

Universidad de Guanajuato
División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca
Departamento de estudios multidisciplinarios Sede Yuriria

Trabajo de veranos de la ciencia 2019:

Implementación de un laser de fibra de múltiples longitudes conmutable

Alumnos:

Salazar Martínez Oscar Manuel

Guzmán Niño Flavio Cesar

Campos Arreola Alan

Asesor: Guzmán Chávez Ana Dinora



23-07-2019

Contenido

Introducción	3
Capítulo 1: Interferometría	3
1.1. - Definición	3
1.2.- Tipos de interferencia	4
1.2.1.- Interferencia constructiva:	4
1.2.2.- Interferencia destructiva:	4
1.3.- Condiciones generales para interferencia:	4
1.4.- Interferencia de dos haces.....	5
1.5.- Interferencia de haces múltiples	5
1.5.1.- Interferómetro Fabry-Perot	6
Capítulo 2: Laser	8
2.1.- Definición	8
2.2.- Características	8
2.3.- Partes de un Laser	8
2.3.1.- Bombeo	9
2.3.1.1.- Bombeo Óptico.....	9
2.3.2.- Cavidad óptica	9
2.3.3.- Medio de Ganancia.....	10
2.4.- Tipos de laser.....	10
Capítulo 3: Resultados	11
3.1.- Arreglo experimental del laser conmutable con arreglo interferométrico	11
3.2.- Sistema interferométrico.	12
3.3.- Caracterización del sistema interferométrico	12
3.4. Conmutación de la emisión laser	14
3.4.1.- Resultados de la emisión laser y estudio de estabilidad.	14
Conclusiones.....	17
Referencias	17

Tabla de figuras

Figura 1: interferencia destructiva (izquierda) e Interferencia constructiva (derecha).....	4
Figura 2: Interferómetro de Michaelson.....	5
Figura 3: Interferómetro de Michaelson.....	5
Figura 4: Interferómetro F-P	6
Figura 5: Espectro de reflectancia de una película delgada.....	7
Figura 6: Arreglo interferométrico multicapa	8
Figura 7: Emisión de LED vs laser	9
Figura 8: Partes de un laser.....	9
Figura 9: Espectro de emisión del erbio bombeada con un laser de 632 nm.....	11
Figura 10: Arreglo experimental de laser de fibra conmutable	11
Figura 11: Diseño del filtro	12
Figura 12: Arreglo para caracterizar el filtro.....	12
Error! Marcador no definido.	
Figura 13: Respuesta del espectro de reflectividad al cambio de temperatura	13
Figura 14: Posición de la longitud de onda pico de la franja en función de la temperatura	15
Figura 15: Emisión laser en la region a) ~1530 nm, b) ~1540 nm, c) ~1555 nm y d) ~1562 nm cuando el VOA es ajustado dos veces	15
Figura 16: Estabilidad en longitud de onda y potencia del laser de fibra obtenidos durante 20 minutos.	16
Figura 17: Espectros del laser de fibra obtenidos durante 20 minutos.	16

Introducción

Los láseres de fibra óptica, desde hace 20 años, han sido objeto de múltiples investigaciones desde su primera presentación. Alrededor del globo se ha explotado su potencia, sus propiedades de emisión o su habilidad para generar luz a diferentes longitudes de onda, todo esto aplicado a diferentes áreas tales como telecomunicaciones, procesamiento de materiales, procesamiento digital de señales, e incluso en medicina [1]. Los láseres de fibra poseen una ventaja a comparación de otros tipos de láser gracias a su diminuto tamaño (del diámetro de un cabello), gran resistencia al calor y como la fibra puede moverse de manera libre, el láser se puede manipular con relativa facilidad.

Los filtros ópticos conmutables son bastante importantes porque pueden ser utilizados en múltiples rangos de aplicaciones. Pueden ser usados como sensores de temperatura [2], de presión, índice de reflectividad o anemómetros [3]. Estos también se pueden usar dentro de una cavidad láser de fibra dopada con erbio para obtener longitudes de onda de emisión específicas dentro del rango de las telecomunicaciones. Existen configuraciones muy diferentes para elaborar este tipo de filtros, de los más utilizados son aquellos que se basan en el interferómetro tipo Fabry-Perot. Procedimientos hay muchos, algunos autores proponen hacer una cavidad en el núcleo de una fibra para tener una cavidad entre dos espejos [4], en otros han colocado una burbuja de aire en la punta de la fibra [5], pero todos estos procedimientos llegan a un mismo fin.

En este trabajo se presenta un láser de fibra dopada con erbio de longitud de onda conmutable basado en un filtro espectral. Aquí, el filtro está formado por una oblea de silicio, una capa de cianocrilato y una película antirreflejante en la punta de la fibra óptica los cuales están unidos con un adhesivo basado en una resina epóxica. Las longitudes de onda de emisión del láser están determinadas principalmente por la posición en donde se encuentran las franjas más intensas del espectro de reflectividad del filtro. Así mismo, la longitud de onda de la emisión láser se controla y conmuta usando un atenuador óptico variable insertado dentro de la cavidad láser. De esta forma, podemos obtener emisiones láser en diferente longitud de onda dentro del rango de los 1530 nm hasta los 1567 nm.

Capítulo 1: Interferometría

1.1. - Definición.

La **interferometría**, o también llamada **interferencia**, es el estudio de los fenómenos ocurridos en la superposición de dos o más ondas. Es un fenómeno óptico que ocurre entre dos o más ondas se traslapan en el espacio. Cuando esto

ocurre, el desplazamiento resultante en cualquier punto y en cualquier instante se encuentra sumando los desplazamientos instantáneos que producirían en el punto las ondas individuales si cada una se presentara sola. Lo anterior mencionado se rige al **principio de superposición**.

1.2.- Tipos de interferencia

1.2.1.- Interferencia constructiva:

Es aquel tipo de interferencia logrado cuando ondas de dos o más fuentes llegan en fase al mismo punto (cuando la diferencia en grados es 0, 360,... etc.), la amplitud de la onda resultante es la suma de las amplitudes de las ondas individuales; estas se refuerzan una a la otra.

1.2.2.- Interferencia destructiva:

A diferencia de la anterior, cuando las ondas de misma frecuencia llegan a un punto con un corrimiento en fase de medio ciclo (es decir con 180 grados de diferencia), el resultado de la suma de las amplitudes de las ondas da igual a cero (suponiendo amplitud igual para ambas ondas), es decir, se anulan. En la figura 1 se muestra de manera visual la diferencia entre la interferencia constructiva y destructiva y el cómo al estar en fase o corrida 180 grados logra los dos tipos de interferencia.

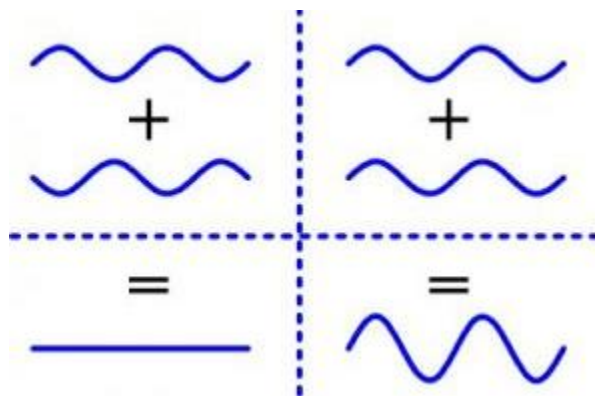


Figura 1: interferencia destructiva (izquierda) e Interferencia constructiva (derecha)

La interferencia en modelos experimentales se da generalmente con luz monocromática, esto debido a su propiedad física de onda sinusoidal y que gracias a esto se ve de forma más clara la interferencia.

1.3.- Condiciones generales para interferencia:

Para que dos ondas produzcan una interferencia apreciable es necesario que se propaguen en la misma dirección y sentido, y que mantengan entre ellas una diferencia de fase constante (la llamada luz coherente). Fresnel y Arago estudiaron la interferencia de ondas polarizadas y llegaron a las siguientes conclusiones:

1. Dos haces polarizados en ángulos rectos procedentes de la misma fuente no producen interferencia apreciable aunque sean llevados al mismo plano de polarización.
2. Dos haces polarizados en ángulo recto, provenientes de luz ya polarizada interfieren cuando son llevados al mismo plano de polarización.

1.4.- Interferencia de dos haces

La interferencia de dos haces se da en términos generales dividiendo la luz de una fuente monocromática y haciendo que estos dos haces viajen por caminos ópticos distintos, una vez hecho esto convergen en un punto para generar el patrón de interferencia. En la figura 2, la luz es dividida por un divisor de haz y los rayos resultantes viajan por un camino óptico para juntarse nuevamente y llegar a una pantalla o punto de convergencia para obtener las franjas de interferencia. En la figura 2b vemos de forma simplificada el arreglo.

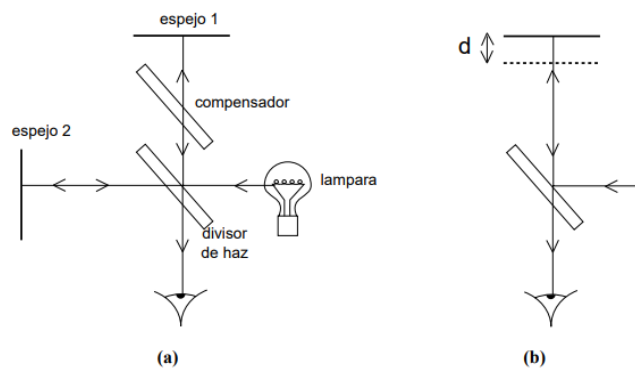


Figura 2: Interferómetro de Michaelson

Otra figura de un diagrama experimental de un interferómetro de Michaelson es la mostrada en la figura 3, donde en ella, podemos ver el patrón de interferencia generado por los dos haces.

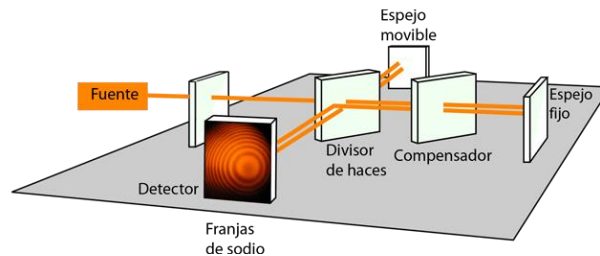


Figura 3: Interferómetro de Michaelson

1.5.- Interferencia de haces múltiples

Pero la interferencia no solamente se puede obtener con dos haces, es posible obtener resultados con múltiples haces, donde la forma más sencilla es usando el principio de reflexión utilizado en diferentes arreglos interferométricos, entre ellos el interferómetro Fabry-Perot.

1.5.1.- Interferómetro Fabry-Perot

Este interferómetro hace uso de las múltiples reflexiones entre dos superficies parcialmente reflejantes y muy próximas entre sí. Parte de la luz se transmite cada vez que llega a la segunda superficie, resultando en múltiples rayos desfasados que pueden interferir unos con otros. El gran número de rayos de interferencia, produce un interferómetro con una resolución extremadamente alta, algo así como lo hacen las múltiples rendijas de una rejilla de difracción, aumentado su resolución [6].

En la figura 4, las placas paralelas azules son placas de vidrio parcialmente reflejantes separadas una distancia d . La luz incidente se muestra en la flecha punteada en la esquina inferior izquierda con un cierto ángulo de inclinación. En este caso la separación de la cavidad es aire, por lo que el índice de refracción $n=1$. Los múltiples rayos de salida pueden pasar a través de un espejo convergente para hacerlos direccionar todos en un punto y generar la interferencia, las franjas de interferencia forman círculos concéntricos.

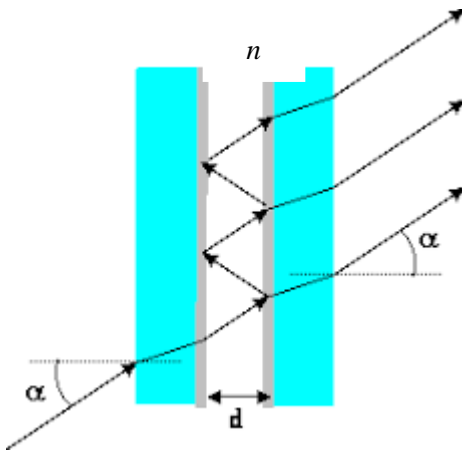


Figura 5: Interferómetro F-P

La interferencia constructiva se da por la siguiente ecuación:

$$2nd \cos(\alpha) = m\lambda$$

Donde:

n : el índice de refracción de la cavidad

d : Distancia de separación de las placas

α : Angulo de incidencia de la luz

λ : Longitud de onda del rayo

m : número de círculos en el patrón de interferencia

En la interferencia de haces múltiples se utiliza generalmente una fórmula para sacar el espectro de reflectancia R dado por la siguiente ecuación matemática:

$$I_R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{F \text{Sen}^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}{1 + F \text{Sen}^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}$$

Donde:

I_R : Reflectancia

F: Finesse o espectro de fineza; $F = \left(\frac{2r}{1-r^2}\right)^2$

δ : K(DCO);

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

En la figura 5 se muestra que el espectro de reflectancia está conformado franjas las cuales dependen de la F.

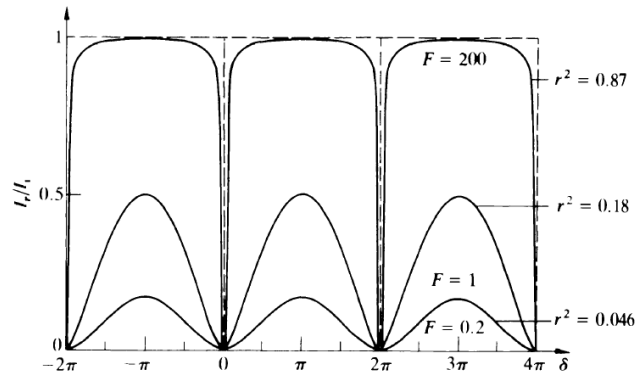
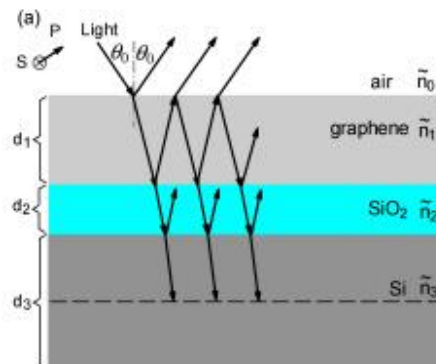


Figura 5: Espectro de reflectancia de una película delgada

El interferómetro Fabry-Perot es un arreglo interferométrico de una capa, pero se puede acondicionar para que se convierta en otro arreglo con múltiples capas, es decir, podemos colocar más de una capa al arreglo y cada una de ellas pudiendo tener propiedades intrínsecas de las mismas, dependiente de la temperatura por ejemplo. Con esto logramos que la cavidad de nuestro filtro disminuya o aumente dependiendo de este cambio de temperatura y con este modificando el espectro de interferencia de maneras variadas. En la figura 6 se muestra un ejemplo de un sistema interferométrico de tres capas, se pueden observar las múltiples reflexiones en cada una de las capas.



Capítulo 2: Laser

2.1.- Definición

LASER, es un acrónimo, en inglés de Light Amplification Stimulated Emission of Radiation (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación). Los lasers son aparatos que amplifican la luz y producen haces de luz coherente; su frecuencia va desde el infrarrojo hasta los rayos X. Un haz de luz es coherente cuando sus ondas, o fotones, se propagan en fase.

2.2.- Características

El laser posee características que lo hacen especial y único:

- Emite en un rango del espectro electromagnético muy corto (si emite a 632 nm puede tener un rango de error de 1 nm), por lo que puede considerarse como luz monocromática, a comparación del LED que emite en un rango mucho mayor (Figura 7).
- Direccionalidad: es decir, que puede propagarse a una distancia muy grande sin divergir de forma importante, esta característica hace que concentre mucha energía en un punto concreto.
- Luz concentrada: La luz va directa a un punto, es decir, va colimada a diferencia de una luz cualquiera que va en todas direcciones.

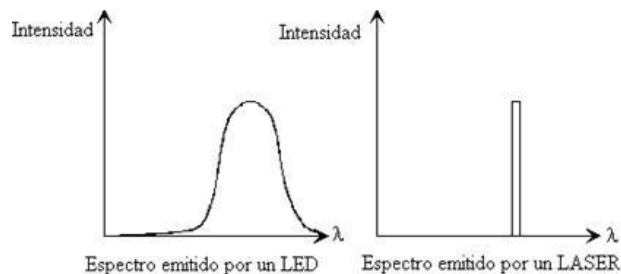


Figura 7: Emisión de LED vs laser

2.3.- Partes de un Laser

El funcionamiento básico de un laser está conformado por 3 partes esenciales: El sistema bombeo, la cavidad óptica y el medio de ganancia. En la figura 8 se muestran las partes básicas del laser: sistema de bombeo, los espejos o cavidad óptica y el medio amplificador.

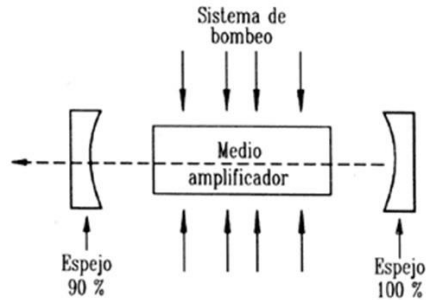


Figura 8: Partes de un laser

2.3.1.- Bombeo

El bombeo de un laser es un componente esencial debido a que es aquel que suministra la energía necesaria al medio de ganancia para que excite sus niveles de energía y pueda realizar la amplificación de la luz laser y se utilizan generalmente dos tipos de bombeo: óptico (luz) y eléctrico (corriente eléctrica). Debido a las pérdidas en el circuito la potencia de bombeo siempre es mayor a la potencia de salida del laser.

2.3.1.1.- Bombeo Óptico

Para excitar un medio laser por bombeo óptico, requiere que el espectro de absorción del medio sea similar al espectro de emisión de la fuente de bombeo para que sea absorbida gran cantidad de radiación. El bombeo óptico es un laser de una longitud de onda determinada, con este laser se energiza el medio de ganancia para que pueda emitir en la longitud de onda de esta ganancia.

2.3.1.2.- Bombeo eléctrico

Este está dado mediante una fuente que suministra electricidad, es usado generalmente en laseres de gas y semiconductores y el propósito es suministrar la energía que necesita el sistema para funcionar.

2.3.2.- Cavity óptica

Es un recinto donde está contenida la sustancia activa del laser, la cual está formada generalmente por dos espejos paralelos enfrentados entre sí llamada cavity Fabry-Perot. El espacio entre estos espejos es lo que se conoce como cavity laser. Los espejos pueden ser planos o curvados, pero lo importante es que guarden el paralelismo. En un laser los fotones provienen de la emisión estimulada de las partículas del medio activo que están en el estado excitado. El haz, dentro de la cavity, pasa repetidamente mediante múltiples reflexiones entre los espejos y es amplificado cada vez que pasa por la sustancia activa; cada fotón da lugar a la generación de otros fotones, generando un proceso en cascada.

Cabe mencionar que también existen cavidades de anillo y estas son usadas frecuentemente en laseres de fibra óptica dopada con tierras raras. En este tipo de

cavidades el elemento que controla las reflexiones dentro de la cavidad puede ser un sistema interferométrico (filtro espectral).

2.3.3.- Medio de Ganancia

El **medio activo** es el material donde se produce la amplificación del laser; es decir, el medio donde se consigue situar más átomos en un estado excitado que en el estado de más baja energía de la transición electrónica utilizada en el laser. Se suele conseguir aportando energía al medio con el llamado *bombeo*, de forma que no interfiera con las transiciones implicadas en la emisión laser.

Algunos ejemplos de medios activos utilizados en varios tipos de laseres son:

- Tierras raras como el neodimio, iterbio y erbio.
- Vidrios de silicatos y fosfatos o cristales como el zafiro.
- Mezcla de gases como helio-neón, nitrógeno, argón, monóxido de carbono.
- Algunos tipos de semiconductores como el arseniuro de galio o nitruro de galio

2.4.- Tipos de laser

Los laseres se pueden clasificar según diferentes parámetros: el tipo de medio de amplificación de la luz y la duración de la emisión del laser.

- **Laseres de estado sólido:** tienen material laser distribuido en una matriz sólida, por ejemplo, los laseres de rubí o neodimio-YAG (granate de aluminio y itrio). El laser de neodimio YAG emite luz infrarroja a 1.064 micrómetros.
- **Laseres de gas** (helio y helio-neón, He-Ne, son los laseres de gas más comunes): tienen una salida primaria de una luz roja visible. Los laseres de CO₂ emiten energía en el infrarrojo lejano, 10,6 micrómetros, y se utilizan para cortar materiales duros.
- **Laseres de semiconductores** (a veces llamados laseres de diodo): no son laseres de estado sólido. Estos dispositivos electrónicos son generalmente muy pequeños y usan poca energía. Pueden estar integrados en matrices más grandes, por ejemplo, la fuente de escritura en algunas impresoras laser o reproductores de discos compactos.
- **Laser de Fibra Óptica:** Este tipo de laseres se debe su nombre gracias a que el medio de ganancia generalmente suelen ser una fibra óptica dopada con erbio, iterbio e incluso neodimio. En la figura 9 se muestra el espectro de ganancia de una fibra dopada con erbio.

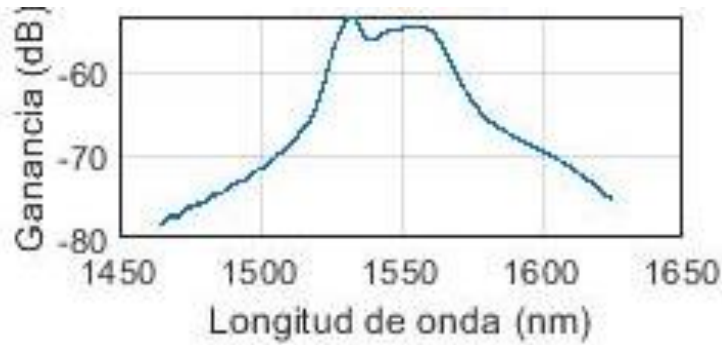


Figura 9: Espectro de emisión del erbio bombeada con un láser de 632 nm

Capítulo 3: Resultados

Como se ha mencionado en la introducción el objetivo principal de este documento es el de mostrar un laser de fibra dopado con erbio que gracias a un filtro basado en un sistemas interferométrico de múltiples capas con propiedades termo-ópticas tiene la característica de que es conmutable en todo el espectro de emisión del erbio (figura 9).

3.1.- Arreglo experimental del laser conmutable con arreglo interferométrico

En la figura 10 se muestra el arreglo experimental usado, este consta de una fuente de bombeo óptica de 980 nm, su salida va empalmada a un WDM (Wide Division Multiplexer) 980/1550 que a su vez está empalmado a una fibra óptica dopada con erbio la cual se empalma a un VOA (Variable Optical Attenuator), enseguida éste se empalma al puerto 1 de un circulador. En el puerto dos del circulador se empalma del filtro espectral de tres capas y el puerto a un acoplador 90/10. Una cola (90%) se conecta a un aislador para asegurar unidireccionalidad y cerrar la cavidad con el WDM; y la otra cola del acoplador (10%) queda como la salida del laser conectada al OSA (Analizador de espectros óptico).

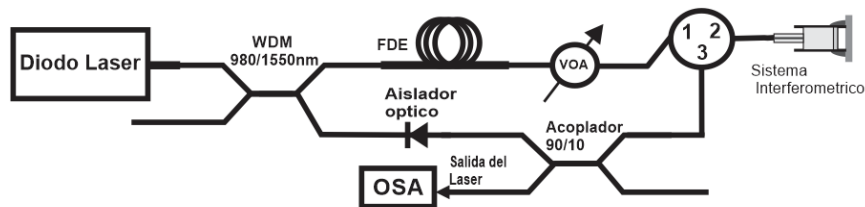


Figura 10: Arreglo experimental del laser de fibra conmutable

El principio de operación del laser se rige con la condición de laseo, que para cada longitud de onda es: $r_m R_m L_m G_{mEDF} G_m(L_{VOA}) = 1$ donde r_m , R_m , L_m y $G_{mEDF} G_m(L_{VOA})$ son la reflectividad del acoplador de salida, la reflectividad del filtro, las pérdidas y la ganancia de viaje redondo en la cavidad de fibra para λ_m , respectivamente. Aquí, $G_m(L_{VOA})$ es la ganancia atribuida a la fibra dopada con erbio y L_{VOA} es un factor de

ganancia que está en función de las pérdidas de la cavidad, las cuales en nuestro caso son ajustadas con el VOA.

3.2.- Sistema interferométrico.

El dispositivo construido consta del principio básico de funcionamiento de un interferómetro Fabry-Perot, en este tipo de dispositivos, como se vio en el capítulo 1, las múltiples reflexiones debido a la capa reflejante forman un patrón de interferencia, en este caso esas múltiples reflexiones se van dando debido a las multicapas del arreglo.

El filtro consta de una fibra mono modo con un revestimiento anti reflectante en la punta acoplada, por medio de un adhesivo basado en plastilina epóxica, a una capa de cianocrilato y a una oblea de silicio. El diseño del dispositivo se muestra en la figura 11 con cada una de las partes que lo conforman.

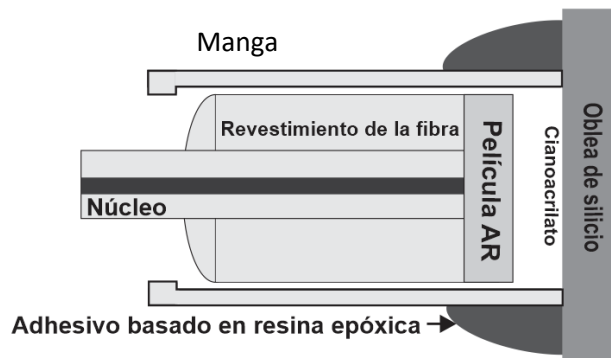


Figura 11: Diseño del filtro

3.3.- Caracterización del sistema interferométrico

Para poder realizar cualquier análisis de un dispositivo nuevo es necesario caracterizarlo, para ello se armó el siguiente arreglo (figura 12) indicando las piezas y elementos utilizados para tal fin.

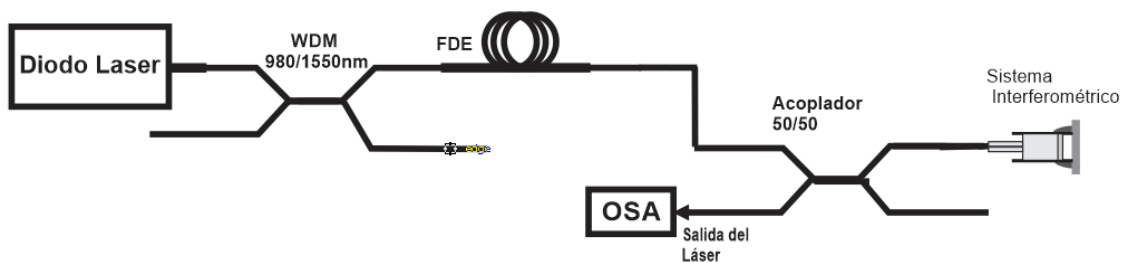


Figura 12: Arreglo experimental para caracterizar el filtro

El filtro fue expuesto a diferentes temperaturas para sacarle provecho a las propiedades térmicas del diseño variando los valores de temperatura desde 20.8 °C a 37.5 °C y obteniendo el espectro de reflectividad se ha observado el funcionamiento del filtro, mismos resultados que han de ser mostrados a continuación (figura 13).

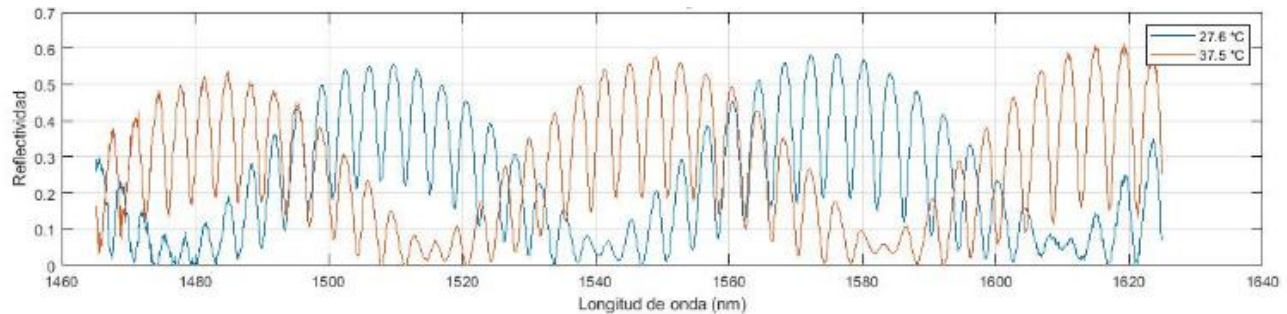


Figura 13: Respuesta del espectro de reflectividad al cambio de temperatura

Una vez analizados los datos obtenidos gracias al OSA referente a cada medición con diferente temperatura, podemos ver que mientras la temperatura aumenta, el espectro de reflectividad va teniendo un punto máximo en una longitud de onda menor, en forma gráfica, el espectro de reflectividad se va moviendo al lado izquierdo como podemos verlo en la figura 13 comparando los valores obtenidos a 27.6 °C y a 37.5 °C.

Comparando todos los demás valores a diferentes temperaturas y realizando una gráfica de la longitud de onda en función de la temperatura de las 7 mediciones realizadas, obtenemos la siguiente gráfica mostrada en la figura 14. En ella podemos ver que efectivamente, el espectro de reflectividad cambia con la temperatura, agregando un dispositivo mas al arreglo experimental, podemos hacer que el espectro de emisión del erbio emita solamente a una longitud de onda, lo que hará que el laser de fibra optica dopado con erbio sea conmutable gracias a este filtro basado en capas con propiedades térmicas.

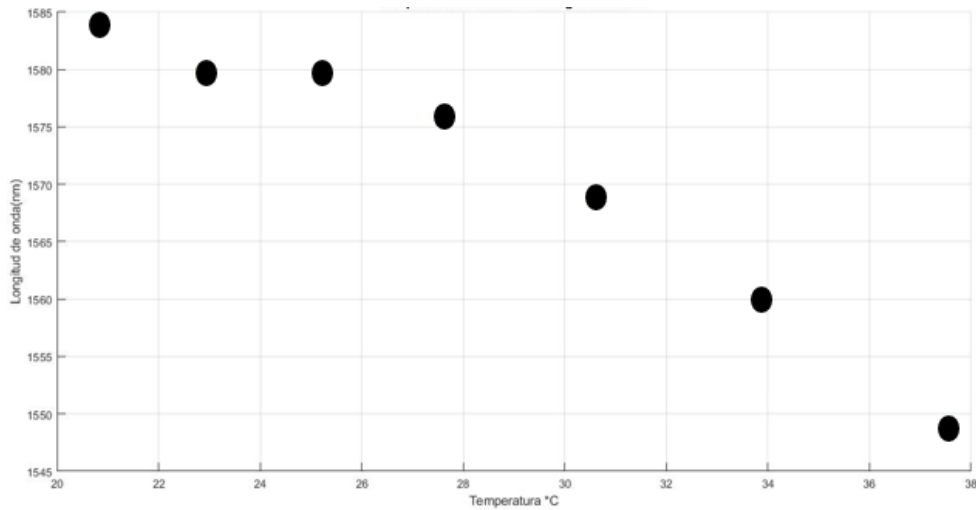


Figura 14: Posición de la longitud de onda pico de la franja en función de la temperatura

3.4. Conmutación de la emisión laser

Una vez que se ha caracterizado el filtro espectral, el cual será el dispositivo que gobernará las longitudes de onda de emisión del laser, junto con el VOA (atenuador óptico variable) se introduce a una cavidad laser para obtener un laser de fibra conmutable en $\sim 1.5 \mu\text{m}$ (figura 10).

El VOA (atenuador óptico variable por sus siglas en inglés) es un dispositivo diseñado para atenuar la señal óptica o un nivel de entrada de manera controlada, para producir una señal de salida con diversas intensidades de atenuación (dependiendo del modelo comercial), se forman de una estructura de bloqueo entre una señal de entrada y una salida. De entre sus aplicaciones, es usado en Telecomunicaciones, Sensores de fibra óptica, Equipos de medida, Test de equipamiento, Sistemas de distribución de vídeo, etc.

3.4.1.- Resultados de la emisión laser y estudio de estabilidad.

Con este VOA, se han modificado las pérdidas para cumplir la condición de laseo en una de las 4 regiones del erbio, $\sim 1.53 \mu\text{m}$, $\sim 1.54 \mu\text{m}$, $\sim 1.55 \mu\text{m}$ o $\sim 1.6 \mu\text{m}$. Esta condición dice que las pérdidas multiplicadas por las ganancias deben ser igual a 1. Cuando esta condición se cumpla se mostrará un pico máximo que indica que la emisión del laser está dada en una longitud de onda específica. La figura 15 muestra un ejemplo de las pruebas realizadas.

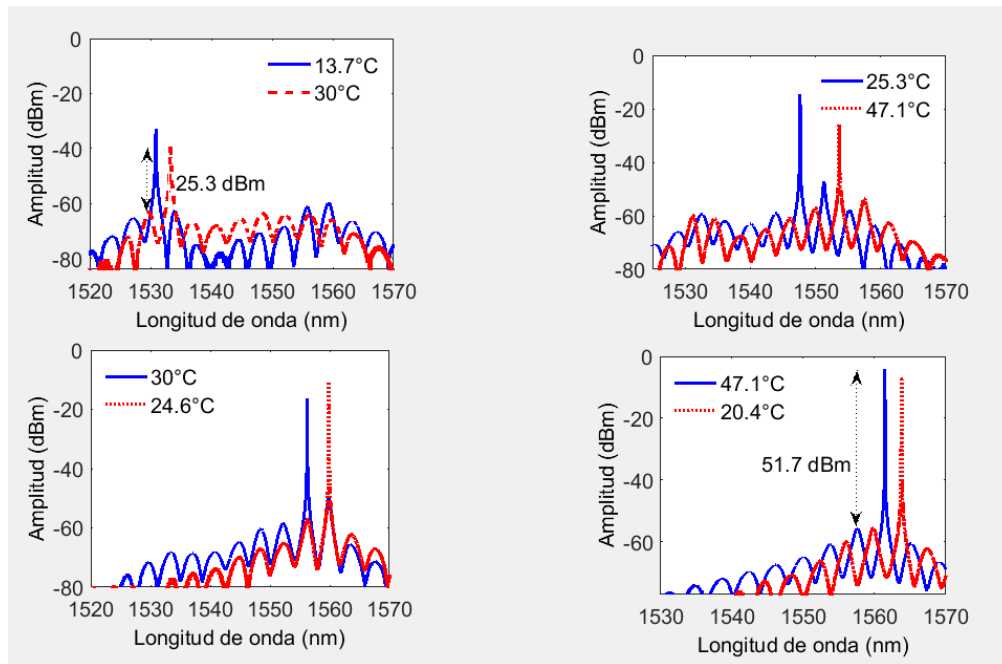


Figura 15: Emisión laser en la región de a) ~1530 nm, b) ~1540 nm, c) ~1555 nm y d) ~1562 nm cuando el VOA es ajustado dos veces

Podemos ver unas amplitudes altas a comparación de los demás picos en cada imagen, esto es debido a que se cumple la condición mencionada anteriormente, en las 4 imágenes podemos notar que hay picos en 1530, 1545, 1550 y 1560 nm, esto nos muestra que efectivamente modificando la temperatura y modificando las pérdidas con el VOA tenemos la oportunidad de obtener, con la ayuda de un sistema interferométrico multicapa, un laser que va en el rango de emisión de la fibra dopada con erbio (~1500 nm - ~1580 nm). Pero además de que emita en ese rango se debe comprobar que la emisión en cierto punto es estable en el tiempo, ya que, de no ser así, de poco funcionaria el dispositivo, es por ello que se han realizado medidas, y cada intervalo de tiempo hecho mediciones para verificar la estabilidad del mismo, se ha obtenido la figura 16 como resultado.

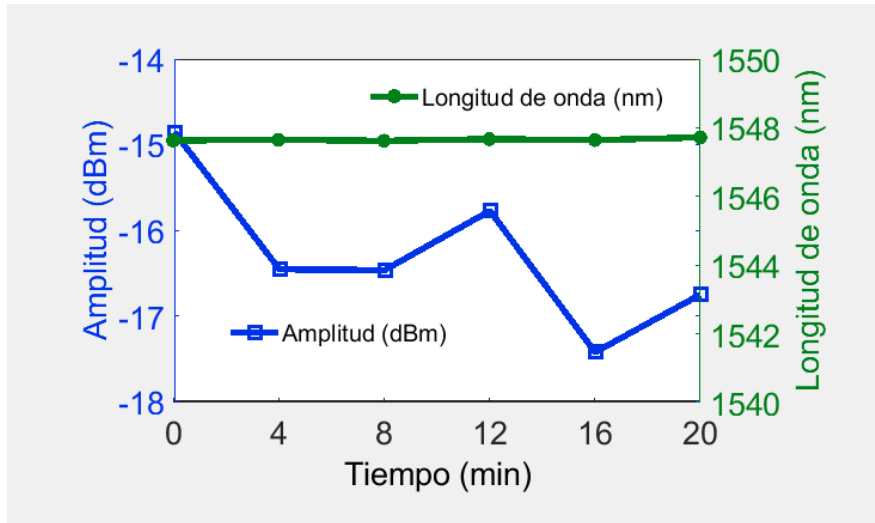


Figura 16: Estabilidad en longitud de onda y potencia del láser de fibra obtenidos durante 20 minutos.

Se puede notar una estabilidad considerable en la longitud de onda donde se ha conmutado con ayuda del VOA (línea verde), y que al paso del tiempo sigue emitiendo a la misma longitud de onda (1548 nm), en cambio la amplitud (línea azul), es decir, la potencia del láser varía en el tiempo, esto es algo sencillo de explicar y es debido al efecto de amortiguamiento inicial en los láseres y en este caso, es debido al bombeo óptico. Una vez pasa un tiempo, los rebotes disminuyen hasta tener estabilidad continua como se puede ver en la tendencia de la amplitud (aunque viendo la amplitud, solamente varía unos cuantos dBm). La figura 17 muestra de manera general la estabilidad del láser durante 20 minutos.

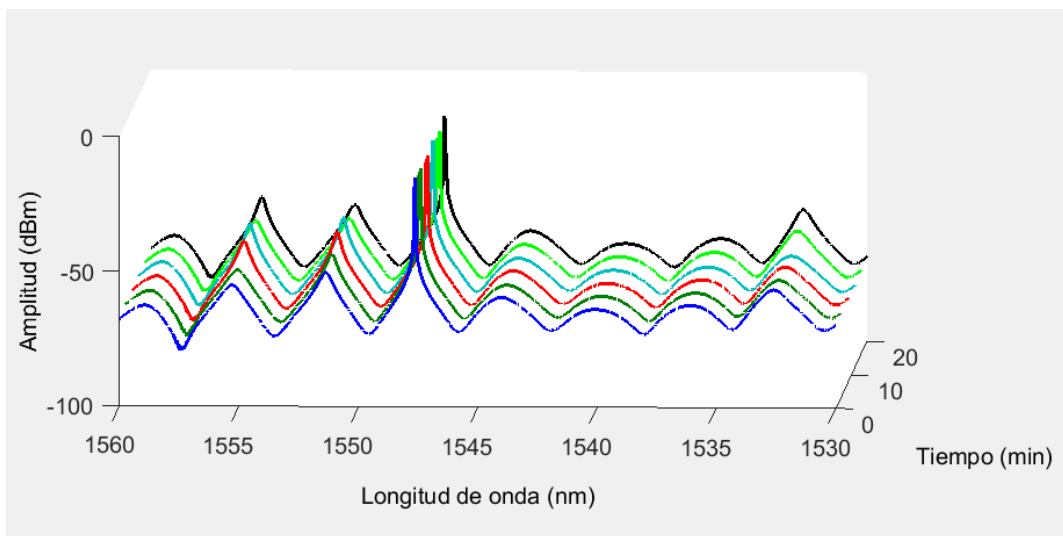


Figura 17: Espectros del láser de fibra obtenidos durante 20 minutos.

Conclusiones.

Con esta investigación, tenemos como resultado un laser de fibra conmutable basado en un filtro espectral de tres capas con propiedades térmicas, sintonizable en el rango de los 1530 a 1570 nm variando la temperatura del dispositivo. Además de eso es altamente estable ya que vimos un desplazamiento en longitud de onda de 0.1 nm durante un periodo de 24 minutos. Este laser propuesto puede ser usado en telecomunicaciones (debido a que estas trabajan en el infrarrojo) o en cualquier otra de las grandes ramas de la óptica.

Referencias

- [1] Malacara, D. *“Óptica tradicional y moderna”*, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, 2007.
- [2] C.-T. Ma, Y.-W. Chang, Y.-J. Yang, and C.-L. Lee, “A dual-polymer fiber Fizeau interferometer for simultaneous measurement of relative humidity and temperature,” *Sensors*, vol. 17, no. 11, p. 2659, 2017.
- [3] C.-L. Lee, K.-W. Liu, S.-H. Luo, M.-S. Wu, and C.-T. Ma, “A hotpolymer fiber Fabry–Pérot interferometer anemometer for sensing airflow,” *Sensors*, vol. 17, no. 9, p. 2015, 2017
- [4] T. Wei, Y. Han, Y. Li, H.-L. Tsai, and H. Xiao, “Temperature-insensitive miniaturized fiber inline Fabry–Pérot interferometer for highly sensitive refractive index measurement,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 8, pp. 5764–5769, 2008.
- [5] D.-W. Duan, Y.-J. Rao, Y.-S. Hou, and T. Zhu, “Microbubble based fiberoptic Fabry–Pérot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement,” *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 8, pp. 1033–1036, 2012.
- [6] HyperPhysics. *“Fabry-Perot Interferometer”*. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/fabry.html>, 2005.