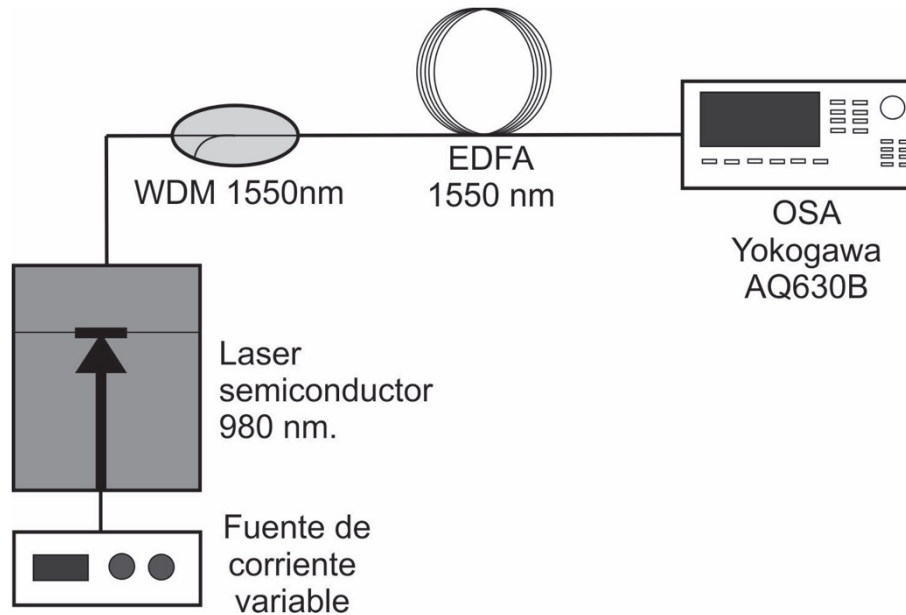


Figura 21. Arreglo experimental para la caracterización de la EDFA.

Con la configuración del arreglo experimental mostrado se obtuvo el comportamiento de la figura 22 de la señal de salida de la amplificación con el EDFA. La caracterización muestra longitud de onda contra potencia de salida a diferentes corrientes.

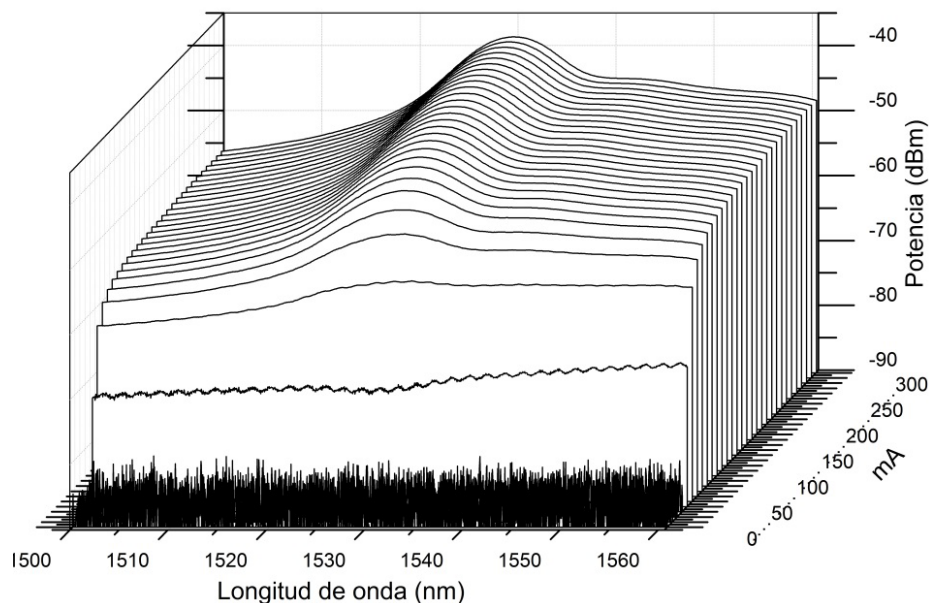


Figura 22. Caracterización de la amplificación con un EDFA con una fuente de bombeo de 980nm.

El rango de corriente utilizado para la caracterización fue de 0 a 300 mA haciendo mediciones del espectro óptico cada 10 mA. En la figura 22 se puede observar que el

pico de la señal comienza a tomar forma en la longitud de onda de 1529.88 nm con una potencia de salida de -46.88 dBm a una corriente de 60 mA. A partir de los 210 mA el pico comienza a estabilizarse con una potencia de salida de aproximadamente -38.849 dBm.

Se utiliza la EDFA para obtener un amplio espectro óptico, normalmente entre 1500 y 1600 nm, para así mejorar y aumentar el rango de detección de variaciones provocadas por parámetros físicos y químicos que afecten al interferómetro de fibra óptica implementado como sensor.

3.4 Circulador óptico.

El circulador es un componente pasivo donde se recibe una señal de entrada y esta se manda a la siguiente salida en sentido horario (figura 23).

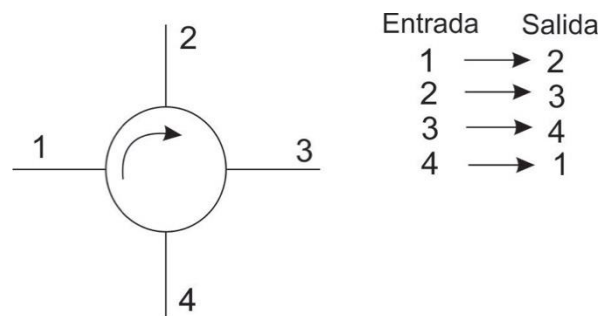


Figura 23. Esquema de un circulador óptico de cuatro puertos con sus entradas y salidas [3].

El circulador tiene varios componentes semejantes a un aislador óptico. En la figura 24 se observa un diagrama de un circulador de cuatro puertos.

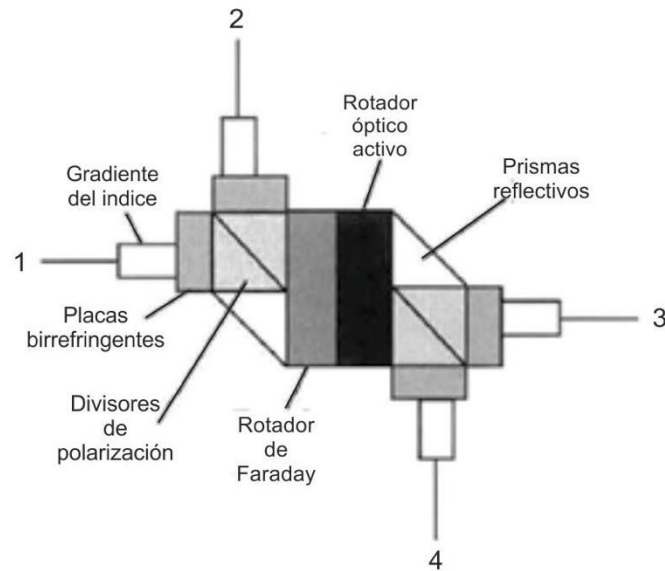


Figura 24. Diagrama de un circulator óptico con cuatro puertos de lente de fibra, cuatro placas birrefringentes, dos divisores de polarización, dos prismas reflectivos, un rotador de Faraday y un rotador óptico activo [3].

La señal entrante se divide en dos estados de polarización ortogonal por una placa birrefringente (material con dos índices de refracción). Los dos caminos resultantes se reflejan y se transmiten por caminos separados a través de un rotador de Faraday y un rotador óptico activo en serie. Los rotadores ópticos son dispositivos que desfasan la polarización lumínica por su material magnético-óptico que lo constituye. Al final los caminos se recombinan por un divisor de haz por una placa birrefringente [3].

En este trabajo de tesis es necesaria la implementación de un circulator óptico para evitar daños al diodo láser, ya que el interferómetro tipo Michelson implementado como sensor trabaja por reflexión y no por transmisión como los interferómetros Mach-Zehnder. Múltiples reflexiones están dentro del arreglo y con el fin de asegurar de que toda la energía reflejada por el interferómetro sea medida por el analizador de espectros ópticos, es necesario utilizar un dispositivo de fibra que asegure que toda esta energía sea transportada hasta el OSA. El circulator óptico es el único dispositivo que realiza esta función.

3.5 Multiplexor por división de onda (WDM).

El multiplexor por división de onda (WDM) permite transmitir varias señales independientes de diferente longitud de onda por una fibra óptica. El dispositivo WDM se utiliza comúnmente para aumentar la capacidad de ancho de banda de un sistema de onda de luz. Esto funciona multiplexando láseres de alta precisión estabilizados por temperatura que operan en longitudes de onda diferentes en una sola fibra [4-5].

3.6 Fabricación del Interferómetro intermodal tipo Michelson.

Para la fabricación del interferómetro tipo Michelson se emplearon dos segmentos de fibra óptica SMF-28 (Figura 25) y una empalmadora FITEL S175 con la cual se puede realizar el empalme de manera manual. Las técnicas de empalme utilizadas fueron las conocidas como Core-offset y Burbuja.

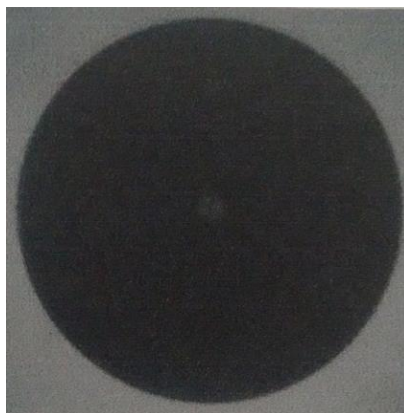


Figura 25. Sección transversal de una fibra óptica monomodo [6].

El Core-offset trata simplemente de obtener un empalme con una pequeña desalineación entre dos segmentos de fibra, moviendo o deslizando uno de los segmentos en una sola dirección respecto al otro, así formándose un pequeño escalón entre los dos segmentos. Para lograr esto, primeramente se tienen que alinear en la empalmadora los dos segmentos de fibra (SMF-28 (1) y SMF-28 (2)) como se muestra en la figura 26(a). Después, para comenzar a deslizar la fibra, nos tenemos que basar o utilizar alguno de los dos segmentos como referencia, en este

caso se utilizó el segmento SMF-28 (1). Respecto a la referencia utilizada, se comienza a mover el otro segmento (en este caso SMF-28 (2)) una distancia d en dirección perpendicular a lo largo de la fibra como se muestra en la figura 26 (b). Teniendo la desalineación deseada, se inicia el deslizamiento de los segmentos en sentido contrario uno respecto al otro en dirección perpendicular a lo largo de la fibra hasta estar en contacto los dos segmentos como se muestra en la figura 26 (c). Por último, para que se realice el empalme, se le aplica las descargas eléctricas necesarias.

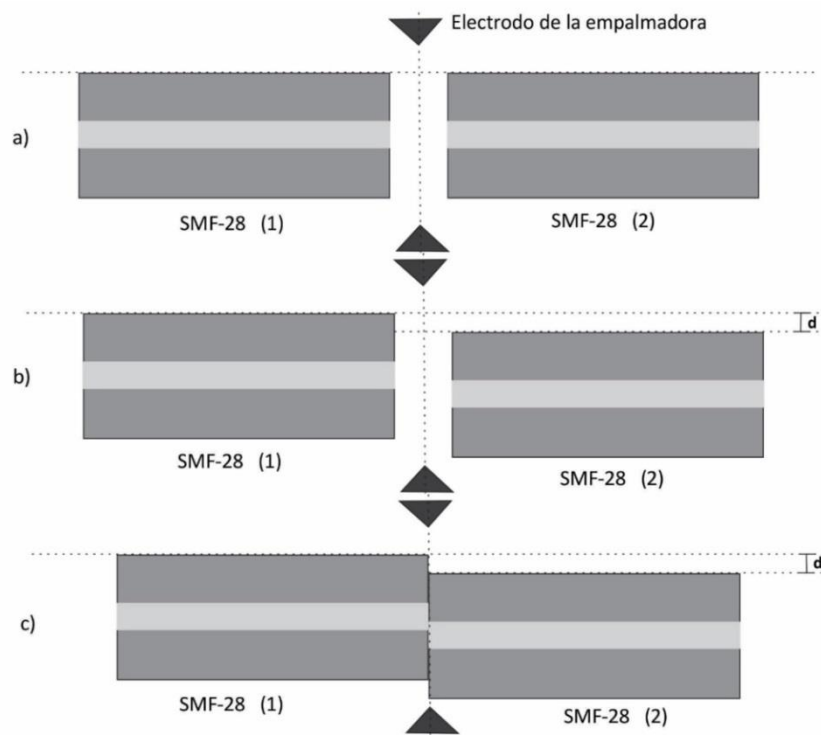
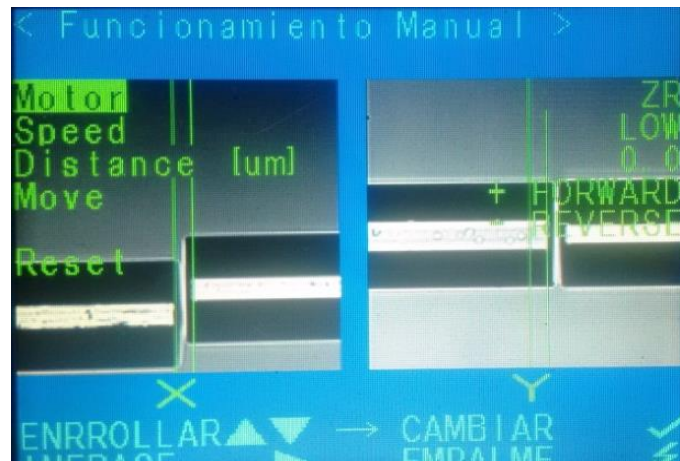


Figura 26. Procedimiento para realizar un empalme Core-Offset entre dos fibras SMF-28.

En la figura 27 se puede observar el empalme realizado con ayuda de la empalmadora manual utilizando la técnica de la figura 26.



a)



b)

Figura 27. Imágenes tomadas del empalme Core-Offset realizado con una empalmadora manual, (a) Imagen antes de aplicar la descarga eléctrica y (b) Imagen después de aplicar la descarga eléctrica.

La técnica de Burbuja, consiste en obtener como empalme un ensanchamiento ovalado entre dos segmentos de fibra. Para lograr esto, primeramente se tienen que alinear los dos segmentos de fibra (SMF-28 (1) y SMF-28 (2)) en la empalmadora como se muestra en la figura 28 (a). Se deslizan los dos segmentos en sentido contrario uno respecto al otro en dirección paralela a lo largo de la fibra hasta estar en contacto como se muestra en la figura 28 (b). Nuevamente, como en el proceso de la técnica Core-offset, se elige alguno de los dos segmentos como referencia, en este caso se utilizó el segmento SMF-28 (1), y se comienza a deslizar el otro segmento de fibra (SMF-28 (2)) una distancia d en dirección paralela a lo largo de la fibra hacia el segmento SMF-28 (1) como se muestra en la figura 28 (c). Esto se

hace para ejercer presión del segmento SMF-28 (2) sobre el segmento SMF-28 (1) y así al momento de aplicarle las descargas eléctricas se forme el ensanchamiento ovalado como en la figura 28 (d).

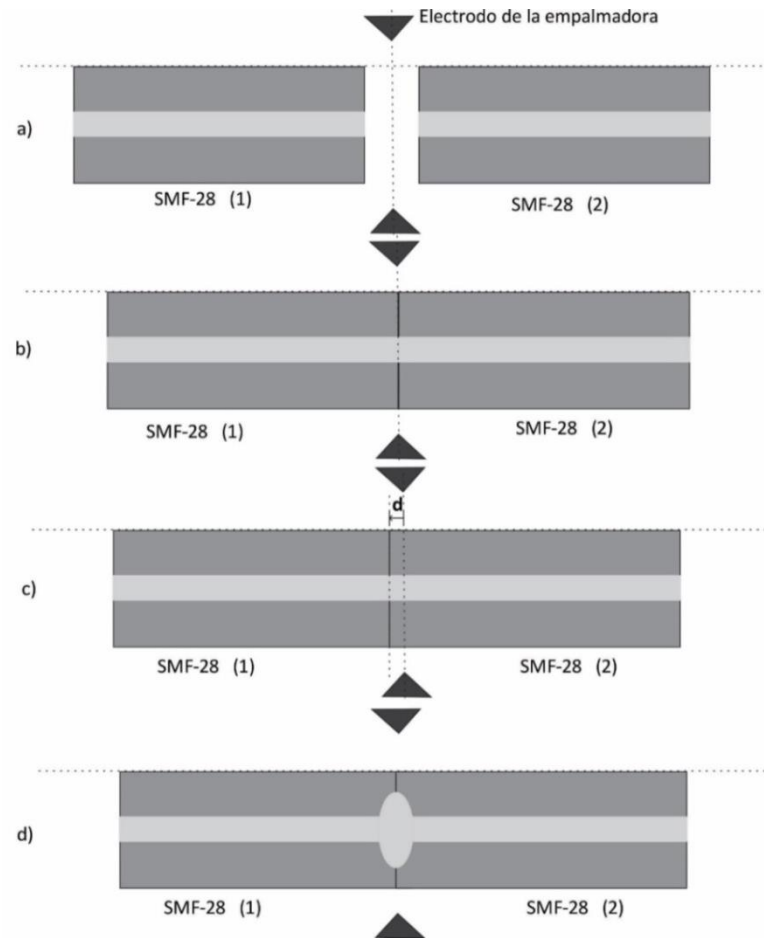


Figura 28. Procedimiento para realizar un empalme tipo burbuja entre dos fibras SMF-28.

En la figura 29 se puede observar el empalme realizado con ayuda de la empalmadora manual utilizando la técnica de la figura 28.



a)



(b)

Figura 29. Imágenes tomadas del empalme tipo burbuja realizado con una empalmadora manual, (a) Imagen antes de la descarga y (b) Imagen después de la descarga

3.7 Principio de operación del interferómetro intermodal tipo Michelson.

En la sección 2.3 del capítulo anterior se vio el MI en el libre espacio, su interferómetro equivalente todo de fibra se muestra en la figura 30, donde el divisor de haz de luz es reemplazado por un acoplador y los caminos ópticos en libre espacio son reemplazados por guías de fibra óptica [7].

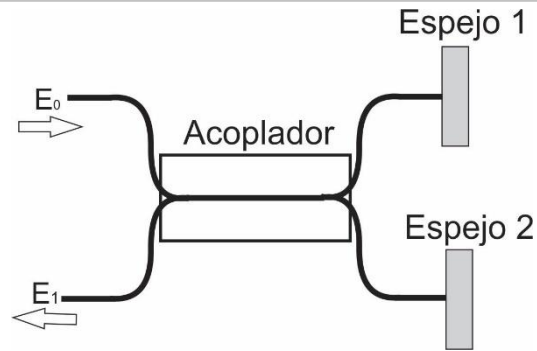


Figura 30. Equivalente Interferómetro Michelson todo de fibra óptica [7].

En este trabajo de tesis el equivalente del acoplador es el empalme core-offset o de burbuja entre los dos segmentos de fibra monomodo vistos en la figura 30. Los dos brazos o los dos caminos del interferómetro equivalen a los caminos formados por el núcleo y el revestimiento. Por último, el reflector 1 y 2 pueden ser un corte normal a lo largo del interferómetro o puede colocarse un reflector al final del interferómetro [7].

También en la sección 2.3 del capítulo anterior se vio el FPI en el libre espacio, su interferómetro equivalente todo de fibra se muestra en la figura 31, donde el divisor de haz de luz es reemplazado por un acoplador y los caminos ópticos en libre espacio son reemplazados por guías de fibra óptica [7].

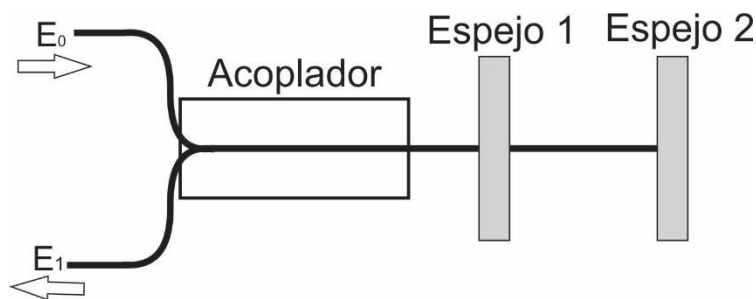


Figura 31. Equivalente FPI todo de fibra óptica [7].

En este trabajo de tesis el interferómetro Fabry-Perot es una oblea utilizada como reflector al final del MI. Esta oblea tiene el mismo comportamiento que un FPI. La oblea está compuesta por capas superpuestas de material semiconductor. Estas capas serían el equivalente a los espejos mostrados en la figura 31.

Las ecuaciones de Fresnel describen la reflexión y transmisión de las ondas electromagnéticas al incidir en una superficie de contacto con diferentes índices de refracción [7].

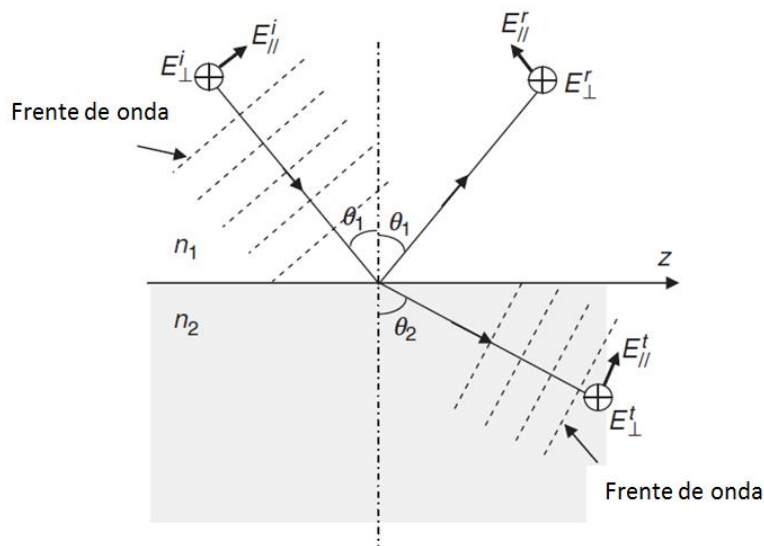


Figura 32. Reflexión y refracción de ondas planas en una interfaz óptica [7].

De acuerdo a la figura 32 y a la ley de Snell vista en el capítulo 2, se puede obtener las ecuaciones 3.7.1 y 3.7.2 [7] de los coeficientes de Fresnel de reflexión paralelos y perpendiculares al plano de incidencia:

$$\rho_{\parallel} = \frac{-n_2^2 \cos \theta_1 + n_1 \sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)}}{n_2^2 \cos \theta_1 + n_1 \sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)}} \quad (3.7.1)$$

$$\rho_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - \sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)}}{n_1 \cos \theta_1 + \sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)}} \quad (3.7.2)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios y θ_1 es el ángulo de incidencia respecto a la normal de la superficie de contacto. Para la potencia de la reflexión se tiene las ecuaciones 3.7.3 y 3.7.4 [7]:

$$R_{\parallel} = |\rho_{\parallel}|^2 \quad (3.7.3)$$

$$R_{\perp} = |\rho_{\perp}|^2 \quad (3.7.4)$$

En el caso de una fibra óptica abierta, se tiene una incidencia normal, es decir, una incidencia perpendicular al interfaz del material, en donde $\theta_1 = \theta_2 = 0$, por lo tanto las ecuaciones 3.7.1 y 3.7.2 se reducen a la ecuación 3.7.5.

$$\rho_{\parallel} = \rho_{\perp} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (3.7.5)$$

Tomando en cuenta la ecuación 3.7.5, el coeficiente de refracción de la fibra óptica ($n_1 \approx 1.5$ silica fiber) y el coeficiente de refracción del aire ($n_2 = 1$), se puede obtener la potencia de reflexión en esta parte de la fibra, que es aproximadamente:

$$R = |\rho|^2 = \left| \frac{1.5 - 1}{1.5 + 1} \right|^2 = 0.2^2 = 0.04 = 4\% \approx -14dB$$

En la figura 33 se muestra la estructura del MI fabricado. En este interferómetro se cuenta con un empalme Core-Offset, donde dos segmentos de SMF se empalman con una desalineación de una distancia d . El dispositivo sensor de este interferómetro es el segmento con una longitud L (SMF (2)). Se puede observar el comportamiento de propagación de la luz por los modos del núcleo y revestimiento. La luz que proviene de la fuente de la fibra dopada con erbio (flechas rojas) entra al interferómetro por el segmento SMF (1). Viaja por el núcleo hasta llegar al empalme core-offset. El empalme sirve como divisor de haz, lo que provoca que cierta cantidad de luz se acople en el núcleo y en el revestimiento del segmento SMF (2). La luz viaja por el segmento SMF (2) hasta llegar al final del interferómetro o cara de corte normal en donde una cantidad de luz se regresa por el efecto de reflexión de Fresnel, en un orden del 4% por la incidencia normal y el porcentaje sobrante se dispersa. Cuando la luz viaja de regreso (flechas azules) y llega a el empalme, este sirve como un reacoplador, donde la luz se acopla de nuevo al segmento SMF (1) teniendo interacción entre la luz que entra y la que sale (flechas rojas y azules respectivamente) obteniendo patrones de interferencia.

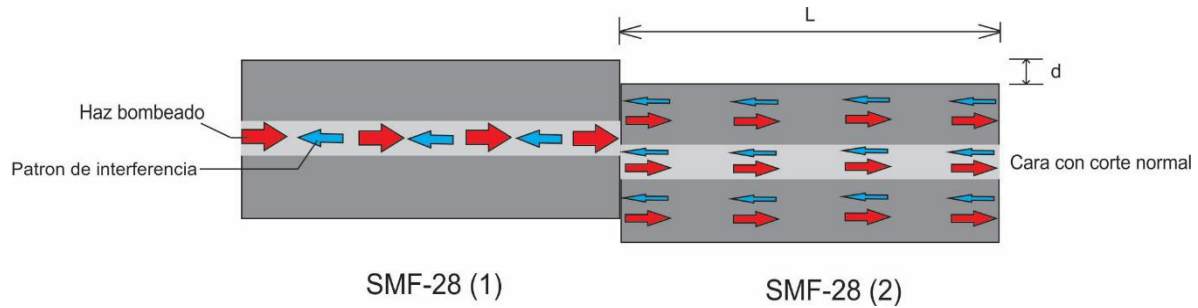


Figura 33. Interferómetro tipo Michelson de fibra óptica con empalme Core-Offset.

Por otro lado, en la figura 34 se muestra la estructura de otro interferómetro tipo Michelson fabricado. En este interferómetro se cuenta con un empalme de Burbuja, donde dos segmentos de SMF alineados se empalman de tal manera que se obtiene un ensanchamiento ovalado. El dispositivo sensor de este interferómetro es el segmento con una longitud L (SMF (2)). El comportamiento de propagación de la luz es semejante al del interferómetro de la figura 33, sólo cambia el empalme que funciona como acoplador.

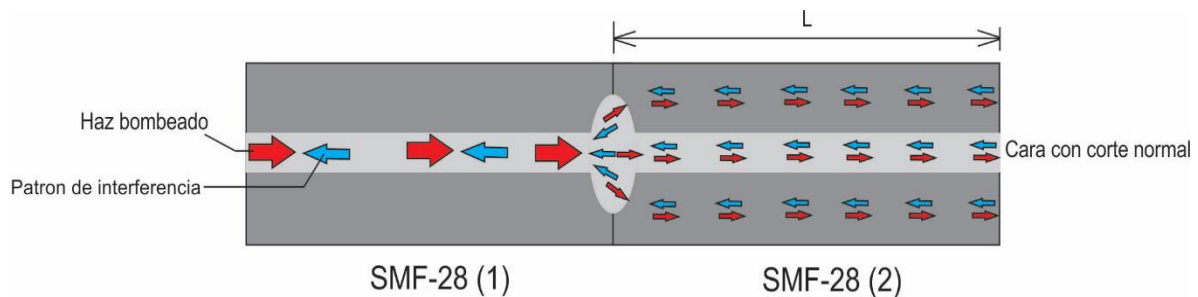


Figura 34. Interferómetro tipo Michelson de fibra óptica con empalme de burbuja.

En la figura 35 se muestran las mismas estructuras de los interferómetros tipo Michelson de la figuras 33 y 34 pero con un reflector al final con el fin de disminuir las pérdidas.

“Sensor de temperatura basado en un interferómetro intermodal tipo Michelson con fibra óptica monomodo”

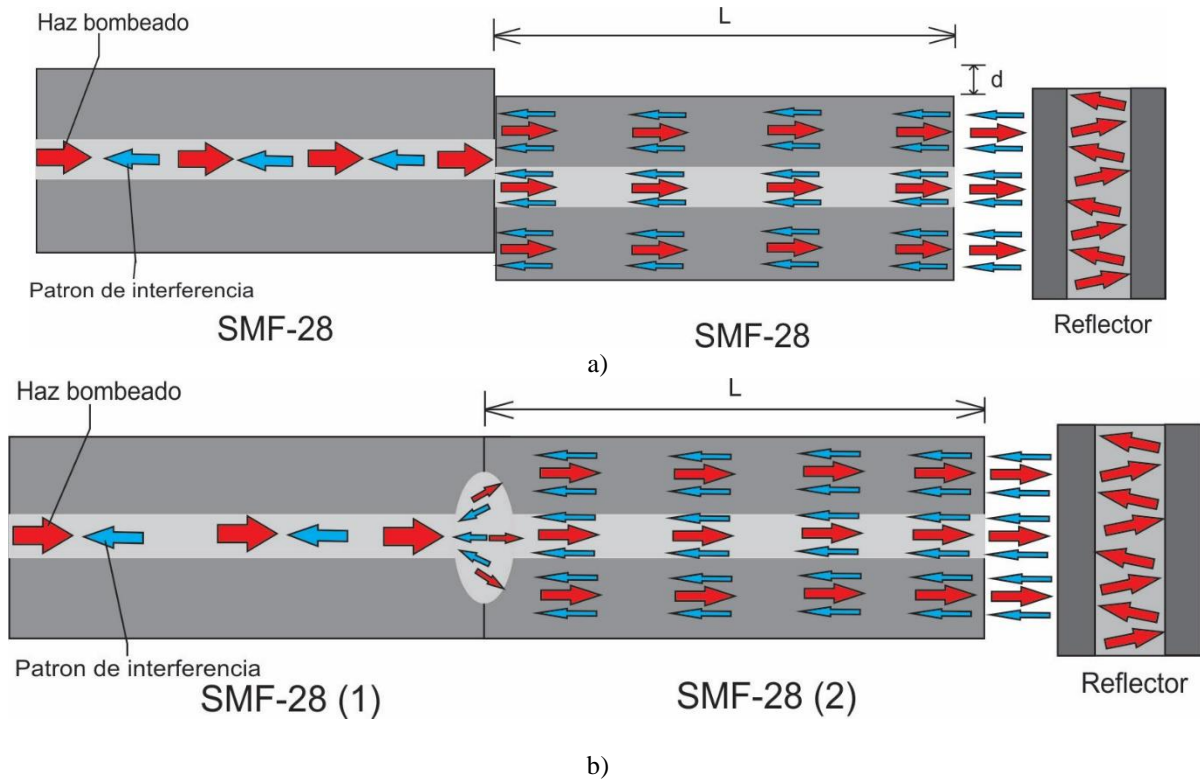


Figura 35. Interferómetro tipo Michelson de fibra óptica con reflector al final. Con (a) empalme Core-Offset y (b) empalme Burbuja.

El reflector es es una oblea de silicio (Silicon Wafer) que tiene un espesor de 250 micrómetros. En la figura 36 se presenta la oblea utilizada en este trabajo de tesis.

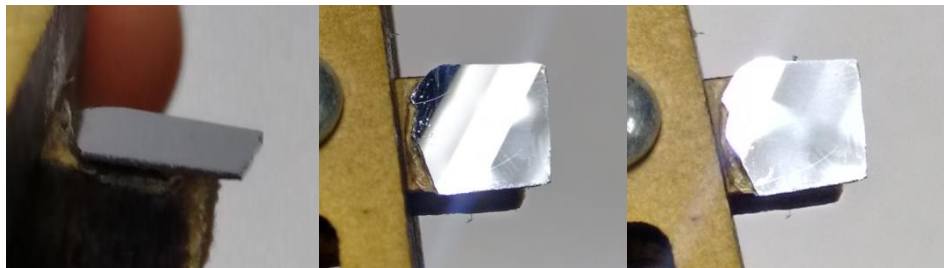


Figura 36. Oblea de silicio.

El reflector se comporta como un interferómetro Fabry-Perot, en donde los modos que salen y se pierden del interferómetro tipo Michelson, ahora entran, se reflejan y se transmiten infinitamente entre las capas del reflector provocando un patrón de interferencia más definido. Este patrón de interferencia provocado por el reflector, se monta sobre el patrón de interferencia ocasionado por el interferómetro tipo Michelson. En conjunto con el interferómetro tipo Michelson y el reflector se

obtiene un patrón de interferencia con franjas más definidas. En la figura 35 se puede observar este comportamiento, en donde con la ayuda del reflector, es mayor la cantidad de modos que regresan y se acoplan al interferómetro.

Referencias

- [1] Vicente Aboites, “El láser”, Ciencia para todos, biblioteca virtual. http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/105/htm/ella_ser.htm
- [2] Rare-earth-doped Fibers
https://www.rp-photonics.com/rare_earth_doped_fibers.html
- [3] P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, “Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology”. New York: Academic, 1999.
- [4] G. P. Agrawal, “Applications of Nonlinear Fiber Optics”, (Academic Press, San Diego, 2001).
- [5] D. Bailey and E. Wright, “Practical Fiber Optics”, ButterworthHeinemann, 2003
- [6] Lopez Dieguez Yanelis, “Fabricacion de un interferómetro de fibra óptica para su implementación como sensor”, Tesis para el grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Guanajuato, México, 2015.
- [7] R. Hui and M. O Sullivan, “Fiber Optic Measurements Techniques”. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier/Academic Press, 2009, ch. 5.

Capítulo IV: Pruebas y resultados.

4.1 Introducción.

Los sensores ópticos interferométricos utilizan la interferencia provocada en la luz coherente y monocromática para poder medir diferentes parámetros. El principio de funcionamiento de estos sensores se basa en el mismo funcionamiento de algunos de los interferómetros mencionados previamente en capítulos anteriores, en donde se divide un haz de luz proveniente de una misma fuente, se hace que estos haces divididos se propaguen por caminos ópticos diferentes y por último se hacen coincidir de nuevo en cierto punto en donde la propiedad de superposición de las ondas los hace sumarse o restarse. La variación del parámetro físico o químico a medir, provoca una modificación en los caminos ópticos, causando un desfase entre éstos, provocando variaciones de energía o irradiación. Así se obtiene un patrón de interferencia, que se modifica dependiendo de las variaciones del parámetro del medio.

Con la ayuda de las técnicas de fabricación de interferómetros (Core-offset y Burbuja) presentadas en el capítulo anterior, se han elaborado diferentes interferómetros tipo Michelson con diferentes parámetros de construcción. En este capítulo se presentan los patrones de interferencia obtenidos de los interferómetros realizados junto con su transformada rápida de Fourier (FFT, de Fast Fourier Transform). También se muestra el comportamiento observado de algunos interferómetros al estar expuestos a una variación de temperatura provocada por un control de temperatura variable.

4.2.1 Transformada rápida de Fourier.

La transformada de Fourier es una herramienta de análisis en frecuencia para señales continuas en el tiempo [1]. Se basa en la serie de Fourier, mediante la cual una señal periódica puede ser representada como una combinación de exponenciales

complejas, armónicamente relacionadas entre sí. Estos resultados pueden ser extendidos para desarrollar una representación de señales aperiódicas.

La transformada de Fourier discreta (TFD) es la transformada que se aplica a las señales digitales. La TFD se puede representar como la ecuación 4.2.1 [2-3].

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n].W_N^{kn} \quad k = 0, \pm 1, \dots, N-1 \quad (4.2.1)$$

Dónde: $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$

Los terminos $x[n]$ son las muestras de la señal discreta y el termino $\frac{2\pi}{N}$ es la frecuencia fundamental donde N es el periodo fundamental [3].

Directamente se puede observar que la resolución implica N multiplicaciones complejas y $N-1$ adiciones complejas por cada k , haciendo que el cálculo directo de una TFD tenga N^2 operaciones. Entonces para valores de N pequeños no se consume mucho tiempo ni recursos, pero cuando N es muy grande el cálculo se vuelve muy poco eficiente y tardado. En las aplicaciones que utilizan la TFD se limitan al cálculo directo a cierto valor de N (comúnmente en aplicaciones de tiempo real). La FFT (Transformada rápida de Fourier) es una versión de la TFD más rápida, es un algoritmo capaz de calcular eficientemente la TFD, eliminando cálculos repetitivos necesarios para la solución de la forma directa haciendo esta operación más rápida y con menores recursos [2-7].

En este trabajo de tesis se utiliza la FFT para transformar al dominio de la frecuencia el patrón de interferencia generada por los interferómetros y obtenida por el OSA, ya que la FFT nos permite estimar la cantidad de modos ópticos que constituyen la señal, a que frecuencia se encuentran y la amplitud que presentan. Debido a que la frecuencia de muestreo no es lo suficientemente buena, tiene la desventaja de no poder apreciar completamente la cantidad de modos que se encuentran en el patrón

de interferencia, no se pueden diferenciar los modos de muy baja amplitud de lo que podría ser ruido.

4.2.2 Contraste de franja y el rango espectral libre.

El contraste de franja es una medida de la calidad de la interferencia [8]. Como la potencia de salida está en escala logarítmica, se describe como la relación entre el máximo y el mínimo de la potencia de transmisión o como la diferencia entre el máximo y el mínimo de la franja en el patrón de interferencia [9]. Entre mejor sea el contraste de franjas, será más precisa la medición de señales de interferencia. El contraste de franja se puede definir con la ecuación 4.2.1 [9].

$$C = 1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \quad (4.2.1)$$

Donde R es la reflectividad sobre la cara cortada del interferómetro y puede ser calculada por la ecuación 4.2.2 [10].

$$R = \frac{(n_{nucleo} - n)^2}{(n_{nucleo} + n)^2} \quad (4.2.2)$$

El rango espectral libre (FSR, Free Spectral Range), es la diferencia de longitud de onda entre dos picos de resonancia adyacentes que determina el rango de medición del interferómetro [10].

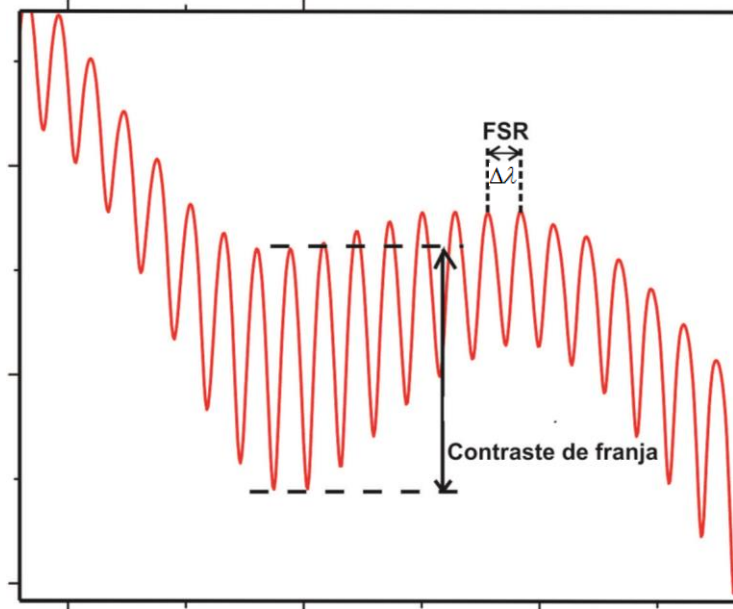


Figura 37. Contraste de franja máximo en patrón de interferencia.

Se observa en la figura 37 el contraste de franja máximo de un patrón de interferencia y el FSR entre dos picos arbitrarios. No siempre el pico que tenga el mayor contraste de franja será el más lineal, es debido a esto que se debe de caracterizar con fuentes de amplio espectro este tipo de interferómetros. Lo que se busca en un interferómetro implementado como sensor es que sea lo más lineal posible, por lo que se debe detectar el pico o valle con comportamiento lineal al momento de aplicarle la variable a medir.

El FSR de las franjas de interferencia para un MI se puede calcular por la ecuación 4.2.3 [10].

$$\Delta\lambda_{dip}^m \approx \frac{\lambda^2}{2\Delta n_{eff}^m L} \quad (4.2.3)$$

Donde el término Δn_{eff}^m es la diferencia entre el índice de refracción efectivo del núcleo y el índice de refracción efectivo del revestimiento, L es la longitud del interferómetro.

La intensidad del patrón de interferencia para este tipo de interferómetros se puede calcular con la ecuación 4.2.4 [10] que es muy semejante a la ecuación de interferencia 2.2.12 de la sección 2.2

$$I = \left(I_{nucleo} + \sum I_{revestimiento} + \sum 2\sqrt{I_{nucleo} \cdot I_{revestimiento}} \cdot \cos \phi \right) \cdot R \quad (4.2.4)$$

Donde I_{nucleo} y $I_{revestimiento}$ son la intensidad de los modos en el núcleo y en el revestimiento respectivamente; ϕ es el desfase entre los modos del núcleo y revestimiento.

Donde n_{nucleo} y n son el índice de refracción del núcleo de la fibra y de del medio externo [10].

El rango espectral libre (FSR, Free Spectral Range), es la diferencia de longitud de onda entre dos picos de resonancia adyacentes que determina el rango de medición del interferómetro [10].

4.3 Arreglo experimental.

En el arreglo experimental presentado en la figura 38 se observa un diodo láser semiconductor de la marca *LASER QPHOTNICS* que opera a 980 nm, empalmado a un WDM de 1550nm de fibra óptica, que evita que las reflexiones dañen al diodo laser. La salida del WDM esta empalmado a 4 m de fibra dopada con erbio (EDF) que sirve como amplificador de amplio espectro en un rango de 1500 a 1600nm aproximadamente. La EDF está empalmada a la terminal 1 de un circulador óptico de tres puertos, que es redireccionado al puerto 2. El puerto 2 está empalmado a un segmento de fibra SMF-38 y este al interferómetro fabricado tipo Michelson. La reflexión provocada por el interferómetro entra por el mismo puerto 2 y es re direccionado al puerto 3. El puerto 3 conectado al OSA Yokogawa AQ630B para monitorear el comportamiento del interferómetro, utilizando una resolución de 0.5 nm.

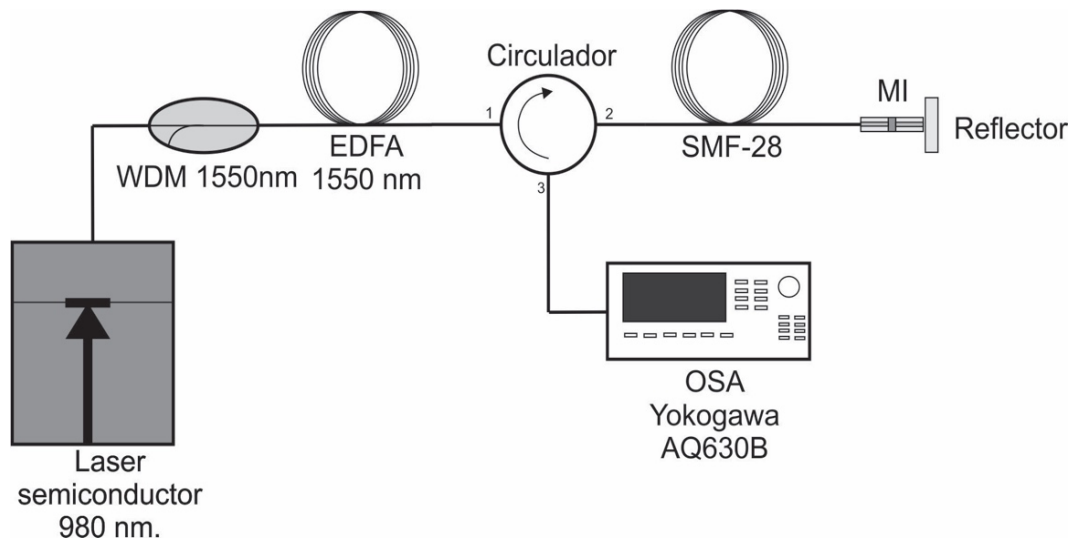


Figura 38. Arreglo experimental para obtener el patrón de interferencia de interferómetros fabricados.

El reflector colocado junto al interferómetro como se ve en la figura 38, ayuda a disminuir las pérdidas, provocando que una mayor cantidad de modos regresen y se reacoplen dentro del interferómetro. Las mediciones obtenidas se hicieron con y sin el reflector para observar las diferencias de un arreglo y otro.

4.4 MI implementados con empalme tipo Core-offset.

De acuerdo al proceso de fabricación de la sección 3.6, se fabricó una amplia gama de interferómetros utilizando la técnica core-offset con diferentes medidas, con el propósito de encontrar el mejor patrón de interferencia generado. En base a la figura 26, las longitudes utilizadas variaron desde 1 hasta 7 cm, variando en cada longitud un offset de 10 a 30 μm , teniendo así una gran cantidad de combinaciones entre longitud (L) y offset (d).

De todos los interferómetros fabricados se seleccionaron los que presentan un patrón de interferencia relativamente bueno en función al contraste de franja. En la tabla 4.4 se muestran éstos interferómetros junto con sus parámetros de construcción y las descargas eléctricas aplicadas.

Características de Interferómetros Core-offset				
Nombre	Figura	Longitud (L) cm.	Off-set (d) μm .	Descargas eléctricas
Int10	39	4	10	2
Int11	40	4	20	2
Int12	41	4	30	3
Int16	42	6	10	2
Int19	43	7	10	2
Int211	44	4	20	4

Tabla 4.4. Parámetros de fabricación de interferómetros con empalme core-offset.

Se observa en la figura 39 el patrón de interferencia generado por el interferómetro Int10, cuya longitud es de 4 cm con un offset respecto al núcleo de $30\mu\text{m}$. La figura 39(a) presenta el patrón de interferencia sin utilizar el reflector. En esta figura se presentan los modos que constituyen el espectro de interferencia, de acuerdo a la FFT calculada. Se puede apreciar el modo fundamental y dos picos que corresponden a dos modos predominantes en el revestimiento localizados en las frecuencias 0.076 y 0.14nm^{-1} . Los picos con amplitud relativamente pequeña que se presentan en los análisis de la FFT podrían ser modos de propagación débiles o pueden ser considerados como ruido, no se puede asegurar debido a la resolución en frecuencia que ofrece la técnica, la FFT no es la más adecuada. Este patrón de interferencia contiene un pico máximo localizado en 1528.7 nm con una potencia de salida de -72.43 dBm y un contraste de franja máximo de 10.47 dBm lo cual nos indica que este patrón de interferencia es apropiado para esta aplicación ya que tiene un rango de medición relativamente grande. La figura 39 (b) presenta el patrón de interferencia utilizando el reflector. La FFT calculada para este patrón de interferencia presenta los mismos tres modos de propagación explicados en la figura anterior pero con una amplitud mayor. Comparando este patrón con el de la figura 39(a), este presenta nuevas franjas generadas por el patrón de interferencia que aporta el reflector colocado en este arreglo, generando un patrón de interferencia montado en el visto en la figura 39(a). Estas nuevas franjas tienen un contraste de

franja de 2 dBm aproximadamente dando apariencia de ruido, debido a esto, este patrón de interferencia no es muy apropiado para esta aplicación ya que tiene un rango de medición pequeño.

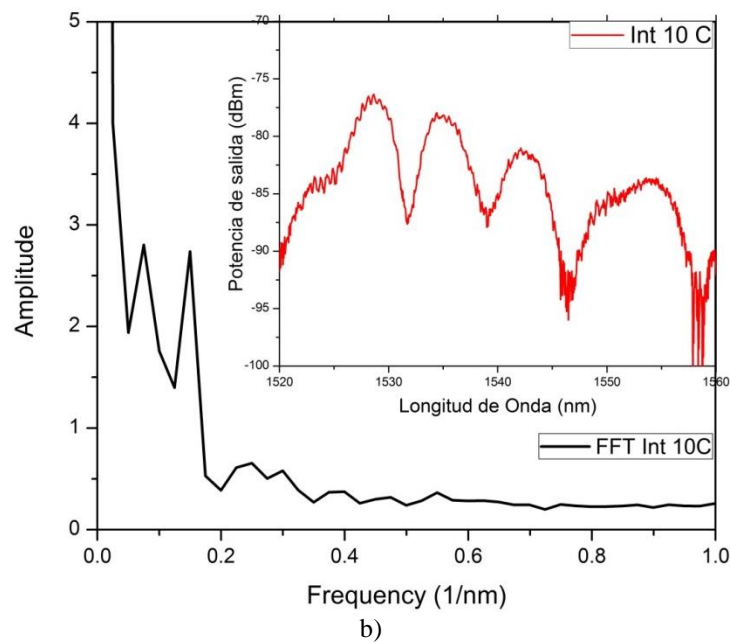
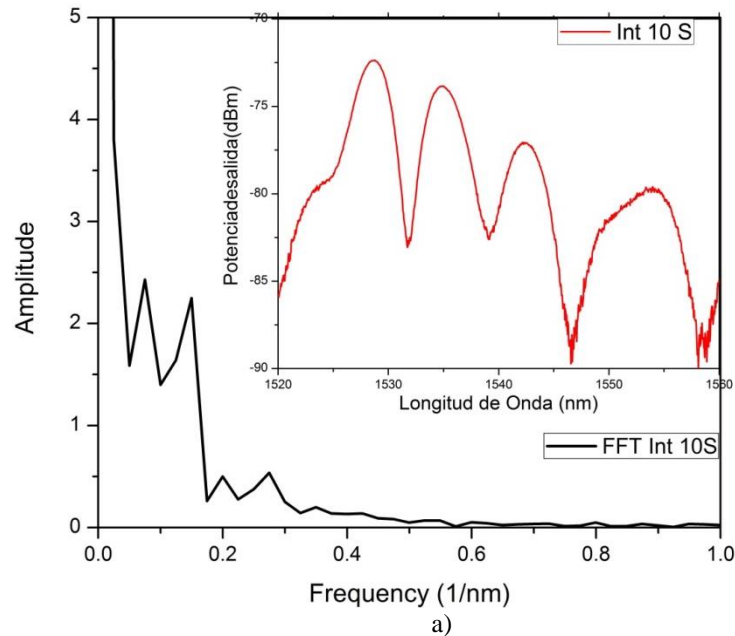
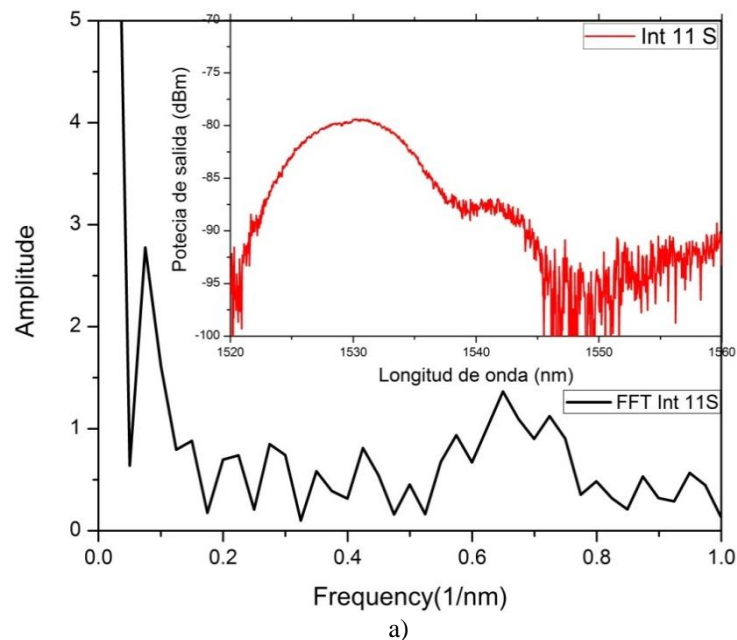


Figura 39. Patrón de interferencia de interferómetro Int10, a) sin reflector y b) con reflector.

Las pruebas se realizaron con y sin reflector para así poder apreciar mejor el efecto aportado por este mismo y encontrar un patrón de interferencia apropiado para esta

aplicación. De manera que se puede concluir que el patrón más adecuado para esta aplicación es el de la figura 39(a)

En la figura 40 se observa el patrón de interferencia generado por el interferómetro Int11, cuya longitud es de 4 cm con un offset respecto al núcleo de $20\mu\text{m}$. La figura 40 (a) presenta el patrón de interferencia sin utilizar el reflector. De acuerdo a la FFT calculada, presenta dos modos de propagación, el fundamental y un modo predominante en el revestimiento localizado en la frecuencia 0.073 nm^{-1} . En la figura 40 (b), al utilizar el reflector se reacoplan más modos y se elimina el ruido obteniendo franjas nuevas que modulan al patrón de la figura 40 (a). Estas franjas cuentan con un contraste máximo de 11.52 dBm . De acuerdo a la FFT calculada, esta cuenta con dos modos de propagación, el modo fundamental y un modo predominante en el revestimiento localizado en la frecuencia de 0.62 nm^{-1} .



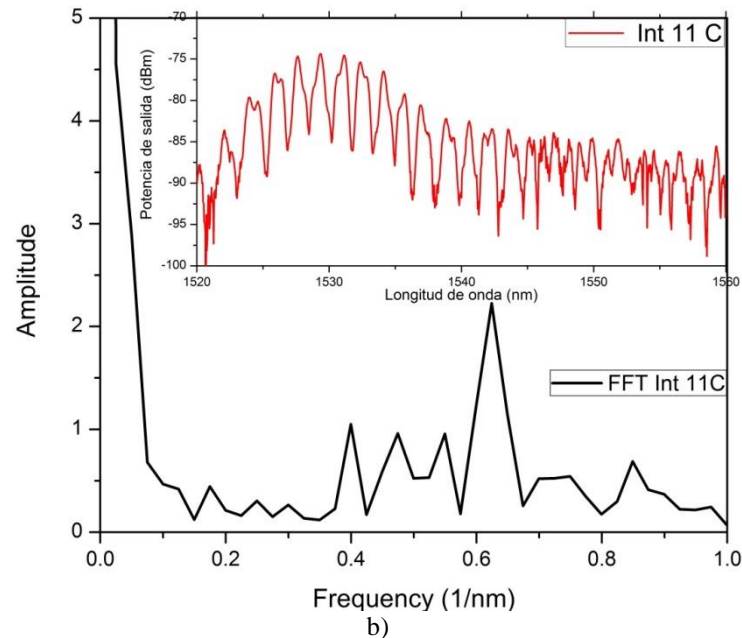
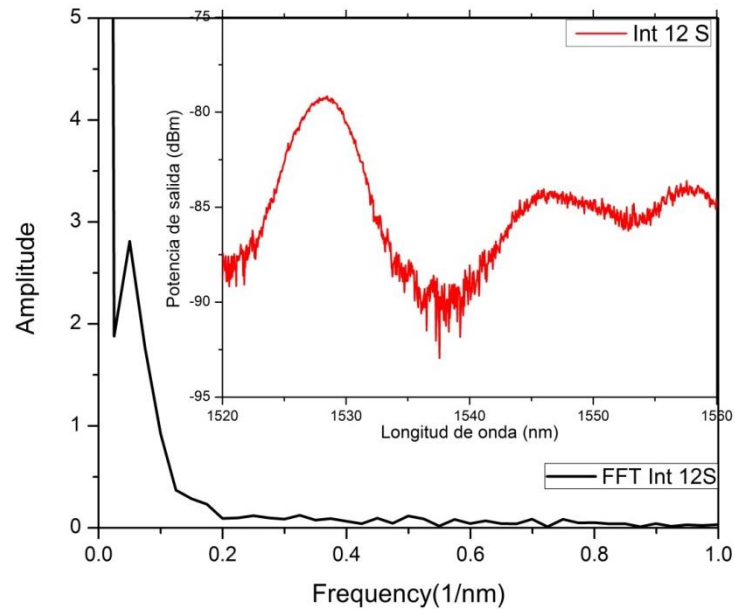


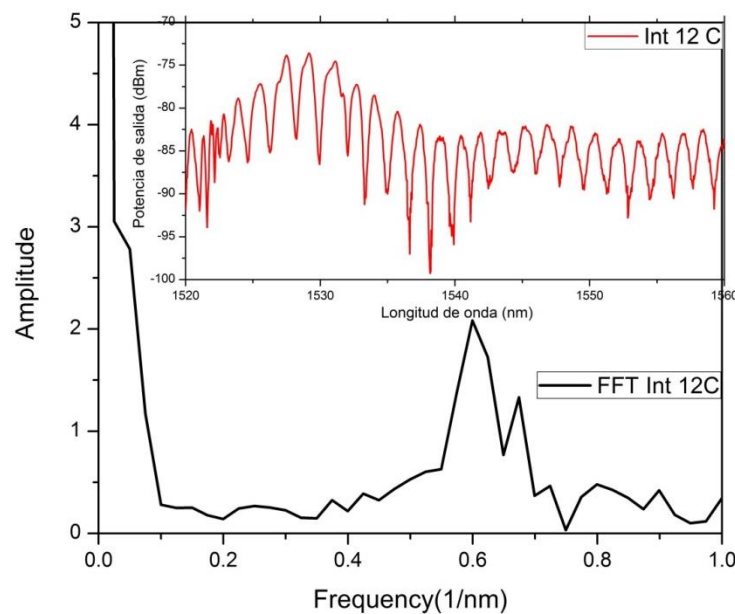
Figura 40. Patrón de interferencia de interferómetro Int11, a) sin reflector y b) con reflector.

Para este interferómetro se puede concluir que el patrón de interferencia más adecuado para esta aplicación es el de la figura 40 (b), ya que cuenta con franjas que tienen un contraste relativamente grande, y por consiguiente un rango de medición grande.

Se observa en la figura 41 el patrón de interferencia generado por el interferómetro Int12, cuya longitud es de 4 cm con un offset respecto al núcleo de $30\mu\text{m}$. La figura 41 (a) presenta el patrón de interferencia generado sin utilizar el reflector. De acuerdo a la FFT calculada, presenta dos modos de propagación, el fundamental y un modo predominante en el revestimiento localizado en la frecuencia 0.05 nm^{-1} . Este patrón de interferencia contiene un pico máximo ubicado en 1528.34 nm con una potencia de salida de -79.22 dBm . En la figura 41 (b) utilizando el reflector, se obtienen franjas montadas sobre el patrón de interferencia de la figura 41 (a). Las franjas cuentan con un contraste máximo de 17.08 dBm . De acuerdo con la FFT calculada, contiene tres modos de propagación, el modo fundamental y dos modos predominantes en el revestimiento localizados en las frecuencias de 0.59 y 0.67 nm^{-1} .



a)



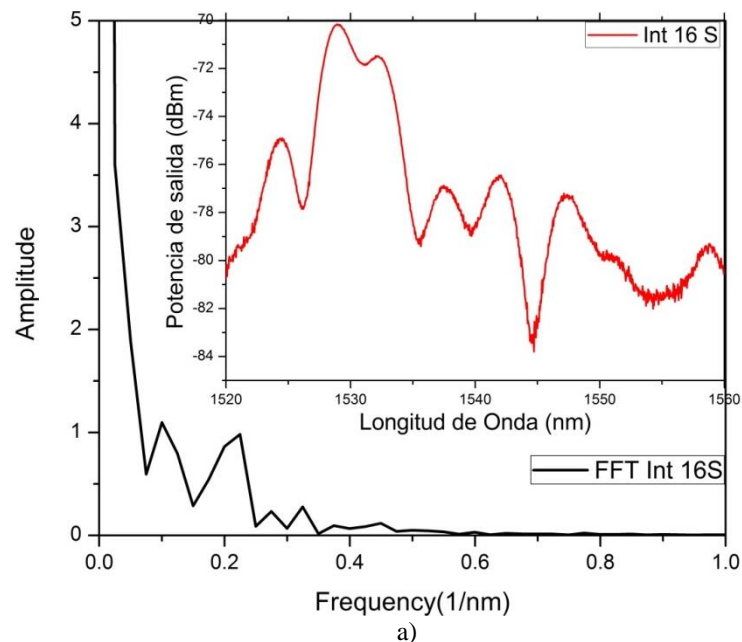
b)

Figura 41. Patrón de interferencia de interferómetro Int12, a) sin reflector y b) con reflector.

Para este interferómetro se puede concluir que el patrón de interferencia más adecuado para esta aplicación es el de la figura 41 (b), ya que cuenta con franjas que tienen un contraste relativamente grande, y un rango de medición grande.

En la figura 42 se observa el patrón de interferencia generado por el interferómetro Int16, cuya longitud es de 6 cm con un offset respecto al núcleo de 10 μ m. La figura 42(a) presenta el patrón de interferencia generado sin utilizar el reflector. De

acuerdo a la FFT calculada, presenta tres modos de propagación, el modo fundamental y dos modos predominantes en el revestimiento localizados en la frecuencia 0.1 y 0.22 nm^{-1} . El patrón de interferencia tiene un pico máximo ubicado en 1528.95 nm con una potencia de salida de -70.18 dBm. El contraste máximo de franja es de 6.83 dBm. En la figura 42 (b) utilizando el reflector, se obtienen franjas montadas sobre el patrón de interferencia de la figura 42 (a). Estas franjas montadas en el patrón anterior tienen un contraste muy pequeño, lo que da la apariencia de presencia de ruido. De acuerdo a la FFT calculada, presenta los mismos tres modos de propagación pero con menor amplitud.



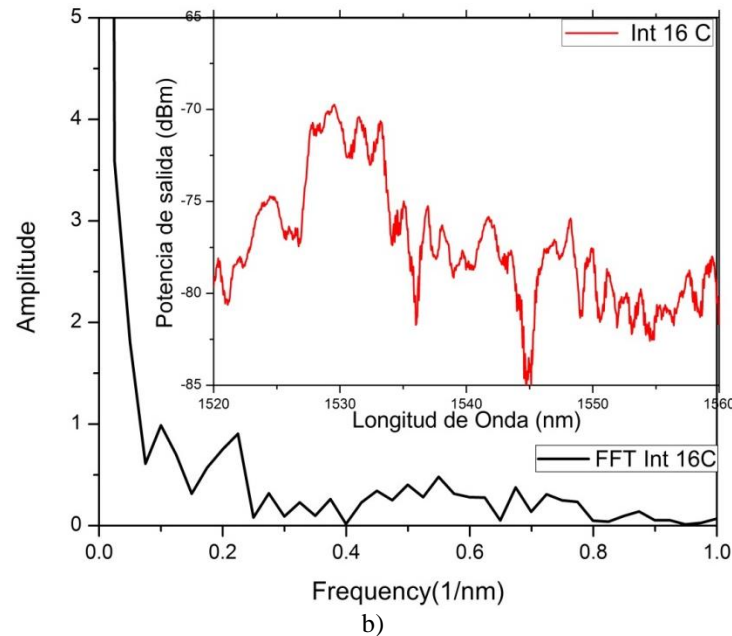


Figura 42. Patrón de interferencia de interferómetro Int16, a) sin reflector y b) con reflector.

Para este interferómetro se puede concluir que el patrón de interferencia más adecuado para esta aplicación es el de la figura 42(a), ya que cuenta con franjas más definidas que el patrón de la figura 42(b). El patrón de la figura 42(b) tiene mayor cantidad de franjas pero con un contraste muy pequeño, lo cual para esta aplicación no es muy apropiado.

En la figura 43 se observa el patrón de interferencia generado por el interferómetro Int19, que tiene una longitud de 7 cm y un offset respecto al núcleo de $10\mu\text{m}$. La figura 43(a) presenta el patrón de interferencia generado sin utilizar el reflector. De acuerdo a la FFT calculada, presenta tres modos de propagación, el modo fundamental y dos modos predominantes en el revestimiento localizados en las frecuencias 0.19 y 0.24 nm^{-1} . El patrón de interferencia tiene un pico máximo localizado en 1529.52 nm con una potencia de salida de -69.77 dBm y un contraste de franja máximo de 4.231 dBm . En la figura 43(b) presenta el patrón de interferencia generado utilizando el reflector. En la FFT calculada se observan tres modos de propagación, el fundamental y dos modos que podrían ser los modos predominantes en el revestimiento, ubicados en las frecuencias 0.09 y 0.17 nm^{-1} .

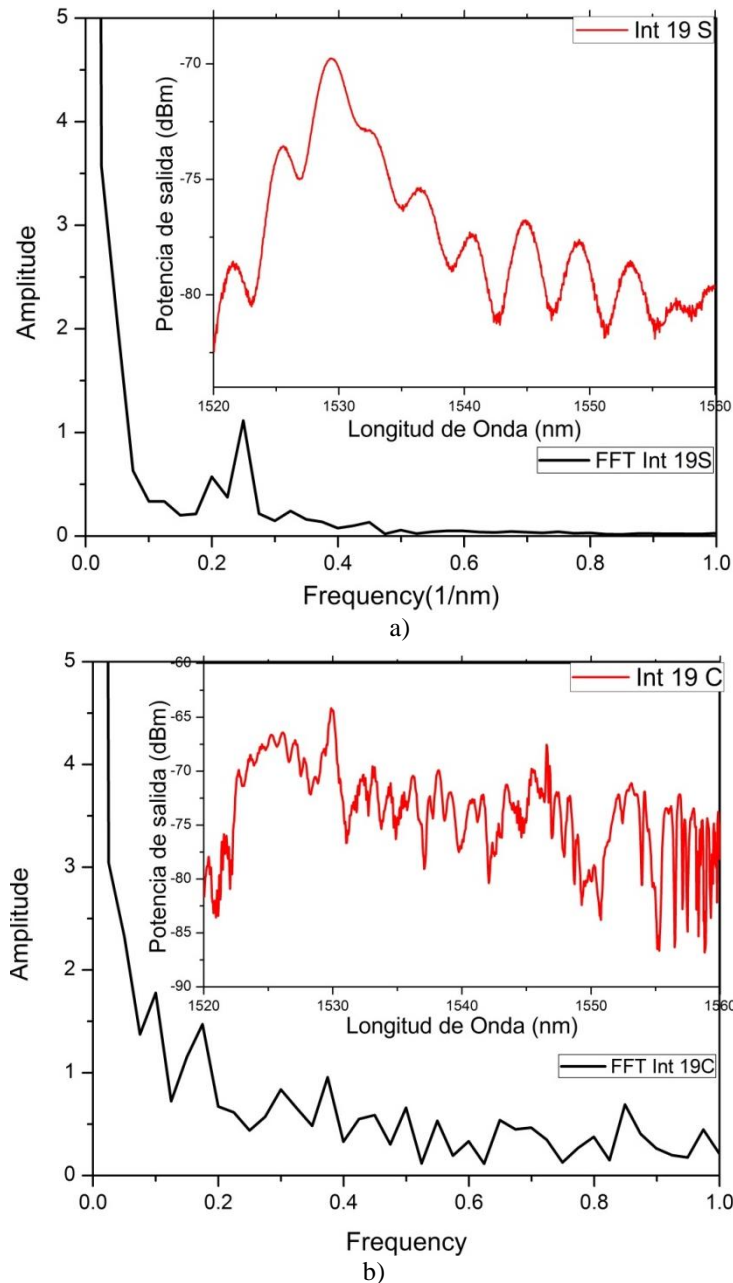
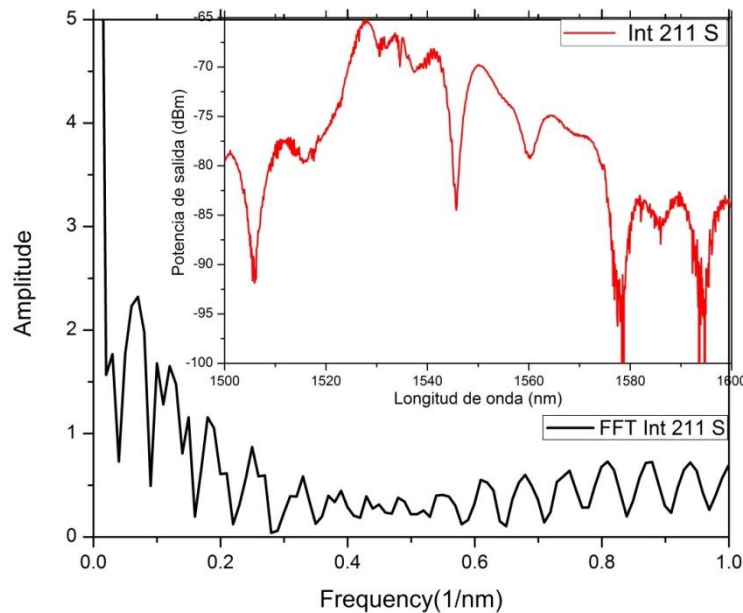


Figura 43. Patrón de interferencia de interferómetro Int19, a) sin reflector y b) con reflector.

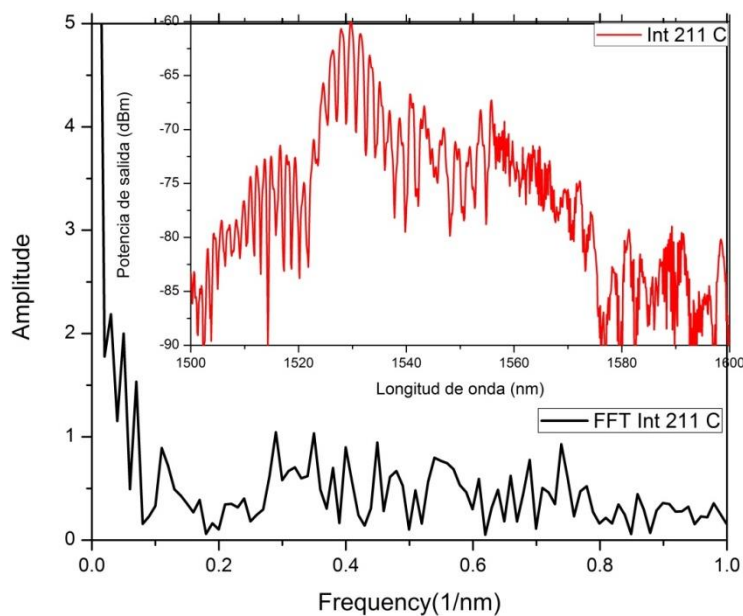
Para este interferómetro se puede concluir que el patrón de interferencia más adecuado para esta aplicación es el de la figura 43(a), ya que cuenta con franjas mejor definidas.

En la figura 44 se observa el patrón de interferencia generado por el interferómetro Int211, que tiene una longitud de 4 cm y un offset respecto al núcleo de 20 μ m. La figura 42(a) presenta el patrón de interferencia generado sin utilizar el reflector. De

acuerdo a la FFT calculada, tiene varios picos que podrían ser modos de propagación o ruido. En la figura 44(b) se presenta el patrón de interferencia utilizando el reflector. En este patrón se obtienen franjas montadas sobre el patrón de interferencia de la figura 44(a). La FFT calculada, de igual manera, presenta varios modos de propagación o ruido. Las franjas presentan un contraste de 11 dBm. El pico máximo se localiza en 1529.7 nm con una potencia de salida de -63.95 dBm.



a)



b)

Figura 44. Patrón de interferencia de interferómetro Int211, a) sin reflector y b) con reflector.

Para este interferómetro se puede concluir que el patrón de interferencia más adecuado para esta aplicación es el de la figura 44(b), ya que cuenta con franjas mejor definidas y con un contraste relativamente grande, lo que provoca tener un rango de medición más amplio.

4.5. Patrones de interferencia de interferómetros con empalme tipo Burbuja.

De acuerdo al proceso de fabricación de la sección 3.6, se fabricó una amplia gama de interferómetros con empalme Burbuja con diferentes medidas, con el propósito de encontrar el mejor patrón de interferencia generado. En base a la figura 28, las longitudes utilizadas variaron desde 1 hasta 7 centímetros.

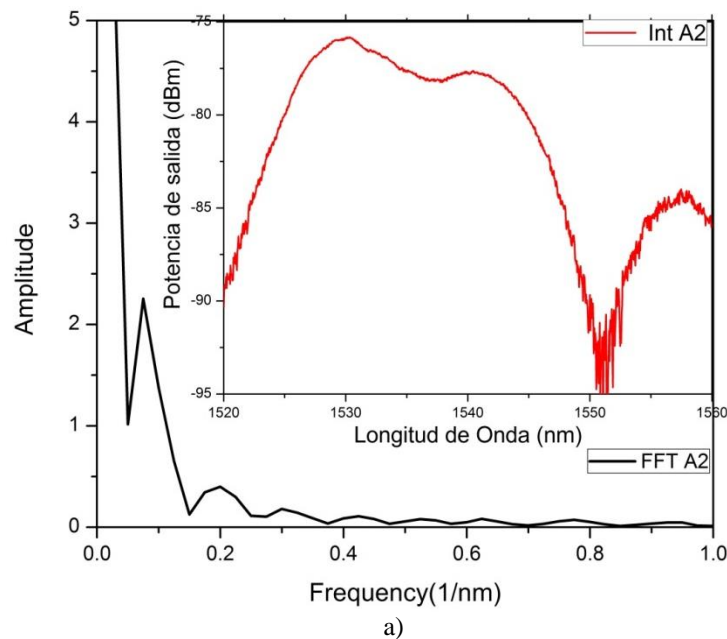
De todos los interferómetros fabricados se seleccionaron los que presentan un patrón de interferencia relativamente bueno. En la tabla 4.5 se muestran estos interferómetros junto con sus parámetros de construcción y las descargas eléctricas aplicadas.

Características de Interferómetros de Burbuja				
Nombre	Figura	Longitud (L) cm.	Descargas electricas iniciales	Descargas electricas finales
IntA2	45	2	3	10
IntA3	46	3	2	10
IntA5	47	5	3	9
IntA6	48	6	1	8
IntB1	49	1	1	11
IntB2	50	2	1	15
IntB3	51	3	2	16
IntBD1	52	4	1	9

Tabla 4.5. Parámetros de fabricación de interferómetros con empalme core-offset.

Se observa en la figura 45 el patrón de interferencia generado por el interferómetro IntA2, cuya longitud es de 2 cm. La figura 45(a) presenta el patrón de interferencia generado sin utilizar el reflector. De acuerdo a la FFT calculada, presenta dos modos de propagación con muy poco ruido, el modo fundamental y el modo

predominante en el revestimiento ubicado en la frecuencia 0.07 nm^{-1} . La figura 45(b) presenta el patrón de interferencia utilizando el reflector. La FFT calculada presenta los mismos dos modos de propagación, el fundamental y un modo predominante en el revestimiento localizado en la frecuencia 1.02 nm^{-1} . Se obtiene un patrón con franjas nuevas montadas sobre el patrón de la figura 45(a). Estas franjas cuentan con un contraste de 6.82 dBm . El patrón cuenta con un pico máximo localizado en 1530.83 nm con una potencia de salida de -60.98 dBm



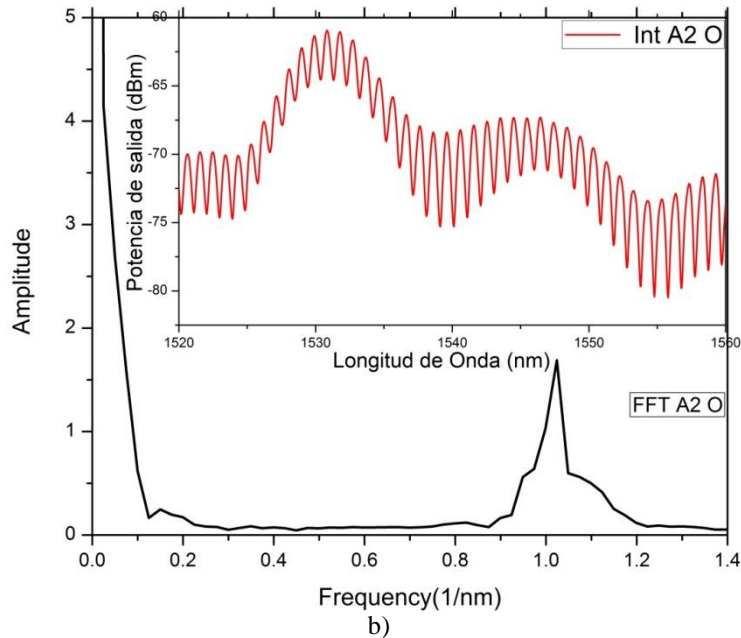


Figura 45. Patrón de interferencia de interferómetro IntA2, a) sin reflector y b) con reflector.

Para este interferómetro se puede concluir que el patrón de interferencia más adecuado para esta aplicación es el de la figura 45(b), ya que cuenta con franjas mejor definidas y con un contraste relativamente grande, lo que provoca tener un rango de medición más amplio.

Se observa en la figura 46 el patrón de interferencia generado por el interferómetro IntA3, cuya longitud es de 3 cm. La figura 46(a) presenta el patrón de interferencia generado sin utilizar el reflector. De acuerdo a la FFT calculada tiene dos modos de propagación con poco ruido, el modo fundamental y el modo predominante en el revestimiento localizado en la frecuencia 0.073 nm^{-1} . El patrón cuenta con un pico máximo ubicado en 1528.71 nm con una potencia de salida de -76.43 dBm y un contraste de franja máximo de 9.343 dBm . La figura 46(b) presenta el patrón de interferencia utilizando el reflector. La FFT calculada presenta tres modos de propagación, el fundamental y dos modos predominantes en el revestimiento ubicados en las frecuencias 0.099 y 0.173 nm^{-1} . Este patrón cuenta con un pico máximo ubicado en 1526.57 nm con una potencia de salida de -70.16 dBm y un contraste de franja máximo de 7.53 dBm .

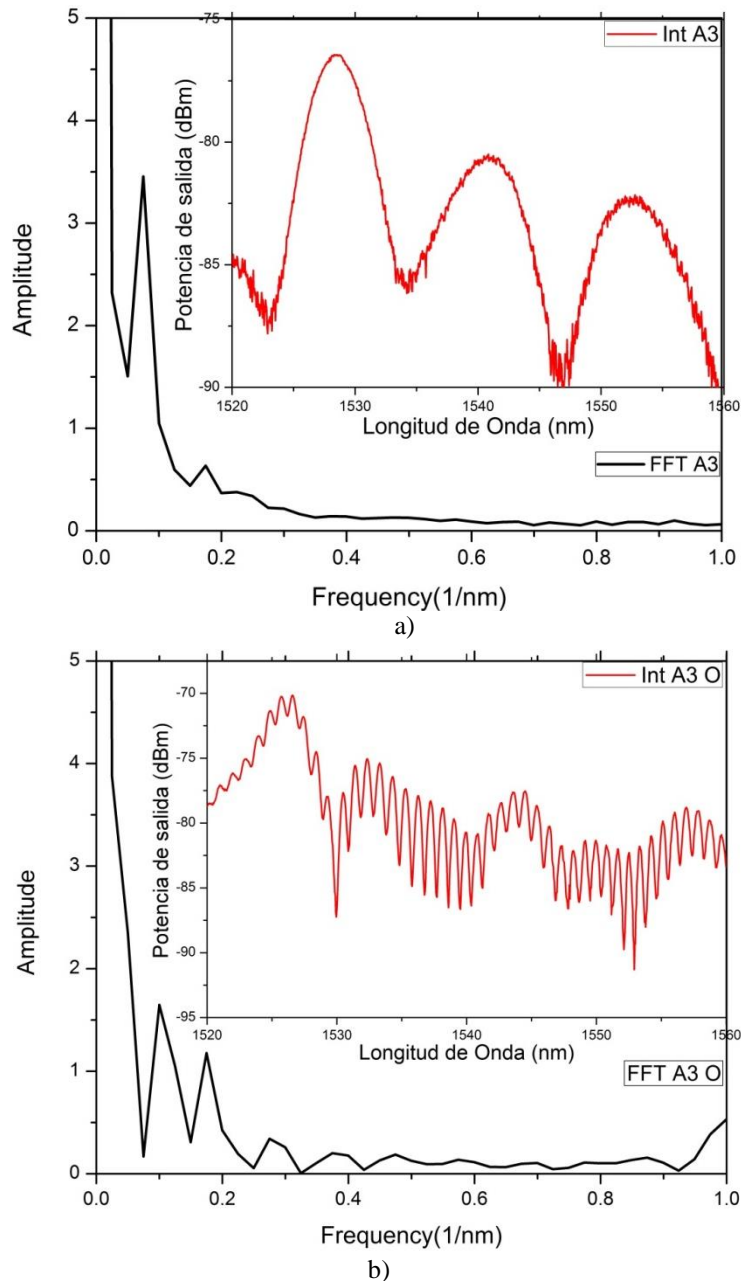
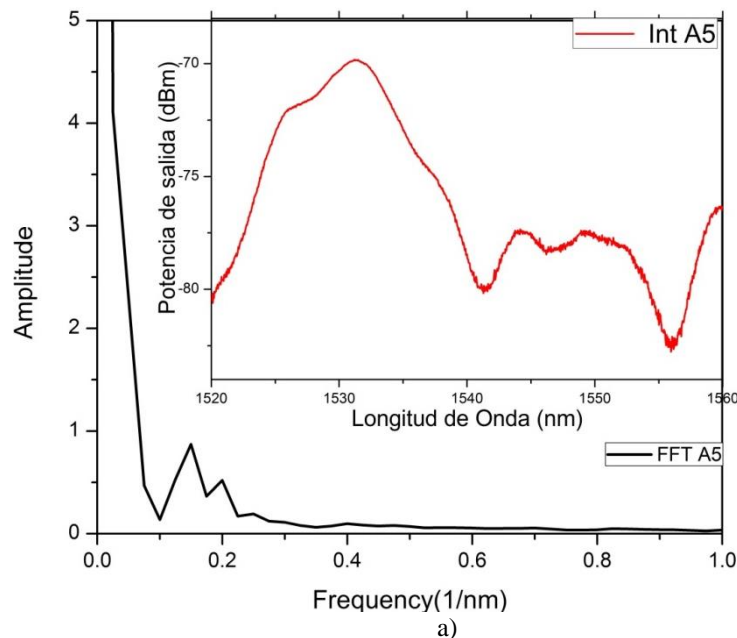


Figura 46. Patrón de interferencia de interferómetro IntA3, a) sin reflector y b) con reflector.

Para este interferómetro se puede concluir que el patrón de interferencia más adecuado para esta aplicación es el de la figura 46(b), ya que cuenta con un número mayor de franjas y con un contraste relativamente grande, lo que provoca tener un rango de medición más amplio.

La figura 47 presenta el patrón de interferencia generado por el interferómetro IntA5, cuya longitud es de 5 cm. La figura 47(a) presenta el patrón de interferencia

sin utilizar el reflector. De acuerdo a la FFT calculada, tiene tres modos de propagación, el fundamental y dos modos predominantes en el revestimiento localizados en las frecuencias 0.151 y 0.199 nm^{-1} . La figura 47(b) presenta el patrón de interferencia utilizando el reflector. La FFT calculada también presenta tres modos de propagación, el fundamental y dos modos predominantes en el revestimiento ubicados en las frecuencias 0.076 y 0.15 nm^{-1} . Se observa nuevas franjas montadas sobre el patrón de interferencia de la figura 47(a). Este patrón cuenta con un pico máximo ubicado en 1531.54 nm con una potencia de salida de -62.44 dBm y con un contraste de franja máximo de 2.99 dBm.



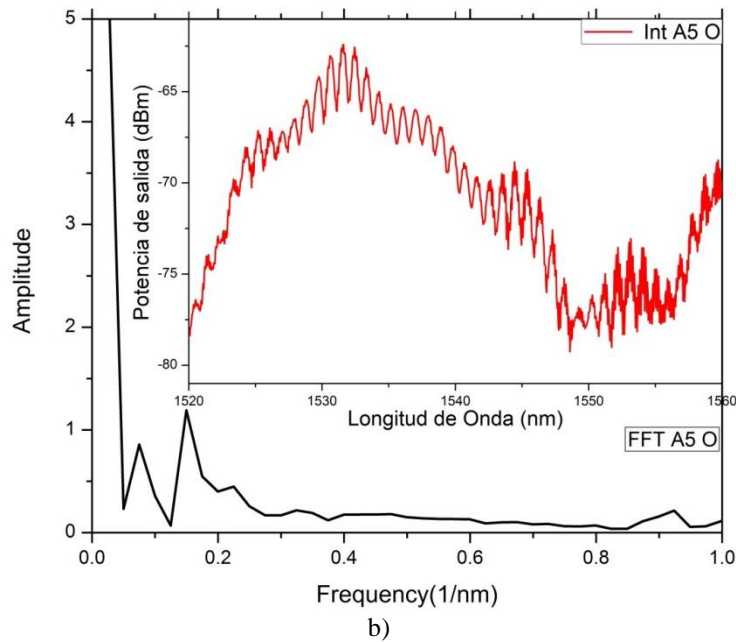
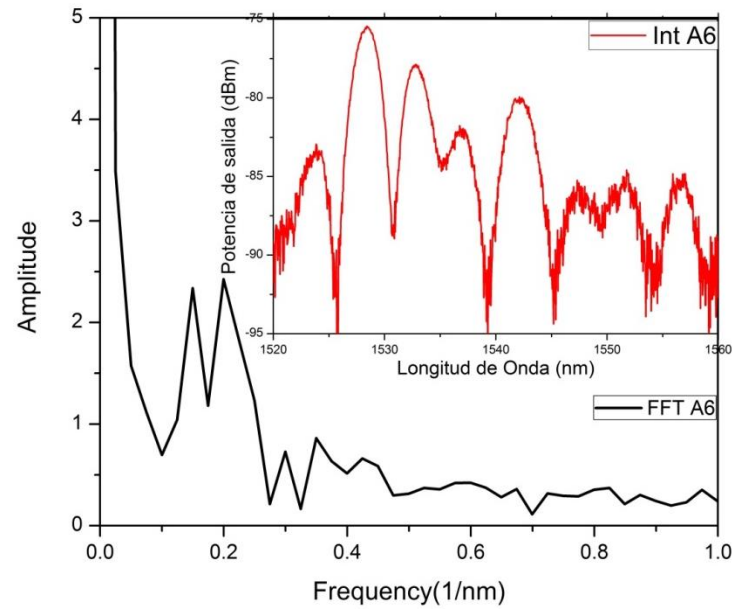


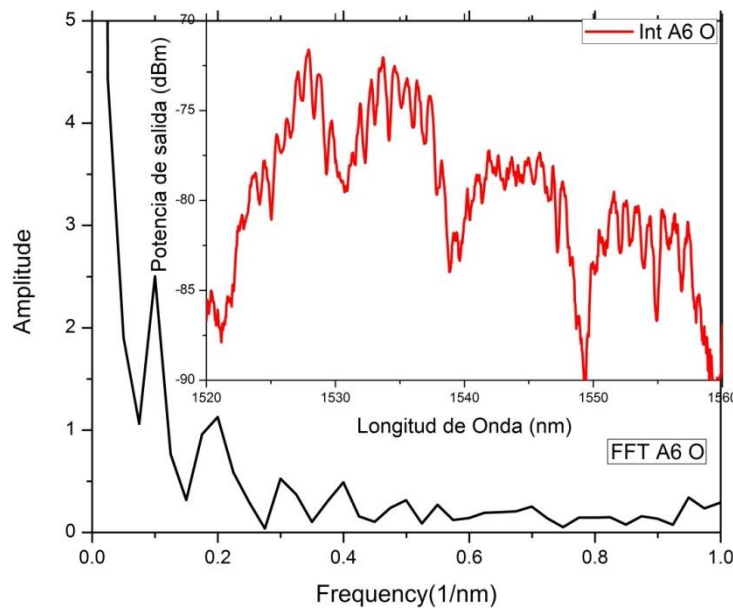
Figura 47. Patrón de interferencia de interferómetro IntA5, a) sin reflector y b) con reflector.

Para este interferómetro se puede concluir que el patrón de interferencia más adecuado para esta aplicación es el de la figura 47(b), ya que cuenta con un número mayor de franjas.

Se observa en la figura 48 el patrón de interferencia generado por el interferómetro IntA6, cuya longitud es de 6 cm. La figura 48(a) presenta el patrón de interferencia sin utilizar el reflector. De acuerdo a la FFT calculada, tiene tres modos de propagación, el fundamental y dos modos predominantes en el revestimiento ubicados en las frecuencias 148 y 199 nm^{-1} . El patrón de interferencia tiene un pico máximo ubicado en 1528.43 nm con una potencia de salida de -75.54 dBm y un contraste máximo de 13.16 dBm. En la figura 48(b) utilizando el reflector se obtienen nuevas franjas montadas sobre el patrón de interferencia de la figura 48(a). Estas franjas tienen un contraste máximo de 4.62 dBm. De acuerdo a la FFT calculada, presenta tres modos de propagación, el fundamental y dos modos predominantes en el revestimiento ubicados en las frecuencias 0.099 y 0.198 nm^{-1} .



a)



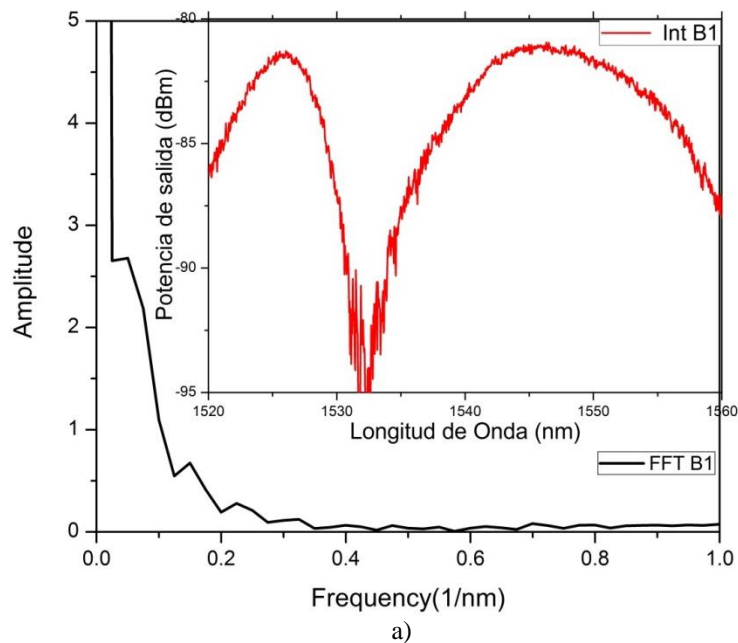
b)

Figura 48. Patrón de interferencia de interferómetro IntA6, a) sin reflector y b) con reflector.

Para este interferómetro se puede concluir que ambos patrones de interferencia pueden ser utilizados para esta aplicación, ya que el patrón de la figura 48(a) presenta franjas con un contraste relativamente grande y el patrón de la figura 48(b) presenta un mayor número de franjas.

En la figura 49 se observa el patrón de interferencia generado por el interferómetro IntB1, cuya longitud es de 1 cm. La figura 49(a) presenta el patrón de interferencia

sin utilizar el reflector. En la FFT calculada no se logra apreciar un número determinado de modos más que el modo fundamental. En la figura 49(b), utilizando el reflector, se obtiene un nuevo patrón de interferencia con franjas que tienen un contraste máximo de 6.26 dBm. El patrón de interferencia cuenta con un pico máximo ubicado en 1528.18 nm con una potencia de salida de -64.83 dBm. De acuerdo a la FFT calculada, presenta dos modos de propagación, el fundamental y un modo predominante en el revestimiento ubicado en la frecuencia 1.099 nm^{-1} .



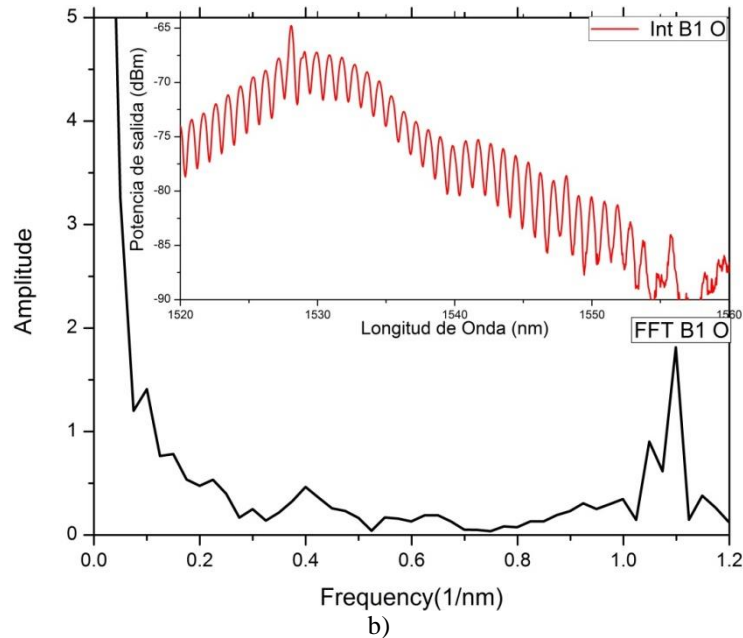


Figura 49. Patrón de interferencia de interferómetro IntB1, a) sin reflector y b) con reflector.

Para este interferómetro se puede concluir que el patrón de interferencia adecuado para esta aplicación, es el de la figura 49(b), ya que presenta un mayor número de franjas con un contraste relativamente grande.

En la figura 50 se observa el patrón de interferencia generado por el interferómetro IntB2, cuya longitud es de 2 cm. La figura 50(a) presenta el patrón de interferencia sin utilizar el reflector. En la FFT calculada no se alcanza a distinguir los modos de propagación o el ruido que tiene este interferómetro. Este patrón tiene un pico máximo ubicado en 1530.22 nm con una salida de potencia de -78.34 dBm. En la figura 50(b) utilizando el reflector se obtienen nuevas franjas montadas sobre la señal anterior. De acuerdo a la FFT, presenta varios picos de los cuales no se logra distinguir cuáles son modos de propagación y cuáles son ruido.

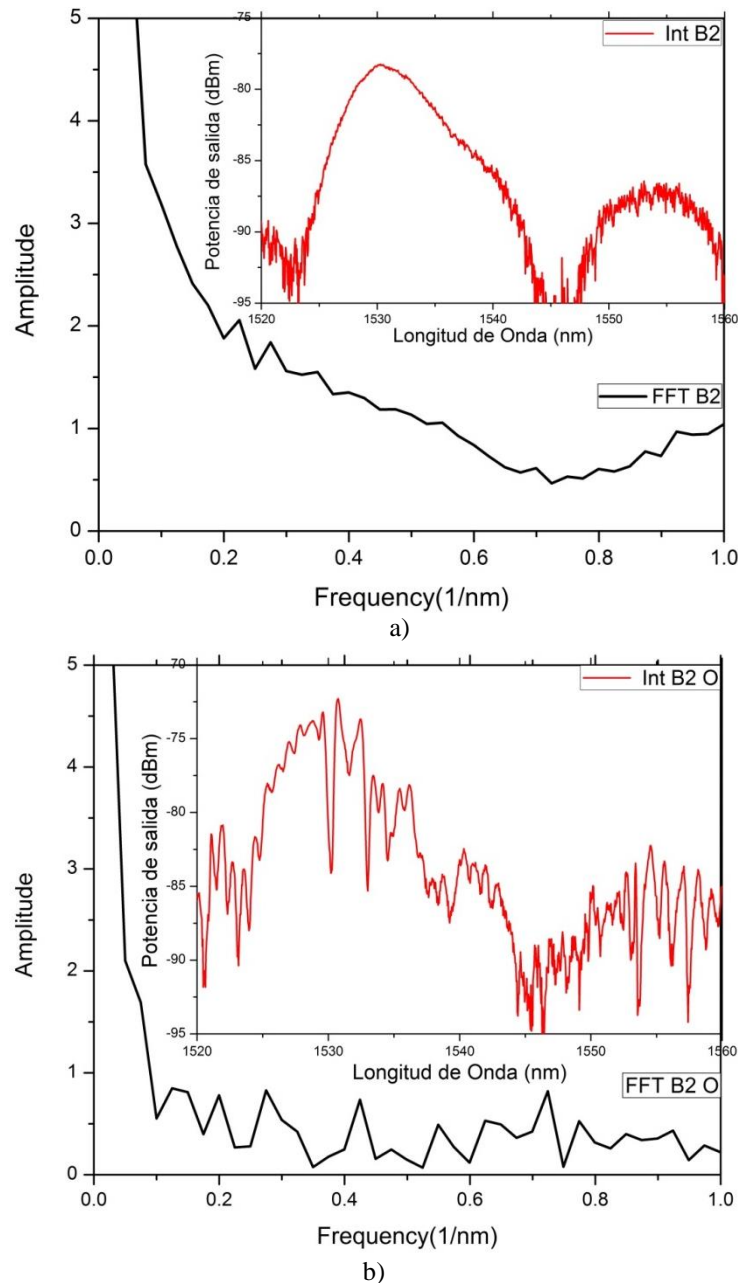
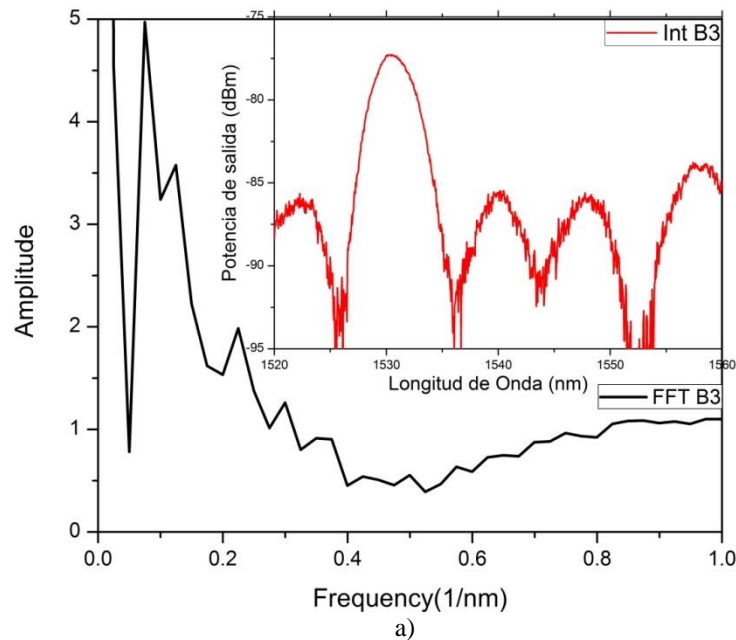


Figura 50. Patrón de interferencia de interferómetro IntB2, a) sin reflector y b) con reflector.

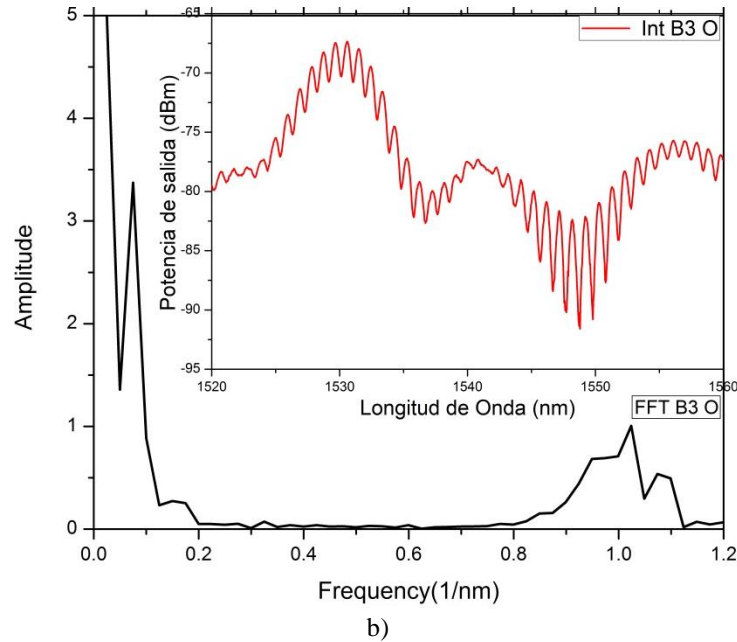
Para este interferómetro se puede concluir que ningún patrón de interferencia es adecuado para esta aplicación, ya que presenta mucho ruido y las franjas no están muy definidas.

En la figura 51 se observa el patrón de interferencia generado por el interferómetro IntB3, cuya longitud es de 3 cm. La figura 51(a) presenta el patrón de interferencia sin utilizar el reflector. De acuerdo a la FFT calculada tiene tres modos de

propagación, el fundamental y dos modos predominantes en el revestimiento ubicados en las frecuencias 0.073 y 0.125 nm^{-1} . Este patrón tiene un pico máximo ubicado en 1530.4 nm con una potencia de salida de -77.36 dBm . En la figura 51(b) se presenta el patrón de interferencia utilizando el reflector. De acuerdo a la FFT calculada, presenta tres modos de propagación, el fundamental y dos modos predominantes en el revestimiento ubicados en las frecuencias 0.074 y 1.02 nm^{-1} . En este patrón se generan nuevas franjas, cuenta con un pico máximo ubicado en 1530.66 nm con una potencia de salida de -67.55 dBm con un máximo contraste de franja 9.77 dBm .



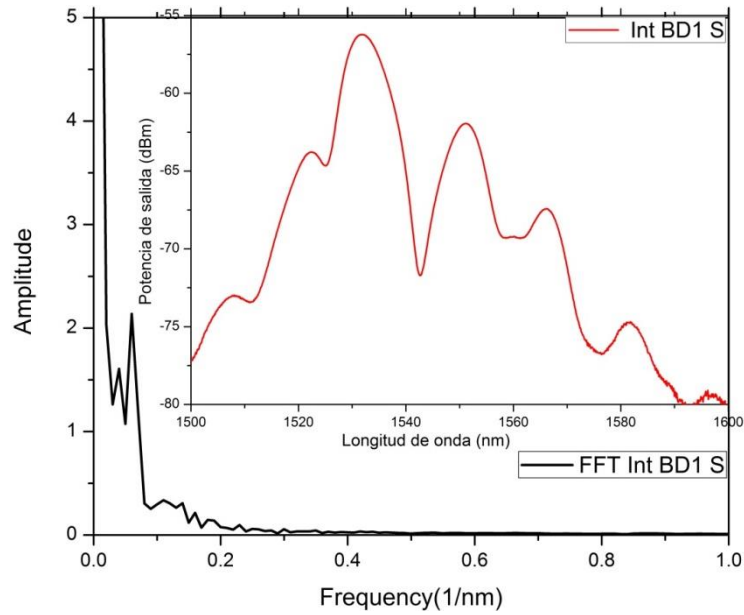
a)



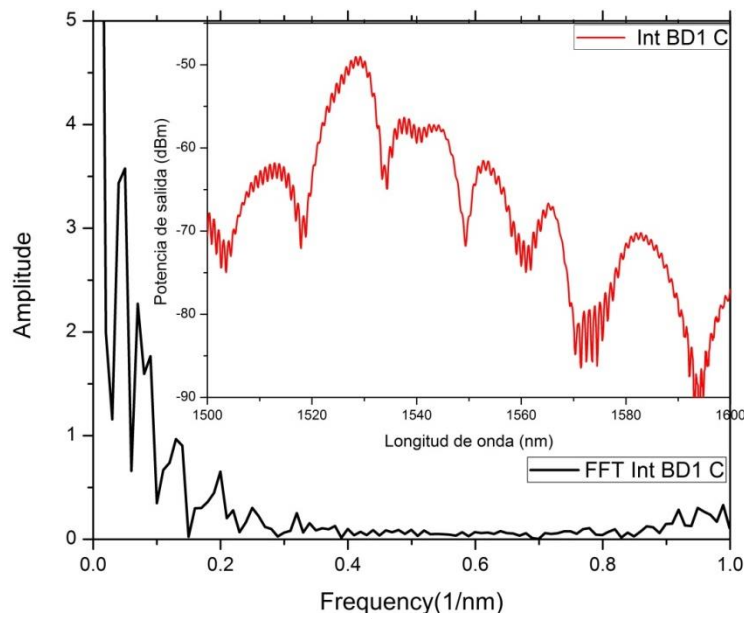
b) Figura 51. Patrón de interferencia de interferómetro IntB3, a) sin reflector y b) con reflector.

Para este interferómetro se puede concluir que el patrón de interferencia adecuado para esta aplicación, es el de la figura 51(b), ya que presenta un mayor número de franjas con un contraste relativamente grande y por lo tanto un rango de medición grande.

Se observa en la figura 52 el patrón de interferencia generado por el interferómetro IntBD1, cuya longitud es de 4 cm. La figura 52(a) presenta el patrón de interferencia sin utilizar el reflector. De acuerdo a la FFT calculada, tiene tres modos de propagación, el fundamental y dos modos predominantes en el revestimiento ubicados en las frecuencias 0.039 y 0.059 nm^{-1} . Este patrón tiene un pico máximo ubicado en 1531.83 nm con una potencia de salida de -56.21 dBm y con un contraste máximo de 15.31 dBm. En la figura 52 (b) se presenta el patrón generado utilizando el reflector. Se obtienen nuevas franjas montadas sobre la señal anterior. De acuerdo a la FFT calculada, presenta tres modos de propagación, el fundamental y dos modos predominantes en el revestimiento ubicados en las frecuencias 0.047 y 0.067 nm^{-1} .



a)



b)

Figura 52. Patrón de interferencia de interferómetro IntBD1, a) sin reflector y b) con reflector.

Para este interferómetro se puede concluir que el patrón de interferencia adecuado para esta aplicación, es el de la figura 52(a), ya que presenta franjas mejor definidas con un contraste relativamente grande y por lo tanto un rango de medición grande.

4.6. Arreglo experimental para detección de temperatura.

El arreglo utilizado para la detección de temperatura visto en la figura 53, es igual al utilizado para la obtención de los patrones de interferencia de la figura 40, en este caso solo se le agrega el control de temperatura y un adaptador para darle soporte al reflector. La potencia del diodo de mantuvo fija a 300 mW.

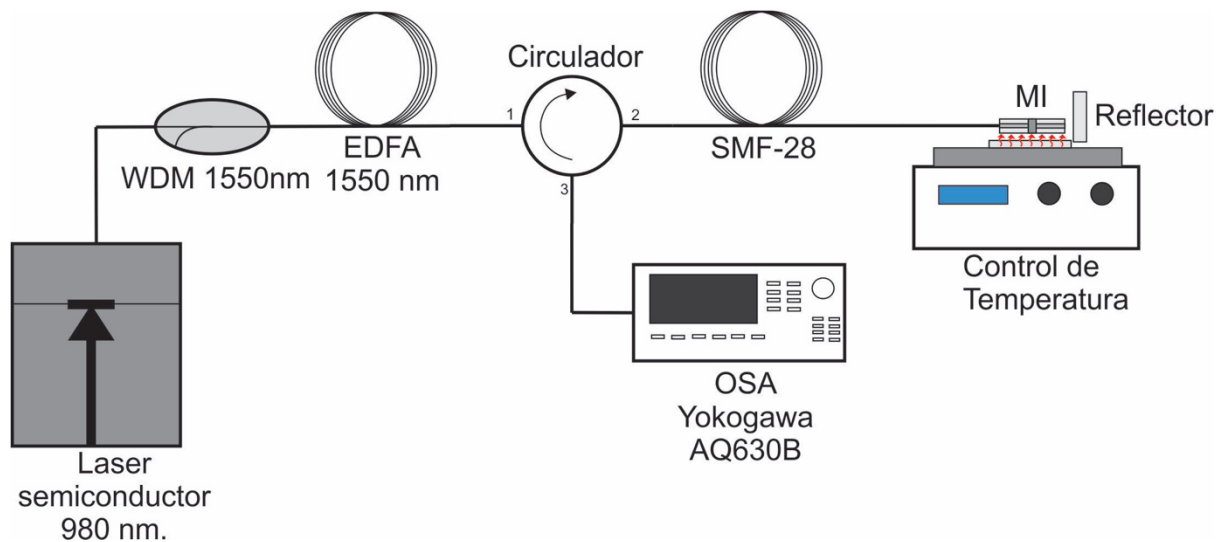


Figura 53. Arreglo experimental para la detección de temperatura.

4.6.1 Control de temperatura.

El control de temperatura utilizado es un control PID que controla la corriente suministrada a una celda Peltier. La celda funciona de acuerdo al efecto Peltier. Cuando se tiene un circuito dos materiales semiconductores diferentes (Tipo P y tipo N) unidos entre si y se aplica una corriente eléctrica, se generará una diferencia de temperaturas en las uniones de los materiales [9]. En una unión se absorbe calor y en la otra se desprende. A esto se le conoce como efecto Peltier. En la figura 54 se puede observar cómo está constituida una celda Peltier.



Figura 54. Celda Peltier [8].

Conectando el polo positivo de una fuente de corriente directa al material tipo N y el polo negativo al material tipo P, se tendrá en la cara de la unión N-P absorción de calor, mientras en la cara de la unión P-N se tendrá disipación de calor.

Al invertir la polaridad de la corriente eléctrica, también se invierte la absorción y la emisión de calor en las caras de las uniones de los materiales. Esto nos permite tener el control para enfriar o calentar alguna de las dos caras de la celda a utilizar [9-10].

El control de temperatura utilizado fue desarrollado en esta misma división (figura 55). Tiene un rango de operación de 5 a 95°C. Llegando de extremo a extremo en solo 28 segundos.



Figura 55. Control de temperatura.

El control puede mantener la temperatura estable por tiempo indefinido y tiene una variación por perturbaciones externas del orden de decimas de grado.

En la figura 56 se muestra el montaje del interferómetro sobre el control de temperatura. En la figura 56(a) se muestra el interferómetro fijado al control de temperatura, donde el cuerpo sensor del interferómetro queda sobre la placa peltier (placa blanca), para posteriormente aplicarle temperatura.



a)



b)



c)

Figura 56. a) Parte superior del control de temperatura con la celda Peltier color blanco, b) reflector montado en el soporte, c) montaje de interferómetro y reflector sobre el control de temperatura.

En la figura 56(b) se muestra la oblea utilizada como reflector montada sobre un soporte de madera que la mantiene en una posición estable para hacer las mediciones. En la figura 56(c) se muestran el interferómetro y la oblea montados

sobre el control de temperatura. El interferómetro queda sobre la placa Peltier y pegado a la oblea, sin embargo, la oblea no alcanza a tocar la placa Peltier.

4.7 Resultados.

De acuerdo al arreglo de la figura 53, se obtuvieron las caracterizaciones de los interferómetros con los mejores patrones de interferencia generados, vistos en la sección 4.5. Para su caracterización, a todos los interferómetros se les aplico un rango de temperatura de 0 a 50°C, aumentando la temperatura cada 2°C. Los comportamientos obtenidos de interferómetros relativamente buenos se muestran a continuación.

Interferómetro IntB1.

El interferómetro IntB1 con características descritas en la sección 4.5 presenta un comportamiento lineal utilizando el reflector. El valle P1 localizado en una longitud de onda alrededor de 1530 nm, es seleccionado por su alta potencia de salida y por tener un contraste de franja relativamente bueno. Este valle, en el rango de 8 a 26°C, presenta un corrimiento de franjas bastante claras, observadas en la figura 57(a). El valle P1 analizado tiene un rango de corrimiento de 1529.5 a 1530.9 nm y un contraste de franja de 7.34 dBm aproximadamente. De acuerdo a la figura 57(b), cuenta con una linealidad en longitud de onda de 0.987 y una sensibilidad de 75.7 pm/°C.

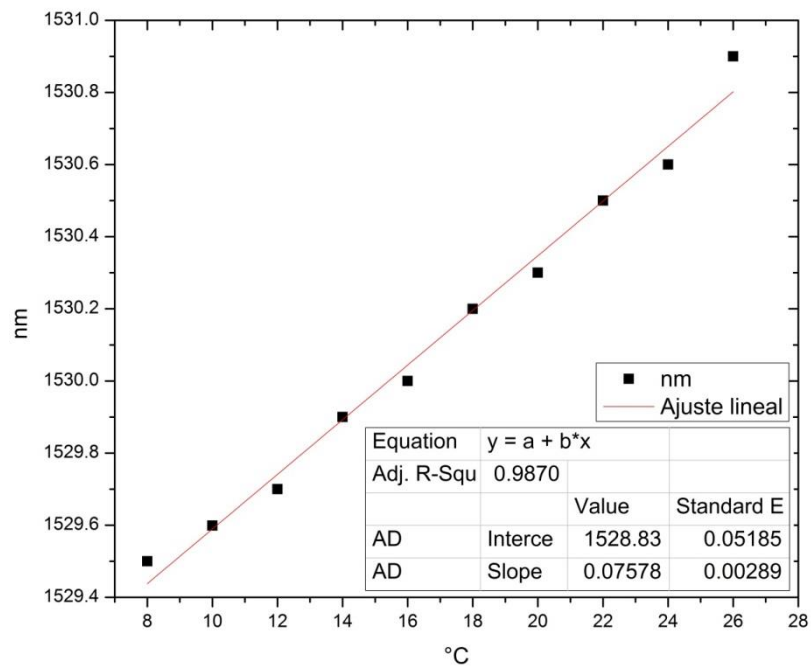
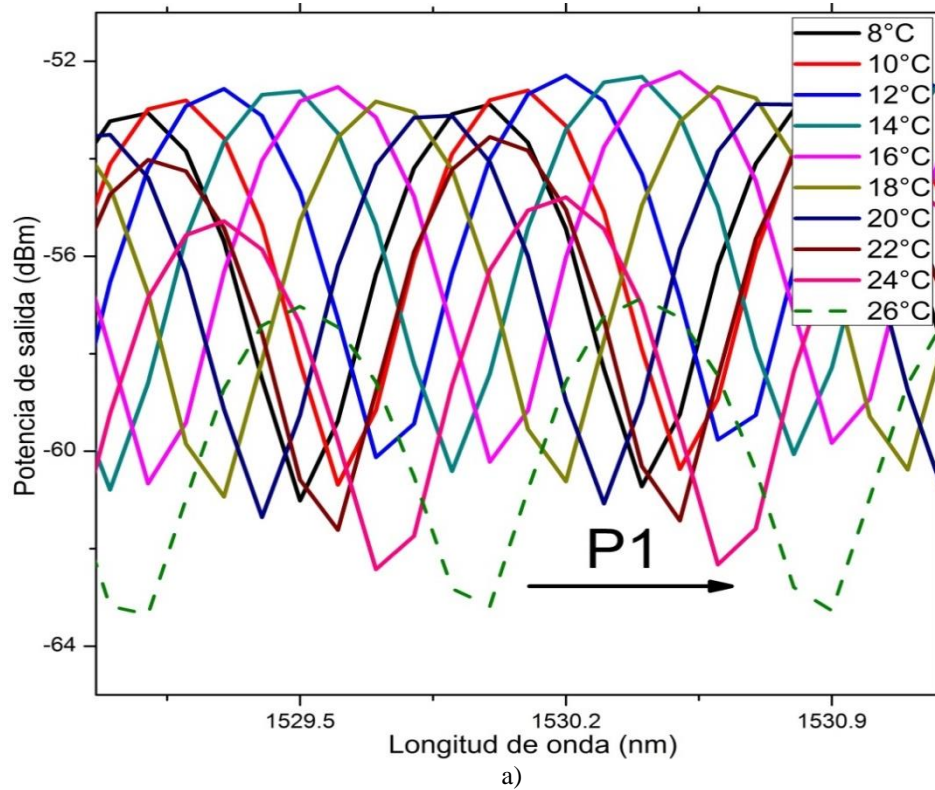
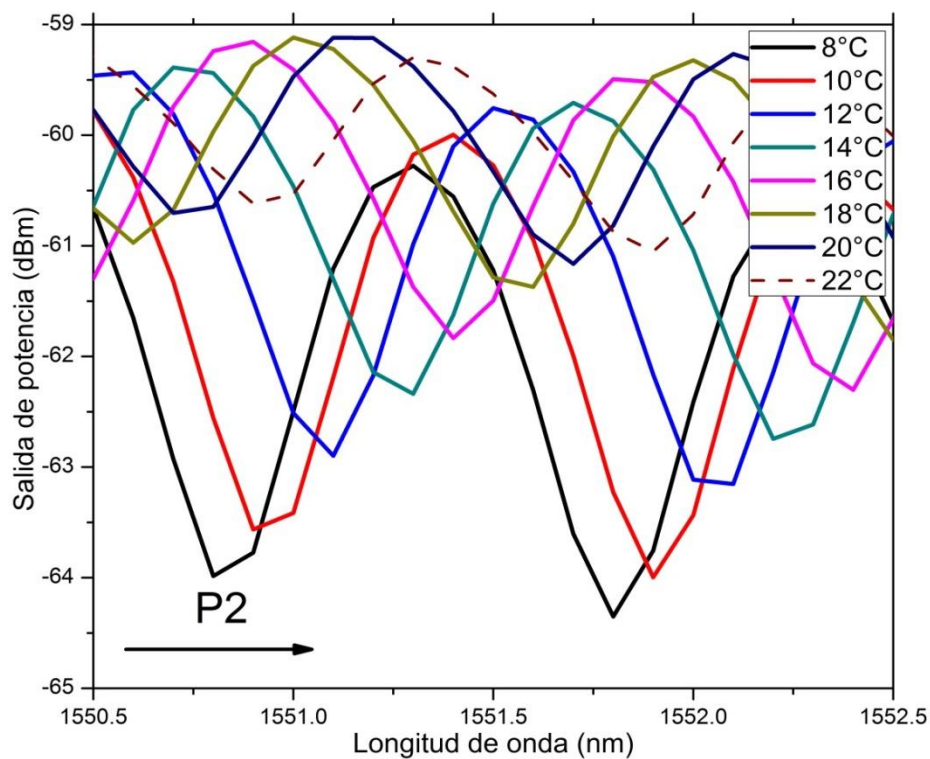
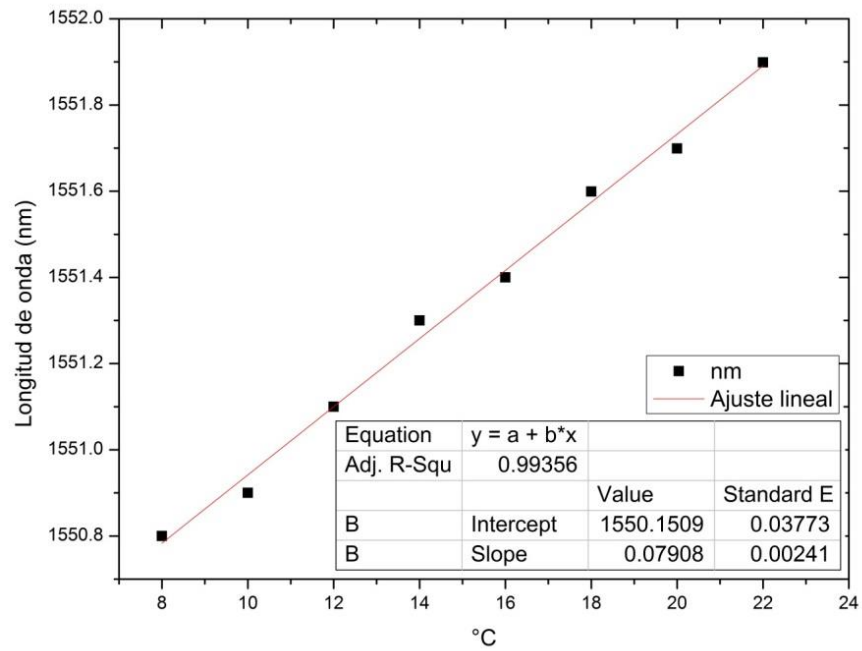


Figura 57. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntB1 a 1530 nm utilizando el reflector. a) Corrimiento de franjas, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm).

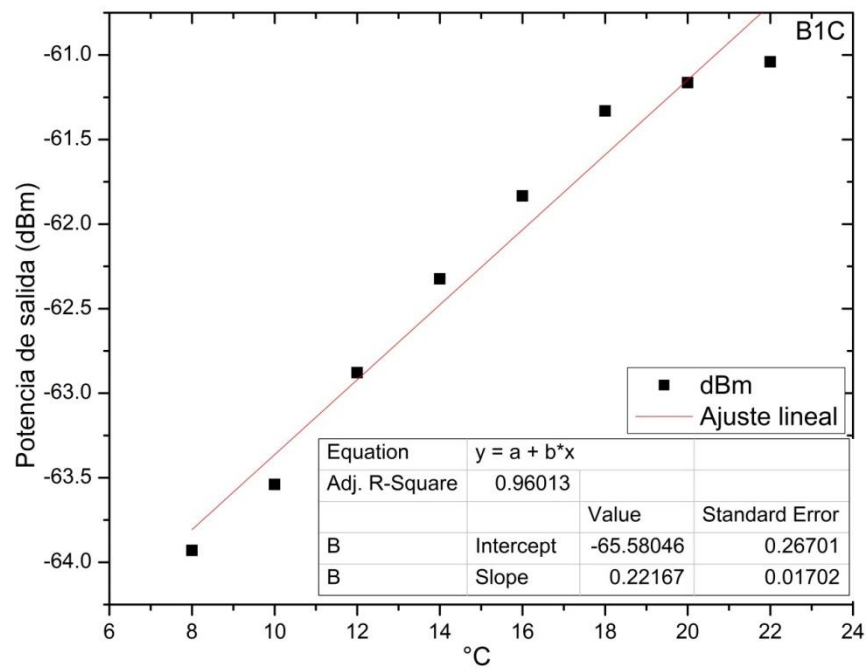
Para este mismo interferómetro, el valle P2 localizado en una longitud de onda alrededor de 1550 nm, es seleccionado por tener una mejor linealidad en comparación con el valle P1. Este valle, en el rango de 8 a 22°C, presenta un corrimiento de franjas bastante claras, observadas en la figura 56(a). El valle P2 analizado tiene un rango de corrimiento de 1550.8 a 1551.89 nm y un contraste de franja de 3.6 dBm aproximadamente. De acuerdo a la figura 58(b), cuenta con una linealidad en longitud de onda de 0.993 y una sensibilidad de 79.08 pm/°C. En la figura 58(c), la potencia de salida tiene una linealidad de 0.96 y una sensibilidad de 0.22 dBm/ °C.



a)



b)



c)

Figura 58. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntB1 a 1550 nm utilizando el reflector. a) Corrimiento de franjas, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm) y c) Comportamiento °C contra Potencia de salida (dBm)

Interferómetro IntA3.

El interferómetro IntA3 con características descritas en la sección 4.5 presenta un comportamiento lineal en un rango de 22 a 50 °C utilizando el reflector. Su espectro obtenido se muestra en la figura 59, en donde se pueden observar las señales montadas en la señal fundamental con ayuda del reflector. Los picos mostrados (P1, P3 y P4) son seleccionados para ser analizados ya que tienen una alta potencia de salida y presentan un comportamiento lineal.

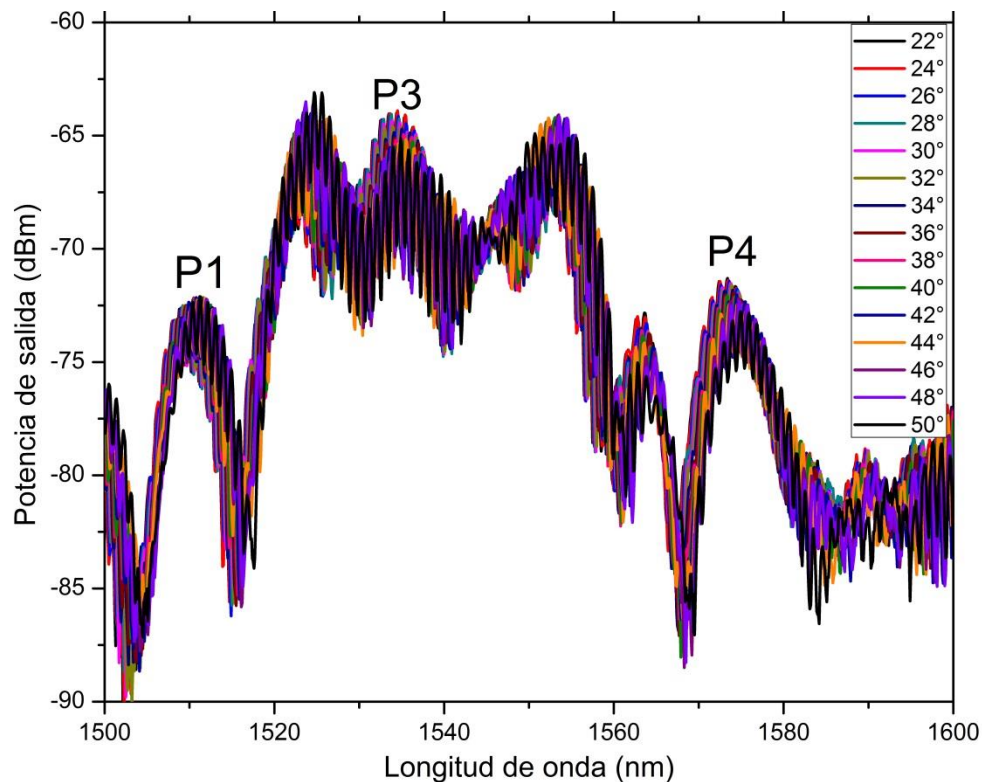
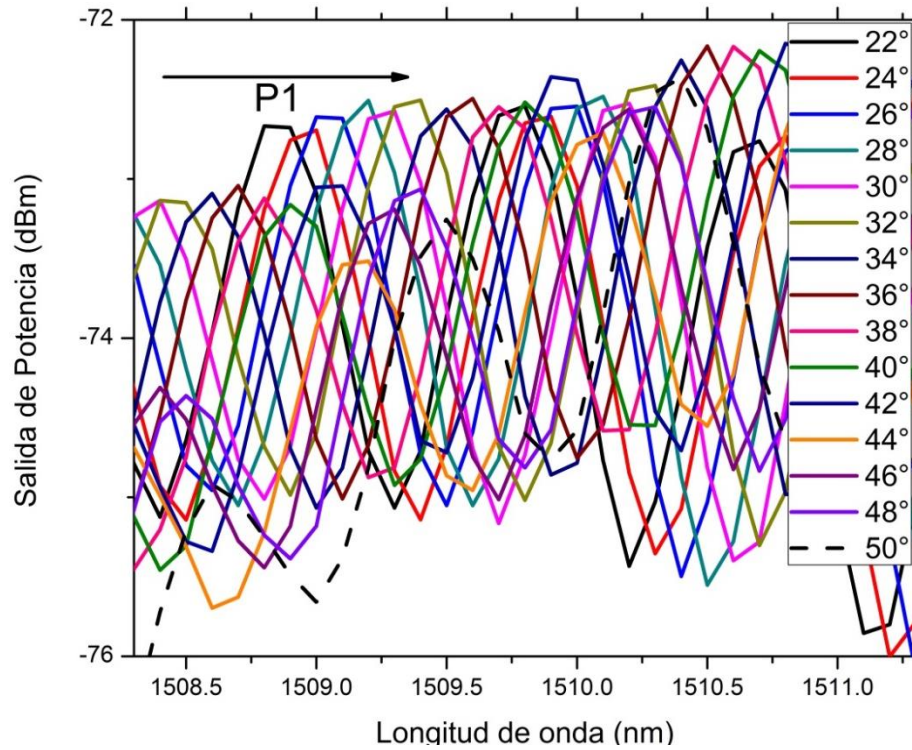
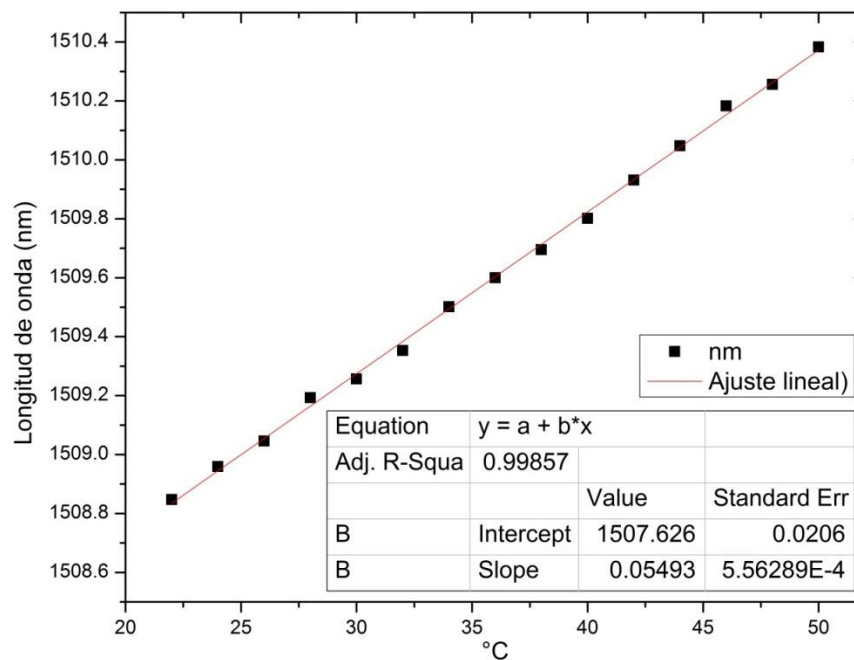


Figura 59. Espectro obtenido de la caracterización del interferómetro IntA3.

El pico P1 seleccionado se encuentra en una longitud de onda de alrededor de 1510 nm , en donde su corrimiento se presenta en la figura 60(a). El pico P1 analizado tiene un rango de corrimiento de 1508.84 a 1510.38 nm y presenta un contraste de franja de 2 dBm aproximadamente. De acuerdo a la figura 60(b), presenta una linealidad en longitud de onda de 0.998 y una sensibilidad de 54.9 pm/°C.



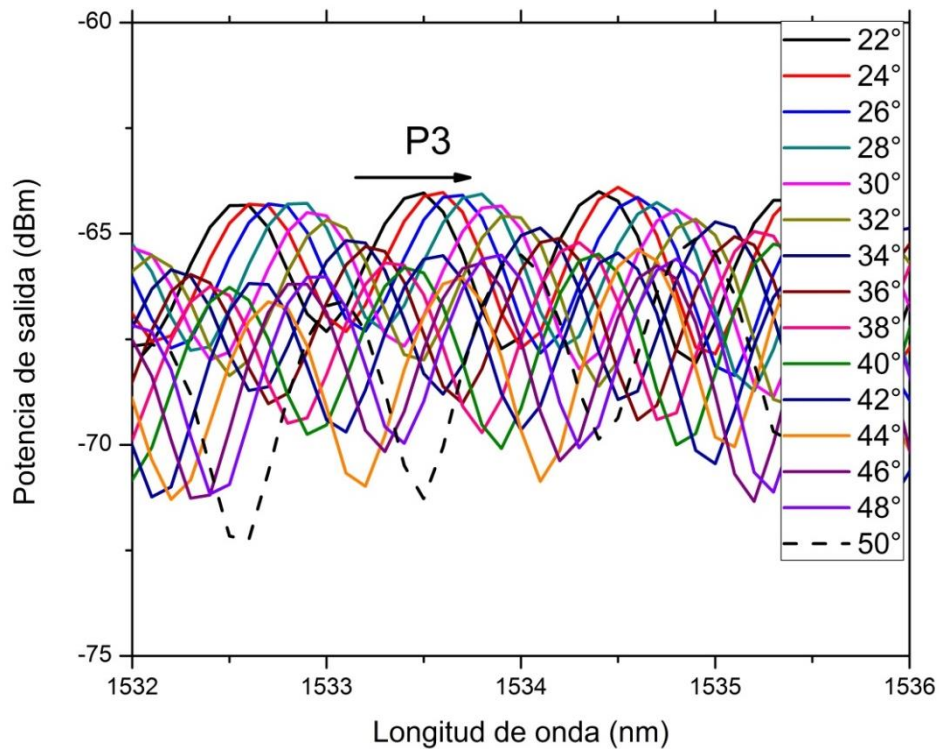
a)



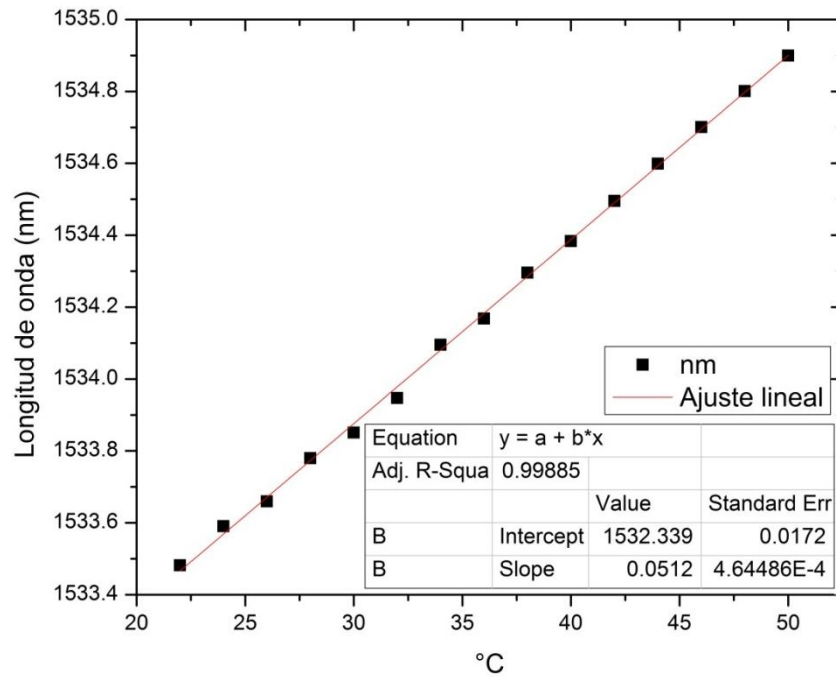
b)

Figura 60. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntA3 en el pico P1 a 1550 nm utilizando el reflector. a) Corrimiento de franjas, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm).

El pico P3 seleccionado se encuentra en una longitud de onda de alrededor de 1534 nm , en donde su corrimimiento se presenta en la figura 61(a). El pico P3 analizado tiene un rango de corrimiento de 1533.48 a 15534.89 nm y presenta un contraste de franja de 5.73 dBm aproximadamente. De acuerdo a la figura 61(b), presenta una linealidad en longitud de onda de 0.998 y una sensibilidad de 51.2 pm/°C.



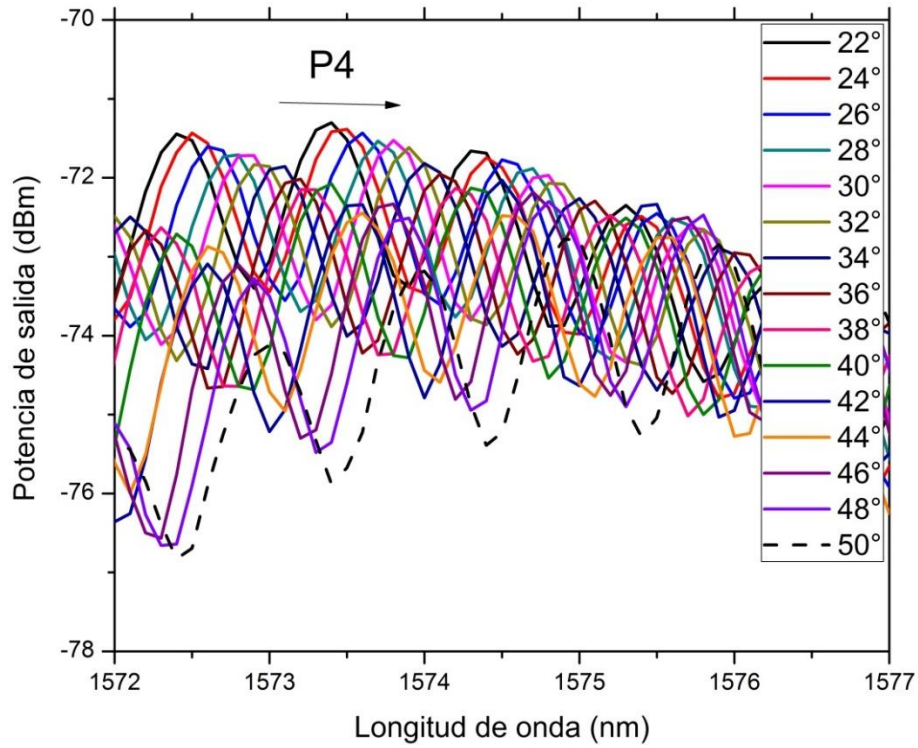
a)



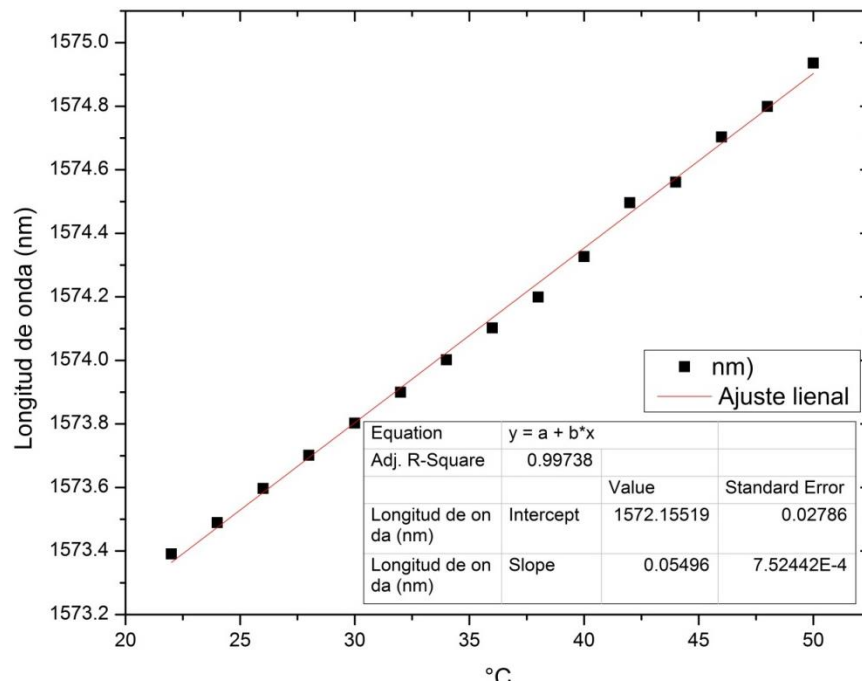
b)

Figura 61. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntA3 en el pico P3 a 1534 nm utilizando el reflector. a) Corrimiento de franjas, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm).

El pico P4 seleccionado se encuentra en una longitud de onda de alrededor de 1574 nm, en donde su corrimiento se presenta en la figura 62(a). El pico P4 analizado tiene un rango de corrimiento de 1573.39 a 1574.93 nm y presenta un contraste de franja de 2.58 dBm aproximadamente. De acuerdo a la figura 62(b), presenta una linealidad en longitud de onda de 0.997 y una sensibilidad de 54.9 pm/°C.



a)



b)

Figura 62. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntA3 en el pico P4 a 1574 nm utilizando el reflector. a) Corrimiento de franjas, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm).

Interferómetro IntBD1.

El interferómetro IntBD1 con características descritas en la sección 4.5 presenta un comportamiento lineal en un rango de 20 a 50 °C sin utilizar el reflector. Su espectro obtenido se muestra en la figura 63, en donde el valle y el pico mostrados (P1 y P2), son seleccionados para ser analizados ya que tienen una alta potencia de salida y presentan un comportamiento lineal.

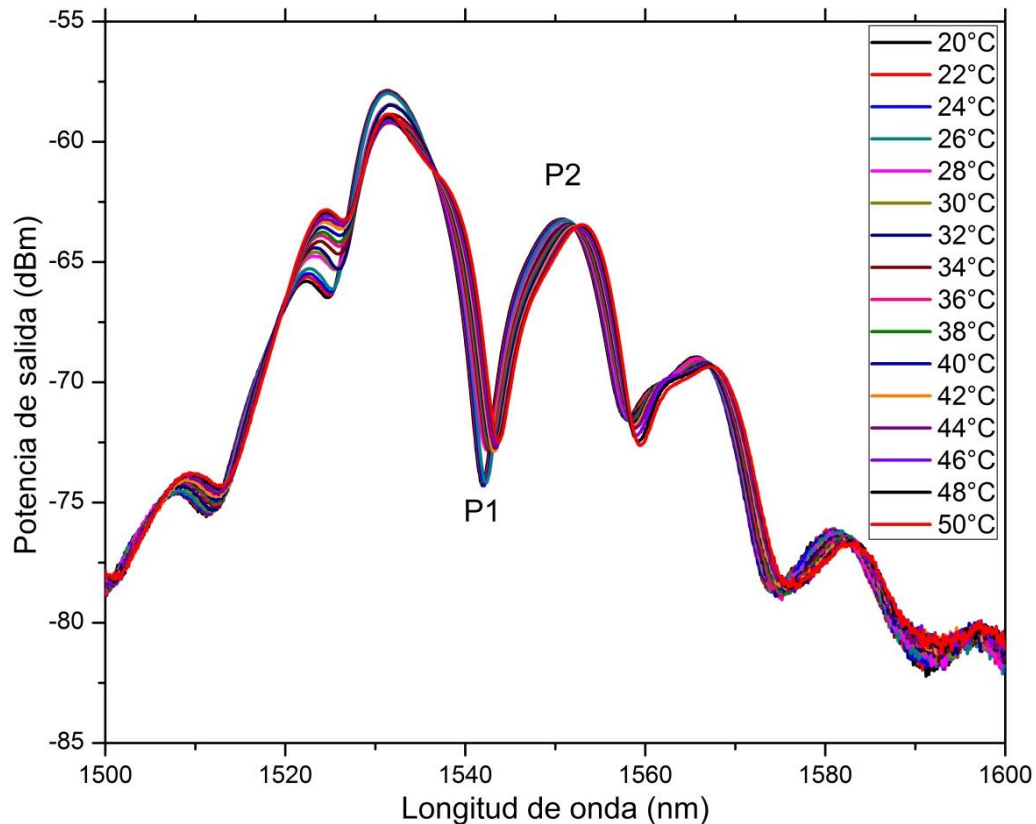
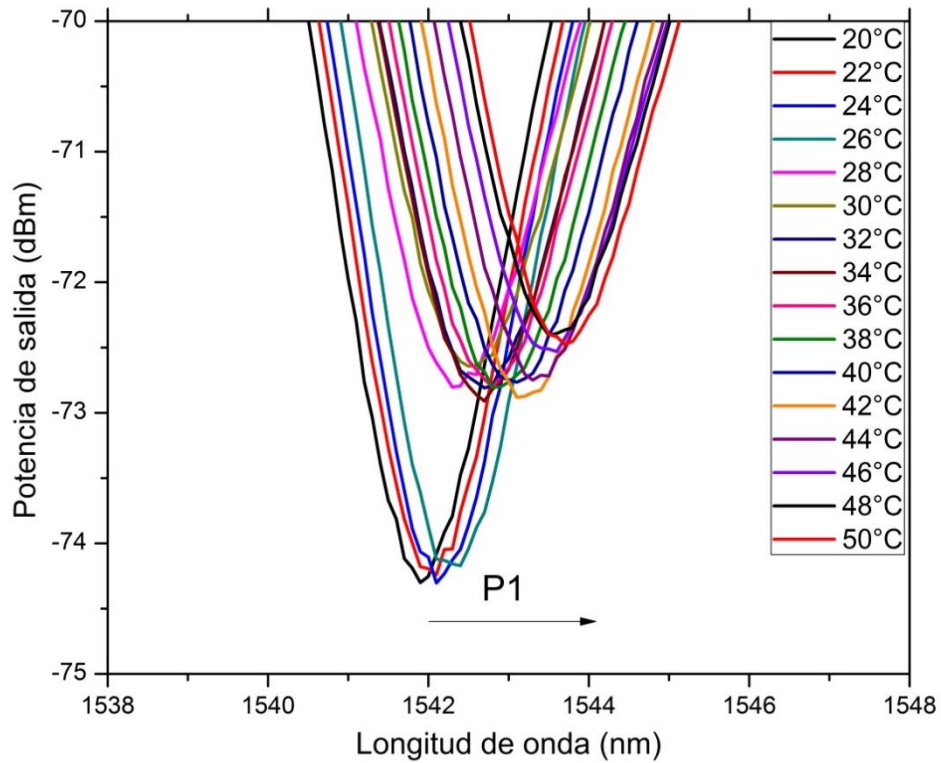


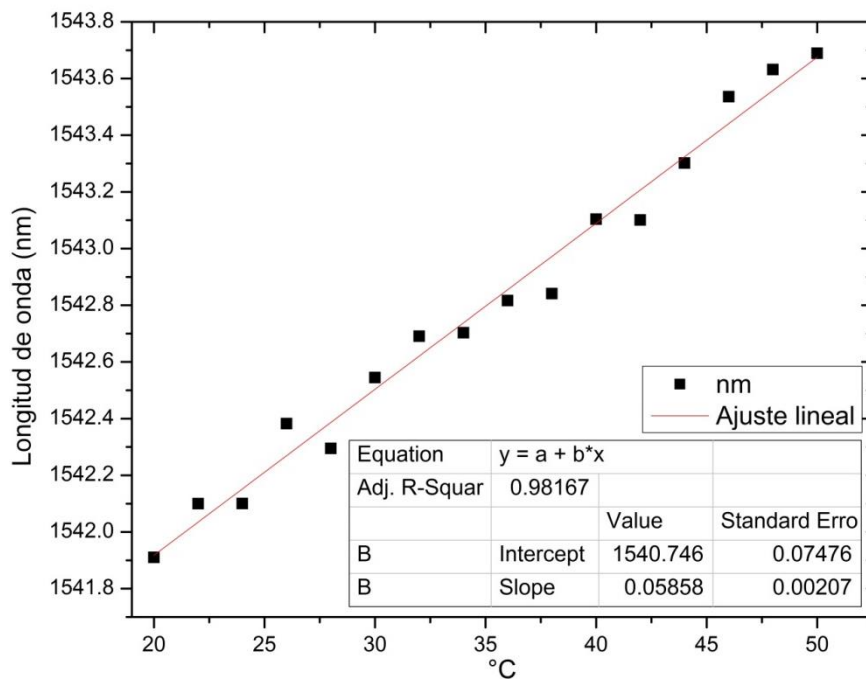
Figura 63. Espectro obtenido de la caracterización del interferómetro IntBD1 sin reflector.

El valle P1 seleccionado se encuentra en una longitud de onda de alrededor de 1542 nm , en donde su corrimiento se presenta en la figura 64(a). El valle P1 analizado tiene un rango de corrimiento de 1541.91 a 1543.68 nm y presenta un contraste de franja de 15.48 dBm aproximadamente. De acuerdo a la figura 64(b), presenta una linealidad en longitud de onda de 0.981 y una sensibilidad de 58.5 pm/°C.

“Sensor de temperatura basado en un interferómetro intermodal tipo Michelson con fibra óptica monomodo”



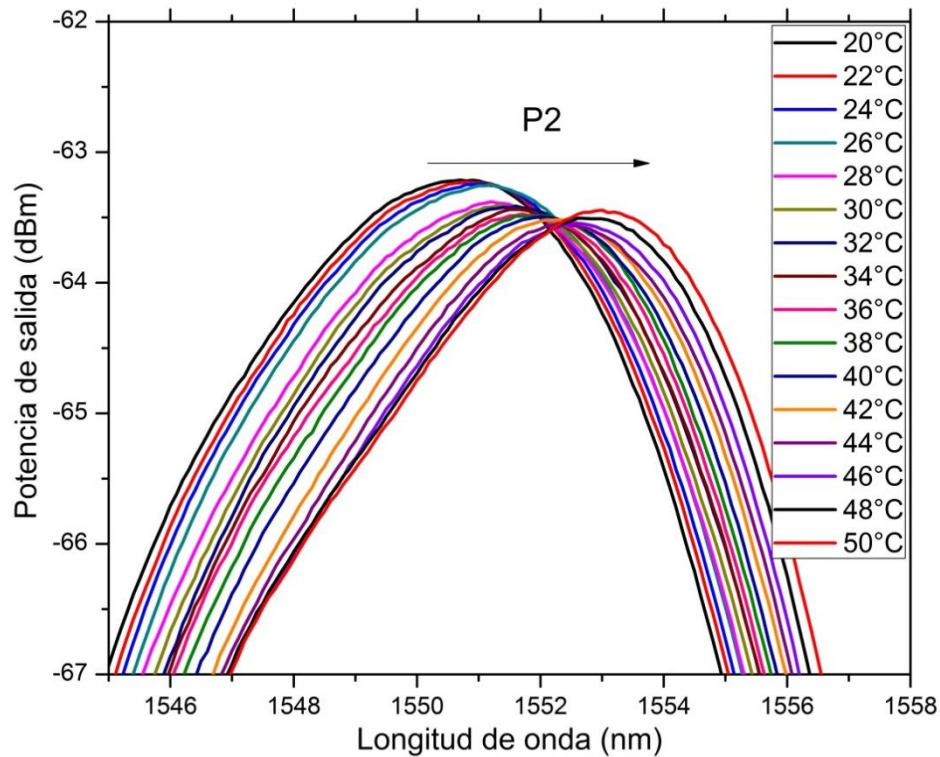
a)



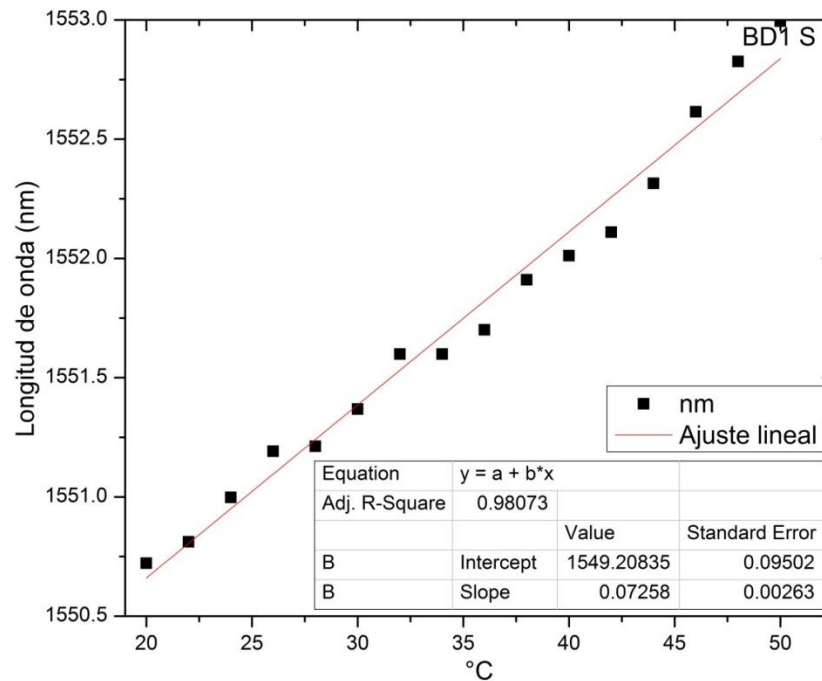
b)

Figura 64. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntBD1 en el P1 sin el reflector. a) Corrimiento de franjas en Int BD1, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm)

El pico P2 seleccionado se encuentra en una longitud de onda de alrededor de 1551 nm , en donde su corrimiento se presenta en la figura 65(a). El pico P2 analizado tiene un rango de corrimiento de 1550.72 a 1552.99 nm y presenta un contraste de franja de 10 dBm aproximadamente. De acuerdo a la figura 65(b), presenta una linealidad en longitud de onda de 0.98 y una sensibilidad de 72.5 pm/°C.



a)

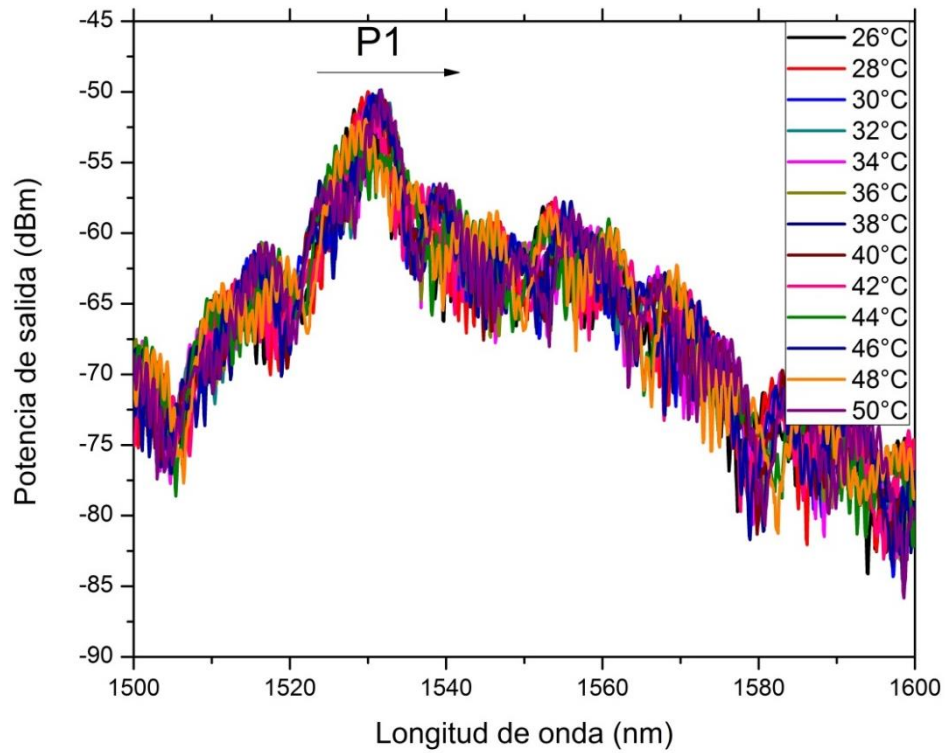


b)

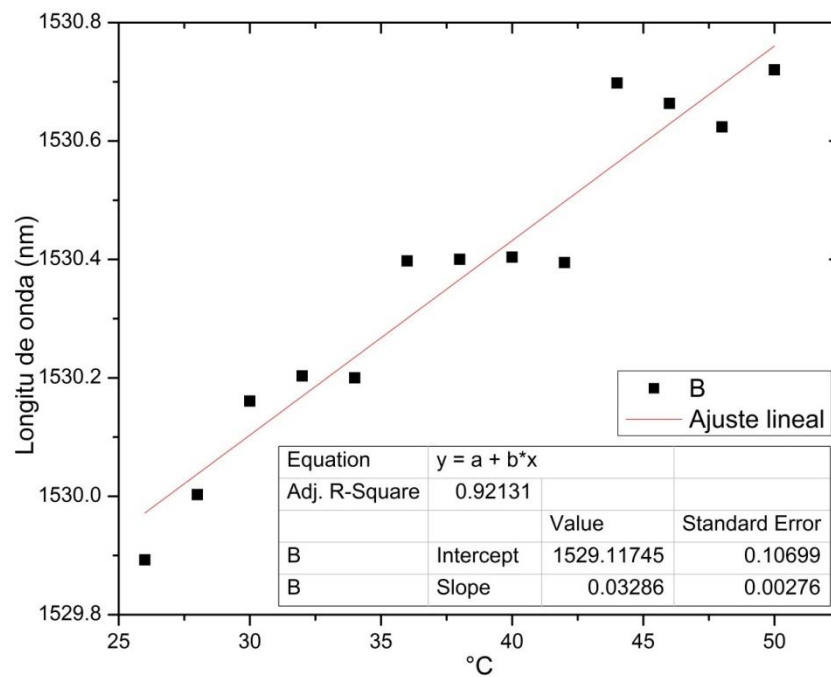
Figura 65. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntBD1 en el P2 sin el reflector. a) Corrimiento de franjas en Int BD1, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm).

Este mismo interferómetro presenta un comportamiento cuasi lineal en un rango de 26 a 50 °C utilizando el reflector. Su patrón de interferencia obtenido se muestra en la figura 66(a), en donde el pico mostrado (P1), es seleccionado para ser analizado ya que tiene una alta potencia de salida.

El pico P1 seleccionado se encuentra en una longitud de onda de alrededor de 1530 nm, tiene un rango de corrimiento de 1529.89 a 1530.72 nm. De acuerdo a la figura 66(b), presenta una linealidad en longitud de onda de 0.921 y una sensibilidad de 32.9 pm/°C.



a)



b)

Figura 66. Aplicación de temperatura en el interferómetro IntBD1 utilizando el reflector. a) Patrón de interferencia, b) Comportamiento °C contra longitud de onda (nm).

Referencias

- [1] J.G Proakis and D.G. Manolakis, Digital Signal Processing, Third. New York: Prentice- Hall, Inc, 1996.
- [2] La Transformada Rápida de Fourier (FFT).
<http://www.ehu.es/Procesadodesenales/tema7/ty3.html>
- [3] OPPENHEIM, A.V., A. L. WILLSKY, and W. T. YOUNG, Signals and Systems. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall,1983.
- [4] Wikipedia, La enciclopedia libre, [internet], disponible en http://en.wikipedia.org/wiki/Cooley-Tukey_FFT_algorithm
- [5] “Transformada de Fourier y análisis de frecuencias “, National Instrument, <http://www.ni.com/support/esa/cvi/analysis/analy3.htm>
- [6] MathWorld, “Fast Fourier Transform”.
<http://mathworld.wolfram.com/FastFourierTransform.html>
- [7] Steven W. Smith, “The Scientist and Engineer Guide to Digital Signal Processing”.
<http://www.dspguide.com/ch12.htm>
- [8] M. A. Gonzalez-Reyna et al., "Laser temperature sensor based on a fiber Bragg grating", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 27, no. 11, pp. 1141-1144, Jun. 2015.
- [9] R. Hui and M. O Sullivan, “Fiber Optic Measurements Techniques”. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier/Academic Press, 2009, ch. 5.
- [10] J. Zhou et al., “Intensity modulated refractive index sensor based on optical fiber Michelson interferometer,” Sens. Actuators B, Chem., vol. 208, pp. 315–319. Nov. 2014.
- [11] C. Rubio Ramírez, G. Martheyn Lizarazo, E. Vera Duarte, “Termoelectricidad: Uso de las celdas Peltier en el campo de la refrigeración y sus principales aplicaciones”, Universidad de Paula Santander, 2017.
- [12] J. Ventura, T.H. Moita, M.B. dos Santos, "Characterization of temperature sensors using Peltier cells", 2016 IEEE 21st International Mixed-Signal Testing Workshop (IMSTW), pp. 1-6xx, 2016

Capítulo V:

Conclusiones y trabajo a futuro.

5.1 Conclusiones.

- La fabricación de interferómetros tipo Michelson por medio de las técnicas “Core-Offset” y de “burbuja” es relativamente sencilla.
- De los interferómetros fabricados, los que presentaron un patrón de interferencia mejor definido fueron los realizados por la técnica de “burbuja” con longitudes de 1 a 3 cm.
- Utilizando el reflector en los interferómetros hechos por la técnica de burbuja se logra obtener un patrón de interferencia con mayor número de franjas con un contraste relativamente bueno.
- Los patrones de interferencia obtenidos por los interferómetros realizados por la técnica de “core-offset” presentan un número de franjas mucho menor que los hechos por la técnica de Burbuja.
- Los interferómetros caracterizados con temperatura con mejores resultados en un rango de 2 a 50 °C obtuvieron un comportamiento lineal en un rango de 0.921 a 0.998 y una sensibilidad en el rango de 32.9 a 79.08 pm/°C.
- Se dice que la implementación de estos interferómetros como sensores de temperatura resulta favorable, ya que cuentan con una sensibilidad y linealidad alta en corrimiento de longitud de onda que es lo que se busca en estos tipos de sensores.

5.2 Trabajo a futuro.

Este tipo de interferómetros hasta la fecha son muy poco investigados, por lo que existe una gran gama de técnicas de fabricación y de aplicación. A futuro se pretende utilizar este mismo interferómetro pero como elemento sensor el reflector, ya que en el proceso de realización de este trabajo de tesis se observaron varios fenómenos relacionados con el reflector.