

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS



TITULO DE LA TESIS

**“SINTONIZACIÓN DE EMISIONES LÁSER POR MEDIO DEL
USO DE INTERFERENCIA SUPERMODAL EN FIBRAS
ÓPTICAS”**

POR

RAMÓN GENARO VALLEJO CARRILLO

TUTOR

DR. GUILLERMO SALCEDA DELGADO

COASESOR

DR. MAURICIO TORRES TORRES

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA FÍSICA
INDUSTRIAL**

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, a 31 octubre 2024

Dedicatoria

A todos los que me aprecian

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la salud para tener esta oportunidad.

A mi pareja y familia por estar presentes.

Enormemente agradezco al Dr. Guillermo Salceda por toda su paciencia y vocación al haberme dirigido para la realización de este trabajo, a mis asesores y a la coordinación de posgrado de la facultad de ciencias Físico Matemáticas de la UANL por haberme permitido usar sus laboratorios.

Al Dr. Rubén Morones por orientarme junto con el Dr. Javier Morales, Dr. Mauricio Torres, Dr. Carlos Luna por la estupenda forma de explicar electricidad y magnetismo.

A la Ing. Karla y a la Lic. Briseida por apoyarme y dedicar parte de su tiempo en culminar este ciclo.

Agradezco a Conacyt por la beca otorgada. No. Registro: 239351, No. Beca: 15494

Contenido

Acrónimos	8
Capítulo 1	9
Introducción.....	9
1.1 Planteamiento del problema.....	9
1.2 Propuesta de la Hipótesis.....	10
1.3 Objetivos.....	11
1.3.1 Objetivo general	11
1.3.2. Objetivos particulares	11
1.4. Justificación e importancia.....	11
Capítulo 2	12
Marco teórico	12
2.1. Ondas electromagnéticas.....	12
2.1.1 Ondas electromagnéticas, caracterización	12
2.2. La luz.....	14
2.3. Superposición de ondas.....	15
2.4. Interferómetros	15
2.4.1 Interferómetro de división de frente de Onda	16
2.4.2. Interferómetro de división de amplitud.....	19
2.4.3. Fibra óptica.....	24
2.4.4 Fibra monomodo y su ensamblaje	26
2.4.5. Fibras ópticas especiales	28
2.4.6. Fibra dopada con Erbio	28
2.5. Láseres	30
2.5.1. Láseres de fibra óptica.....	31
2.6. Láseres sintonizables.....	32
2.6.1. Aplicaciones de Láseres sintonizables.....	32
Capítulo 3	34
Metodología.....	34
3.1. Aislador óptico.....	35
3.2. WDM.....	36
3.3. Fibras dopadas con $Er + 3$	37
3.4. El diodo láser.....	38

<i>3.5. Acoplador 90/10.....</i>	<i>38</i>
<i>3.6. Controlador de polarización.....</i>	<i>40</i>
<i>3.7. Analizador de espectros ópticos.....</i>	<i>41</i>
Capítulo 4	44
Resultados	44
<i>4.1. Configuración experimental y manipulación del interferómetro.....</i>	<i>44</i>
<i>4.2. Montaje y método experimental.....</i>	<i>45</i>
<i>4.3. Interferómetro - Estación de doblez.....</i>	<i>46</i>
<i>4.4. Resultados experimentales.....</i>	<i>47</i>
Capítulo 5	57
Discusión y conclusiones.....	57
Referencias	59

Índice de figuras

Figura 1 Longitud de onda y frecuencia para algunos colores.....	14
Figura 2 Experimento Young de Interferencia.....	17
Figura 3 Espejo de Lloyd.....	19
Figura 4 Estructura de una fibra óptica, esquema recopilado de (J.C. Hernández García:2010)	25
Figura 5 Representación de la propagación en una fibra multimodo escalonado	28
Figura 6 Diagrama correspondiente a niveles de energía en los procesos de a) en el proceso de absorción, b) emisión espontánea, c) emisión estimulada.	29
Figura 7 Sistema láser de fibra óptica dopada con Erblio, donde se agrega el interferómetro Mach-Zehnder para su sintonización de emisiones.	34
Figura 8 Rotación de la polarización de la luz, a causa el efecto Faraday.....	35
Figura 9 Aislador óptico 10202A-90 Modelo tomado de Thorlabs, Inc.....	36
Figura 10 WDM empleado en el arreglo.	37
Figura 11 Diodo Láser - Modelo tomado de Thorlabs, Inc.	38
Figura 12 Funcionamiento acoplador.	39
Figura 13 Fotografía del elemento acoplador 90/10.	39
Figura 14 Fotografía del dispositivo controlador de polarización.	40
Figura 15 Fotografía del analizador de espectros ópticos modelo.....	41
Figura 16 Fotografía tomada desde arriba de la empalmadora de fibra s178 A versión	42
Figura 17 Fotografía tomada desde el frente de la empalmadora de fibra s178 A versión 2.	42
Figura 18 Procedimiento para empalmar la fibra.	43
Figura 19 Interferómetro Mach-Zehnder. a) Sección transversal del SCF, b) Estructura del interferómetro supermodo, y c) comportamiento de la luz a través de la estructura.	44
Figura 20 Montaje experimental del láser de cavidad anular. El interferómetro está incluido dentro de la cavidad en anillo montado en una estación de flexión.....	46
Figura 21 FSR en función de la longitud del SFC. El recuadro muestra los espectros para estructuras de interferómetro con 20.32, 40.64, 60.96 y 101.6 mm de longitud SFC	47
Figura 22 muestra la señal de salida del láser cuando se incluyen interferómetros con 20.32, 40.64, 60.96 y 101.6 mm de longitud SCF en la cavidad del láser.	48
Figura 23 Espectros del interferómetro compuesto por 60.96 mm de longitud SCF para un rango de flexión de desplazamiento de 0 a 21 mm con 0.5 mm de paso.	50
Figura 24 Espectro de la señal láser de salida con una estructura de interferómetro de 60,96 mm de longitud SCF para un rango de flexión de desplazamiento de 0 a 21 mm, con 0,5 mm de paso.....	51
Figura 25 Emisión de la línea láser contra el desplazamiento para un láser con una estructura interferométrica de 60.96 mm de longitud SCF para un intervalo de curvatura del desplazamiento de 0 a 21 mm, con 0.5 mm de paso. También se incluyen las profundidades alrededor del pico.	52

Figura 26 Espectro de la señal láser de salida con una estructura interferométrica de 101.6 mm de longitud SCF para un rango de flexión de desplazamiento de 0 a 21 mm, con 0.5 mm de paso.....	53
Figura 27 Emisión de línea láser en función del desplazamiento para un láser con una estructura interferométrica de 101.6 mm de longitud SCF para un intervalo de curvatura del desplazamiento de 0 a 21 mm, con 0.5 mm de paso.	54
Figura 28 Espectros de la señal de salida láser para un interferómetro con 101.6 mm de longitud SCF y 10 mm de flexión de desplazamiento durante 114 minutos, con un paso de 3 minutos.....	55
Figura 29 Emisión láser de longitud de onda frente al tiempo. El interferómetro de 101.6 mm de SCF se dobló con 10 mm de desplazamiento en la cavidad láser. El tiempo total de ensayo fue de 114 minutos, con un paso de 3 minutos.	56

Acrónimos

SCF (Seven Core Fiber): Una Fibra de tipo de Siete Núcleos es una fibra óptica multinúcleo con siete núcleos que puede utilizarse para diversos fines, como: conexión de salas de servidores, crear sensores de alta sensibilidad y pueden usarse en redes ópticas pasivas.

SMFs (Single Mode Fibers): Una fibra monomodo es una fibra óptica que solo emite luz en un modo. Esto significa que las señales viajan en trayectoria lineal por el centro de la fibra, sin rebotar en los bordes.

WDM (Wavelength-division Multiplexing): La Multiplexación por División de Longitud de Onda es una tecnología de fibra óptica que permite transmitir simultáneamente varias señales ópticas por medio de un único cable de fibra óptica.

LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging): La Detección, Localización de Imágenes por Láser es un método de teledetección que utiliza un láser para medir la distancia, su posición y forma de objetos. También se conoce como detección y alcance de la luz o escaneo láser activo.

FSR (Free Spectral Range): El Rango Espectral Libre es la diferencia de la longitud de onda o frecuencia entre los dos picos o valles adyacentes en el espectro de transmisión o reflexión de un interferómetro.

EDF (Erbium-doped fiber): La Fibra Dopada de Erblio es una de las fibras ópticas que contienen iones de erbio en su núcleo, que se utilizan para amplificar señales ópticas en sistemas de comunicación.

Capítulo 1

Introducción

Este trabajo de investigación doctoral fue realizado en el laboratorio de óptica y fotónica ubicados en el edificio de posgrado de la Facultad Fisicomatemáticas FCFM de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En donde se propuso diseñar y construir un arreglo experimental que permita estudiar la sintonización de longitud de onda de la emisión láser empleando una fibra óptica dopada con Erblio, debido a su gran utilidad de poder simultáneamente absorber y emitir la luz de forma simultánea. mediante un interferómetro de división de amplitud tipo Mach-Zehnder [1,2]. Para lo anterior se emplearon un conjunto de dispositivos ópticos fundamentales, complementándolos con componentes mecánicos para la obtención de diversas emisiones láser a diferentes longitudes de onda y se estableció realizar el ajuste de las emisiones láser basándose en interferencia supermodal en una fibra multinúcleo.

1.1 Planteamiento del problema

En este trabajo se ha planteado abordar en calidad de estudio un problema importante para desarrollar un método que permita seleccionar una emisión de longitud de onda de un láser de fibra óptica basado en la interferencia supermodo con una fibra multinúcleo, con el fin de abordar un estudio para el desarrollo de fuentes de luz con longitud de onda variable de una manera simple y a un costo no elevado en comparación con equipos comerciales disponibles.

1.2 Propuesta de la Hipótesis

Analizando el comportamiento y las características de la emisión de longitud de onda de un láser de fibra óptica basado en una interferencia super-modo en una fibra multinúcleo, por medio de la construcción de un interferómetro de división de amplitud tipo Mach-Zehnder que es posible construir con el SCF (Seven Core Fiber, por sus siglas en inglés) empalmado entre dos SMFs (Single-Mode Fiber), usándolo como filtro para la selección adecuada de las longitudes de onda correspondientes a emisión laser en un láser de anillo de Erbio. Así cuando la luz del SMF en el primer corte pase al SCF, estimulará dos super-modes. Entonces, ambos super-modes viajarán a través del SCF hasta llegar a un segundo empalme. Con el fin de que ambos super-modes estén superpuestos en el SMF, se obtendrá un patrón de interferencia generado debido a la diferencia de fase entre los super-modes, en donde el patrón de interferencia será útil como filtro en la cavidad láser, aprovechando e incluyendo la estructura del interferómetro en una cavidad láser en anillo, dando lugar a la selección de las emisiones láser en la longitud de onda, estimando que las pérdidas registradas sean mínimas y la ganancia favorable. Por lo antes mencionado, considero que, si es posible controlar dichas longitudes de onda de las emisiones de láseres de fibra óptica, con la integración y el uso de un interferómetro Mach Zehnder de fibra óptica sobre una configuración de flexión mecánica y un acoplador que permita alterar la geometría de la estructura de este, cambiando el patrón de interferencia, modificando dicha longitud de onda a la que se logra la producción de dicha emisión.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Selección de longitud de onda y sintonización de la radiación láser en un láser de fibra dopado con erbio utilizando un interferómetro Mach-Zehnder

como filtro en la cavidad del láser para generar radiación a una longitud de onda donde las pérdidas son mínimas y el aumento de nivel es significativo.

1.3.2. Objetivos particulares

- Construir interferómetro Mach-Zehnder con fibra multinúcleo.
- Inclusión del interferómetro en la cavidad láser
- Construcción de un láser de fibra con dopaje de erbio en forma de anillo.
- Caracterización de los interferómetros fabricados
- Analizar la estabilidad del arreglo propuesto

1.4. Justificación e importancia

El estudio de la selección óptima de la emisión láser de la longitud de onda en los láseres de fibra óptica, han sido un tema de estudio e investigación aumentando el interés por sus diversas ventajas que la fibra óptica presenta, tales como tamaño pequeño, peso ligero, alta sensibilidad, alta resolución, alto poder de conversión eficiente y bajo costo, por ello se aprecia notablemente su competitividad y potencial utilidad e implementación en la industria así como en diversos campos como elemento o componente fundamental en el desarrollo de otras investigaciones, en el desarrollo de equipos de medición, en la división multiplexación de la longitud de onda, sistemas de comunicación ópticos, sistemas de red de sensores de fibra óptica, prueba de componentes del sistema óptico, prueba y medición óptica, fotónica de microondas, señal de procesamiento óptica, espectroscopia, y RF fotónicas. Por ello se considera de gran utilidad el desarrollar un método para seleccionar una emisión de longitud de onda de un

láser de fibra óptica basado en una interferencia super-modo en una fibra multinúcleo.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Ondas electromagnéticas

La radiación de tipo electromagnética es una de las tantas formas en que la energía viaja en el espacio, la luz producida por los rayos del sol, los rayos X o la energía de las microondas son algunas de las distintas manifestaciones de energía de radiación electromagnética. Aunque estas parecieran muy diferentes entre sí, tienen una fuerte relación, en el sentido de que todas presentan propiedades ondulatorias, es decir se comportan como ondas.

2.1.1 Ondas electromagnéticas, caracterización

Sabiendo que las ondas no son más que perturbaciones que se dan en un medio físico determinado o en un campo particular, dando lugar a vibraciones u oscilaciones. Las ondas electromagnéticas están formadas por dos ondas que se encuentran oscilando perpendicularmente. Una de las ondas es un campo magnético oscilante; la otra es un campo de tipo eléctrico oscilante [1]. Un campo de tipo magnético oscilante induce un campo eléctrico oscilante y viceversa. Debido a que las ondas electromagnéticas se conforman por ondas transversales, es decir que las oscilaciones se producen perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda, les permite cruzar el espacio, provocando que, a diferencia de otros tipos de ondas, puedan propagarse por el vacío. La teoría científica planteada por James Clerk Maxwell, se centra en explicar las ondas electromagnéticas. Clerk menciona que los campos eléctricos y magnéticos pueden acoplarse para formar ondas electromagnéticas. Dicha teoría resume la relación entre electricidad y magnetismo, lo que hoy se conocen como las

“Ecuaciones de Maxwell”. Por lo anterior es importante destacar que dichas ecuaciones son reformulaciones de leyes propuestas anteriormente como se mostrará a continuación:

La ecuación de Maxwell para campos eléctricos es la ecuación de la Ley de Gauss mostrada en forma diferencial:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{Ec. 1}$$

donde \vec{E} representa el flujo del campo eléctrico, ρ corresponde a la densidad de carga y ϵ_0 la permitividad eléctrica en el vacío.

Asimismo, la forma diferencial de la Ley de Gauss para campos magnéticos se presenta como:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Ec. 2}$$

donde \vec{B} representa el flujo del campo magnético. Podemos observar que el campo no diverge, por lo que se concluye que la divergencia de B se caracteriza como nula.

La forma diferencial de la Ley de Faraday es:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Ec. 3}$$

Por lo que en caso de que se produzca una modificación en el campo magnético B, se originará un campo eléctrico E, o si hay un campo magnético cambiante presente en el espacio vacío, esto provocará circulaciones del vector E a lo largo de líneas cerradas.

La reformulación de la ley de Ampere fue una de las mayores contribuciones de Maxwell. La forma diferencial (y en el vacío) de la Ley de Ampere es:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde μ_0 esta representa la permeabilidad magnética del vacío y ϵ_0 la permitividad eléctrica en el vacío.

2.2. La luz

La Luz es una emisión ondulatoria que corresponde a la radiación electromagnética en la estrecha banda de frecuencias que va de unos $3.84 \times 10^{14} \text{ Hz}$ a aproximadamente $7.69 \times 10^{14} \text{ Hz}$. Generalmente se produce por el reacomodo de los electrones exteriores en átomos y moléculas. En un material incandescente, ya sea un filamento metálico caliente o la bola de fuego solar, los electrones se aceleran de forma aleatoria y experimentan colisiones frecuentes. El amplio espectro de emisión resultante se denomina radiación térmica y es una de las principales fuentes de luz. La luz que se emite es específica de los niveles de energía particulares de los átomos, y consiste en una serie de bandas o líneas de frecuencia claramente definidas.

El científico Newton fue el primero en darse cuenta de que la luz blanca es una combinación de todos los colores del espectro visible. Además, descubrió que el prisma no genera color cambiando la luz blanca en diversos grados, como se creía desde muchos siglos, sino que sencillamente divide la luz y la separa en los colores que la conforman.

Color	Rojo	Naranja	Amarillo	Verde	Azul	Violeta
λ_0 (nm)	780-622	622-597	597-577	577-492	492-455	455-390
ν (THz)	384-482	482-503	503-520	520-610	610-659	659-769

Figura 1 Longitud de onda y frecuencia para algunos colores.

2.3. Superposición de ondas

Se defina que la forma diferencial de la ecuación de onda corresponde

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad \text{Ec. 5}$$

muestra una característica intrigante de las ondas, la cual es de forma distinta al comportamiento de una corriente de partículas clásicas. Si las funciones de onda ψ_1 y ψ_2 son correspondientes a las soluciones de forma individual de la ecuación de onda, entonces se concluye que $(\psi_1 + \psi_2)$ es también una solución.

$$\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial t^2} \quad \text{y} \quad \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial t^2} \quad \text{Ec. 6 y}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (\psi_1 + \psi_2) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\psi_1 + \psi_2) \quad \text{Ec. 8}$$

A esto se le conoce como el principio de superposición.

Esto significa que cuando dos ondas separadas se encuentran en el mismo lugar en el espacio donde se superponen, simplemente se suman (o restan) entre sí sin cancelar ni cambiar permanentemente ninguna de las ondas. La perturbación producida en cada punto de la región de superposición es la suma algebraica de los componentes individuales de la onda en ese punto.

Una vez que pasen por la zona donde conviven las dos olas, cada ola escapará sin verse afectada por la colisión [2].

2.4. Interferómetros

El interferómetro es un dispositivo de medida que utiliza el fenómeno de interferencia de las ondas, usualmente de la luz. Las mediciones pueden abarcar otras propiedades específicas de las ondas y los materiales a través de los cuales se propagan.

A través de dos rayos de luz, se crea un patrón de interferencia en el que ambos rayos se superponen. Dado que la longitud de onda del rayo visible es bastante corta, se pueden observar mínimas variaciones en las correspondientes trayectorias ópticas entre ambos rayos. Por lo anterior se entiende que el principio es la interferometría, siendo una técnica que se basa en la superposición de dos haces de luz, creando un fenómeno conocido como interferencia. El interferómetro es el instrumento utilizado para aplicar esta técnica, permitiendo medir con buena precisión longitudes de onda de luz, lo que ha beneficiado significativamente a diversas áreas del conocimiento.

En las dos categorías de interferómetros podemos clasificar a los que corresponden de división de onda y a los de división de amplitud, los que a continuación se procede a describir de manera breve, resaltando la funcionalidad de cada uno y en específico las componentes del interferómetro tipo Mach-Zehnder, empleado en esta tesis doctoral.

2.4.1 Interferómetro de división de frente de Onda

Los interferómetros de división de frente de onda funcionan dividiendo un frente de onda incidente en dos o más frentes de onda, los cuales después se recombinan para formar un patrón de interferencia. Este enfoque es útil para estudiar los fenómenos ópticos y permite realizar la medición de parámetros como la longitud de onda de la luz y las propiedades de los materiales.

- Se divide el frente de onda incidente en dos partes a través de la refracción, reflexión o difracción.
- Las dos partes se reúnen para producir una banda de interferencia.
- Las frentes de onda se superponen de forma constructiva o destructiva.

Suelen ser mucho más convenientes los interferómetros de división de frente de onda, ya que una restricción es el que no se pueden utilizar con una fuente

amplia, ya que las franjas se confunden rápidamente con la dimensión de la fuente.

2.4.1.1. Experimento de Young

El experimento de la doble rendija de Thomas Young es uno de los ejemplos clásicos de interferencia por división de frente de onda. Cuando la luz pasa a través de dos rendijas estrechamente espaciadas, se crean los dos frentes de onda que se superponen, dando lugar al llamado patrón de interferencia. Este resultado es inexplicable si la luz estuviera formada por partículas porque deberían observarse solo dos franjas de luz frente a las rendijas, pero es fácilmente interpretable asumiendo que la luz es una onda y que sufre interferencia.

Dicho experimento es posible realizarlo empleando electrones, átomos, neutrones, con el objetivo de producir patrones de interferencia muy semejantes o similares a los que se obtiene cuando se realiza el experimento con la luz, lo que demuestra el característico comportamiento ondulatorio de las partículas.

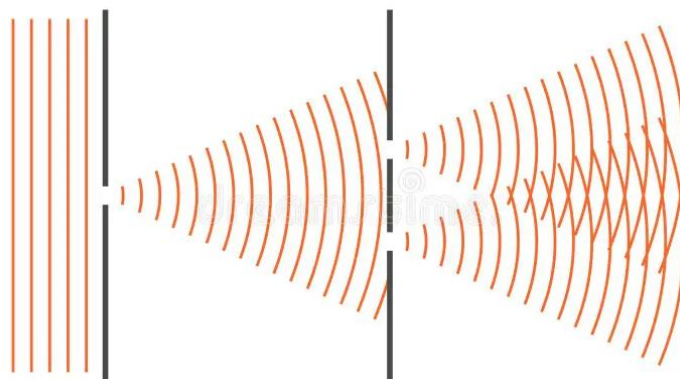


Figura 2 Experimento Young de Interferencia.

Este experimento demostró la naturaleza ondulatoria de la luz y sentó las bases para el estudio de la interferencia óptica.

2.4.1.2. El espejo doble y prisma doble de Fresnel

El sistema de Fresnel para generar interferencia se fundamenta en el uso de espejos y prismas que dividen un frente de onda en dos haces que siguen trayectorias distintas antes de volver a combinarse. Esta configuración permite crear patrones de interferencia con gran precisión, lo que resulta valioso en metrología óptica y en experimentos que requieren alta resolución espacial. Este experimento evidenció la naturaleza ondulatoria de la luz y estableció las bases para el estudio de la interferencia óptica. Espejos y prismas dobles de Fresnel.

2.4.1.3. El espejo de Lloyd

El espejo de Lloyd es una configuración en la que una fuente de luz y su imagen reflejada en un espejo crean frentes de onda que interfieren entre sí. Este tipo de interferómetro es útil para estudiar la interferencia a lo largo de superficies reflectantes y medir la coherencia de la luz.

El espejo de Lloyd es una técnica en la que una fuente de luz y su imagen reflejada en un espejo generan frentes de onda que interfieren. Esto es particularmente útil para medir la coherencia de la luz y estudiar la interferencia a lo largo de superficies reflectantes.

El experimento busca la colocación de una fuente delante de un espejo. La imagen virtual de la fuente a través del espejo actúa como una segunda fuente coherente de la primera. Si el espejo es dieléctrico, el haz reflejado sufre un cambio de desfase en π . Se puede apreciar de manera gráfica en la siguiente imagen.

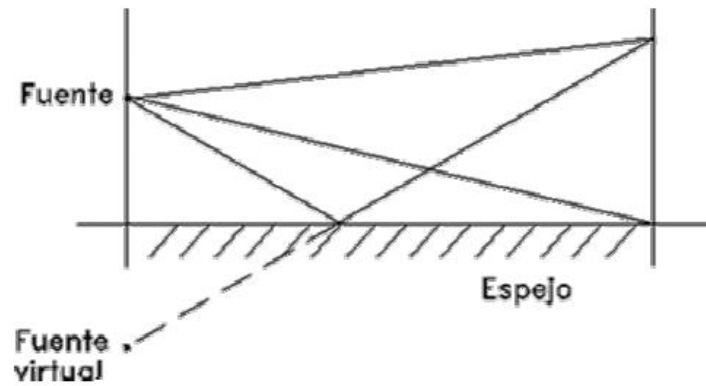


Figura 3 Espejo de Lloyd

2.4.2. Interferómetro de división de amplitud

Los interferómetros correspondientes de división de amplitud utilizan haces de luz en lugar de grandes frentes de onda. Los dispositivos ópticos llamados divisores de haz separan parte del haz y lo envían en una dirección diferente. Estos divisores de haz se pueden hacer con un espejo parcialmente plateado (uno que refleja parte de la luz y transmite parte de la luz) o un divisor de haz cúbico. A continuación, se describen varios interferómetros divisores de amplitud [1].

2.4.2.1. Interferómetro de Michelson

El interferómetro de Michelson es uno de los más conocidos y se utiliza ampliamente para mediciones de alta precisión, como en el famoso experimento de Michelson-Morley, que buscaba detectar el movimiento relativo de la Tierra con respecto al "éter ". El dispositivo divide el haz incidente en dos trayectorias perpendiculares que luego se recombinan para formar un patrón de interferencia.

Este interferómetro utiliza un divisor de haz para separar la luz en dos trayectorias. Para después ser reflejadas por espejos

El interferómetro de Michelson es uno de los instrumentos más importantes que utilizan los fenómenos de interferencia. Se compone principalmente de dos

espejos planos y dos placas planas de vidrio con caras paralelas. Los espejos están colocados perpendicularmente uno respecto al otro, y se pueden ajustar con precisión mediante tornillos.

El interferómetro de Michelson es distinto de otros instrumentos en un aspecto importante. Ambos haces de luz que finalmente se combinan para crear el patrón de interferencia recorren trayectos distintos en parte de su recorrido. La disponibilidad de esta situación permite una amplia variedad de aplicaciones; como, por ejemplo, permitir la transmisión de luz a través de distintas sustancias para poder identificar las mínimas variaciones en los índices de refracción de estas. Otra aplicación crucial del interferómetro de Michelson es la medición de longitudes en relación con la longitud de onda de la luz monocromática [2].

2.4.2.2. Interferómetro de Fabry-Perot

En este método se utilizan haces múltiples para producir un patrón transmitido. Para conseguir esto se utilizan dos placas transparentes con una película reflejante en sus caras encontradas a este ensamble se le llama etalón. En la siguiente imagen se muestra la trayectoria de un rayo que entra al etalón y se refleja y transmite hacia la derecha en múltiples ocasiones. Una gran cantidad de haces de interferencia crean un interferómetro con una resolución extremadamente alta, así como una serie de rendijas de difracción que aumentan su resolución.

El interferómetro de Fabry-Perot es un dispositivo que utiliza las franjas generadas por la interferencia múltiple. El sistema se compone por dos placas planas de vidrio que se mantienen meticulosamente paralelas entre ellas. La luz de una fuente extensa se refleja hacia atrás y adelante entre las placas, las cuales tienen superficies ligeramente plateadas, provocando que se pierda algo de luz en cada reflexión. Los haces de luz que salen en sentido contrario al origen

inciden en una lente convergente y producen, en su plano focal, las franjas de interferencia.

Este instrumento tiene gran relevancia en diversas áreas de la espectroscopia. Dado que los anillos luminosos son extremadamente finos, si una fuente de luz emite dos longitudes de onda distintas, se generarán dos conjuntos de anillos perfectamente distinguibles, incluso si las longitudes de onda son prácticamente idénticas.

El interferómetro de Fabry-Perot se puede emplear como un potente espectroscopio para detectar la existencia de longitudes de onda ligeramente distintas en una luz casi monocromática [3].

2.4.2.3. Interferómetro Mach-Zehnder

El interferómetro de Mach-Zehnder divide un haz de luz en dos trayectorias mediante divisores de haz y luego los recombina para observar diferencias de fase causadas por cambios en el medio óptico o la introducción de materiales en la trayectoria de los haces. Esta configuración es esencial para aplicaciones en óptica cuántica y análisis de materiales (Anderson & Lee, 2019).

La interferometría consiste en combinar luz de diferentes fuentes para obtener imágenes de mayor resolución. Este método se aplica, por ejemplo, en radioastronomía, y fue fundamental para que Michelson y Morley demostraran la no existencia del éter en 1887. En particular, el interferómetro de Mach-Zehnder se utiliza para explorar las implicaciones de la dualidad onda-partícula y la no localidad en la mecánica cuántica, como lo demuestra el experimento del detector de bombas de Elitzur-Vaidman. Este tipo de interferómetro es un dispositivo óptico que estudia la interferencia de la luz y tiene diversas aplicaciones en física experimental y en ingeniería. Está compuesto por dos divisores de haz y dos espejos, que separan un haz de luz en dos trayectorias

diferentes y luego las recombinan para observar patrones de interferencia. Esta configuración permite detectar cambios en las propiedades de los haces debido a variaciones en la longitud del camino óptico o en el medio por el que se propagan.[1]

2.4.2.3.1. Funcionamiento del Interferómetros Mach-Zehnder

El interferómetro Mach-Zehnder funciona dividiendo un haz de luz láser en dos partes con un divisor de haz inicial. Cada haz viaja por caminos separados que son reflejados por espejos y posteriormente se recombinan en un segundo divisor de haz. Dependiendo de la diferencia de fase acumulada en los dos caminos, el resultado puede ser un patrón de interferencia constructiva o destructiva en los detectores ubicados a la salida del interferómetro. El patrón de interferencia observado se debe a la naturaleza ondulatoria de la luz y se utiliza para medir con precisión variaciones de fase, lo que lo hace útil en aplicaciones como sensores y pruebas de coherencia cuántica.[1]

En un experimento típico, la luz utilizada es un láser de helio-neón que proporciona una fuente coherente y estable, lo cual es crucial para generar interferencia clara. Los cambios en los caminos ópticos, ya sea al modificar la longitud física del recorrido o las propiedades del medio (como el índice de refracción), se traducen en desplazamientos en el patrón de interferencia observable. Esto permite usar el dispositivo para detectar variaciones muy pequeñas en las condiciones experimentales, lo que lo hace valioso para la investigación científica y en mediciones precisas de fenómenos físicos [2]

2.4.2.3.2. Partes del Interferómetros Mach-Zehnder

El Interferómetro Mach-Zehnder consta de los siguientes componentes principales:

Fuente de luz

Un láser se utiliza comúnmente como fuente de luz, ya que emite un haz coherente con una longitud de onda específica. Su alta coherencia lo hace ideal para este propósito. La longitud de onda de la luz es esencial para la creación de patrones de interferencia. En la mayoría de los experimentos, se utilizan los láseres de helio-neón con una longitud de onda de 633 nm, ya que genera las condiciones óptimas para ser visible [3]

Beam splitters

Son componentes ópticos que se utilizan para dividir un rayo de luz incidente en dos haces separados, según una fracción específica. Además, estos tipos de divisores de haz pueden usarse de manera inversa para combinar dos haces. Estos componentes dividen la luz entrante en dos trayectorias. Típicamente, son divisores 50-50, lo que significa que la mitad de luz es transmitida y la otra mitad es reflejada [3]

Espejos

Dirigen los haces de luz a lo largo de los dos caminos separados. La alineación precisa de los espejos es esencial para asegurar que los dos haces se recombinen adecuadamente y generan interferencia.[4]

Detectores

Capturan la luz combinada, que puede mostrar patrones de interferencia según la diferencia de fases en los caminos. Estos detectores son importantes para analizar los resultados y medir la intensidad de patrones.

Los detectores en un interferómetro pueden variar dependiendo de la precisión requerida y la naturaleza del experimento.

Algunos de los detectores más utilizados son:

Fotodiodos: Son dispositivos semiconductores que convierten la luz en una señal eléctrica. Son muy sensibles a la luz en el rango del espectro visible y son usados comúnmente en experimentos que requieren una alta velocidad de respuesta y precisión en la medición de la intensidad de la luz.[4]

Fotodiodos individuales: Se usan para tomar imágenes claras del patrón de interferencia y pueden mostrar cambios sutiles en la intensidad de la luz en diferentes partes del interferograma. Son útiles en experimentos donde se necesita ver el patrón de interferencia en dos dimensiones, como en la medición óptica o en la visualización de cambios de temperatura en líquidos.

Cámaras CCD

En el ámbito de la óptica cuántica, los detectores de fotones individuales, tales como los fotomultiplicadores o los detectores de avalancha de fotones (APD), son fundamentales para medir la interferencia de la luz en niveles de intensidad muy bajos. Estos detectores son altamente sensibles y permiten la detección de fotones individuales, lo cual es esencial para llevar a cabo experimentos que evidencian la naturaleza cuántica de la luz. [5]

2.4.3. Fibra óptica

Las redes de fibra óptica son indispensables hoy en día porque permiten la transmisión de datos a distancias más largas, velocidades de transmisión mucho más altas y un mayor rendimiento.

En particular, los centros de datos utilizan redes de fibra multimodo (MMF), que se utilizan comúnmente para conectar servidores y almacenar datos.

Además, estos sistemas son rápidos, económicos, resistentes a las interferencias electromagnéticas y se caracterizan por sus cortos alcances de transmisión [27].

En su forma más simple, una fibra óptica son filamentos de vidrio (compuestos de cristales naturales) o plásticos (cristales artificiales) formadas por un núcleo de con índice de refracción n_1 rodeada por una capa de índice de refracción n_2 , siendo n_2 ligeramente menor a n_1 de modo de aprovechar el fenómeno de reflexión total en la interfaz entre los dos medios. [22]

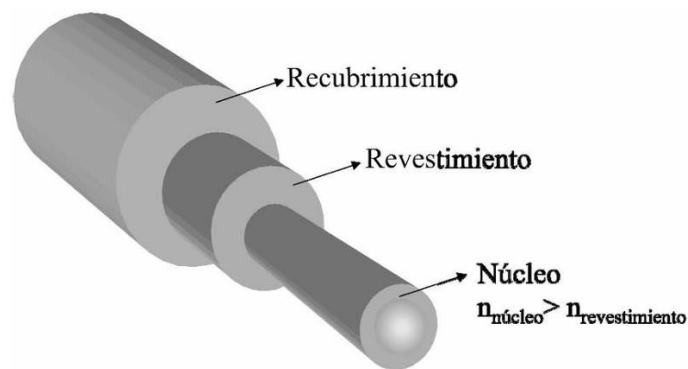


Figura 4 Estructura de una fibra óptica, esquema recopilado de (J.C. Hernández Garcia:2010)

La transmisión de datos a través de fibra óptica se basa en el principio de la reflexión interna total; en la que los rayos de luz que se propagan por el núcleo central de la fibra inciden en la interfaz núcleo - revestimiento con un ángulo superior al ángulo crítico, lo que provoca que la luz se refleje completamente hacia el interior del núcleo. Este mecanismo garantiza una propagación eficiente de la señal luminosa a lo largo de grandes distancias. El revestimiento de menor índice de refracción que rodea al núcleo minimiza las pérdidas por dispersión, optimizando así el rendimiento de la fibra óptica. Con el propósito de minimizar

perdidas por dispersión de la luz a causa de impurezas de la superficie de la fibra, el núcleo se recubre con una capa de vidrio con un índice de refracción menor. [40]

2.4.3.1. Naturaleza y Funcionamiento

Guías de onda ópticas: La fibra óptica se clasifica como una guía de onda óptica dieléctrica, lo que significa que conduce la luz a través de ella. Su estructura cilíndrica es fundamental para su funcionamiento.

Modos de propagación: Dependiendo del diámetro del núcleo y de su apertura numérica, la fibra puede admitir un gran número de modos de propagación de la luz. Para fibras con pocos modos, es necesario resolver ecuaciones de Maxwell para caracterizarlas.

2.4.3.2. Dispersión

Dispersión material: El índice de refracción de la fibra varía con la longitud de onda de la luz, lo que causa dispersión. Este fenómeno afecta la calidad de la señal, especialmente en sistemas que utilizan fuentes de luz con un amplio espectro.

Evaluación de la dispersión: Para evaluar la dispersión de una fibra, se necesitan datos detallados sobre el material del núcleo y el perfil de la fibra. Se requiere un análisis numérico complejo para calcular los índices efectivos de los modos.

2.4.4 Fibra monomodo y su ensamblaje

El cable monomodo solo dispone de un modo de propagación: una sola longitud de onda de luz en el núcleo de fibra. Esto significa que no hay interferencias ni solapamientos entre las distintas longitudes de onda de luz que pudieran distorsionar sus datos a grandes distancias, como ocurre con el cable multimodo.

El proceso consiste en ensamblar un tubo y una barra cilíndrica de vidrio colocados de manera concéntrica. Luego, se calienta todo el conjunto para garantizar la uniformidad del vidrio. A partir de una barra de vidrio de 1 metro de longitud y 10 cm de diámetro, se puede obtener, mediante un proceso de estirado, una fibra monomodo de aproximadamente 150 km de longitud. Esta barra se coloca verticalmente en una torre en el primer piso, donde es calentada por quemadores de gas. El vidrio se estira y "fluye" hacia la base para ser enrollado en una bobina.

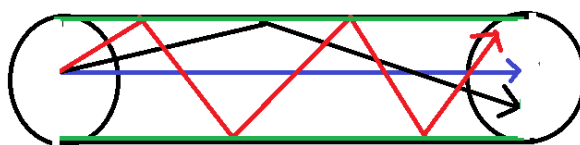
2.4.4.1. Fibras multimodo

Las fibras multimodo están constituidas con un núcleo de mucho mayor diámetro que las de monomodo (50 a 62.5 micras), por lo que los haces de luz puedan circular de más de un modo en camino, los cuales son reflejados con diferentes ángulos dentro del mismo núcleo.

Dependiendo de las características del emisor y el medio, la potencia luminosa del pulso se divide sobre todos o parte de los modos, lo cual la hace menos eficiente que la fibra monomodo.

En este tipo de fibras podemos mencionar principalmente 2 tipos, las de índice escalonado y las graduales, las cuales permiten ligeramente un alcance superior.

En las fibras de índice escalonado tal y como se mencionó se propagan varias ondas o modos diferentes a través de la fibra, unas ondas se propagan completamente paralelas al revestimiento, por el núcleo de la fibra, otras se reflejan continuamente, atrapadas por el fenómeno TIR, el resto se refracta en el revestimiento [34]



2.4.5. Fibras ópticas especiales

2.4.5.1. Fibra de 7 núcleos

La particularidad de esta fibra multinúcleo es que consta en su estructura interna de siete núcleos que se encuentran muy cercanas entre sí una de la otra.

Las Fibras multinúcleo (MCF) con alta densidad de núcleo y bajo nivel de diafonía han llamado mucho la atención en los sistemas de comunicaciones ópticas. Recientemente, las propiedades especiales de la MCF, tales como tamaño pequeño, la separación del núcleo bien definido, y una buena estabilidad térmica, han dado lugar a mucho interés en sensores de fibra óptica.

Una fibra de siete núcleos puede soportar siete supermodos, pero cuando es excitado por el modo fundamental de SMF sólo actúan dos supermodos. Estos modos interfieren dentro de la sección MCF, produciendo un espectro de transmisión modulada periódicamente.

2.4.6. Fibra dopada con Erblio

Las fibras ópticas con erbio, conocidas como amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA), han transformado el campo de las telecomunicaciones y la transmisión de datos por sus múltiples ventajas en amplificación de señal. Los EDFA aprovechan el principio de emisión estimulada para amplificar las señales ópticas, permitiendo así la transmisión a través de largas distancias sin conversión eléctrica.

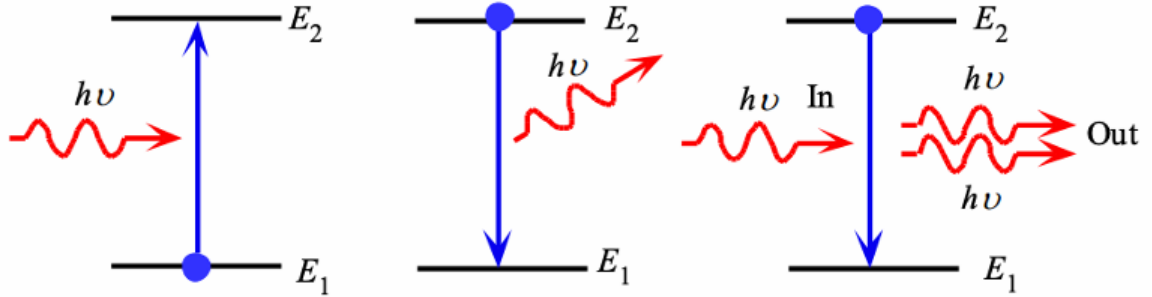


Figura 6 Diagrama correspondiente a niveles de energía en los procesos de a) en el proceso de absorción, b) emisión espontánea, c) emisión estimulada.

Estas son algunas de las ventajas más destacadas de estas fibras:

Transmisión a larga distancia sin pérdidas de señal significativas: Los amplificadores EDFA son esenciales en redes de fibra óptica de larga distancia, como los cables submarinos, donde se colocan cada 80-100 kilómetros para reforzar la señal óptica. Esto permite enviar información a través de continentes con una mínima degradación de señal y sin la necesidad de complejos sistemas de regeneración de señal eléctrica.

Compatibilidad con tecnologías DWDM para maximizar la capacidad de red: Los EDFAs son ideales para redes que utilizan la multiplexación por división de longitud de onda (DWDM). Esta tecnología permite transmitir múltiples señales ópticas en distintas longitudes de onda sobre la misma fibra, lo que maximiza la capacidad y eficiencia de las redes. En este contexto, los EDFA amplifican varias señales simultáneamente, lo que resulta en una infraestructura más compacta y eficiente para operadores de telecomunicaciones.

Alta ganancia y bajo nivel de ruido: Al trabajar principalmente en la ventana de transmisión de 1550 nm, que es ideal para minimizar pérdidas en las redes de fibra óptica, los EDFA alcanzan altos niveles de ganancia (20-30 dB) con niveles

de ruido muy bajos. Esta característica es esencial en aplicaciones sensibles como las redes de telecomunicaciones de alta velocidad y las tomografías de coherencia óptica (OCT) en medicina, donde es crucial mantener la calidad de la señal.

Aplicaciones en campos médicos y astronómicos: Además de las telecomunicaciones, los amplificadores ópticos dopados con erbio se utilizan en áreas como la medicina y la astronomía. En medicina, específicamente en la tomografía de coherencia óptica (OCT), estos amplificadores ayudan a generar imágenes detalladas para el diagnóstico, especialmente en oftalmología y cardiología. En astronomía, los EDFAs facilitan la observación de objetos celestiales distantes al amplificar señales de luz muy débiles, lo que permite estudios detallados de estructuras estelares y planetarias que de otro modo serían invisibles

2.5. Láseres

Láser es un dispositivo que emite un haz de luz coherente mediante amplificación óptica. Existen varios tipos de láseres, como láser de gas, fibra, estado sólido, colorante, diodo y excimer, todos comparten componentes básicos.

Elementos esenciales:

- Fuente
- Medio activo
- Cavidad óptica resonante

Usos de la tecnología láser

Los láseres son fundamentales en productos cotidianos, como reproductores de Blu-Ray y DVD, que los utilizan para leer información. También se emplean en escáneres de códigos de barras y en procedimientos quirúrgicos, como la cirugía ocular LASIK. En la industria, los láseres son usados para cortar, grabar, perforar y marcar materiales.

Aplicaciones de la tecnología Láser

- Telemetría láser
- Procesamiento de información (DVD y Blu-Ray)
- Lectores de código de barras
- Cirugía láser
- Imágenes holográficas
- Espectroscopia láser
- Procesamiento de materiales mediante láser (corte, grabado, perforado, marcado y modificación de superficie)

2.5.1. Láseres de fibra óptica

Láser de fibra óptica es un tipo de láser cuyo medio activo es una fibra óptica dopada con elementos como erbio, iterbio, tulio y neodimio. La mayoría son bombeados por diodos láser. Esta tecnología ha evolucionado para convertirse esencial en el corte de materiales, telecomunicaciones, sensores, etc.

2.5.1.1. Características técnicas

- Capacidad de corte: Hasta 25 mm en acero.
- Velocidades de corte:
 - 35 m/min para 1 mm de espesor.
 - 0,8 m/min para 16 mm.
 - 0,6 m/min para 25 mm.
- Calidad: Buena en espesores finos, adecuada en medios. El agujero más pequeño cortado con alta calidad es igual al espesor.

2.5.1.2. Beneficios

El láser de fibra es rápido y preciso, apto para cortar acero, aluminio, latón y cobre. Se utiliza tanto para planchas como para tubos. Sus ventajas incluyen:

- Proceso de preparación sencillo.

- Costes de mantenimiento y consumibles bajos.
- Consumo energético bajo a medio.
- Alta productividad y reducción de costes por pieza.

La luz se genera en un cable de fibra, lo que proporciona estabilidad y facilidad de uso. La operación se controla mediante un ordenador, minimizando la intervención manual y aumentando la seguridad.

2.6. Láseres sintonizables

Láser sintonizable es un tipo de diodo láser que permite ajustar la longitud de onda o frecuencia, ofreciendo mayor control y versatilidad en comparación con láseres tradicionales. Pueden emitir luz en rangos que van desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. La teoría sugiere que podrían cambiar frecuencias en transmisiones individuales, mejorando la eficiencia.

Los primeros láseres sintonizables, conocidos como láseres de tinte, fueron desarrollados en 1966. Estos láseres utilizan tintes y otros elementos, como prismas y rejillas de difracción, para ajustar la longitud de onda emitida, ofreciendo un amplio rango de frecuencias.

Existen cuatro clasificaciones de láseres sintonizables: línea única, multilínea, banda estrecha y ampliamente sintonizable.

2.6.1. Aplicaciones de Láseres sintonizables

Los láseres sintonizables se utilizan en:

- Espectroscopia y fotoquímica: Para analizar composiciones químicas y efectos de la luz.
- Comunicaciones ópticas: En sistemas de fibra óptica.

- Separación de isótopos: Utilizados en la industria nuclear a través del proceso AVLIS.
- Industria: En corte, soldadura y quemado, con un uso creciente a medida que los costos bajan.
- Medicina: Proporcionando cirugía láser de precisión y otros tratamientos.

Capítulo 3

Metodología

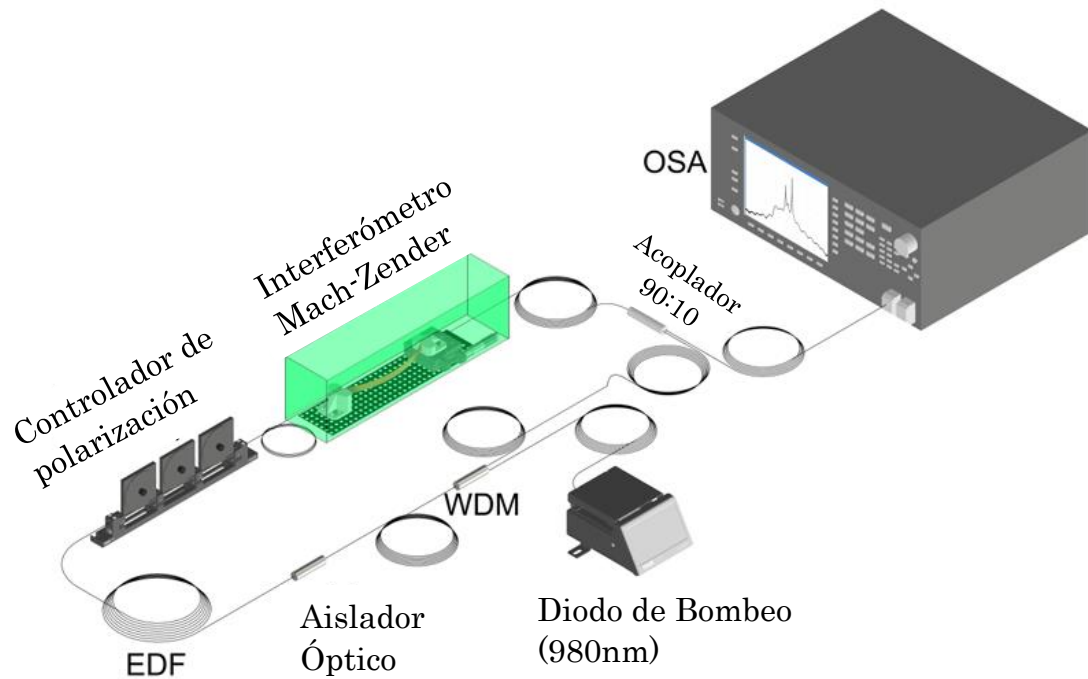


Figura 7 Sistema láser de fibra óptica dopada con Erbio, donde se agrega el interferómetro Mach-Zehnder para su sintonización de emisiones.

En la figura 7 logramos visualizar un láser conformado por una fibra óptica en forma de anillo. Se emplea como medio activo el uso de fibra óptica dopada con Erbio. En la imagen se muestra e ilustra la cavidad resonante del láser, que en este caso tiene forma de anillo mediante el cual la luz viaja en círculos a través de los componentes WDM, aislador óptico, fibra dopada con Erbio, controlador de polarización, circulador óptico y acoplador. [49]

Tener el conocimiento sobre la operación de los dispositivos que son parte del sistema laser de fibra nos otorga el poder explicar el funcionamiento general de este arreglo. Dado esto, a continuación, los dispositivos que forman parte del láser de fibra serán descritos, así como las especificaciones de cómo operan. En la discusión de resultados se da una descripción mayormente detallada sobre la configuración del sistema laser.

3.1. Aislador óptico

Como medio o dispositivo estabilizador de los sistemas ópticos se implementó la colocación de un aislador óptico con la finalidad deseable de reducir o eliminarla luz directamente que es reflejada en el sistema óptico de la fibra óptica, con lo anterior se logra que una onda electromagnética en una sola dirección se propague. Dichos dispositivos se basan en el efecto Faraday

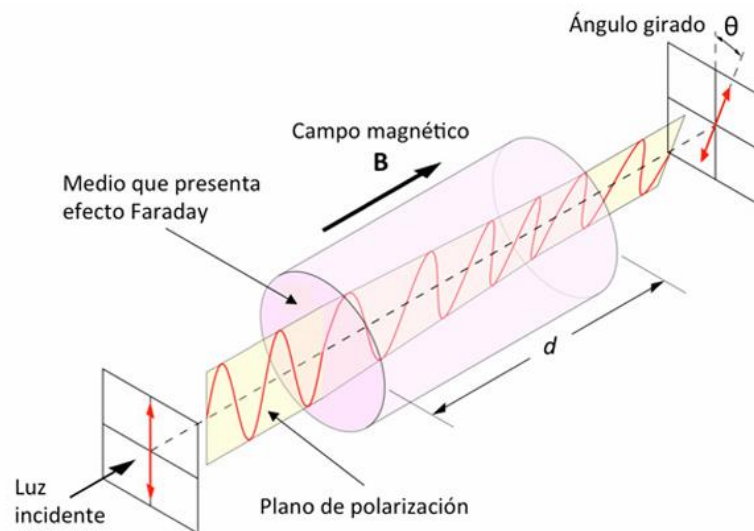


Figura 8 Rotación de la polarización de la luz, a causa el efecto Faraday



Figura 9 Aislador óptico 10202A-90 Modelo tomado de Thorlabs, Inc.

3.2. WDM

WDM (de las siglas en inglés) se refiere a multiplexación por división de longitud de onda. Es un dispositivo capaz de transmitir diferentes longitudes de onda de la luz a través de la fibra óptica de manera simultánea de una forma paralela, cada una de estas señales es transmitida con su banda de color correspondiente, de la manera que se define una longitud de onda muy exclusiva para la fuente de cada señal.

Estos dispositivos generalmente son bidireccionales, lo que le permite dividir una señal en otras varias longitudes de onda o bien en caso contrario es posible la unión de diferentes longitudes de onda para obtener una sola mediante el mismo dispositivo

El WDM que se utiliza en el sistema previamente propuesto se conforma por un mecanismo bidireccional que opera a 980/1550nm el cual tiene un propósito de unificar o separar la luz de manera eficiente en ambas longitudes de onda con un alto aislamiento y una pérdida de inserción baja. Figura 10.

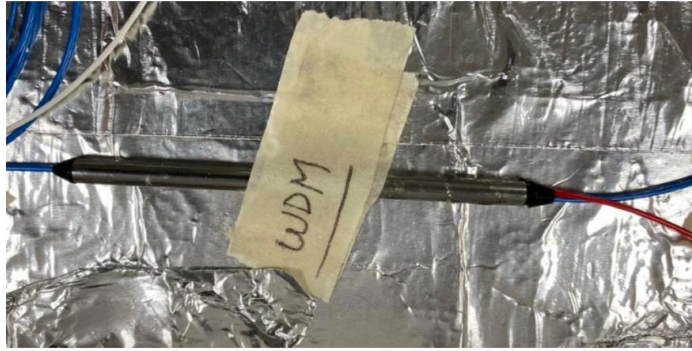


Figura 10 WDM empleado en el arreglo.

3.3. Fibras dopadas con Er^{+3}

Hay una gran variedad de fibras de sílice dopadas con tierra rara sirvieron para las aplicaciones que requirieron pulsos muy energéticos. Una de las tierras raras trivalentes más importantes es el erbio (Er^{3+}), las fibras que están dopadas con este elemento tienen la función de operar en varias regiones de longitud de onda, desde el espectro visible hasta el infrarrojo. Hay una variedad de fibras ópticas las cuales se dopan con algunos elementos o también conocidos como tierras raras, para este trabajo de investigación se empleó una fibra dopada con erbio, la gran ventaja de emplear es que pueden operar en distintas regiones de longitud de onda, que va desde lo 0.98 o 1.48 μ m asiendo a estas demandadas para su uso.[47]

Las fibras que se usaron en nuestro sistema como medio activo son altamente dopadas (4.4m de fibra dopada) con Erblio con absorción de 4.5 – 5.5 dBm⁻¹ a 1531nm, marca Thorlabs M5-980-125 [47]

3.4. El diodo láser

Este dispositivo está conformado de la unión de material semiconductor de tipo p, (unión p-n), en este proceso de unión es posible crear una región activa en la que, como parte del proceso y secuencia de recombinación originado en la aplicación del voltaje, aparecerá la luz laser. En este arreglo experimental se usó una fuente de bombeo a 980 nm de la marca Thorlabs.



Figura 11 Diodo Láser - Modelo tomado de Thorlabs, Inc.

3.5. Acoplador 90/10

El acoplador óptico es el componente cuya utilidad en este sistema es la de mayor importancia ya que es usado en redes y circuitos ópticos, permitiendo dividir la potencia óptica y acoplarla, sumado a eso sus usos como multiplexores y demultiplexores o divisores de polarización, siendo normalmente bidireccionales.

Cuando el arreglo experimental usa amplificadores de fibra óptica dopada con el erbio, se deben emplear acopladores fabricados de forma específica para estos arreglos, para poder lograr de forma óptima un desempeño eficaz a pérdida de la inserción y la dependencia de la longitud de onda referida.[4]

Es importante tener en consideración que la fabricación de dichos elementos e instrumentos es mediante la tecnología empleando una fibra fusionada, aunado a que son bidireccionales, teniendo la capacidad de agrupar o separar las diversas señales ópticas.

En la Figura 12 se visualiza básicamente el funcionamiento y se basa en el fenómeno óptico de acoplamiento de campos evanescentes, este fenómeno muestra que el campo modal del pulso guiado se propaga más allá del propio núcleo y al estar suficientemente cerca a otra fibra este campo terminará eventualmente acoplándose a la segunda fibra.



Figura 12 Funcionamiento acoplador.

El acoplador 90/10 que se usó en nuestro sistema, modelo PN:10202-FC, marca Thorlabs. A este dispositivo le es posible trabajar con 1550 nanómetros correspondientes a su longitud de onda, su característica que resalta es la de tener un valor de ± 40 del valor fijo de ancho de banda, sin olvidar que posee una pérdida por inserción máxima es de 0.1 decibelios



Figura 13 Fotografía del elemento acoplador 90/10.

3.6. Controlador de polarización

Se hizo uso de un controlador de polarización FPC560 de Thorlabs para caracterizar las propiedades de la emisión del sistema láser de nuestro arreglo experimental en función de los distintos estados de polarización. Por mencionar algunas de las características y funciones la de convierte polarización proveniente elíptica a lineal, tiene desempeño estable en un rango de 500-1660 nm, completo control a la salida de la polarización es para fibras con relativamente altas pérdidas de doblamiento.

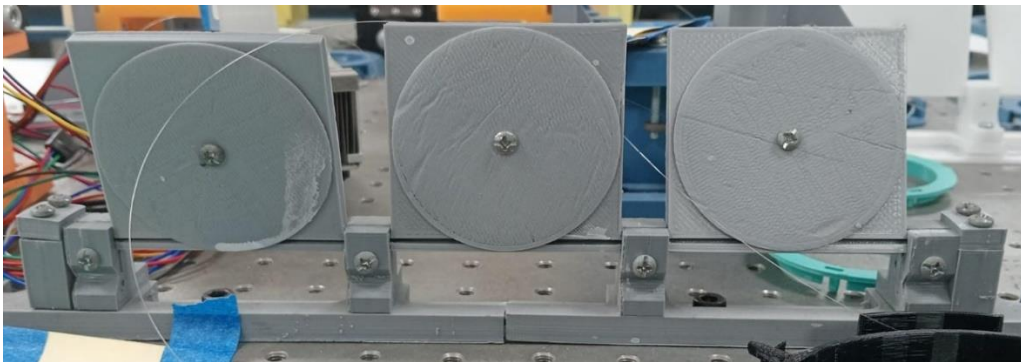


Figura 14 Fotografía del dispositivo controlador de polarización.

Las aplicaciones incluyen fibra monomodal las cuales requieren luz linealmente polarizada, el controlador de polarización FPC560 fácilmente puede implementarse para convertir la luz elípticamente polarizada de fibra monomodal en luz linealmente polarizada, de manera simple es como enrollar un número de veces específico dentro de cada plato y ajustar la posición de los tres platos.

3.7. Analizador de espectros ópticos

Se usó el analizador de espectros ópticos MS997740A de la marca Anritsu para observar el comportamiento espectral del sistema láser implementado, este equipo posee un rango de longitud de onda optimizado de 600 a 1750nm y requiere niveles de potencia entre 10 μ W (mínimo) – 2mW (máximo).



Figura 15 Fotografía del analizador de espectros ópticos modelo

3.8. Empalmadora de fibra óptica

La empalmadora de fibra monomodo que se usó, de modelo s178 A versión 2, contiene un mecanismo activo de alineamiento de los núcleos para ajustar los extremos de las fibras y un arco eléctrico controlable para derretir el cristal y empalmar los extremos. Entregándonos como producto un empale fuerte con bajas pérdidas y muy baja reflexión inversa. Esta empalmadora se usó para llevar a cabo el armado del láser empalmado cada uno de los componentes que conforman a este.



Figura 16 Fotografía tomada desde arriba de la empalmadora de fibra s178 A versión 2.



Figura 17 Fotografía tomada desde el frente de la empalmadora de fibra s178 A versión 2.

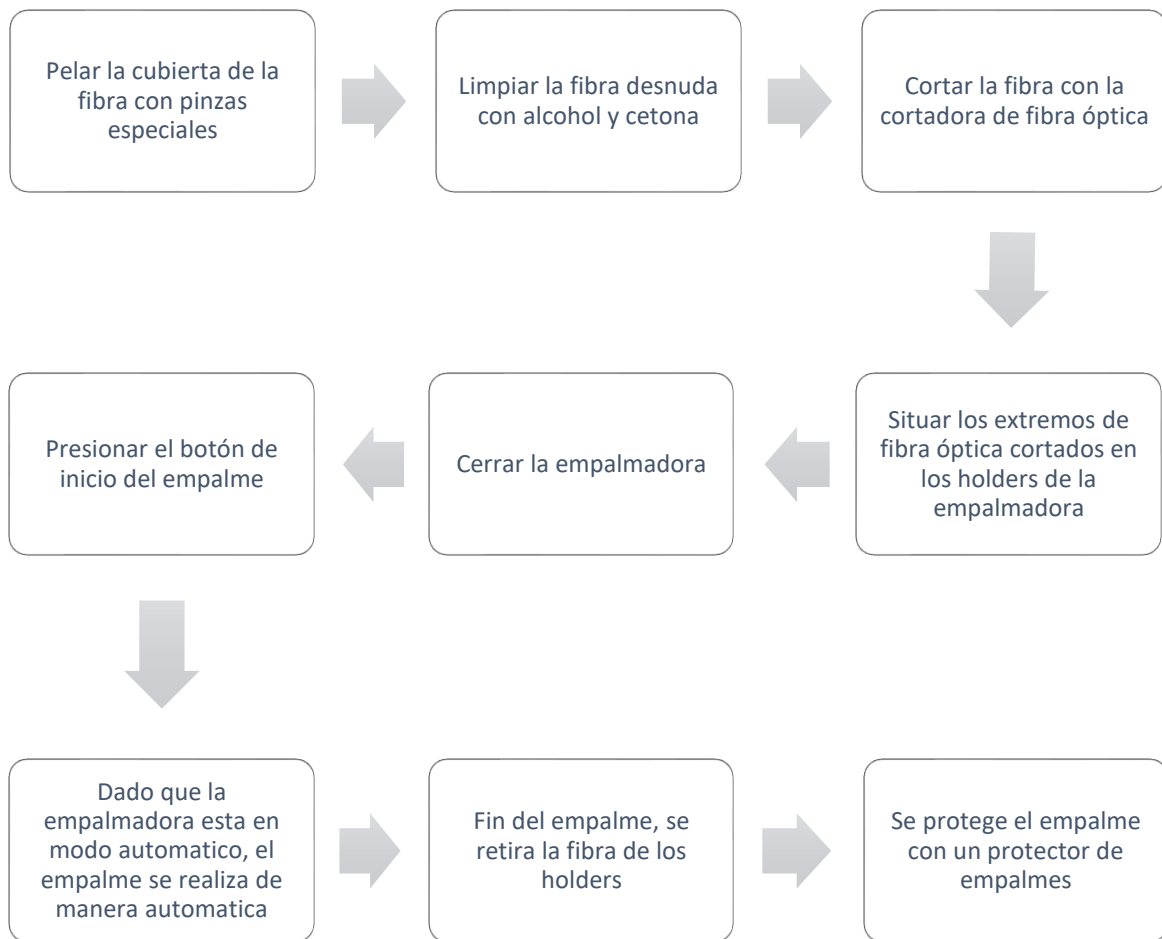


Figura 18 Procedimiento para empalmar la fibra.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Configuración experimental y manipulación del interferómetro

La Fig. 19a) muestra la sección transversal de la SCF, donde puede observarse que el diámetro de cada núcleo es de aproximadamente $9\ \mu\text{m}$, el paso de los núcleos es de $10\ \mu\text{m}$ y el diámetro del revestimiento es de $108\ \mu\text{m}$. La Fig. 19b) muestra el esquema del interferómetro supermodo Mach-Zehnder, que se fabrica empalmando unos milímetros de SCF casera entre dos SMF. La Fig. 19c) muestra el principio de funcionamiento del interferómetro:

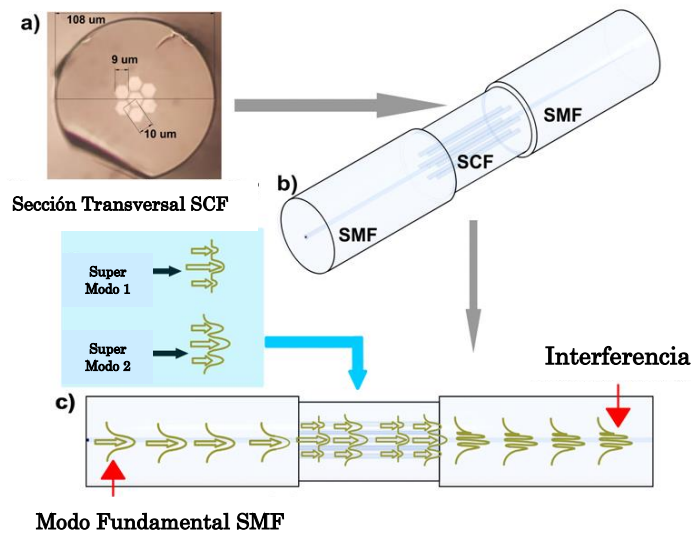


Figura 19 Interferómetro Mach-Zehnder. a) Sección transversal del SCF, b) Estructura del interferómetro supermodo, y c) comportamiento de la luz a través de la estructura.

El modo fundamental de la SMF de entrada excita los dos supermodos axisimétricos soportados por la SCF [15]; A continuación, los supermodos soportados generan una diferencia de fase óptica a medida que se propagan a través de la SCF y, por último, los supermodos se acoplan al núcleo de la SMF de salida causando interferencias.

El patrón de interferencia Mach-Zehnder puede ser descrito por [15]:

$$I(\lambda) = I_{sm1} + I_{sm2} + 2\sqrt{I_{sm1}I_{sm2}} \cos \Delta\phi \quad (2.1)$$

Donde I_{sm1} e I_{sm2} son las intensidades de los supermodos. $\Delta\phi$ es la diferencia de fase y puede calcularse mediante [5, 15]:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\delta n_e L}{\lambda} \quad (2.2)$$

Donde λ es la longitud de onda de la luz que se propaga, L es la longitud SCF, y δn_e es la diferencia de índice de refracción efectivo entre supermodos. Y el rango espectral libre (FSR, $\Delta\lambda$) del interferómetro se denota por [5]:

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{2\delta n_e L} \quad (2.3)$$

Además, al doblar la estructura del interferómetro, se produce de manera clara un desplazamiento de la longitud de onda y un ligero cambio de visibilidad [15]. Estos cambios pueden ajustar las pérdidas de la cavidad si el interferómetro se utiliza como filtro de longitud de onda en una cavidad láser. En consecuencia, el interferómetro se inserta en una cavidad laser en anillo para ajustar las pérdidas de la cavidad. De este modo, las emisiones láser pueden inducirse en las longitudes de onda seleccionadas en las que las pérdidas son mínimas y la ganancia láser es considerable.

4.2. Montaje y método experimental

La Figura 20 se ilustra la configuración del láser. El láser consiste en una cavidad en anillo con 4.2 m de fibra, la cuál es una fibra dopada en erbio (EDF). La EDF se bombea mediante un diodo de bombeo de 980 nm a través de un WDM. La cavidad anular también se compone de un aislador óptico para evitar la retro propagación de la luz, además tiene un controlador de polarización, el interferómetro Mach-Zehnder SCF construido supermodal es un elemento de

sintonización y un acoplador de fibra 90:10 para cerrar el anillo y permitir la monitorización de la salida del láser.[44]

4.3. Interferómetro - Estación de doblez

El interferómetro está montado en una lámina delgada metálica con bases que soportan los extremos (estación de doblez). Una de las bases es fija, y la otra está montada en una estación de traslación lineal para un desplazamiento longitudinal de precisión (véase el recuadro verde de la Figura 20, que se denomina configuración de flexión del interferómetro).

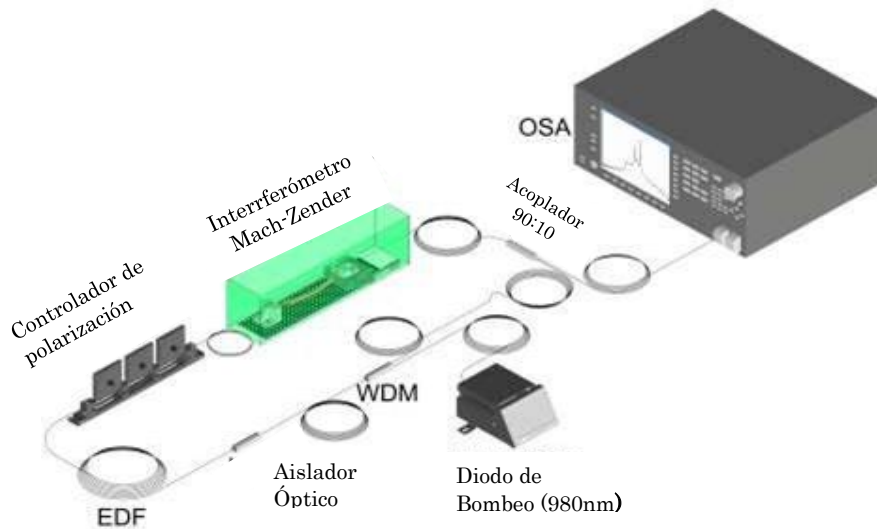


Figura 20 Montaje experimental del láser de cavidad anular. El interferómetro está incluido dentro de la cavidad en anillo montado en una estación de flexión

Cuando la estación de traslación lineal se desplaza para comprimir la lámina metálica, el interferómetro se dobla y su radio de curvatura disminuye.

4.4. Resultados experimentales

El recuadro de la Figura 21 muestra la respuesta espectral resultante de la interferencia supermodo con 20.32, 40.64, 60.96 y 101.6 mm de longitud de SFC, y la Figura 21 representa el gráfico de FSR contra las longitudes de SCF. Se observa que el FSR del interferómetro disminuye a medida que aumenta la longitud de la SCF, lo que concuerda con la ecuación 2.3.

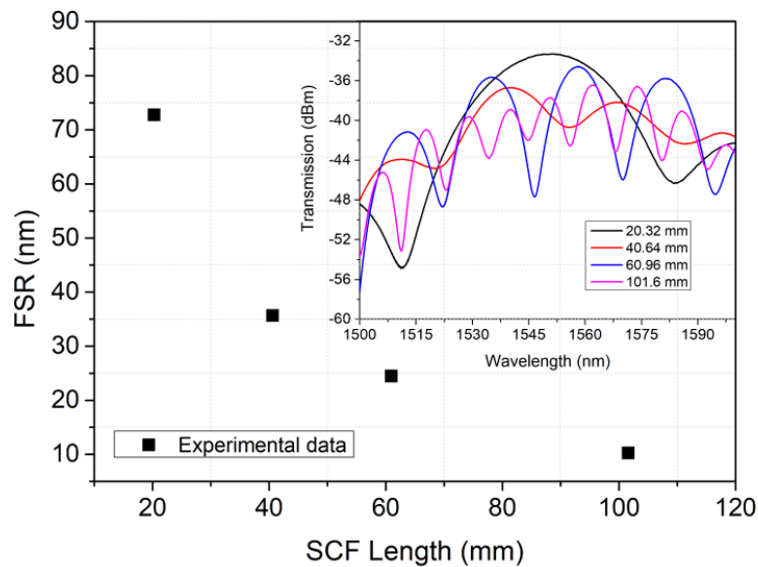


Figura 21 FSR en función de la longitud del SFC. El recuadro muestra los espectros para estructuras de interferómetro con 20.32, 40.64, 60.96 y 101.6 mm de longitud SFC

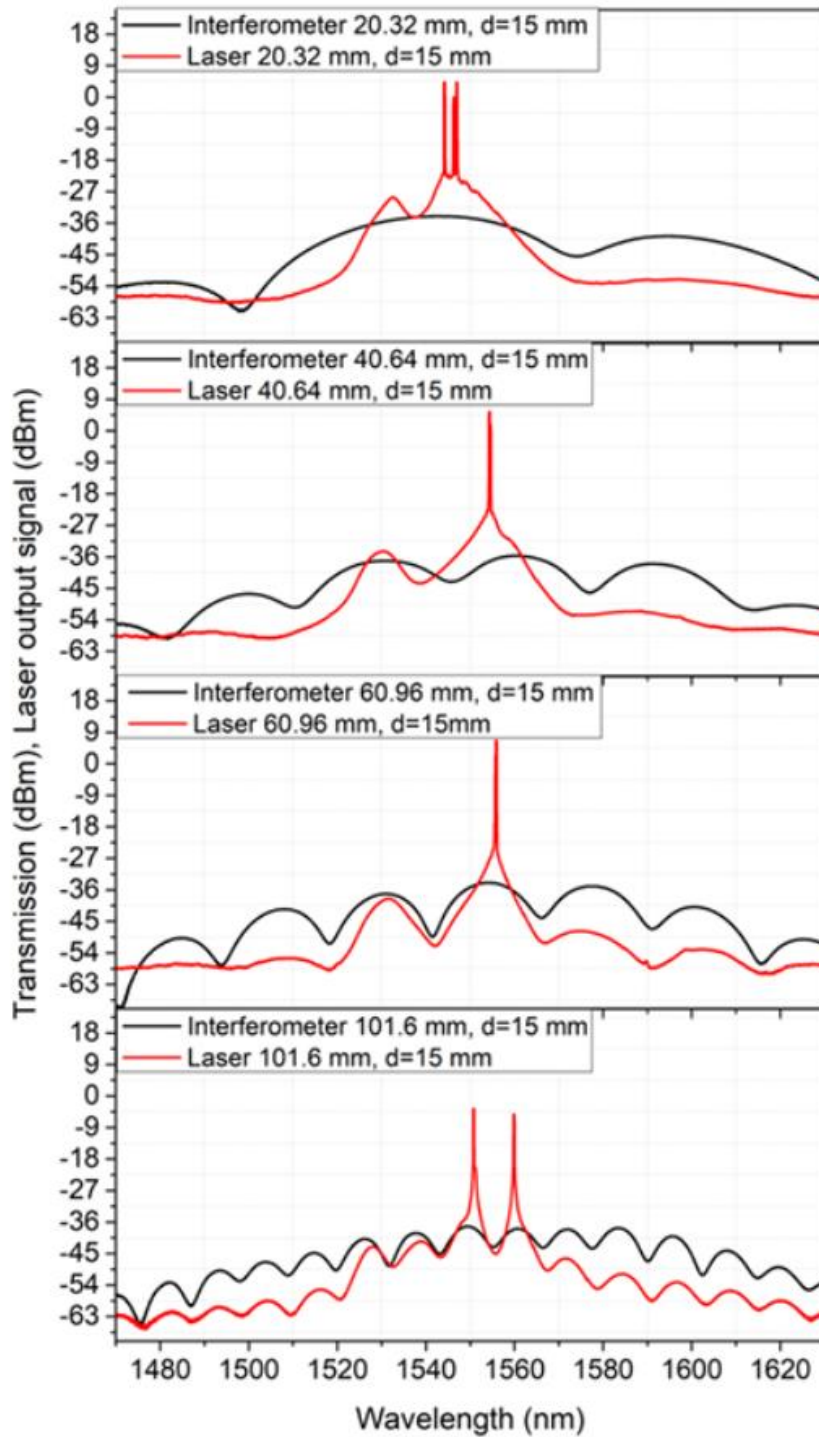


Figura 22 Señal de salida del láser cuando se incluyen interferómetros con 20.32, 40.64, 60.96 y 101.6 mm de longitud SCF en la cavidad del láser.

La Figura 22 muestra la señal de salida del láser cuando se incluyen interferómetros con 20.32, 40.64, 60.96 y 101.6 mm de longitud SCF en la cavidad del láser.

Además, el espectro del interferómetro se suma en el mismo gráfico para compararlo con la señal de salida del láser.

Se observa cómo las pérdidas de la cavidad se filtran según la forma espectral del interferómetro incluido en la cavidad láser. Además, las emisiones se concentran entre dos mínimos de un pico del espectro del interferómetro, donde la ganancia del láser es suficiente para lasear.

Para el caso de 20.32 mm, la FSR del interferómetro es de aproximadamente 72.73 nm, que es demasiado larga para reducir la competencia de modos del láser en una longitud de onda concreta de forma eficiente. Sin embargo, a medida que la FSR se hace más pequeña, la competencia entre modos láser disminuye lo suficiente como para inducir la emisión entre los mínimos de un pico del espectro, lo cual es más evidente en la Figura 22 para los casos de estructuras con 101.6 y 60.96 mm de longitud SCF.

La respuesta espectral del interferómetro puede desplazarse en longitud de onda doblando su estructura. La Figura 23 muestra los espectros de un interferómetro con 60.96 mm de SCF contra el desplazamiento que dobla la estructura del interferómetro. Se observa que el espectro sufre un desplazamiento de longitud de onda hacia longitudes de onda más reducida a medida que se dobla la estructura del interferómetro. Este desplazamiento hacia el azul se debe a los cambios geométricos de la estructura, y a que el índice de refracción cambia en consecuencia al efecto elasto-óptico.

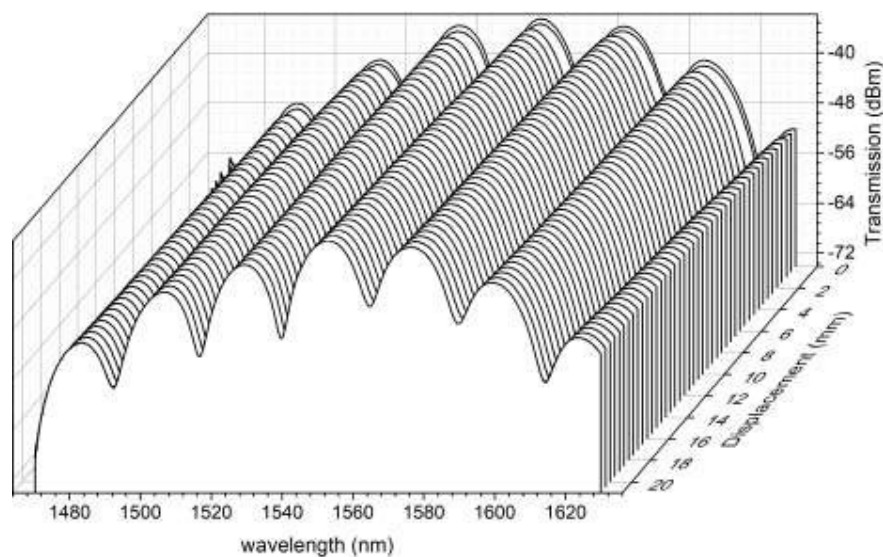


Figura 23 Espectros del interferómetro compuesto por 60.96 mm de longitud SCF para un rango de flexión de desplazamiento de 0 a 21 mm con 0.5 mm de paso.

La Figura 24 muestra los espectros de salida del láser utilizando un interferómetro fabricado con 60.96 mm de longitud SCF para distancias de flexión de desplazamiento de 0 a 21 mm, con 0.5 mm de paso.

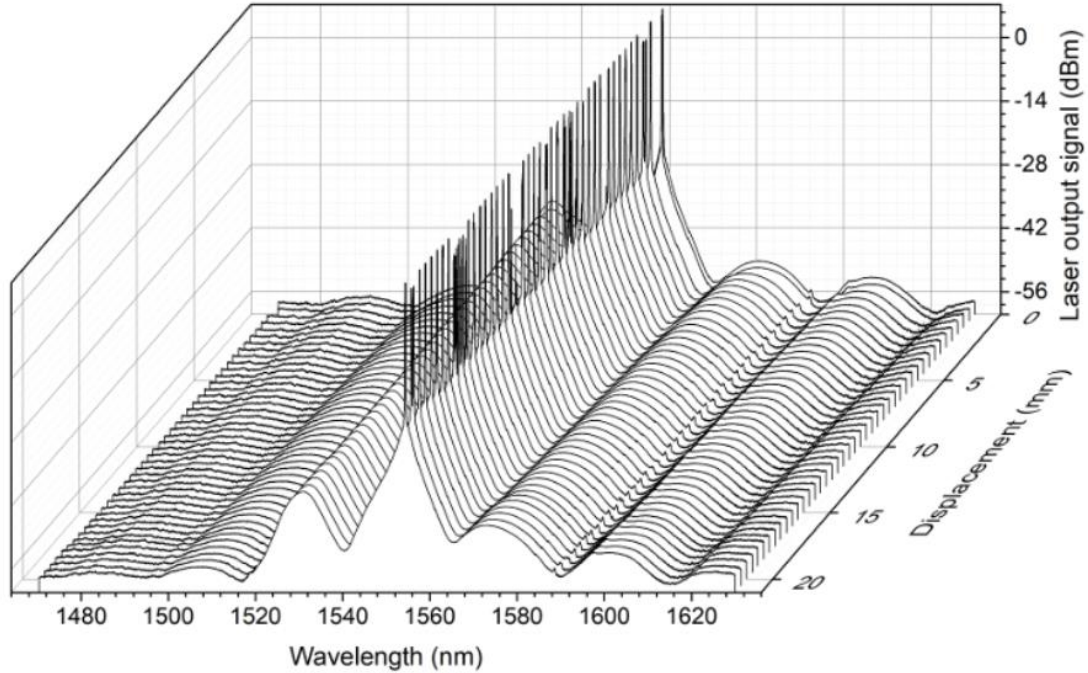


Figura 24 Espectro de la señal láser de salida con una estructura de interferómetro de 60,96 mm de longitud SCF para un rango de flexión de desplazamiento de 0 a 21 mm, con 0,5 mm de paso.

Es posible visualizar en la figura 25 la representación de la longitud de onda de la emisión (cuadrados negros) junto con el mínimo entre el pico (triángulos verdes y círculos rojos) en el espectro del interferómetro para cada valor de desplazamiento.

Se observa que la emisión está contenida entre las longitudes de onda mínimas del pico del interferómetro. Sin embargo, la FSR del interferómetro no es suficiente para provocar una emisión precisamente en medio de los dos mínimos, lo que puede deberse también a la ganancia láser de la fibra empleada dopada con erbio.

También es posible visualizar que el desplazamiento de dicha longitud de onda de la emisión es ajustado, y su factor de desplazamiento es de alrededor de 0.17 nm/mm. Las emisiones láser de dicha longitud de onda se desplazan hacia longitudes de onda más cortas a medida que aumenta el desplazamiento.

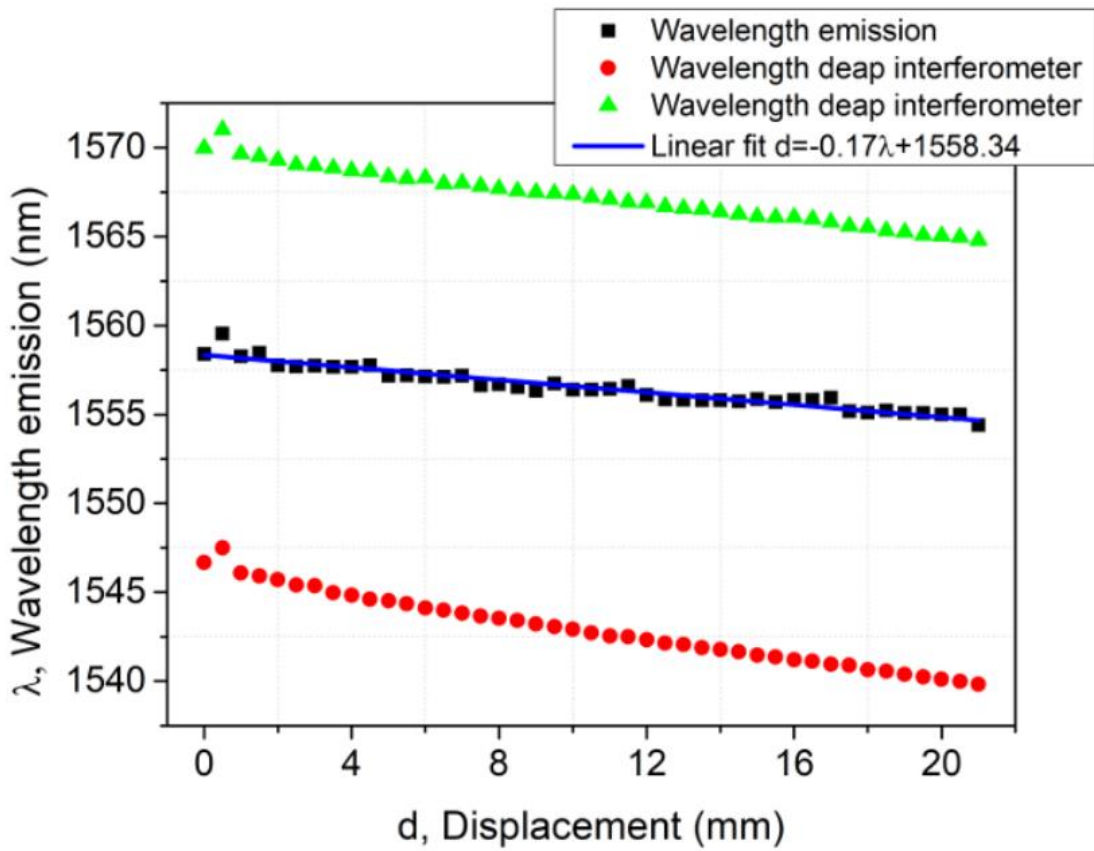


Figura 25 Emisión de la línea láser contra el desplazamiento para un láser con una estructura interferométrica de 60.96 mm de longitud SCF para un intervalo de curvatura del desplazamiento de 0 a 21 mm, con 0.5 mm de paso. También se incluyen las profundidades alrededor del pico.

La Figura 26 muestra la señal de salida láser para un interferómetro de 101.6 mm de longitud SCF para valores de flexión de desplazamiento de 0 a 21 mm con 0.5 mm de paso.

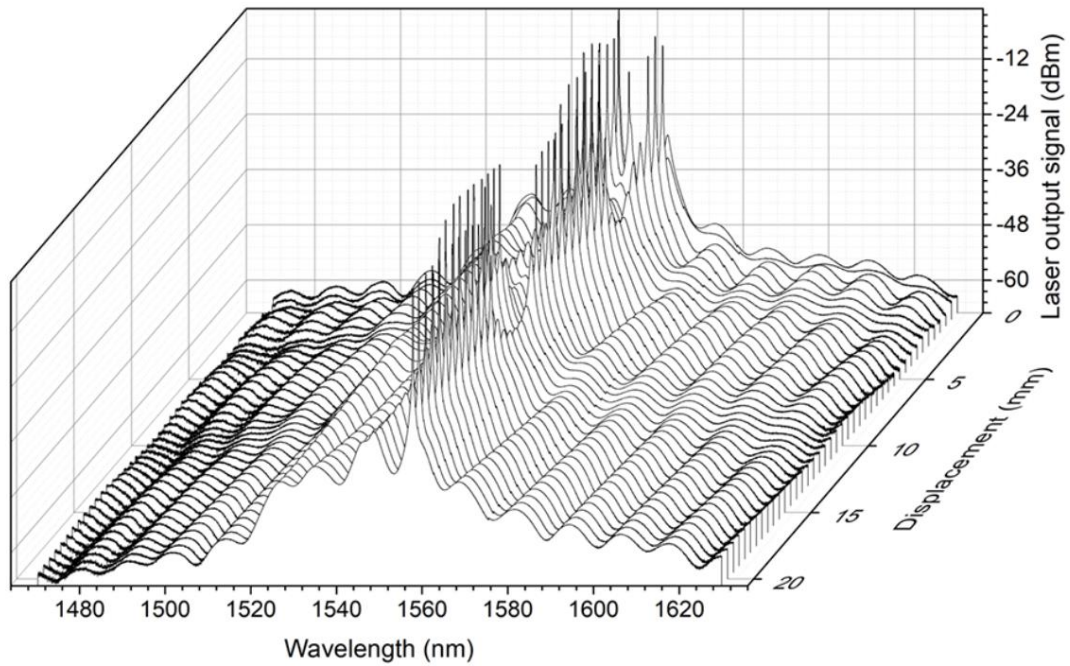


Figura 26 Espectro de la señal láser de salida con una estructura interferométrica de 101.6 mm de longitud SCF para un rango de flexión de desplazamiento de 0 a 21 mm, con 0.5 mm de paso.

La Figura 27 muestra las emisiones de longitud de onda contra el desplazamiento; el comportamiento es aproximadamente lineal, dando factores de 0.33 a 0.91 nm/mm. Se añaden los ajustes lineales para cada rango de desplazamiento de emisión, y además, se indica la zona donde se presenta dos y tres emisiones encerradas por líneas discontinuas.

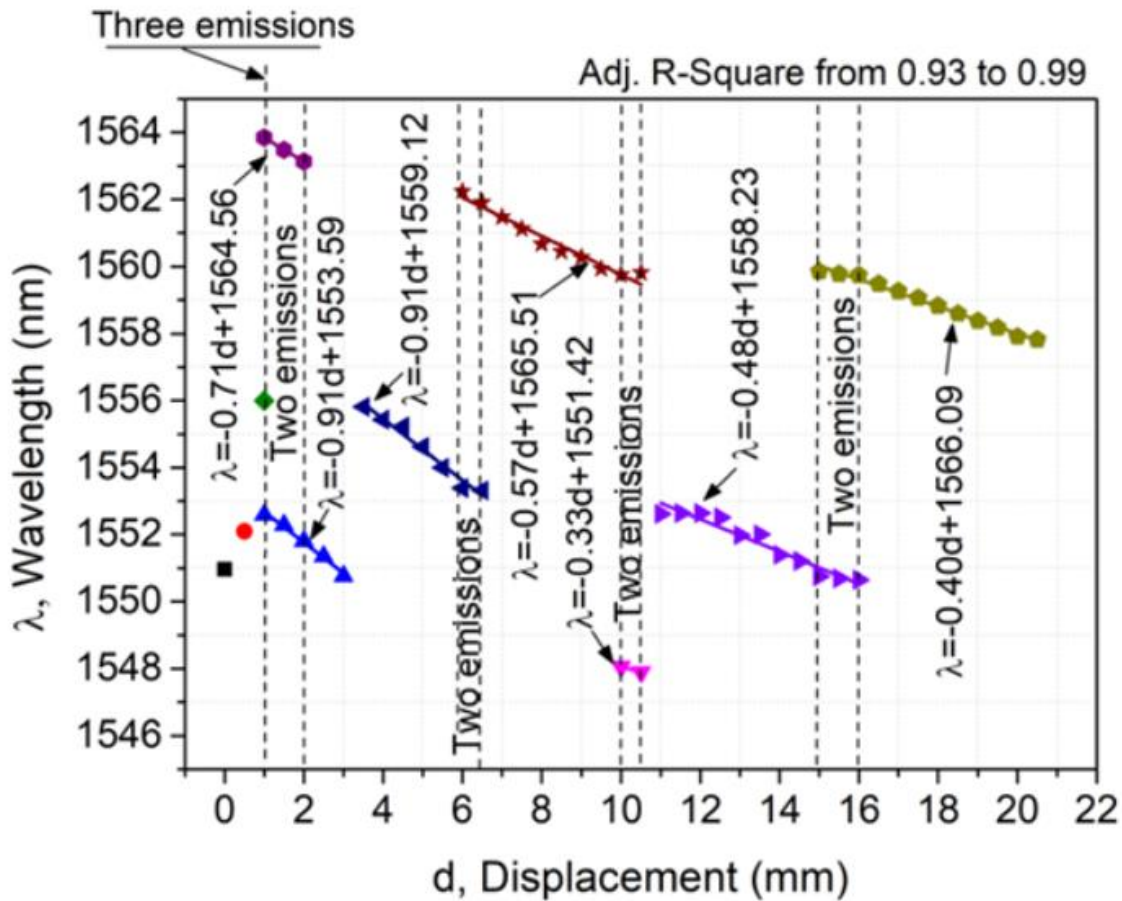


Figura 27 Emisión de línea láser en función del desplazamiento para un láser con una estructura interferométrica de 101.6 mm de longitud SCF para un intervalo de curvatura del desplazamiento de 0 a 21 mm, con 0.5 mm de paso.

Estabilidad del láser

La señal láser de salida para la configuración láser con interferómetro de 101.6 mm SCF doblado con un desplazamiento de 10 mm se registró cada tres minutos durante 104 minutos. En los espectros resultantes se visualizan e la figura 28 La intensidad y la longitud de onda de la emisión para cada espectro de la Figura. 28 se representan gráficamente en la Figura 29. Se observa que se obtuvieron variaciones máximas de 0.34 dBm en intensidad y 0.12 nm de longitud de onda.

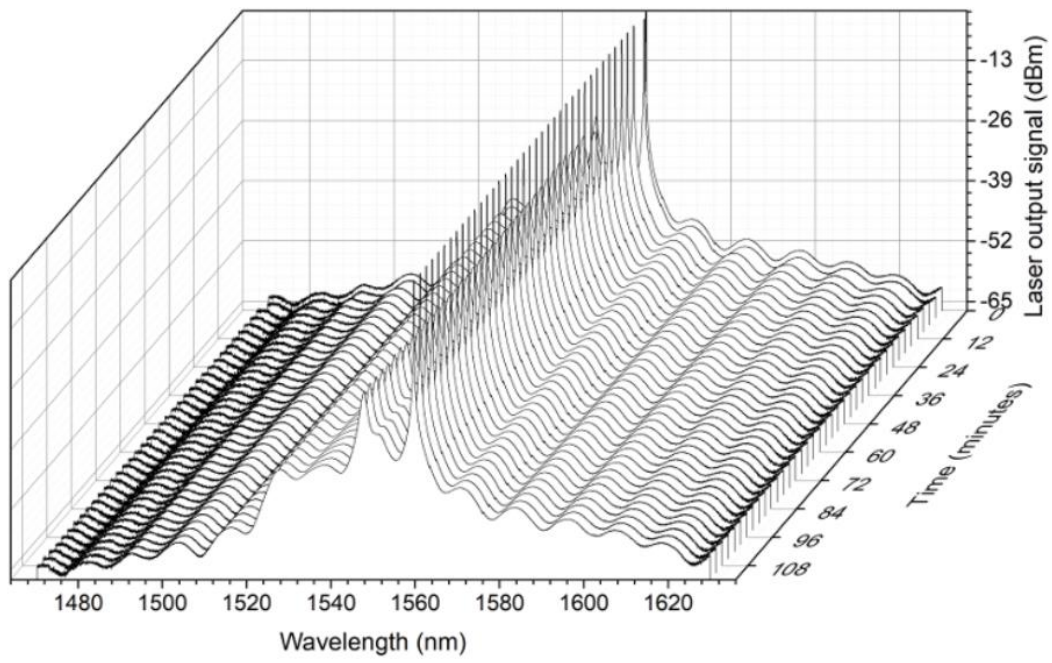


Figura 28 Espectros de la señal de salida láser para un interferómetro con 101.6 mm de longitud SCF y 10 mm de flexión de desplazamiento durante 114 minutos, con un paso de 3 minutos.

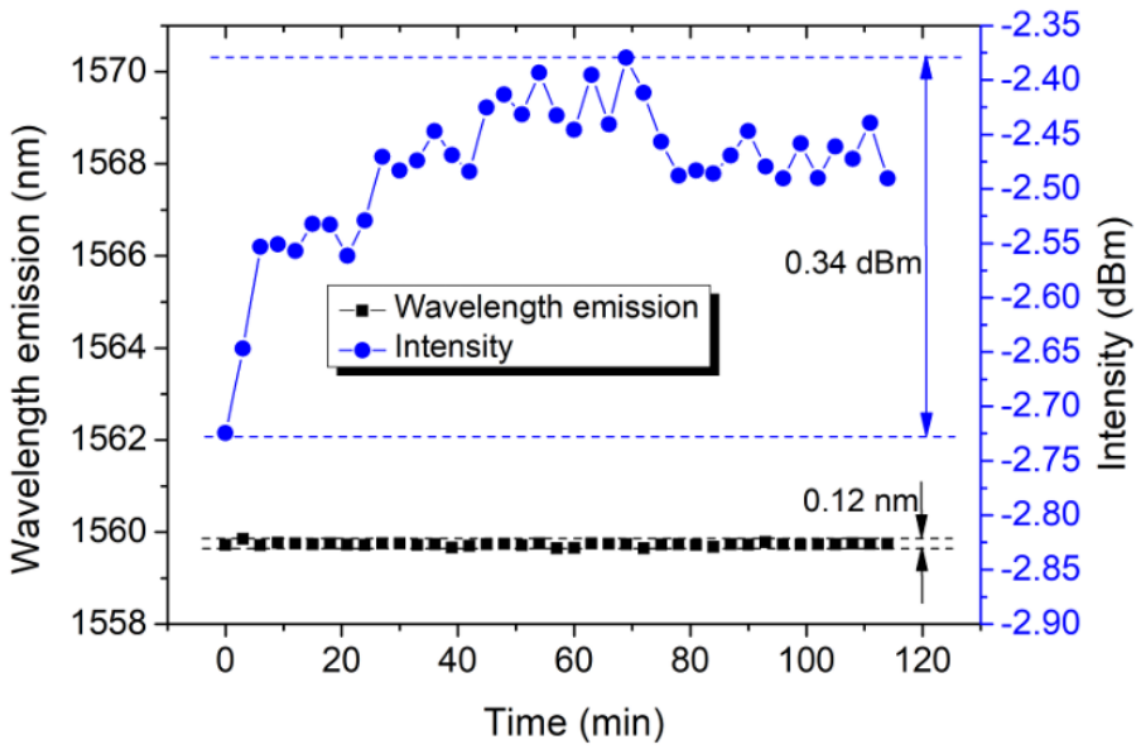


Figura 29 Emisión láser de longitud de onda frente al tiempo. El interferómetro de 101.6 mm de SCF se dobló con 10 mm de desplazamiento en la cavidad láser. El tiempo total de ensayo fue de 114 minutos, con un paso de 3 minutos.

Capítulo 5

Discusión y conclusiones

Se ha demostrado la sintonización del láser de fibra óptica basada en la interferencia supermodo en una fibra de siete núcleos. Fue posible utilizar un interferómetro Mach-Zehnder basado en la interferencia supermodo como filtro intracavitario. El interferómetro se construyó satisfactoriamente empalmado un segmento SCF entre dos SMF. El SMF a la entrada del SCF y se logró excitar dos supermodos en el SCF. Se determina que los supermodos interfieren debido a los diferentes caminos ópticos que experimentan a través de la longitud de la SCF.

Se muestra que dicho patrón de interferencia generado por el interferómetro supermododal, se utilizó como filtro en un láser de cavidad para provocar la inducción de las emisiones de la línea láser a longitudes de onda en las que las pérdidas fueron mínimas y la ganancia del láser considerable.

Tal y como lo apreciamos en el capítulo anterior, el patrón de interferencia empieza a desplazarse en longitud de onda, cuando se dobla la estructura del interferómetro, por lo que la emisión de la línea láser puede sintonizarse debido al desplazamiento de longitud de onda generado, provocando una redistribución de las pérdidas de la cavidad que ajusta la emisión de la línea láser.

Se probaron, caracterizaron y analizaron los interferómetros construidos con diferentes longitudes de SCF doblados como filtros dentro del láser de cavidad, obteniéndose factores de sintonía de 0.33 a 0.91 nm/mm, y se consiguieron emisiones simultáneas en algunos rangos de flexión.

Se analizó experimentalmente la estabilidad del láser, obteniéndose variaciones máximas de alrededor de 0.34 dBm y 0.12 nm en intensidad y longitud de onda, respectivamente por lo que el arreglo planteado tiene una cierta variación, lo que a trabajos a futuro podría revisar como área de mejora, Sin embargo, esta

variación de intensidad se puede compensar añadiendo algunos esquemas ópticos, y la variación de longitud de onda es adecuada para aplicaciones que no exigen altas resoluciones.

Por último, se concluye que el estudio experimental propuesto es adecuado, rentable y sencillo, por lo que puede aplicarse en diversos campos, por ejemplo, el desarrollo de fuentes ópticas variables, las telecomunicaciones, la detección, la separación y decodificación de las diferentes señales de la fibra óptica acorde a las distintas longitudes de onda, la espectroscopia y la metrología.

Referencias

- [1] Salceda-Delgado, G., Martínez Rios, A., Sierra-Hernández, J., Rodríguez-Carreón, V., Toral-Acosta, D., & Selvas-Aguilar, R. (2018). Reconfiguration of the multiwavelength operation of optical fiber ring lasers by the modifiable intracavity induced losses of an in-fiber tip probe modal Michelson interferometer. *Laser Physics*, 28(3):035107.

- [2] Salceda-Delgado, G., Martínez Rios, A., Sierra-Hernández, J., Rodríguez-Carreón, V., Toral-Acosta, D., Selvas-Aguilar, R., & Álvarez-Tamayo, R. (2019). Wavelength switching and tuning of fiber lasers by using a modifiable intracavity filter based on a modal Michelson interferometer. *Laser Physics*, 29(6):065104.

- [3] Mary, R., Choudhury, D., & Kar, A. (2014). Applications of fiber lasers for the development of compact photonic devices. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 20(5):72–84.

- [4] Wang, M., Huang, Y., Yu, L., Song, Z., Liang, D., & Ruan, S. (2018). Multiwavelength thulium-doped fiber laser using a microfiber-optic Fabry–Perot interferometer. *IEEE Photonics Journal*, 10(4):1–8.

- [5] Digonnet, M., & Gaeta, C. (1985). Theoretical analysis of optical fiber laser amplifiers and oscillators. *Applied Optics*, 24(3):333–342.

- [6] Xia, L., Shum, P., & Cheng, T. (2007). Photonic generation of microwave signals using a dual-transmission-band FBG filter with controllable wavelength spacing. *Applied Physics B*, 86(1):61–64.

- [7] Lian, Y., Ren, G., Zhu, B., Gao, Y., Jian, W., & Ren, W. (2017). Switchable multiwavelength fiber laser using erbium-doped twin-core fiber and nonlinear polarization rotation. *Laser Physics Letters*, 14(5):055101.

- [8] Cheng, J., Chen, W., & Chen, G. (2016). Switchable quadruple-wavelength Erbium doped fiber laser based on a chirped fiber grating and polarization maintaining fiber. *Optics & Laser Technology*, 78:71–73.

- [9] Qian, L., Fen, D., Xie, H., & Sun, J. (2015). A novel tunable multi-wavelength Brillouin fiber laser with switchable frequency spacing. *Optics Communications*, 340:74–79.
- [10] Cheng, J., Zhang, L., Sharafudeen, K., & Qiu, J. (2014). Tunable and switchable six wavelength erbium-doped fiber ring laser. *Laser Physics*, 24(3):035102.
- [11] Yelen, K., Hickey, L., & Zervas, M. (2005). Experimentally verified modeling of erbium-ytterbium co-doped DFB fiber lasers. *Journal of lightwave technology*, 23(3):1380.
- [12] Sobon, G., Kaczmarek, P., & Abramski, K. (2012). Erbium–ytterbium co-doped fiber amplifier operating at 1550 nm with stimulated lasing at 1064 nm. *Optics Communications*, 285(7):1929–1933.
- [13] Martinez-Rios, A., Anzueto-Sanchez, G., Monzon-Hernandez, D., Salceda-Delgado, G., & Castellon-Uribe, J. (2014). Multiwavelength switching of an EDFL by using a fixed fiber-comb filter and a broadband tunable S-bent fiber filter. *Optics & Laser Technology*, 58:197–201.
- [14] Slavik, R., Castonguay, I., LaRochelle, S., & Doucet, S. (2004). Short multiwavelength fiber laser made of a large-band distributed Fabry-Pérot structure. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(4):1017–1019.
- [15] Wei, H., Amrithanath, A., & Krishnaswamy, S. (2019). Multi-wavelength erbium doped fiber ring lasers based on an optical fiber tip interferometer. En *Optical Components and Materials XVI* (Vol. 10914, pág. 1091420).
- [16] Duree, G. C. (2011). “Optics for dummies”. John Wiley & Sons.
- [17] Hecht, E. (2017). Optics. Pearson Education.
- [18] Rossi, B. (1977). Fundamentos de óptica. Editorial Reverté.

- [19] Liu, C.; Zhang, M.; Zhang, H.; Yang, J.; Shang, Q.; Yang, X.; Wang, S.; Ran, L. (2022) Tapered-open-cavity-based in-line Mach-Zehnder interferometer for highly sensitive axial-strain measurement. *Opt. Express* 2022, 30, 6341–6354.
- [20] Aspelmeyer, M., Kippenberg, T. J., & Marquardt, F. (2014). Cavity optomechanics. *Reviews of Modern Physics*, 86(4), 1391–1452.
- [21] Zhang, H., Liu, C., Zhang, M., & Yang, J. (2021). Multimode assisted open-cavity Mach-Zehnder interferometer. *Twelfth International Conference on Information Optics and Photonics*, 27, 15.
- [22] Bass, M., & Van Stryland, E. W. (2002). *Fiber Optics Handbook*. McGraw-Hill.
- [23] Bass, M., Enoch, J., Van Stryland, E. W., & Wolfe, W. L. (2001). *Handbook of Optics*. McGraw-Hill.
- [24] Hitz, B., Ewing, J. J., & Hecht, J. (2001). *Introduction to Laser Technology*. IEEE Publications.
- [25] Hecht, J. (2004). *The Laser Guidebook*. McGraw-Hill.
- [26] Tapia, L. A. (2021). DISEÑO Y FABRICACIÓN DE INTERFERÓMETROS MACH-ZEHNDER MEDIANTE LA TÉCNICA DE ESCRITURA LÁSER. Centro de Investigaciones en Óptica.
- [27] Peatross, J., & Ware, M. (2015). *Physics of Light and Optics*. Birmingham Young University.
- [28] Fehle, R., & Mayinger, F. (2011). MACH-ZEHNDER INTERFEROMETRY.
- [29] Gutiérrez, C., & Morales, L. (2014). Interferómetro de Mach-Zehnder y desplazamiento con piezoeléctricos. Universidad de los Andes.

- [30] Zhao, C., Wang, Y., Zhao, W., & Dong, X. (2022). Modifiable optical fiber tapered Mach-Zehnder interferometer for tune and switch optical fiber laser applications. *Optical Fiber Technology*, 68, 102696.
- [31] Y. Rodriguez. (2009). *Fibra Óptica*. El Cid.
- [32] Grosz, D. (s/f). *SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR FIBRA ÓPTICA DE ALTA CAPACIDAD*. Instituto Tecnológico de Buenos Aires.
- [33] Vargas, I. A. (s/f). *Sistemas De Fibra Óptica*. Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica.
- [34] Alonso, M. C. (2015). *SENSOR DE TEMPERATURA RATIOMÉTRICO BASADO EN FIBRA MULTINÚCLEO*. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
- [35] Yañez, H. E., & Barahona, A. M. (2024). *DISEÑO DE UN ADAPTADOR ÓPTICO PARA REDES DE FIBRA ÓPTICA MULTIMODO MEDIANTE INTERFERENCIA MULTIMODO*. Universidad Politécnica Salesiana.
- [36] T. Cseh and T. Bercei, “Efficient compensation methods for modal dispersion in radio over multimode fiber links,” 2014 20th Int. Conf. Microwaves, Radar Wirel. Commun. MIKON 2014, pp. 3–5, 2014, doi: 10.1109/MIKON.2014.6899953.
- [37] Arevalo-Bautista, L. J., Selvas-Aguilar, R., Sierra-Hernandez, J. M., Gallegos-Arellano, E., Rico-Mendez, M. A., De Cordoba-Castella, P. J. F., & Toral-Acosta, D. (2024). Displaced thinned single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer tested for temperature and curvature applications. *Results in Optics*, 100744.
- [38] Rivera, Juan. (2022). *Física - Volumen I*. Córdoba (España): Fondo Editorial RED Descartes.
- [39] Luo, A-P., Luo, Z-c., & Xu, W.-C. (2009). Tunable and switchable multi-wavelength erbium-doped fiber ring laser based on modified dual-pass Mach-Zehnder interferometer. *Optics Letter*, 34(14), 2135-2137
- [40] M. Young, (1992). *Optics & Lasers*, Springer
- [41] Montoya-Castro, S. A., Herrera-Duran, J. M. y Barrera-Ramírez, J. F. (2017). Límites de velocidad y distancia en la transmisión de información por un enlace óptico de bajo costo con recuperación libre de ruido. *DYNA*, 84(201), 234–240.
- [42] Hecht, Eugene. (2017). *Optics*. Malaysia: Pearson

- [43] Bello-Jiménez, M., Kuzin, E., Ibarra-Escamilla, B., & Tellez-García, R. (2007). Caracterización de un amplificador de fibra dopada con erbio a partir de sus parámetros experimentales. *Revista Mexicana de Física*, 53(4), 289-295.
- [44] Guzman-Sepulveda, J. R., & May-Arrijoja, D. A. (2013). In-fiber directional coupler for high-sensitivity curvature measurement. *Optics Express*, 21(10), 11853.
- [45] May-Arrijoja, D. A., & Guzman-Sepulveda, J. R. (2017). Fiber optic sensors based on multicore structures. En *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation* (pp. 347–371). Springer International Publishing.
- [46] López, A. R., & Martínez, P. J. (2022). Análisis del transitorio de un láser de fibra óptica dopada con erbio. *Revista de Óptica Avanzada*, 35(4), 123-134.
- [47] Alvarez Mota, G. 2008. Análisis experimental del modelo de Giles usado para la caracterización de fibras dopadas con erbio. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- [48] Miguel, C. S. P. (2018). Caracterización de dispositivos avanzados de fibra óptica.
- [49] Alaniz Baylón, J. (2017). *Láser Q-switched activo de fibra dopada de Er/Yb de doble revestimiento en cavidad lineal* (Tesis de maestría). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonanzintla, Puebla, México.