



Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

---

---

**“SENSORES BASADOS EN LÁSERES DE FIBRA  
ÓPTICA CON LA CAVIDAD LÁSER COMO  
ELEMENTO SENSIBLE”**

Presenta:

**Ing. Josué del Valle Hernández.**

**TRABAJO DE TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**Maestro en Ciencias (Óptica).**

Asesor de Tesis: Dr. Yury Barmenkov.

León, Gto., México

Agosto 2006

---

*Doy gracias a Dios sobre todas las cosas, por permitirme vivir este momento en compañía de las personas que amo.*

*Este trabajo de tesis esta dedicado a todas las personas queridas que me rodean y me han acompañado a través de este largo y feliz camino llamado vida. Pero con especial afecto a mi familia que me ha apoyado de tantas maneras para llegar aquí, en este momento tan importante de mi vida. Y a esa persona amada, gracias por tu paciencia y tiempo para culminar esta etapa de mi vida.*

*Gracias madre, porque no tengo palabras para describir todo lo que has hecho por mí a lo largo de mi vida.....*

*Gracias Walde, Paty e Itzel por su amistad y apoyo incondicional que siempre he tenido de ustedes para librar cualquier meta.....*

*Gracias Icela por todo tu amor, apoyo y comprensión que me levantaron en esos momentos difíciles en los que parecía caer.....*

**G R A C I A S . . .**

---

## **AGRADECIMIENTOS.**

Quiero agradecer a toda la gente detrás de CONACYT por la oportunidad que me dio para realizar mis estudios de postgrado a través del CIO. Por la confianza que depositaron en mí para efectuar y obtener el grado de “Maestro en Ciencias (Óptica)”.

Doy las gracias a aquellas personas que me ayudaron a lo largo de estos dos años en las instalaciones del CIO, ya que sin su apoyo este momento no hubiera sido posible. Estoy muy agradecido con los investigadores que me ayudaron y compartieron de su tiempo para resolver mis dudas durante este tiempo, no solo porque transmitieron sus conocimientos y experiencias durante los cursos, sino porque me enseñaron la visión del investigador, esa sensación de indagar, conocer, descubrir y desarrollar nuevas cosas.

Gracias Dr. Yuri Barmenkov por asesorarme y guiarme durante este proyecto, por su apoyo y enseñanzas, por que sin ello, este camino hubiera sido más difícil.

Gracias Dr. Ismael Torres, Dr. David Monzón, Dra. Alejandrina Martínez por su ayuda incondicional y tiempo dedicado a aclarar mis dudas.

Gracias Lic. Guillermina Muñiz y Lic. Laura González por su amistad, por su ayuda personal y académica brindada en todo momento y a toda hora.

Agradezco a mis compañeros de trabajo, pero en especial al Lic. Luis Octavio Meza, Ing. David Solís Santana, Ing. Héctor Arellano Sotelo, Lic. Víctor Romero Arellano y a la Lic. Irma Lorena Villegas por la mutua ayuda y compañerismo que mostraron tener con su servidor.

Porque todas las personas anteriormente mencionadas, no solo demostraron ser personas muy capaces en sus áreas, sino que demostraron ser mis amigos, gracias por su amistad.

Me despido agradeciendo nuevamente a esta Institución, a este Centro de Investigaciones en Óptica, a todas las personas que lo conforman, que estando unidos hacen esto posible.



---

## PREFACIO

En este documento se desarrollarán tres tipos de sensores basados en fibra láser con la cavidad láser como elemento sensible. Para ello es necesario conocer diferentes tipos de sensores hechos de fibra óptica ya reportados o existentes en la actualidad, así como el entendimiento de los conceptos y fundamentos en los cuales se basan este tipo de sensores hechos de fibra óptica.

Para ello, en el capítulo uno se muestra algunos de los tipos de sensores de hechos de fibra óptica, su forma de detectar un parámetro de interés por medio de las propiedades ópticas de materiales o fuentes de bombeo. Se expondrán varios tipos de sensores hechos de fibra, donde en su mayoría fueron hechos por su servidor dentro de las instalaciones del CIO, con la finalidad de entender las propiedades de varios de los dispositivos ópticos, dispositivos ópticos que formaran parte del arreglo experimental de este proyecto de tesis. Es fundamental tener el conocimiento de varios de los dispositivos ópticos si se quiere diseñar un nuevo sensor, porque para diseñar, primero hay que entender.

En el capítulo dos se muestra una breve reseña de los conceptos básicos de espectroscopia, que para nuestro interés se enfocará en el erbio. Es importante conocer estas propiedades, debido a que una de las partes principales del láser de fibra es su medio activo, es decir, la fibra dopada con erbio la cual servirá como amplificador.

En el capítulo tres, se muestra todo el desarrollo experimental acompañado de su metodología para realizar el estudio al sensor basado en láser de fibra óptica con cavidad sensible. Este capítulo se dividirá en tres partes, que corresponden al numero de sensores elaborados y desarrollados.

Sin más por el momento, invito al lector a leer este documento.

---

# CONTENIDO

## Capítulo 1 “Introducción a los sensores de fibra óptica”

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1.1     | INTRODUCCIÓN.....   | 2  |
| 1.2     | CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS SENSORES HECHOS DE FIBRA OPTICA .....                  | 2  |
| 1.3     | PRINCIPALES TIPOS DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA.....                              | 5  |
| 1.3.1   | Sensor de Fibra óptica estrechada con un recubrimiento de película delgada..... | 6  |
| 1.3.2   | Sensor de Fibra óptica basados en rejillas de Bragg.....                        | 10 |
| 1.3.3   | Sensor de Fibra óptica basados en Interferometría Fabry-Perot.....              | 17 |
| 1.3.3.1 | Interferómetro Fabry-Perot (SMF-MMF-SMF).....                                   | 19 |
| 1.3.3.2 | Interferómetro Fabry-Perot (SMF-Aire-SMF).....                                  | 19 |
| 1.3.3.3 | Interferómetro modal hecho con fibra óptica microestructurada estrechada.....   | 21 |
| 1.3.4   | Sensor de Fibra óptica basados en Rejillas de Periodo Largo (LPG).....          | 26 |
| 1.3.5   | Sensores basados en Láseres de Fibra.....                                       | 29 |
| 1.3.5.1 | Láseres de Fibra de Onda Continua (CW).....                                     | 30 |
| 1.3.5.2 | Láseres de Fibra Switcheados.....   | 31 |
| 1.3.5.3 | Láseres de Fibra con Mode-Locking.....  | 31 |
| 1.3.5.4 | Aplicación del láser de fibra a sensores de fibra óptica.....                   | 33 |
| 1.4     | PROPOSITOS DE TRABAJO DE MAESTRÍA .....   | 35 |
| 1.5     | CONCLUSIONES.....   | 36 |
| 1.6     | REFERENCIAS .....   | 37 |

## Capítulo 2 “Láser de fibra dopado con erbio”

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.1   | INTRODUCCIÓN.....  | 41 |
| 2.2   | ESPECTROSCOPÍA BÁSICA .....  | 41 |
| 2.3   | LÁSER DE FIBRA BOMBEADO A 980nm.....   | 43 |
| 2.4   | NIVELES DE ENERGIA PARA EL Er <sup>+3</sup> BOMBEADO A 980nm.....                  | 45 |
| 2.5   | DISPOSITIVOS OPTICOS USADOS EN EL LÁSER DE FIBRA DOPADO CON Er <sup>+3</sup> ..... | 47 |
| 2.5.1 | Espejo de Faraday.....   | 48 |
| 2.5.2 | Multiplexor de división de longitud de onda (WDM).....                             | 49 |
| 2.6   | CONCLUSIONES.....  | 51 |
| 2.7   | REFERENCIAS .....  | 52 |

## Capítulo 3 “Estudio experimental del régimen transitorio de un láser de fibra dopado con erbio”

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.1 | INTRODUCCIÓN.....  | 54 |
| 3.2 | DESARROLLO EXPERIMENTAL PRELIMINAR.....  | 54 |
| 3.3 | ESTUDIO DEL LÁSER DE FIBRA CON PÉRDIDAS DE LA CAVIDAD LÁSER.....   | 60 |
| 3.4 | ESTUDIO DEL LÁSER DE FIBRA CON PÉRDIDAS EN LA CAVIDAD VARIABLES POR LA TEMPERATURA APLICADA A LA REJILLA DE BRAGG.....         | 70 |
| 3.5 | ESTUDIO DEL LÁSER DE FIBRA CON PÉRDIDAS EN LA CAVIDAD VARIABLES POR LA TEMPERATURA APLICADA A LA REJILLA DE PERIODO LARGO..... | 80 |
| 3.6 | CONCLUSIONES.....  | 86 |
| 3.7 | REFERENCIAS.....   | 88 |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>Conclusiones.....</b> | <b>90</b> |
|--------------------------|-----------|



# Capítulo 1

## “Introducción a los sensores de fibra óptica”

- 1.1 Introducción.
- 1.2 Conceptos básicos de los sensores hechos de fibra óptica.
- 1.3 Principales tipos de sensores de fibra óptica.
  - 1.3.1 Sensor de Fibra óptica estrechada con un recubrimiento de película.
  - 1.3.2 Sensor de Fibra óptica basados en rejillas de Bragg (FBG).
  - 1.3.3 Sensor de Fibra óptica basados en Interferometría Fabry-Perot.
    - 1.3.3.1 Interferómetro Fabry-Perot (SMF-MMF-SMF).
    - 1.3.3.2 Interferómetro Fabry-Perot (SMF-Aire-SMF).
    - 1.3.3.3 Interferómetro modal hecho con fibra óptica microestructurada estrechada.
  - 1.3.4 Sensor de Fibra óptica basados en Rejillas de Periodo Largo (LPG).
  - 1.3.5 Sensores basados en Láseres de Fibra.
    - 1.3.5.1 Láseres de Fibra de Onda Continua (CW).
    - 1.3.5.2 Láseres de Fibra Switcheados.
    - 1.3.5.3 Láseres de Fibra con Mode-Locking.
    - 1.3.5.4 Aplicación del láser de fibra a sensores de fibra óptica.
- 1.4 Propósitos de trabajo de maestría.
- 1.5 Referencias
- 1.6 Conclusiones

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años se ha tenido una gran revolución y crecimiento en el ramo de la industria optoelectrónica y en la industria de las comunicaciones basadas en fibra óptica. Estas últimas, literalmente han revolucionado las telecomunicaciones suministrando un alto rendimiento disminuyendo el costo del ancho de banda. Esta revolución ha traído consigo los beneficios de una producción en alto volumen de las fibras ópticas usadas para transmitir la información de una manera eficiente y rápida a través de ellas.

En paralelo a estos desarrollos, la tecnología en los sensores hechos de fibra óptica (*fiber optics sensors*) también ha crecido, esta muy asociada con la optoelectrónica y las telecomunicaciones, muchos de los componentes asociados con estas industrias se debe al desarrollo de las aplicaciones de los sensores hechos de fibra [1.1]. Los sensores hechos de fibra tienen la habilidad de desplazar a los sensores tradicionales para realizar mediciones en rotación, aceleración, campos eléctricos y magnéticos, temperatura, presión, vibraciones, acústica, posición lineal y angular, esfuerzo, humedad, viscosidad, mediciones químicas, entre muchas otras más aplicaciones [1.2].

Las principales ventajas de los sensores hechos de fibra ante los sensores comunes son:

- La habilidad de ser muy ligeros.
- Son de tamaños pequeños.
- Baja potencia.
- Resistentes a la interferencia electromagnética.
- Tienen alta sensibilidad.
- Tienen gran ancho de banda.
- Son usados en ambientes peligrosos (explosivos).

## 1.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS SENSORES HECHOS DE FIBRA OPTICA

La palabra sensor deriva de la palabra sentidos, por medio de los sentidos se puede conocer el entorno, es decir, uno puede tomar una acción en base a monitorear el ambiente, en consecuencia, la palabra sensor es el poder implementar los sentidos en instrumentos que permitan conocer el entorno.

En general, la estructura general de un sensor óptico es la siguiente:

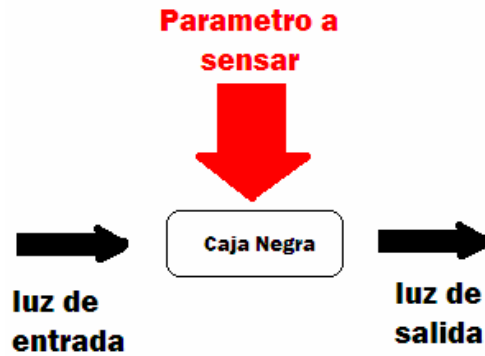


Fig. 1.1 Diagrama esquemático de un sensor óptico.

Donde el parámetro a sensar modifica a la luz guiada. Existen varias maneras de modificar la luz guiada, las cuales se mencionan a continuación:

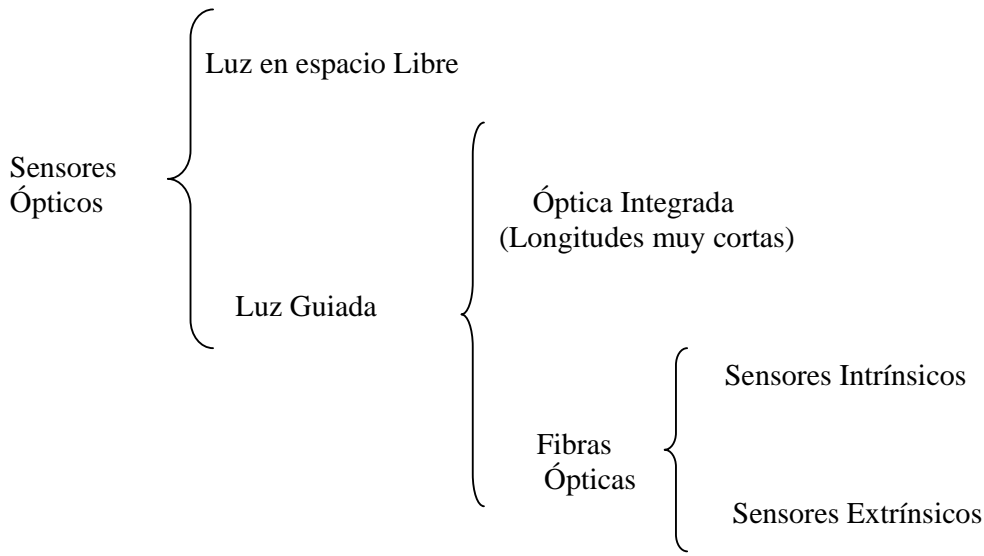
- **Polarización.** Se basa en la orientación de la vibración del campo eléctrico.
- **Fase.** Se basa en el cambio de fase debido a la diferencia de camino óptico (interferómetros).
- **Intensidad.** Basados en la relación o cambio de la potencia de salida con respecto a la potencia de entrada.
- **Longitud de Onda.** Basado en el corrimiento en longitud de onda del espectro.

Los principales parámetros de un sensor y que deben ser tomados en cuenta para diseñar un sensor son los siguientes:

- **Sensibilidad.** Se le denomina sensibilidad al cambio de la señal con respecto al parámetro a sensar  $\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)$ , donde  $S$  es la señal y  $P$  es el parámetro a sensar.
- **Resolución del sensor.** Es el cambio mínimo detectable ( $\Delta P$ ), normalmente esta relacionado con el ruido de la luz y del detector.
- **Rango dinámico.** Es el rango de medición, es decir, los valores contenidos entre el valor mínimo y el valor máximo de medición. En otras palabras, el rango de valores en que funciona el sensor.
- **Repetibilidad.** Se debe de tener muy en cuenta este punto, ya que muchos sensores principalmente los de temperatura no funcionan óptimamente cuando se varía el valor de la temperatura en forma ascendente y descendente, de manera repetida, o comúnmente llamado Histéresis.
- **Costo.**
- **Tamaño.**
- **Peso.**



En general los sensores ópticos se pueden clasificar de la siguiente manera:



Cuadro sinóptico 1. Clasificación general de los sensores ópticos.

La diferencia entre los sensores en espacio libre y los de luz guiada, es que los sensores en espacio libre la energía esta en una onda, y los sensores basados en guía de onda, la energía se confina en modos guiados.

Nos enfocaremos en los sensores basados o hechos de fibra óptica, comúnmente llamados *Fiber Optic Sensors*, ya que el proyecto de tesis se enfoca en este tipo de sensores.

Los sensores de fibra óptica se dividen en dos grandes grupos, los intrínsecos y los extrínsecos. La diferencia entre estos es que los primeros están hechos en su totalidad de fibra óptica, es por eso que comúnmente se les conoce como *all fiber sensors* [1.3]. En la siguiente figura se muestra el esquema de un sensor de fibra óptica intrínseco:

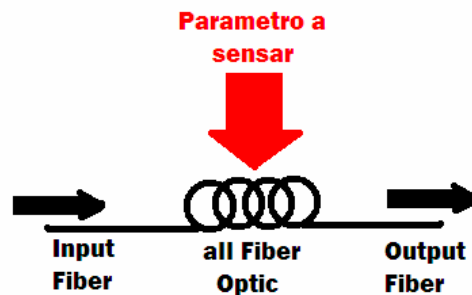


Fig. 1.2 Diagrama esquemático de un sensor intrínseco de fibra óptica.

En la figura 1.2 se muestra un sensor hecho todo de fibra, esto quiere decir que los componentes del sensor pueden estar conformados por rejillas de Bragg (FBG), rejillas de periodo largo (LPG), multiplexores (WDM), espejos de Faraday (FRM) u otros componentes hechos totalmente de fibra óptica.

En general el parámetro a sensar modifica directamente las propiedades ópticas de la fibra óptica o componentes hechos de fibra óptica, las principales propiedades ópticas que se pueden variar son la longitud de onda, la polarización o su fase de acuerdo al tipo de arreglo empleado para realizar el sensor.

Por otro lado, los sensores de fibra óptica extrínsecos, no todos los componentes están hechos de fibra óptica. Pueden usar un elemento que sirva de intermediario entre el parámetro de interés y la luz guiada [1.4]. En la siguiente figura se muestra el esquema de un sensor de fibra óptica extrínseco:

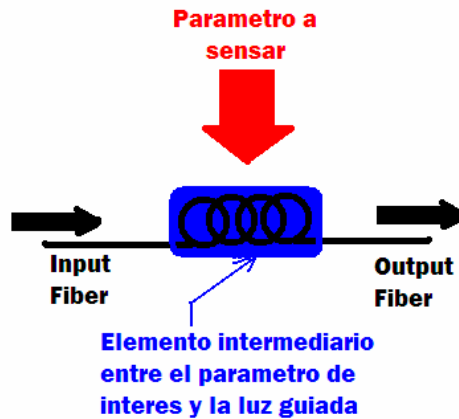


Fig. 1.3 Diagrama esquemático de un sensor extrínseco de fibra óptica

En la figura 1.3 se muestra un sensor extrínseco, esto quiere decir que no todos los componentes del sensor están hechos a base de fibra óptica. En general el elemento intermediario es afectado en sus propiedades físicas, químicas u ópticas por el parámetro a sensar, y en consecuencia este provoca variaciones en las propiedades ópticas de la fibra u componentes hechos de fibra óptica, como lo es la intensidad, la polarización, la fase o la longitud de onda de acuerdo al arreglo hecho para el sensor diseñado.

### 1.3 PRINCIPALES TIPOS DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Existen varios tipos de sensores de fibra óptica, los cuales difieren de acuerdo a su forma o manera de sensar el parámetro deseado. Por lo tanto me enfocare en los siguientes tipos de sensores debido a su importancia y relación con mi proyecto de tesis. La lista siguiente muestra los sensores que se explicarán con más detalle en las siguientes páginas:

- Sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg.
- Sensores de fibra óptica basados en rejillas de periodo largo.
- Sensor de fibra óptica estrechada (*taper*) con un recubrimiento de película delgada de un elemento que servirá de intermediario entre el parámetro a sensar y la luz guiada
- Sensores de fibra óptica basados en láseres de fibra.

### 1.3.1 Sensor de Fibra óptica estrechada con un recubrimiento de película delgada

Este tipo de sensores es sumamente estudiado y explotado para sensar, entre otros, el hidrogeno. Debido a que este muestra grandes propiedades como portador de energía, como sea, líquido o gaseoso el hidrogeno es volátil, altamente flamable y extremadamente explosivo. Muchas técnicas han sido propuestas para detectar el hidrogeno, y algunas de ellas corresponde a sensores de hidrogeno hechos de fibra óptica.

Es importante sensar el hidrogeno, ya que es una energía limpia que en un futuro no muy cercano será una de las fuentes principales de energía. Un sensor de hidrogeno debe detectar fugas a una concentración menor al 4 %, ya que este representa el limite inferior explosivo [1.5]. De no ser así, cualquier chispa o corto circuito en estas concentraciones o por encima de ellas generaría y desencadenaría una explosión. Un sensor funcional de hidrogeno debe también tener una respuesta menor a los 5 segundos para poder detectar rápido una fuga de hidrogeno.

Nos enfocaremos en sensores de hidrogeno estrechados con recubrimiento de paladio. Al estirar una fibra monomodo se puede tener acceso a las ondas evanescentes debido a que en la zona adelgazada el modo fundamental se ensancha [1.6].

El rol del paladio es servir como intermediario entre el parámetro de interés y la luz guiada, en donde nuestro parámetro de interés en este es el hidrogeno. El paladio (Pd) solo en la fibra óptica no sirve de nada, pero si a este se sumerge en un ambiente con hidrogeno, el paladio empieza a absorber el hidrogeno, por lo tanto se atenúa provocando un cambio en la atenuación de la onda evanescente [1.7].

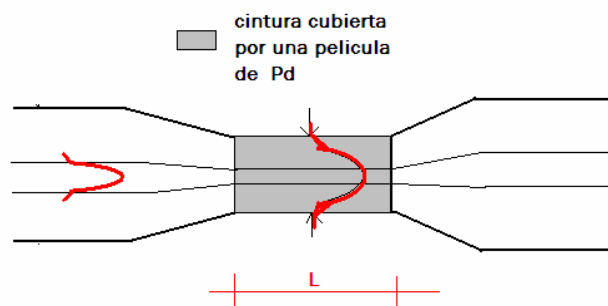


Figura 1.4 Ensanchamiento del modo fundamental en la cintura de la fibra provocado por el estiramiento de la fibra.

La potencia de salida del dispositivo de un sensor depende de la atenuación de la fibra estrechada [1.8].

$$P_i = P_o * \exp(2\Delta\alpha L) \quad (1.1)$$

Donde:

$P_i$  es la potencia de salida.

$P_o$  es la potencia de entrada.

$L$  es la longitud de interacción del sensor.

$\Delta\alpha = (\alpha_1 - \alpha_2)$  es la diferencia entre coeficientes de atenuación.

$\alpha_1$  es el coeficiente de atenuación sin presencia de hidrogeno.

$\alpha_2$  es el coeficiente de atenuación en presencia de hidrogeno.

Para este tipo de sensores en principio se le puede incidir cualquier longitud de onda, pero hay que tener en cuenta la sensibilidad y la profundidad de penetración del modo guiado al recubrimiento de Pd.

Cuando el paladio esta en presencia del hidrogeno, existe una disminución de la parte real e imaginaria del índice de refracción, es decir, provoca un cambio en la absorción del paladio, provocando una variación en la intensidad o potencia transmitida. En consecuencia la potencia del haz que se transmite a través de el aumenta cuando se incrementa la concentración de hidrogeno. Otro parámetro que se debe tener en cuenta es la longitud de interacción del sensor, de poner una muy larga esta longitud la luz se puede absorber en su gran mayoría ocasionando perdidas a la salida.

Este tipo de sensor lo fabriqué dentro de las instalaciones del CIO . Como primera etapa en la fabricación de este sensor se procede a estirar la fibra monomodo (*Single Mode Fiber*) SMF-28 por medio de la técnica de estiramiento por calor. Se decidió tener un estiramiento con un diámetro final de 30 micras ( $d_f$ ), con la ayuda de la ecuación 1.2 , se puede calcular la distancia de elongación ( $z$ ) en relación con la longitud de calentamiento  $L_0$  (oscilación de la flama) [1.9]. Los parámetros de la SMF-28 estrechada fabricada normalmente son:

$$d_f = d_i \cdot \exp\left(-\frac{z}{2L_0}\right) \quad (1.2)$$

$d_f$  – diámetro final = 10 micras.

$d_i$  – diámetro inicial= 125 micras.

$z$  - distancia de elongación= 28.54 mm

$L_0$  – distancia de oscilación de la flama= 10 mm

En la figura 1.5 se muestra los parámetros geométricos de la fibra estrechada.

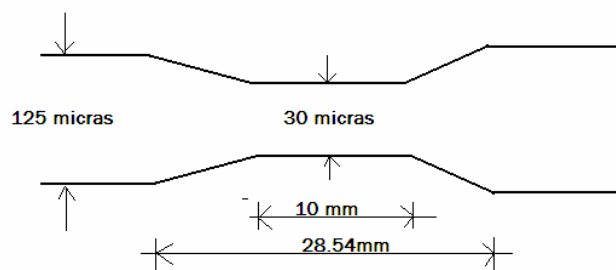


Figura 1.5. Parámetros de la fibra estirada por medio de calor para la fabricación del sensor de hidrogeno.

Ya estirada la fibra se procede a verificar la calidad de la fibra, es decir, la medición de pérdidas en esta SMF-28 estrechada, para ello se le hizo incidir luz con una potencia de entrada ( $P_o$ ), la fuente de luz utilizada corresponde a un diodo láser con centro en 1550nm. A continuación se mide la potencia de salida ( $P_s$ ) por medio de un fotodetector de Germanio, para tener una fibra estrechada funcional, debe cumplir una relación  $P_s=0.95P_o$ , es decir, se debe tener pérdidas menores o igual del 5%. Para hacer tales mediciones se utilizó el siguiente esquema:

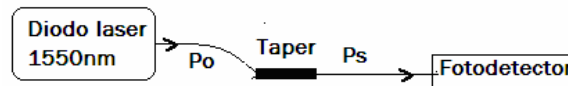


Figura 1.6. Arreglo experimental para cuantificar las pérdidas en la fibra estirada.

La segunda etapa corresponde en recubrir la longitud ( $L_o$ ) con una película delgada de paladio con un espesor de 12 nm. Para ello fue necesario llevar el *taper* a una evaporadora de alto vacío para depositar el paladio.

En la siguiente figura se muestra la evaporadora utilizada situada en el laboratorio de Películas Delgadas en el interior de unos de los laboratorios del CIO.



Figura 1.7. Evaporadora de alto vacío Balzers BA-510 utilizada para realizar la deposición del paladio en la cintura de la fibra estirada.

Para obtener una deposición óptima, se debe lavar las monturas en una cámara con agua destilada a la cual se le aplica ultrasonido, esta montura servirá como estructura auxiliar para sujetar el *taper* y tener una buena manipulación de este. Ya montado el *taper* en la montura, se prosigue con la deposición del Pd en la zona del *taper* ya especificada anteriormente. Finalmente se tiene la SMF-28 estirada con un recubrimiento de Pd en una cara de la fibra con espesor de 12 nm, es decir, el sensor de hidrógeno fue fabricado.

El siguiente paso es caracterizar y probar la funcionalidad del sensor, es decir, el siguiente paso es sensar hidrogeno con el sensor fabricado. Para ello se hace uso de una cámara de gas hecha de aluminio, esta cámara contiene una válvula de escape que permite un flujo continuo de gas a través de la cámara con el fin de evitar la presurización en dicha cámara provocada por la compresión del gas usado.

Los gases utilizados son el hidrogeno ( $H_2$ ) y el nitrógeno ( $N_2$ ), obviamente se hace pasar  $H_2$  debido a que es el elemento que queremos sensar. El  $N_2$  se uso como un diluyente para bajar la concentración del  $H_2$ , ya que una concentración igual o por encima del 4% es altamente flamable y extremadamente explosivo. El  $N_2$  se utilizó debido a que el paladio no sufre ningún efecto óptico ante la presencia del Hidrogeno. En la figura 1.8 se puede apreciar el arreglo experimental utilizado para sensar el  $H_2$  con el sensor fabricado.

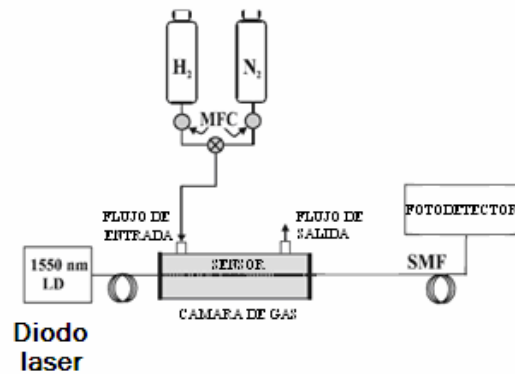


Figura 1.8. Arreglo experimental para sensar el  $H_2$  con el sensor hecho de fibra SMF-28 [1.10].

Siendo observadores, en la figura anterior se muestran los controladores electrónicos de flujo, donde el caudal del nitrógeno corresponde a  $3000 \text{ cm}^3/\text{min}$  y el caudal de  $H_2$  es de  $300 \text{ cm}^3/\text{min}$ . En la siguiente tabla se muestra la variación de la concentración del hidrogeno en la cámara de gas, estas variaciones del  $H_2$  deben ser detectadas por el sensor fabricado que se encuentra en el interior de esta cámara.

| Caudal de $N_2$<br>$\text{cm}^3/\text{min}$ | Caudal de $H_2$<br>$\text{cm}^3/\text{min}$ | Concentración de $H_2$<br>(%) |
|---|---|-------------------------------|
| 750   | 0   | 0                             |
| 750   | 9   | 1.18                          |
| 750   | 15  | 1.96                          |
| 750   | 18  | 2.34                          |
| 750   | 30  | 3.84                          |
| 750   | 45  | 5.67                          |
| 750   | 60  | 7.50                          |

Tabla 1.1 Variación del caudal del  $H_2$  para lograr sus diversas concentraciones.

Dependiendo la variación de la concentración del hidrogeno existe una variación en la potencia detectada por el fotodetector, lo cual nos permite caracterizar el sensor con estos parámetros.

En la figura 1.9 se observa el comportamiento de la potencia transmitida respecto a la variación de la concentración del  $H_2$ . Dependiendo los cambios de la concentración existe un aumento en la potencia transmitida. Como fin práctico se logra observar la dependencia de la potencia transmitida con la concentración del  $H_2$ . El efecto de saturación observado en el mismo gráfico se debe a que a una concentración del  $H_2$  de 6%, la película de Pd absorbe todo el  $H_2$  que puede absorber.

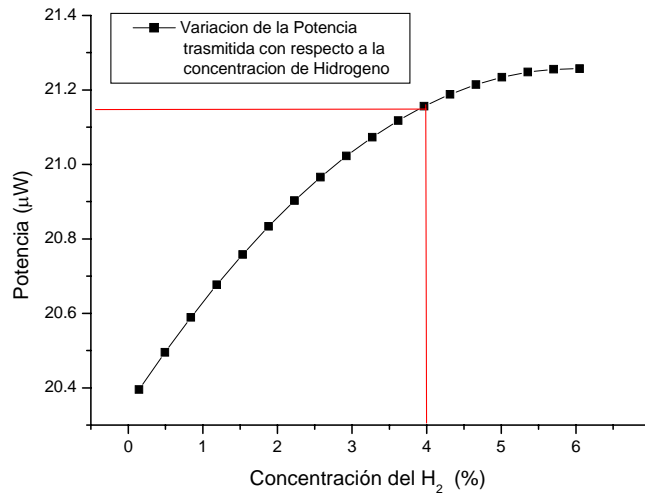


Figura 1.9 Variación de la potencia transmitida en contra el porcentaje del hidrogeno.

### 1.3.2 Sensor de Fibra óptica basados en rejillas de Bragg

Se conoce a una rejilla de Bragg (FBG) como una modulación periódica del índice de refracción del núcleo en una fibra óptica. Para lograr dicha modulación se usan técnicas de grabado, en donde el método mas eficiente para grabar rejillas en el núcleo de una fibra fotosensible de manera externa es el “Método de la mascara de fase” y por “Interferencia”.

Hemos usado el termino fotosensibilidad, y este se refiere a un cambio permanente en el índice de refracción en el núcleo de la fibra óptica por medio de una exposición a una longitud de onda y amplitud determinada de una radiación. Lo recomendable para grabar rejillas de Bragg es usar fibra fotosensible, o usar fibra convencional y fotosensibilizarla por medio de la Hidrogenación, este es un método muy conocido y practico que consiste en inyectar hidrogeno a un cámara sellada en donde en su interior se encuentra una fibra convencional a una temperatura y presión controladas. Esto se realiza con el propósito de lograr la difusión del hidrogeno en el núcleo de la fibra óptica provocando un cambio en el índice de refracción en el núcleo alrededor de 0.01-1 %. Esto quiere decir que se puede fotoinducir una perturbación periódica del índice de refracción.

Ya explicado el termino de fotosensibilidad, el método de la máscara de fase usa una máscara de fase, la fibra óptica fotosensible y un haz láser de UV. Este método consiste en incidir el haz láser a través de de la máscara de fase que funciona como elemento difractor cuyo propósito es modular espacialmente el haz de grabado UV.

En cuanto a las técnicas de interferencia en el grabado de rejillas, como su nombre lo indica se hace uso de interferómetros, cuyo propósito es formar un patrón de interferencia en un tramo de la fibra fotosensible, este patrón de interferencia induce una modulación permanente en el índice de refracción del núcleo de dicha fibra.

Hemos hablado de cómo se graban las rejillas de Bragg uniforme, ahora describiré las principales propiedades de estas, ya que es muy importante el saber el como y porque estas rejillas fungen como espejos, es decir que son utilizadas por su reflectancia de haces.

En la siguiente figura se muestra un imagen que representa esquemáticamente una rejilla de Bragg uniforme, esto quiere decir que el periodo es constante.

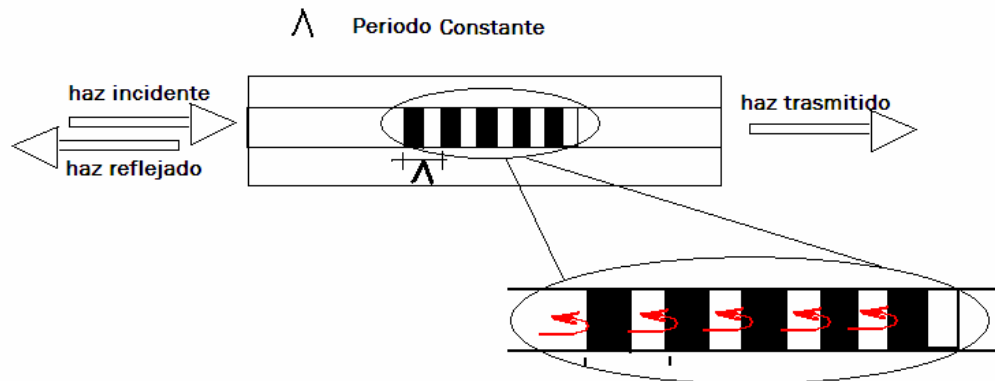


Fig. 1.10 Diagrama esquemático de una FBG , también se muestra una ampliación donde se observa la luz reflejada o esparcida por cada plano de la rejilla.

La luz reflejada en el núcleo de una fibra es esparcida por cada uno de los planos de la rejilla debido a la condición de Bragg, si no se cumple la condición de Bragg la luz reflejada por cada plano estará fuera de fase y se cancelara. La condición de Bragg es simplemente el requerimiento de que se cumpla tanto la conservación de la energía como del momento.

Para que se cumpla la conservación de energía la longitud de onda incidente debe ser igual a la longitud de onda reflejada. Esto quiere decir que debemos inyectar una longitud de onda diseñada a un periodo ( $\Lambda$ ) para que pueda existir un haz reflejado, de otra manera la el haz no se refleja y solo habrá haz transmitido.



Viéndolo de otro punto de vista, la longitud de onda incidente debe ser igual a la longitud de onda reflejada para que las ondas sean constructivas. Hay que tomar en cuenta que si se tiene un haz incidente y otro reflejado ambos con la misma longitud de onda y mismas condiciones se genera una interferencia de dos ondas viajando en direcciones opuestas y se tendrían ondas estacionarias. Entonces se tiene que diseñar una FBG de tal manera que su periodo sea de ciertas características que al incidirse cierto haz cada plano de la rejilla refleje la onda de tal manera que la superposición de las ondas incidentes y reflejadas se superpongan de una manera constructiva y exista el haz reflejado. De otra manera, la superposición será de una manera destructiva y tales ondas se cancelarán y solo existirá el haz transmitido.

En cuanto a la conservación del momento se tiene que el vector de onda incidente más el vector de onda de la rejilla es igual al vector de onda de la luz esparcida (figura 1.11).

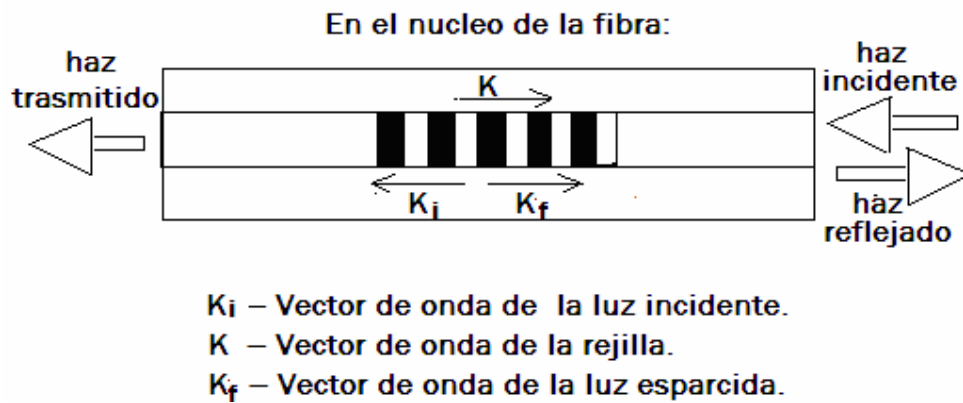


Fig. 1.11 Diagrama esquemático de la FBG donde se muestra la dirección de los vectores de onda incidente, de la rejilla de Bragg y el de la luz esparcida.

Además  $|K_i| = |K_f|$  en magnitud por la conservación de la energía, pero van en direcciones opuestas, por lo tanto:

$$K_i + K = K_f \quad (1.3)$$

$$|K| = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1.4)$$

$$|K_i| = |K_f| = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \quad (1.5)$$

Sustituyendo (1.4) y (1.5) en (1.3) se tiene la longitud de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ):

$$-\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} + \frac{2\pi}{\Lambda} = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \quad (1.6)$$

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (1.7)$$

Por lo tanto la  $\lambda_B$  depende del periodo de la rejilla y del índice de refracción efectivo del núcleo ( $n_{eff}$ ). En otras palabras, si queremos un cambio en la longitud de onda de Bragg se tiene que afectar al periodo y/o al índice de refracción del núcleo.

Una rejilla uniforme es aquella en el que el periodo de modulación es constante. Consideremos una rejilla de este tipo, con un índice de refracción del núcleo promedio  $n_0$  [1.11]. El perfil del índice de refracción de la rejilla puede expresarse como:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (1.8)$$

Donde  $\Delta n$  es la amplitud de la perturbación inducida en el índice de refracción, o más exacto, amplitud del primer armónico espacial de distribución en el índice de refracción (valores típicos de  $\Delta n$  son de  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$ ).

Utilizando la teoría de acoplamiento de modos, encontramos que la reflectividad de una rejilla con amplitud de modulación y periodo constante está dado por:

$$R(l, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + \cosh^2(sl)} \quad (1.9)$$

Donde:

$R$  es la Reflectividad.

$\Omega$  es el Coeficiente de acoplamiento del modo de propagación con la rejilla.

$\Delta k$  es el vector de onda de sintonización.

$l$  es la longitud física de la rejilla

$$\Delta k = \frac{2\pi}{\lambda_B} - \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.10)$$

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} \quad (1.11)$$

$$s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2 \quad (1.12)$$

En la figura 1.12 se muestra un espectro de reflexión característico de una FBG:

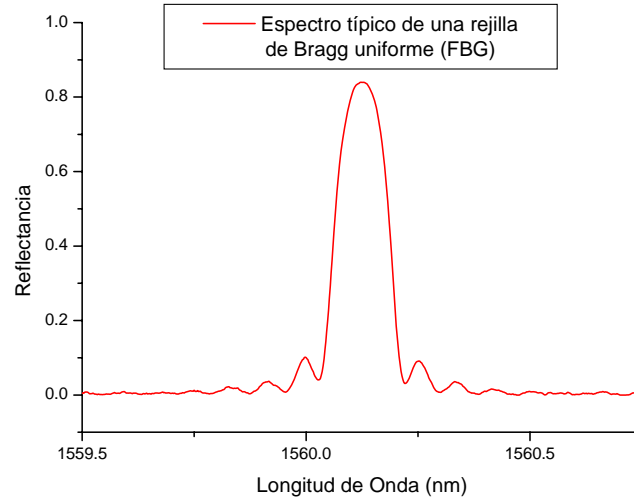


Fig.1.12 Espectro de reflexión característico de una rejilla de Bragg uniforme.

Haré mención de otra propiedad de las rejillas que no se debe olvidar es que las FBG es que su longitud de onda de resonancia ( $\lambda_B$ ) depende de la temperatura y el esfuerzo. Esto es porque existe un coeficiente de expansión térmica, un coeficiente termoóptico y un coeficiente fotoelástico [1.11].

Ahora proseguiremos con un esquema para observar un sensor basado en estrés hecho con una FBG para visualizar el comportamiento de la longitud de onda de Bragg cuando la rejilla de Bragg es sometida a tensión [1.12 –1.13]. En la siguiente figura se puede ver el esquema utilizado para observar la variación de los espectros cuando la rejilla es sometida a tal estiramiento (este sensor también fue fabricado en los laboratorios de Fibra Óptica del CIO).

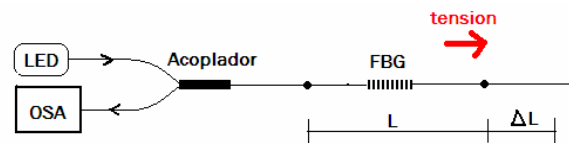


Fig. 1.13 Sensor basado en FBG montado para obtener la variación de la longitud de resonancia al aplicar un esfuerzo por medio de la técnica de estirado.

Uno de los parámetros que hay que tener en cuenta, es que una fibra SMF-28 tiene un esfuerzo de diseño de  $6000 \mu$  esfuerzos aproximadamente, por lo tanto, se deberá aplicar un micro esfuerzo menor al antes mencionado para evitar fracturas y rupturas en la fibra y en la rejilla de Bragg.

Para tener una idea del microesfuerzo ( $\mu\varepsilon$ ) aplicado a la rejilla de Bragg se hace uso de la Ecs. 1.13, en donde se puede obtener el microesfuerzo ( $\mu\varepsilon$ ) en relación a la distancia inicial ( $L$ ) y a la distancia de deformación elástica ( $\Delta L$ ).

$$\mu\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.13)$$

Para el caso de este experimento se uso:

$\Delta L$  entre 0 y 500  $\mu\text{m}$

$L = 11.5\text{cm}$

Por lo tanto se tomaron mediciones de los espectros de reflexión variando el  $\Delta L$  desde 0 hasta 500  $\mu\text{m}$  en pasos de 50  $\mu\text{m}$  para el estirado de la rejilla de Bragg, y posteriormente se tomaron mediciones de los espectros de reflexión de la rejilla en relajación, es decir, dejando de estirar y disminuyendo el  $\Delta L$  hasta cero. Como resultado del arreglo experimental en donde se somete a una FBG a un esfuerzo por medio de una tensión, se observa que la longitud de onda varia dependiendo del estiramiento, es decir, existe un corrimiento de la longitud de onda de Bragg. Esto se puede observar en la figura siguiente:

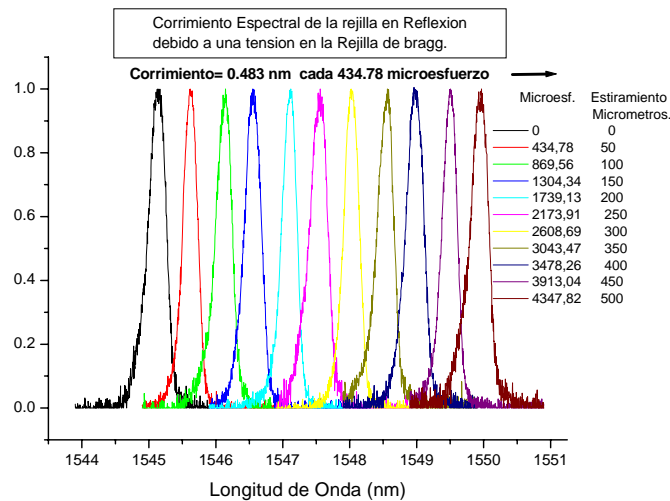


Fig. 1.14 Variación de la longitud de onda debido al esfuerzo aplicado por medio de una tensión.

El valor de la longitud de onda de la rejilla de bragg sin aplicar ningún estiramiento es de 1545.138 nm, como se menciona en la parte del desarrollo experimental de este trabajo, se fue estirando la rejilla cada 50  $\mu\text{m}$  produciendo un microesfuerzo y a la vez un desplazamiento en la longitud de onda de Bragg.

Por cada 50  $\mu\text{m}$  de estiramiento se produjo un microesfuerzo de 434.78 desplazando 0.483 nm la longitud de onda de Bragg con un comportamiento lineal. Posteriormente se obtuvo los espectros en relajación, en nuestro caso, le diré relajación a la destención, es decir, disminuyendo la distancia de deformación elástica  $\Delta L$  hasta cero cada 50  $\mu\text{m}$ . tales espectros se muestran en la figura 1.15.

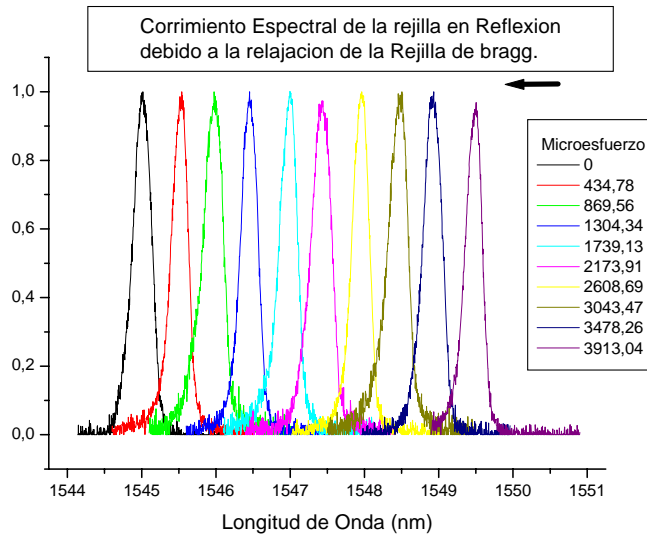


Fig. 1.15 Variación de la longitud de onda debido a una relajación o destensión.

Al ir disminuyendo el microesfuerzo, la longitud de onda de bragg disminuye también, pero a los mismos valores de longitudes de onda de bragg. Esto quiere decir que es repetible, que se tienen los mismos valores de longitud de onda para dichos microesfuerzos mencionados en la figura 1.14. Esto se puede apreciar en la figura 1.16.

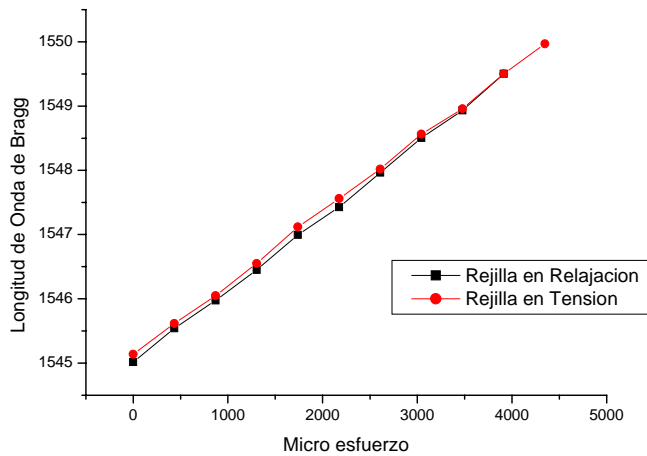


Fig. 1.16 Grafica que muestra el comportamiento lineal entre la longitud de resonancia y el microesfuerzo aplicado a la FBG.

En la figura 1.16 se tiene un error de 0.08 nm en la longitud de onda del arreglo en tensión con el arreglo de relajación. Haciendo una aproximación se obtiene la figura 1.17.

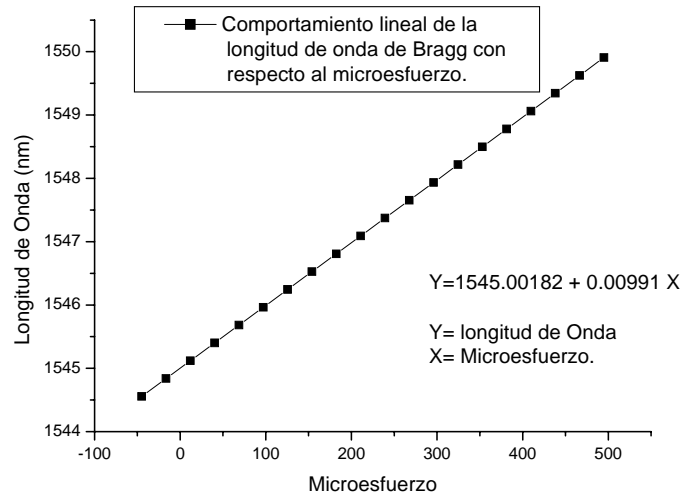


Fig. 1.17 Aproximación del comportamiento lineal entre la longitud de resonancia y el microesfuerzo aplicado a la FBG.

Por lo tanto, se demuestra que existe un comportamiento lineal entre la longitud de onda de resonancia y los esfuerzos.

Los sensores basados en rejillas de Bragg no se limitan solo a detectar la temperatura o el stress, también son utilizados para detectar otros parámetros de interés. Existen sensores basados en rejillas de Bragg para medir parámetros como la presión [ 1.14-1.15], load [ 1.16], bending [ 1.17], la vibración [1.18], la aceleración [1.19], la potencia eléctrica [1.20], la corriente eléctrica [1.21], el campo magnético [1.22-1.23 ], el hidrogeno [1.24]. Por lo tanto, las FBG tienen un amplio campo de aplicación como sensores para detectar un parámetro de interés que en combinación con otros dispositivos ópticos o materiales se modifique alguna propiedad óptica de la luz para poder ser detectable.

### 1.3.3 Sensor de Fibra óptica basados en Interferometría Fabry-Perot

La interferometría es una herramienta muy funcional para ser aplicada en sensores. Una característica muy importante de los interferómetros basados o hechos de fibra para ser aplicados como sensor es su alta resolución, estamos hablando de resoluciones en longitud de onda, es decir, resolución en nanómetros [1.25].

Existen diversos tipos de interferómetros, en los cuales se pueden fabricar en un solo trozo de fibra, otros que parten del principio de separar y recombinar, y finalmente los que usan modos guiados para realizar la interferencia. Todos los interferómetros parten de la idea principal, nunca se pierde la esencia.

En la antigüedad al hablar de interferómetros de fibra óptica se pensaba que solo la fibra óptica servía para guiar el haz, ya que para dividir el haz se hacía uso de divisores de haz, además para insertar al haz en la fibra se auxiliaba de lentes, lo cual hacía un manejo muy laborioso difícilmente sacar de un laboratorio. En la actualidad, debido a la creciente tecnología y conocimiento de investigadores, se han podido realizar interferómetros hechos en su totalidad de fibra óptica, debido a la creación de acopladores, aisladores, circuladores, etc. todo hecho de fibra.

El FPI (Interferómetro Fabry-Perot) hecho de fibra básicamente lo compone dos materiales diferentes con índices de refracción diferentes, es decir, donde uno corresponde a un tipo de fibra óptica (por ejemplo SMF), y el otro corresponde a la cavidad, esta podría ser aire o una fibra multimodo (*Multi-Mode Fiber*), abreviada con las siglas MMF. El fin es que exista una diferencia entre los índices de refracción para que exista la reflectividad, esta se puede conocer con la ecuación (1.14) [1.26].

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1.14)$$

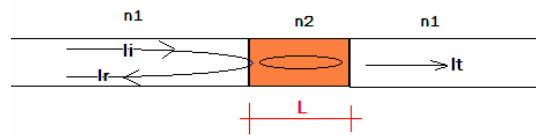


Fig. 1.18 Esquema de un FPI donde su reflectividad es dada por la diferencia de índices de refracción

En este tipo de interferómetros las fronteras entre los materiales funcionan como espejos, así que uno puede sustituir o quitar el material que sirve como cavidad y poner espejos en las puntas del material con índice de refracción  $n_1$ . Existen varios tipos de FPI, como extrínsecos e intrínsecos. El primer FPI intrínseco que usaba espejos internos fue reportado en 1987 [1.27-1.28].

La fibra estructurada o agujerada puede ser utilizada para realizar un interferómetro modal debido a las propiedades que tiene este tipo de fibra. En este tipo de fibra óptica el núcleo es sólido hecho de  $\text{SiO}_2$  rodeado de un patrón periódico de agujeros de aire que equivale al revestimiento, y en la parte externa nuevamente su estructura es sólida. [1.26]. Los agujeros son los que bajan el índice de refracción del revestimiento (haciendo una analogía con una SMF) y el índice de refracción efectivo lo da el número de agujeros. Además en este tipo de fibras la luz se guía por un fenómeno llamado reflexión total interna modificada. Las ondas evanescentes se propagan por la primera circunferencia de agujeros cercana al centro, al estirar este tipo de fibras se puede tener acceso a las ondas evanescentes de forma parecida a una SMF, solo que en la MMF la cintura y zona adelgazada se convierte en una estructura sólida debido al colapso de los agujeros provocado por el adelgazamiento. Adicionando a lo antes dicho, se puede realizar un interferómetro modal adelgazando la fibra microestructurada como se verá más adelante en las páginas siguientes de este documento. De igual manera estos sensores FPI fueron fabricados y sometidos a prueba en los Laboratorios del CIO.

### 1.3.3.1 Interferómetro Fabry-Perot (SMF-MMF-SMF).

Para realizar este tipo de interferómetros es necesario construir su cavidad. La cavidad esta la forma un trozo de MMF conectado en ambos lados por SMF. El trozo de MMF funge como interfase, cuando el haz va viajando a través de la SMF parte de la luz se refleja y otra parte se trasmite debido a la diferencias de índices de refracción entre la SMF y la MMF, la parte de energía trasmitada va viajando a través de la MMF, y al llegar a la SMF parte de esta energía se trasmite y otra parte se refleja. Es decir, las fronteras entre la SMF y la MMF fungen como espejos. Esto se puede apreciar en la figura 1.19.

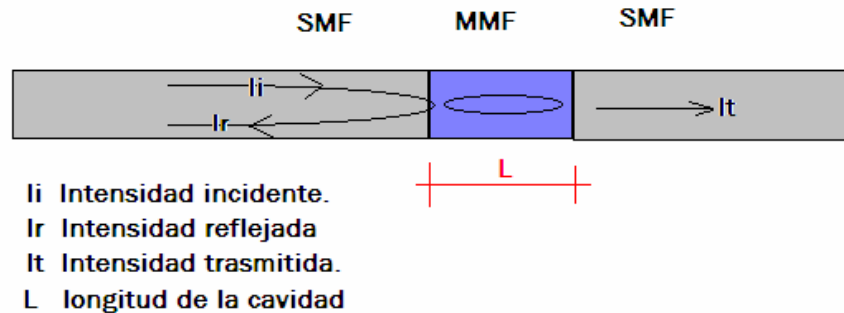


Figura 1.19. Diagrama esquemático de un FPI con cavidad hecha de MMF

Por lo tanto, este tipo de interferómetro no necesita espejo, pero se necesita tener un buen corte adicionado con un buen empalme para garantizar la funcionalidad de este interferómetro. Lo dificultoso de fabricar este tipo de interferómetro es que la longitud de la cavidad ( $L$ ) debe estar en un rango entre 600 y 800 micras.

Los cortes se realizaron por medio de una cortadora de alta precisión, especial para cortar fibra óptica, se auxilio de un microscopio para la medición de la longitud ( $L$ ) de la MMF.

### 1.3.3.2 Interferómetro Fabry-Perot (SMF-Aire-SMF).

Este interferómetro tiene los mismos principios físicos que el FPI (SMF-MMF-SMF), solo que la diferencia es que la cavidad del FPI (SMF-Aire-SMF) la forma el aire. La ventaja de este interferómetro a su homologo es que uno puede variar la longitud de la cavidad de una manera practica y sin aplicar esfuerzos de tensión.

Para variar y medir la longitud de la cavidad se auxilio de la empalmadota, ya que con este artefacto se puede alinear de una manera muy precisa la fibra óptica, además, se puede desplazar la longitud de la cavidad ( $L$ ) haciendo uso de los servomotores de forma manual incluidos en la empalmadota. Para finalizar se muestra en la siguiente figura el FPI con cavidad variable formada por el aire.



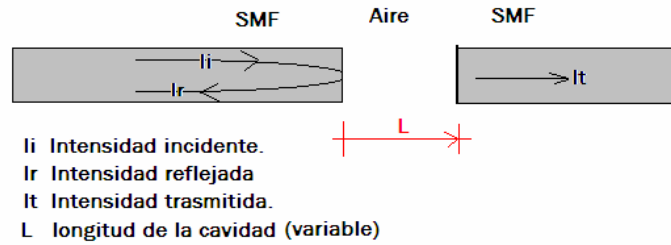


Figura 1.20 Diagrama esquemático de un FPI con longitud de cavidad variable.

Haciendo uso del arreglo experimental mostrado en la figura 1.21 se obtuvieron los espectros de reflexión (patrones de interferencia) a diversas longitudes de cavidad ( $L$ ).

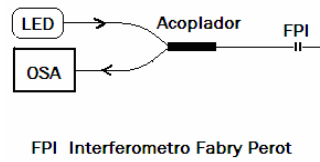


Figura 1.21 Arreglo experimental para observar los espectros en reflexión del FPI.

En la siguiente grafica se observa dos espectros de reflexión que corresponden a los patrones de interferencia a una longitud de cavidad de  $91.35 \mu m$  y  $48.08 \mu m$ .

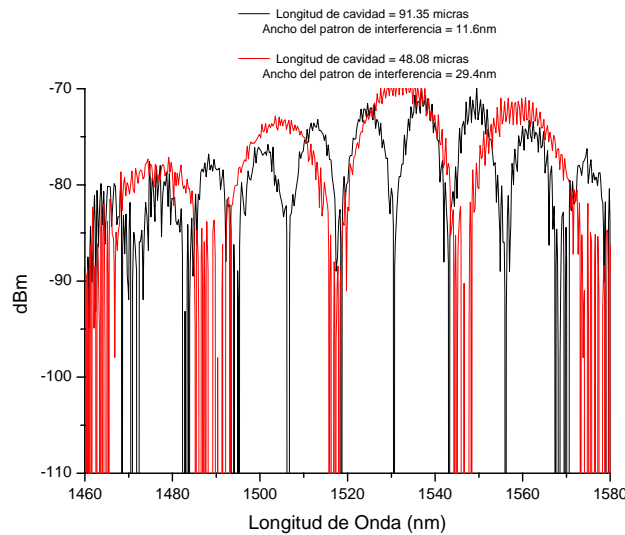


Figura 1.22 Espectros de reflexión (patrones de interferencia) del FPI para distintas longitudes de cavidad

En la figura 1.22 se muestra la diferencia en los patrones de interferencia cuando se varía la longitud de la cavidad. Por lo tanto, midiendo los anchos espectrales de los patrones de interferencia para cada longitud de cavidad se puede obtener la relación o el comportamiento de la dependencia de estos dos parámetros. Esta relación se muestra a continuación en la figura 1.23.

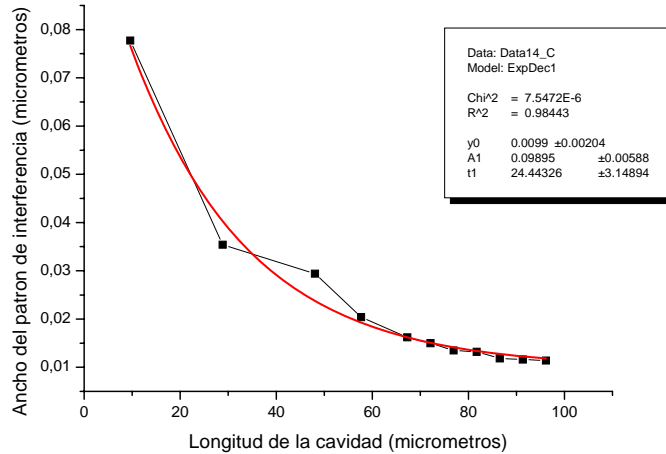


Figura 1.23 Muestra el comportamiento exponencial decayente entre la longitud de onda y la longitud de la cavidad

Con esto se demuestra que existe un comportamiento exponencial decayente entre la longitud de cavidad y la longitud de onda. Ya descubierto esto, uno puede explotar el comportamiento de estos parámetros para caracterizar este tipo de interferómetros para darle una aplicación como sensor.

### 1.3.3.3 Interferómetro modal hecho con fibra óptica microestructurada estrechada.

Primeramente se toma fibra microestructurada, en una sección se le quita el recubrimiento con ayuda de un cloruro para después ser estirada. Para fabricar este interferómetro se hace uso de la técnica de adelgazado de una fibra microestructurada aplicando calor (ver Ecs. 1.2). En la figura 1.24 se observan los parámetros físicos aplicados para la fabricación de este interferómetro modal.

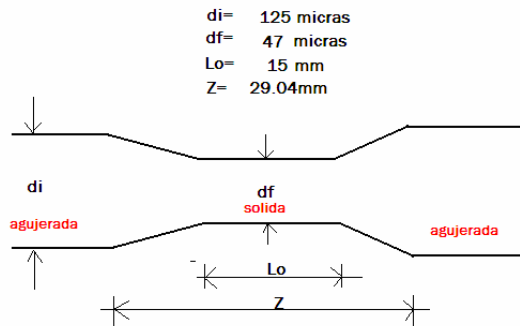


Figura 1.24 Parámetros de la fibra microestructurada adelgazada.

El adelgazamiento de la fibra microestructurada se hizo en línea de acuerdo al arreglo mostrado en la figura 1.25, es decir, todos los cambios en el espectro de transmisión fueron vistos al mismo tiempo que la fibra fue estirada hasta llegar a la distancia de elongación (Z) acordada.

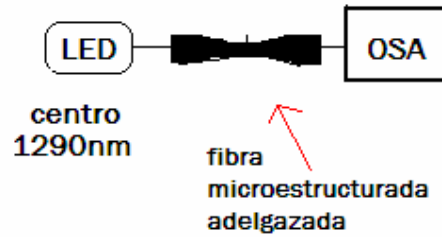


Figura 1.25 Arreglo experimental para observar en línea los cambios del espectro de trasmisión debido al acomodo de la energía provocado por el adelgazamiento de la fibra microestructurada.

La siguiente prueba que se le hizo al este sensor hecho a base de un interferómetro modal fue aplicarle tensión a la fibra estructurada [1.12]. Se prosiguió con un esquema para observar el comportamiento de la longitud de onda cuando el interferómetro modal es sometido a tensión. En la siguiente figura se puede ver el esquema utilizado para observar la variación de los espectros cuando el interferómetro modal es sometido a tal estiramiento.

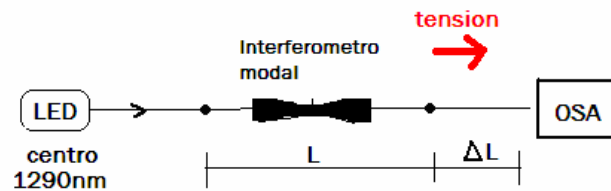


Figura 1.26 Arreglo experimental montado para obtener la variación de la longitud de resonancia al aplicar un esfuerzo por medio de la técnica de estirado.

Para tener una idea del microesfuerzo ( $\mu\epsilon$ ) aplicado se hace uso de la ecuación 1.13, en donde se puede obtener el microesfuerzo ( $\mu\epsilon$ ) en relación a la distancia inicial ( $L$ ) y a la distancia de deformación elástica ( $\Delta L$ ).

Para el caso de este experimento se uso:

$\Delta L$  entre 0 y  $360\mu\text{m}$ .

$L = 6.9\text{cm}$

Por lo tanto se tomaron mediciones de los espectros de trasmisión variando el  $\Delta L$  desde 0 hasta  $360\mu\text{m}$  en pasos de  $30\mu\text{m}$  para el estirado del interferómetro modal, y posteriormente se tomaron mediciones de los espectros de trasmisión del interferómetro modal en relajación, es decir, dejando de estirar y disminuyendo el  $\Delta L$  hasta cero. Le diré relajación a la destensión, es decir, disminuyendo la distancia de deformación elástica  $\Delta L$  hasta cero en pasos de  $30\mu\text{m}$ .

Para finalizar los experimentos a este interferómetro se aplicó por segunda vez la tensión y relajación, pero ahora aplicando calor ( $47^{\circ}\text{C}$ ) por medio de un foco de 60 W al interferómetro modal durante la aplicación de microesfuerzos ( $\mu\epsilon$ ). En la gráfica 1.27 se muestra el espectro del LED con centro 1280 que pasa a través de la fibra microestructurada hasta llegar al OSA.

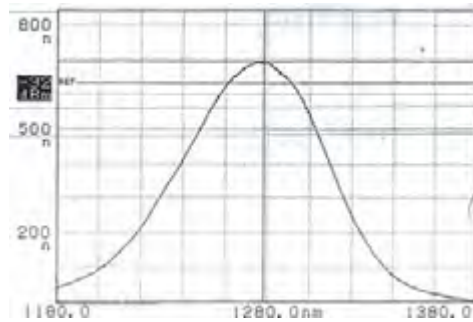


Figura 1.27 Espectro de la fuente de amplio espectro. (LED)

Ahora, de acuerdo a la figura 1.25 se observó en línea los cambios en el espectro de transmisión debido al estiramiento de la fibra. Cuando la distancia alargada ( $Z$ ) fue de 8.5 mm se notó un decaimiento del pico central del espectro, este fue el primer cambio notorio, esto es debido a que los agujeros empiezan a tener influencia y colapsarse.

Posteriormente se empieza a reacomodar la energía alrededor de  $Z=10.5\text{mm}$ , se forman tres picos, después dos, en fin, existe un juego en el espectro en el cual está cambiando constantemente debido al reacomodo de la energía.

La ventaja de este interferómetro es que uno puede decidir el tipo de espectro que uno desee mientras se va estirando la fibra. La fibra se estiró hasta una distancia de elongación de  $Z=29.04\text{mm}$ . El espectro de transmisión correspondiente a esta distancia se muestra en la figura 1.28.

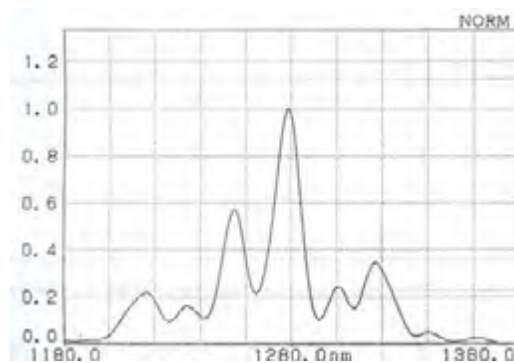


Figura 1.28 Espectro en transmisión debido al adelgazamiento de fibra microestructurada (interferómetro modal).

En la figura 1.29 se muestra los dos anteriores espectros previamente normalizados para observar las longitudes de ondas y los picos formados debido al estiramiento de la fibra microestructurada, es decir, la nueva forma del espectro debido al reacomodo de la energía.

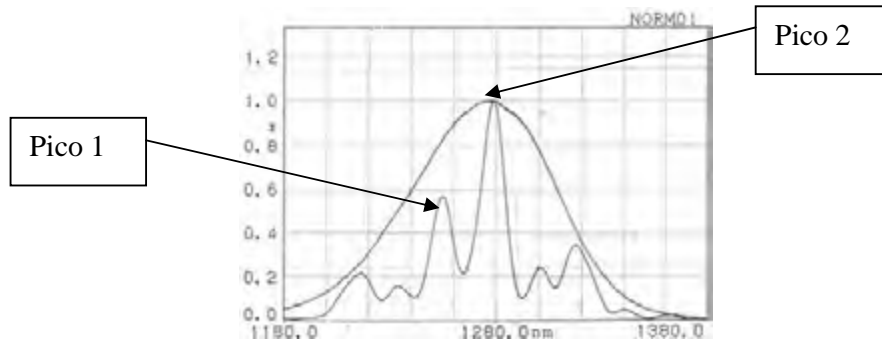


Figura 1.29 Comparación de los espectros correspondiente al interferómetro modal (patrón de interferencia) con respecto al espectro de la fuente de amplio espectro (LED)

En las siguientes figuras se muestra la primera y la segunda prueba de tensión y relajación respectivamente aplicadas al interferómetro modal tomando en cuenta dos picos del espectro de transmisión, en donde se observa la variación o corrimiento de la longitud de onda debido al microesfuerzo aplicado al interferómetro.

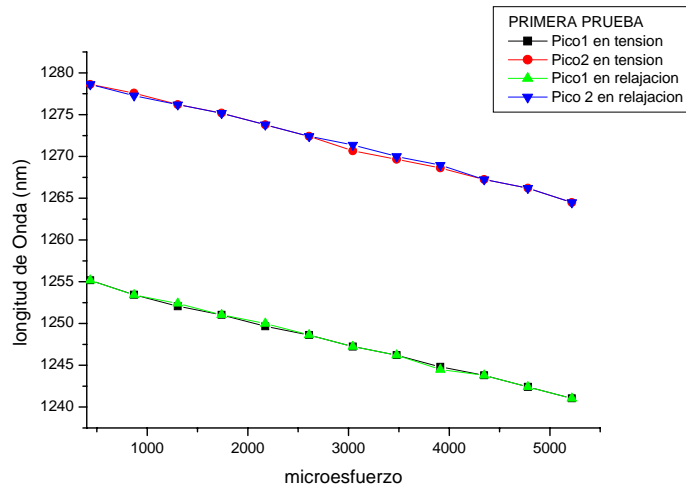


Figura 1.30 Muestra el comportamiento lineal entre la longitud de onda y el microesfuerzo aplicado en tensión y relajación ( prueba 1).

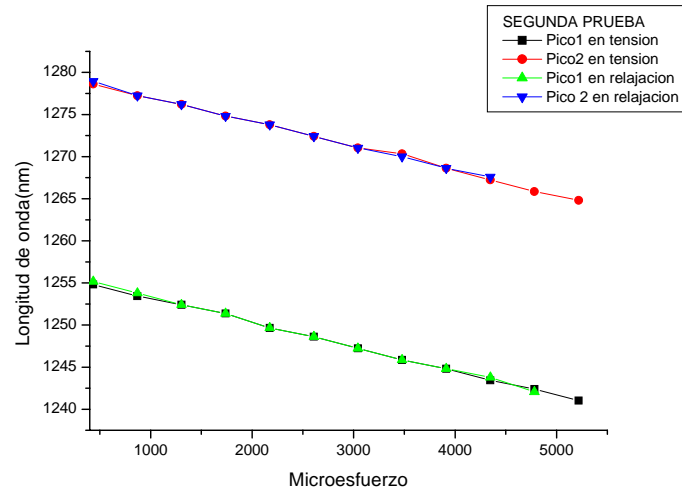


Figura 1.31 Muestra el comportamiento lineal entre la longitud de onda y el microesfuerzo aplicado en tensión y relajación a 47°C (prueba 2).

Claramente se ve que existe un comportamiento lineal entre el microesfuerzo y la longitud de onda, entre mayor sea el microesfuerzo, menor la longitud de onda. También se ve a simple vista que este interferómetro modal puede ser aplicado como sensor, tiene repetibilidad, se puede variar tantas veces el microesfuerzo, pero a cada microesfuerzo le corresponde una longitud de onda debido a la tendencia lineal que se tiene. Este tipo de interferómetros pueden tener muchas aplicaciones como sensores en temperaturas de trabajo duras.

Siendo observadores y recordando que la segunda prueba que se le hizo al interferómetro fue aplicar los microesfuerzos en presencia de calor (47°C), y este calor no influyó en el cambio de longitud de onda. Es por eso que se le llaman atérmicos. Este tipo de sensores pueden ser aplicados en lugares de temperaturas duras sin preocuparse de que la temperatura afecte una medición. Este dispositivo tiene la propiedad de ser atérmico en un rango de -20 a 80°C aproximadamente.

Finalmente se muestra la gráfica 1.32 ya aproximada con su ecuación correspondiente que describe el comportamiento lineal del pico 1.

Otra propiedad descubierta es que es altamente sensible a los cambios de índice de refracción, me di cuenta que al insertar un líquido en la cintura de la fibra estirada el espectro inicial cambió, pero lo más importante es que al remover tal líquido el espectro regresó a su estado inicial, esto indica que puede ser aplicado como un sensor muy fiable y de alta repetibilidad.

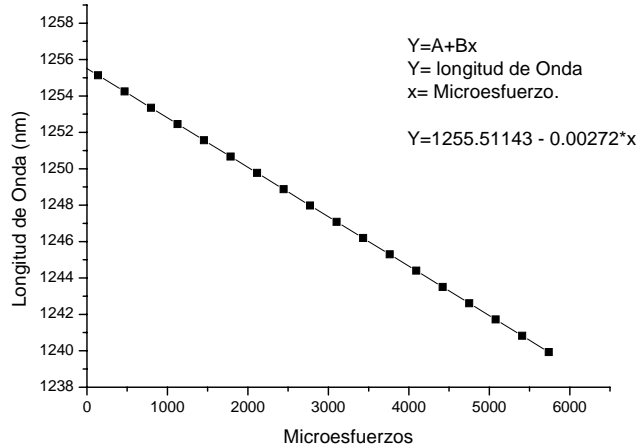


Figura 1.32 Muestra la recta aproximada y la ecuación que gobierna el comportamiento lineal entre el microesfuerzo y la longitud de onda.

### 1.3.4 Sensor de Fibra óptica basados en Rejillas de Periodo Largo (LPG).

Dependiendo del periodo de este tipo de rejillas, la luz del modo fundamental se acopla a los modos de revestimiento, donde la luz se pierde debido a la absorción y el esparcimiento. En este caso no se tiene luz reflejada y las propiedades de la rejilla se observan en transmisión. El acoplamiento de un modo guiado a modos no guiados depende de la longitud de onda, de tal manera que las pérdidas tienen un comportamiento espectral selectivo.

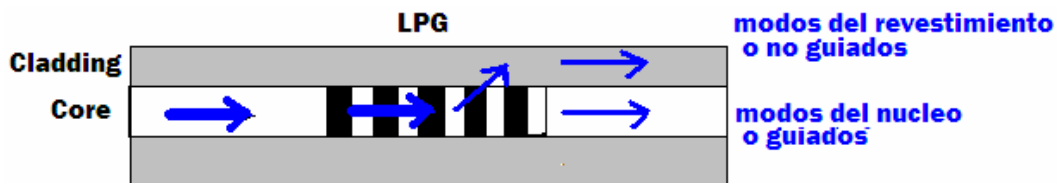


Figura 1.33 Acoplamiento de la energía incidente en modos guiados y no guiados..

Las rejillas de Bragg satisfacen la condición de *phase-matching*, que regula el acoplamiento de un modo a otro [1.29], esta condición se describe como:

$$\beta_{01} - \beta = \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \tag{1.15}$$

$\Lambda$  es la periodicidad de la rejilla. ( Rango típico entre 10 y 1000  $\mu\text{m}$ )

$\beta_{01}$  y  $\beta$  son constantes de propagación del modo fundamental guiado y el modo al cual ocurre el acoplamiento.

El espectro de transmisión de una fibra óptica que tiene grabada una LPG contiene un número de bandas de atenuación, cada una corresponde al acoplamiento de diferentes modos del recubrimiento. Las longitudes a las cuales ocurre la condición de phase-matching cumple la siguiente expresión [1.29]:

$$\lambda_i = [n_{eff}(\lambda) - n_{cl}(\lambda)] \Lambda \tag{1.16}$$

$n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo del modo  $LP_{01}$  de propagación.

$n_{cl}^i$  es el índice de refracción del  $i$ -ésimo modo del recubrimiento.

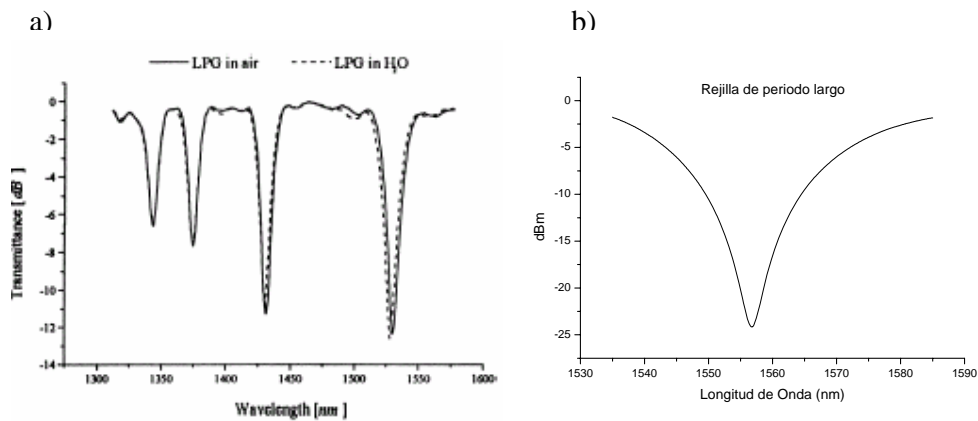


Figura 1.34 (a) Respuesta típica de una LPG en transmisión [1.30]. b) Espectro de transmisión característico de una LPG en un solo modo.

Estas propiedades ópticas pueden ser explotadas para diseñar una cabeza de sensor, por ejemplo, si se empalman dos LPG en serie, se puede fabricar un interferómetro Mach-Zender.

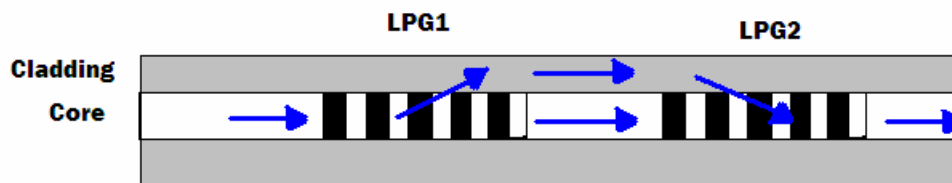


Figura 1.35 Interferómetro Mach-Zender conformado por dos LPG en serie.

La LPG1 acopla la luz del modo fundamental (núcleo) a modos de orden superior (del recubrimiento). El modo del recubrimiento acoplado por el recubrimiento se propaga por el recubrimiento y si la longitud entre las rejillas no es muy grande, estos modos se acoplan al modo fundamental de la FBG2. mientras que el modo guiado o del núcleo de la FBG1 continúa guiándose hasta el modo de núcleo de la FBG2 [1.31]. En otras palabras, el modo se divide y se propaga en dos trayectorias de distintas para posteriormente recombinarse provocando una diferencia de camino óptico debido a la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y el recubrimiento, por lo tanto existe una diferencia de fase y en consecuencia se genera un patrón de interferencia.



También se puede poner un interferómetro en el cual su operación se base en la reflexión, este se logra con una LPG y un espejo al final de la fibra.

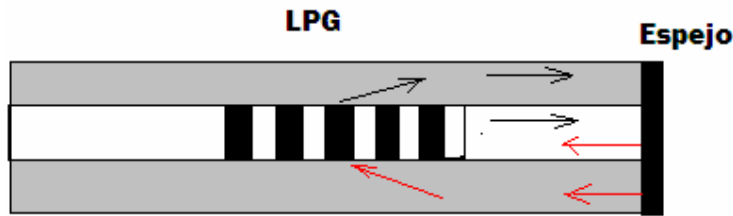


Figura 1.36 Interferómetro conformado por una LPG y un espejo al final de la Fibra.

Esta cabeza de sensor tiene las mismas propiedades estructurales que su homólogo hecho por dos LPG en serie, simplemente que diseño es mas compacto que el anterior. Partiendo del mismo principio, la energía se propaga por el núcleo, al llegar a la LPG provoca que los modos se dividan por trayectorias distintas con un acoplamiento del 50%, posteriormente los modos son reflejados por el espejo para recombinarse los modos en el núcleo debido a la presencia de la LPG, provocando una diferencia de caminos ópticos para poder así formar un patrón de interferencia.

En general, la mayoría de estos tipos de interferómetros son utilizados para medir modificaciones en el índice de refracción de los modos del recubrimiento, al variar los modos en el recubrimiento por un agente externo o el parámetro a sensor se modifica el patrón de interferencia, teniendo así un comportamiento que se pudiera estandarizar par poder aplicarlo como sensor [1.32]. En las siguientes figuras se muestran dos arreglos, donde se usan las cabezas de sensor antes mencionadas como sensor.

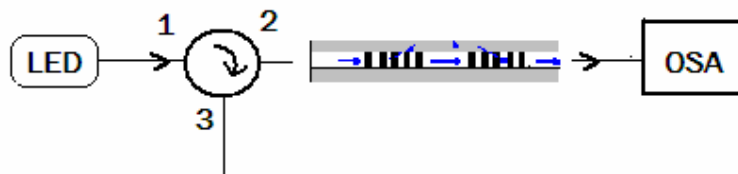


Figura 1.37 Cabeza de sensor formado por dos LPG e n serie aplicado como sensor en transmisión.

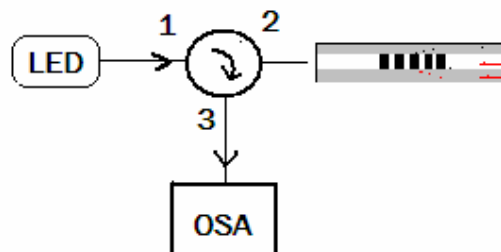


Figura 1.38 Cabeza de sensor formado por una LPG y un espejo aplicado como sensor en reflexión.

### 1.3.5 Sensores basados en Láseres de Fibra.

Las Fibras ópticas dopadas con tierras raras tienen un gran potencial y puede aplicarse en las comunicaciones, sensado, medicina, láseres, y muchas mas. El confinamiento que proporciona la fibra combinado con las excelentes propiedades del láser de los iones trivalentes de las tierras raras, aumenta extremadamente la eficiencia del láser. Estos se pueden operar con umbrales de baja potencia, por ejemplo, 100 microwatts, y aun así pueden ser extremadamente bombeados para obtener una potencia de salida de cientos de watts. Además de eso, en muchos de los láseres transitorios, los iones trivalentes de las tierras raras les proporcionan la habilidad de generar luz en un amplio espectro, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo medio. Bombeados por un diodo láser, ya que estos tienen la ventaja de ser compactos, tener bajo costo, además de ser muy disponibles y fáciles de producir a gran escala.

Los láseres de fibra presentan muchas ventajas con las fuentes de semiconductor, debido a que tienen mas brillo, alta eficiencia de acoplamiento en fibra monomodo y una mayor estabilidad en longitud de onda a la temperatura.

En general, existen tres clases de láseres de fibra:

- Láseres de fibra de onda continua (CW).
- Láseres de fibra en Q-Switched.
- Láseres de fibra en Mode-Locked.

Las tierras raras que han sido utilizadas en las fibras de sílica son el Neodimio ( $\text{Nd}^{+3}$ ), Erblio ( $\text{Er}^{+3}$ ), Yterbio ( $\text{Yb}^{+3}$ ), Tulio ( $\text{Tm}^{+3}$ ), Holmio ( $\text{Ho}^{+3}$ ), Samario ( $\text{Sm}^{+3}$ ) y Prasodimio ( $\text{Pr}^{+3}$ ). En la siguiente figura se muestra los rangos en longitud de onda en los cuales trabajan las tierras raras en la sílica.

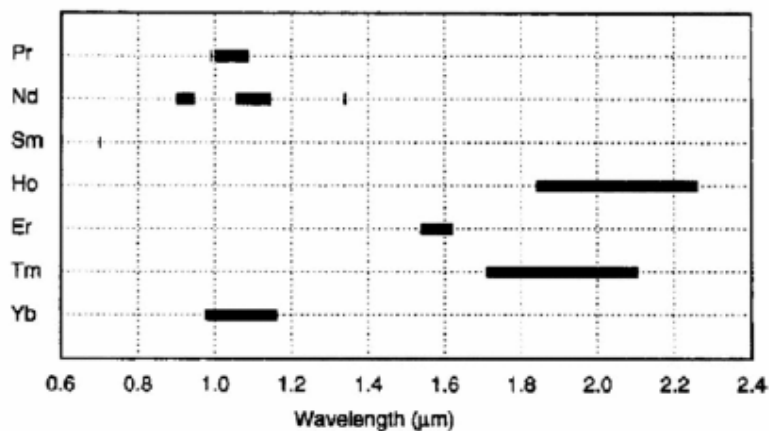


Figura 1.39 Rangos de longitud de onda en Fibras de Sílica dopadas con Tierras raras.

### 1.3.5.1 Láseres de Fibra de Onda Continua (CW)

Para que sea un láser de fibra, este debe tener su resonador o cavidad, comúnmente se usa un resonador Fabry-Perot. Existen varias maneras de realizar este tipo de resonador, utilizando reflectores dieléctricos, rejillas de Bragg, espejos de Faraday. En la siguiente figura se muestran los resonadores más comunes. En sí para ser un láser de onda continua se necesita principalmente el bombeo (diodo láser), el resonador, y los iones trivalentes de tierras raras [1.33].

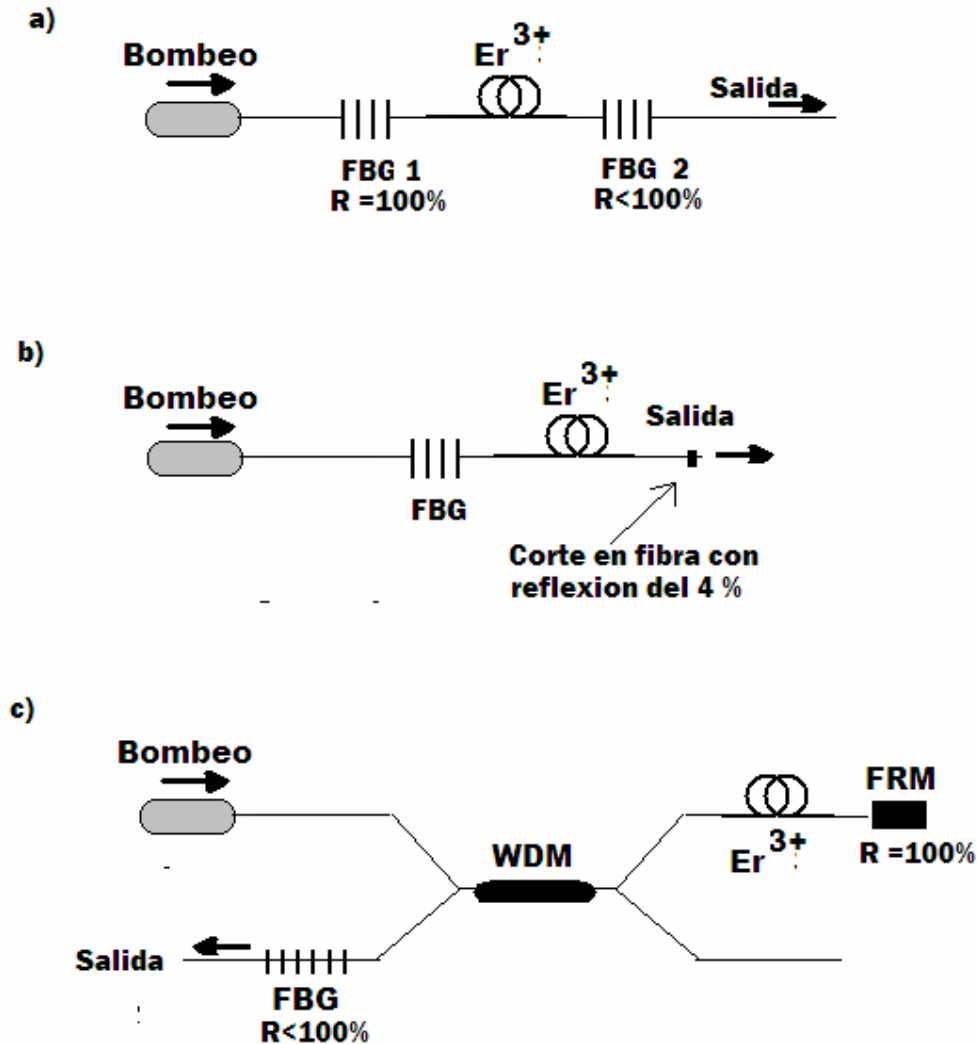


Figura 1.40 En esta figura se muestran diferentes tipos de resonadores: (a) Fabry-Perot con rejillas de Bragg; (b) Resonador formado por una rejilla de Bragg y un corte en la fibra; (c) Fabry-Perot formado por una rejilla de Bragg y un espejo de Faraday.

La figura 1.40 muestra diferentes arreglos de láseres de fibra con sus elementos principales hechos de fibra óptica, también se muestran las cavidades láser formadas por diferentes dispositivos ópticos. La figura 1.40 (c) tiene una cavidad formada por un espejo de Faraday (FRM) y una FBG, el FRM sirve para compensar birrefringencia de la fibra óptica y para tener un régimen de láser más estable.

### 1.3.5.2 Láseres de Fibra Switcheados

De igual manera que los láseres de fibra de onda continua, este también hace uso del diodo láser como bombeo, los resonadores y los iones trivalentes de tierras raras. Solo que en este caso se usa el método de conmutación de factor Q, donde Q es la calidad de la cavidad [1.34].

Si en una cavidad láser hacemos imposible la oscilación, aumentando las pérdidas en la cavidad (reduciendo el factor Q de la cavidad) pero manteniendo constante el bombeo, logramos un valor de inversión de población muy elevado. Si repentinamente se restablece la capacidad de oscilación de la cavidad reduciendo ahora las pérdidas en esta (aumentando su calidad Q), tendemos una situación en la que el medio activo se encuentra al máximo de inversión de población y muy por encima de su valor crítico. En estas circunstancias especiales, el medio activo está a tal grado fuera de equilibrio que la oscilación láser ocurrirá en forma de un corto e intenso pulso de luz láser, con lo cual la inversión de población del medio activo regresará bruscamente a un estado de equilibrio. Este método está fundamentado en la repentina variación de la calidad Q de la cavidad óptica. Los métodos más utilizados para variar la calidad Q de la cavidad láser es colocando dentro de la cavidad un dispositivo electro-óptico, un dispositivo magneto-óptico, un elemento acusto-óptico o un absorbedor dentro de la cavidad.

### 1.3.5.3 Láseres de Fibra con Mode-Locked

Modelocked es una técnica en la óptica por la cual un láser puede producir pulsos de luz con duraciones extremadamente cortas, hasta el rango de picosegundos ( $10^{12}$ ) o de los femtosegundos ( $10^{15}$ ) [1.35]. Por lo tanto, este tipo de láseres de fibra han sido capaces de producir pulsos cercanos de 30fs a 1 ns. Aunque la luz láser es quizás la forma más pura de luz, esta no tiene una longitud de onda. Todos los láseres producen la luz sobre cierto ancho de banda o gama natural de frecuencias en el cual opera. Otro factor que determina las frecuencias de la emisión de un láser es la cavidad óptica o cavidad resonante del láser. El caso más simple consiste en dos espejos planos, en donde el medio activo del láser se encuentra entre ellos. Normalmente para este resonador se usa una cavidad Fabry-Perot. Puesto que la luz es una onda, al estar reflejándose entre los espejos de la cavidad, la luz interfiere de manera constructiva y destructiva con sí mismo, conduciendo a la formación de ondas que están paradas entre los espejos.

Estas ondas paradas o fijas forman un sistema discreto de frecuencias, conocido como los modos longitudinales de la cavidad. Estos modos son las únicas frecuencias de la luz que uno mismo-están regenerando y permitido para oscilar por la cavidad resonante; el resto de las frecuencias de la luz son suprimidas por interferencia destructiva. Para una cavidad simple del plano-espejo, los modos permitidos son los para las cuales la distancia de la separación de los espejos  $L$  es un múltiplo exacto de la mitad de la longitud de onda del  $\lambda$ . En otras palabras la salida de un láser como función de tiempo depende de las amplitudes, frecuencias y fases relativas de los modos longitudinales oscilando en la cavidad láser. Para una cavidad de longitud  $L$  los modos posibles ( $n$ ) de oscilación son aquellos que satisfacen la condición:

$$n \frac{\lambda}{2} = L \quad (1.17)$$

En la práctica, la distancia de la separación de los espejos  $L$  es generalmente mucho mayor que la longitud de onda ( $\lambda$ ), así que los valores relevantes de  $n$  son grandes (alrededor 105 a 106). De más interés está la separación de la frecuencia entre cualquier dos modos adyacentes  $n$  y  $n+1$ ; esto es dada (para un resonador lineal vacío de la longitud  $L$ ) por  $\Delta\nu$ . Donde ( $c$ ) es la velocidad de la luz.

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (1.18)$$

.Cada modo longitudinal individual tiene sí mismo cierta anchura de banda o gama estrecha de frecuencias, pero esta anchura de banda es típicamente mucho más pequeña que la separación de la frecuencia del inter-modo.

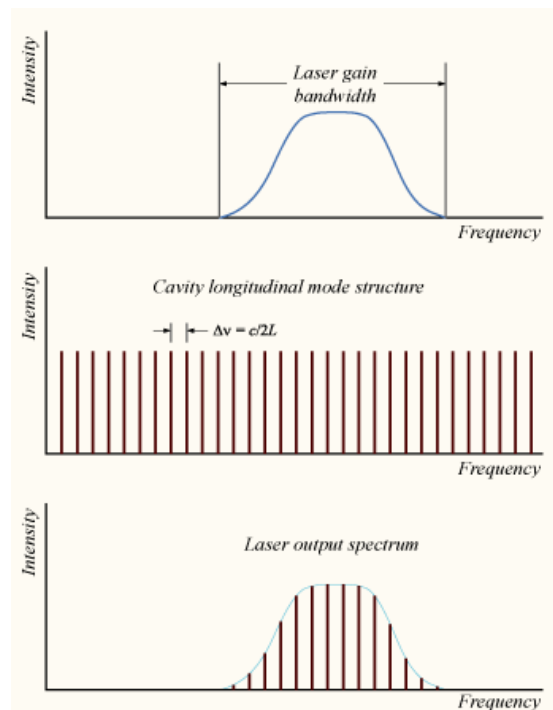


Figura 1.41 En esta figura se muestran tres figuras didácticas que ayudaran a comprender lo antes dicho. En la primera se muestra el ancho de banda en frecuencia de un láser, en la segunda modos longitudinales con una separación constante entre ellos. En la tercera se muestra el número de modos contenidos en el espectro del láser.

En un láser simple, cada uno de estos modos oscilará independientemente, sin una relación fija entre ellos, a esto se le conoce como un sistema de láser independientes que emite la luz en frecuencias diversas. La fase individual de las ondas ligeras en cada modo no es fija, y puede variar aleatoriamente debido a las cosas tales como cambios termalés en los materiales del láser. En láseres con solamente algunos modos oscilantes, la interferencia entre los modos puede causar efectos que batan en la salida del láser, conduciendo a las fluctuaciones al azar en intensidad; en láseres con muchos millares de modos, estos efectos de interferencia tienden para hacer un promedio a una intensidad cercano-constante de la salida, y la operación del láser se conoce como onda continua.

Si en vez de la oscilación independientemente, cada modo funciona con una fase fija entre él y los otros modos, la salida del láser se comporta absolutamente diferentemente. En vez de una intensidad al azar o constante de la salida, si todos los modos del láser interfieren periódicamente constructivo el uno con el otro, esto produce una explosión o un pulso de luz intensa [1.36]. Tal láser se encuentra en modo-bloqueado o fase-bloqueada.

El tiempo de separación de estos pulsos esta dado por:

$$\tau = 2L/c \quad (1.19)$$

Donde  $\tau$  también es el tiempo que tarda la luz en realizar un viaje de ida y vuelta en la cavidad láser. Esta a su vez, su inverso corresponde a la separación de frecuencia entre 2 modos. La duración de cada pulso de luz es determinada por el número de los modos que están oscilando en fase (en un láser verdadero, no es necesariamente verdad que los modos de todo el láser serán fase-bloqueados). Por lo tanto, los pulsos mas cortos e intensos serán obtenidos entre mayor sea el numero de modos en la cavidad.

Los métodos para producir modelocking en un láser se pueden clasificar como activos o pasivos. Los métodos activos implican típicamente el usar de una señal externa de inducir una modulación de la luz de la intra-cavidad. Los métodos pasivos no utilizan una señal externa, sino confían en poner un cierto elemento en la cavidad del láser que causa la modulación de la luz.

#### 1.3.5.4 Aplicación del láser de fibra a sensores de fibra óptica.

Una aplicación de este tipo de sensores es el *fiber laser hydrogen* sensor basado en el tiempo de dominio (figura 1.42). Este láser de fibra dopado con Erblio consta de un *taper* con un recubrimiento o película delgada de paladio colocado dentro de la cavidad láser. El *taper* actúa como elemento para sensar el hidrogeno, cuando el *taper* es expuesto al hidrogeno, su atenuación disminuye cambiando las perdidas en la cavidad comenzando una modificación en el régimen transitorio del láser. La concentración del hidrogeno es obtenida por una simple medición del tiempo de dominio en el régimen transitorio del láser.

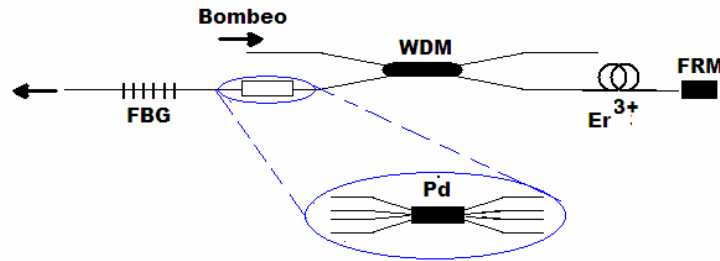


Figura 1.42 Arreglo experimental del sensor de hidrógeno de láser de fibra. Formado por espejo de Faraday (FRM), Rejilla de Bragg (FBG), Multiplexor (WDM) y la cabeza de sensor formada por fibra estrechada con un recubrimiento de Paladio.

Usualmente, la absorción dentro de la cavidad basada en sensores basados en láseres de fibra se basa en los cambios de potencia de emisión causada por las variaciones en las pérdidas de la cavidad. Tales sensores demuestran su eficiencia cuando el bombeo es cercano al umbral. Desafortunadamente debajo de esas condiciones la fibra dopada con erbio muestra un comportamiento pulsado continuo e uniforme. Por lo tanto este diseño de sensor se basa en la cavidad láser, ya que el hidrógeno afecta a la cavidad, y estos cambios hacen posible la medición del hidrógeno [1.37 – 1.38]. Este sistema explota el comportamiento del régimen transitorio del láser observado cuando el bombeo es switchado, en vez de confiar en los cambios de la potencia de emisión láser.

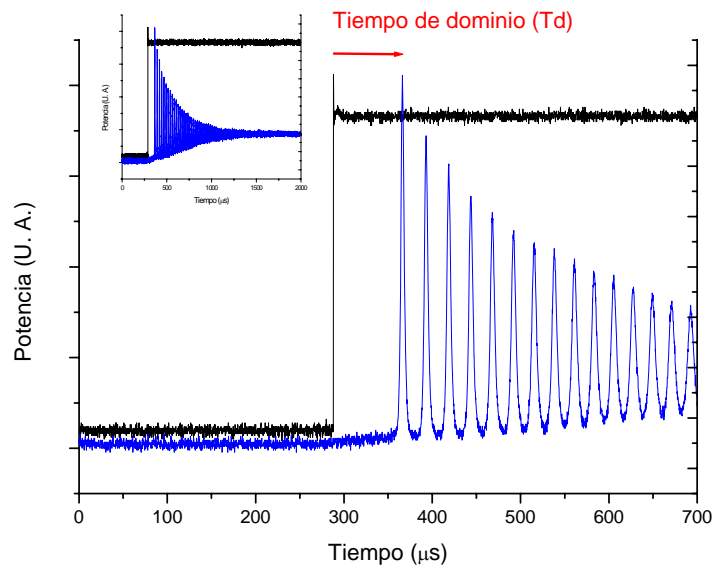


Figura 1.43 Régimen transitorio de un láser de fibra.

El régimen transitorio del láser se caracteriza por sus oscilaciones amortiguadas antes de llegar a un estado estable [1.39]. La base del mecanismo físico es basada en la interacción entre el campo oscilatorio en la cavidad y la inversión de población. El tiempo de dominio es el tiempo comprendido entre el comienzo del bombeo switchado y la presencia del primer pulso del régimen transitorio del láser. De acuerdo a la variación de la concentración del hidrógeno, el tiempo de dominio también varía, esto se puede apreciar fácilmente en la figura 1.43.

## 1.4 PROPOSITOS DE TRABAJO DE MAESTRÍA

Existen varios propósitos en este trabajo, de los cuales destacan los siguientes:

- Familiarizarse con el uso y manejo de las fibras ópticas. Este punto es muy importante debido a que este proyecto de tesis está conformado por una parte experimental y otra parte teórica. Por lo tanto, para diseñar un arreglo de fibra óptica para posteriormente aplicarlo como sensor, se debe tener el conocimiento de las propiedades ópticas de los distintos dispositivos ópticos (FBG, LPG, WDM, FRM, atenuadores, etc.) para obtener un comportamiento deseado.
- Lograr visualizar y comprobar por medio de arreglos experimentales diversas propiedades y comportamientos de sensores ópticos, así como de los dispositivos ópticos escritos en diversas publicaciones y libros de textos con la finalidad de comprobar de manera práctica tales escritos.
- Lograr una experiencia práctica en el manejo de materiales e instrumentos de manera eficiente del laboratorio de Fibras Ópticas.

En los párrafos anteriores se ha descrito varios de los propósitos generales de este proyecto, pero en sí los propósitos específicos serán los siguientes:

- Diseñar un sensor hecho con láser de fibra óptica con cavidad láser como elemento sensible, donde el medio activo será fibra dopada con iones trivalentes de erbio. A través de la cavidad, con este tipo de sensor podemos sensorar diversos parámetros de interés por medio de la variación de las pérdidas en la cavidad, un parámetro de interés actual podría ser el hidrógeno. El sensor en presencia del fluido provoca variaciones o modificaciones de las pérdidas en la cavidad, provocando un cambio en el régimen transitorio del láser. Para simular las variaciones de pérdidas en la cavidad se hará uso de un atenuador, es decir, el fin es diseñar y caracterizar el comportamiento del régimen transitorio y del tiempo de dominio del sensor de láser de fibra debido a las variaciones de las pérdidas en la cavidad.
- Dar inicio a una nueva forma de sensorar por medio de un sensor de láser de fibra. - Ésta se basa en la variación de pérdidas y corrimiento de los espectros en longitud de onda de una rejilla de Bragg cuando se le aplica calor, ésta rejilla que funge como uno de los espejos de la cavidad en coordinación con una rejilla de periodo largo que se encuentra dentro de la cavidad láser, afectarán el régimen transitorio del láser, lo cual es muy aplicable para realizar un sensor.
- Realizar un sensor hecho con láser de fibra dopada con Erbio semejante al anterior, solo con la diferencia de que este sensor se base en la modificación del régimen transitorio por el corrimiento del espectro de una rejilla de periodo largo al variar la temperatura en esta rejilla, en donde también la rejilla de Bragg funge como uno de los espejos de la cavidad láser.



## 1.5 CONCLUSIONES

En este capítulo se expusieron algunos de la gran variedad de sensores hechos de fibra óptica existentes, donde se manipuló una propiedad óptica para modificar la luz guiada, principalmente la intensidad y la longitud de onda.

Con los sensores expuestos, los conceptos o principios en los cuales se fundamentan tales sensores en este capítulo, el lector ya es capaz de familiarizarse con el tema y podrá darse cuenta del gran potencial y de las aplicaciones de este tipo de dispositivos ópticos.

Se adentró en el tema de los láseres de fibra, otra aplicación de la unión de varios dispositivos ópticos, ya que un láser de fibra está compuesto principalmente por una fuente de bombeo, el medio activo y el resonador o cavidad láser.

Los láseres de fibra pueden ser aplicados como sensores, donde se puede utilizar la cavidad láser como medio para medir un parámetro a sensar. Principio en el cual surgió la idea de estudiar y realizar este proyecto de tesis.

## 1.6 REFERENCIAS

---

- [1.1] E. Udd, "Fiber Optic Sensors: An introduction for Engineers and Scientists," ed., Wiley, New York, 1991.
- [1.2] J. Dakin and B. Culshaw, "Optical Fiber Sensors: Principles and Components," Vol.1, Artech, Boston, 1988.
- [1.3] Sait Khalil, Lulitkumor Bansal and Mahmoud, "Intrinsic fiber optic chemical sensor for the detection of dimethyl methylphosphode" Opt. Eng. 43(11) 2683 -2688., Nov., 2004.
- [1.4] S.K. Yao and C.K. Asawa, Fiber optical intensity sensors, IEEE J. Sel. Areas in Communication, SAC-1,3, 1983.
- [1.5] J. Villatoro, A.Díez, J.L. Cruz, and M.V. Andrés. : "In - line highly sensitive hydrogen sensor based on palladium- coated single-mode tapered fibers," IEEE Sensors Journal, Vol. 3, No. 4, August 2003.
- [1.6] J. Villatoro, A.Díez, J.L. Cruz, and M.V. Andrés. : "Highly sensitive optical hydrogen sensor using circular Pd-coated singlemode tapered fibre," Electronics Letters, 2<sup>nd</sup> August 2001, Vol. 37, No. 16.
- [1.7] J. Villatoro, D. Monzón Hernández, and E. Mejía. : "Fabrication and modeling of uniform – waist single mode tapered optical fiber sensors," Applied Optics Vol. 42, No. 13, 1 May 2003.
- [1.8] J. Villatoro, D. Luna Moreno, and D. Monzón Hernández. : "Optical fiber hydrogen sensor for concentrations below the lower explosive limit," Sensors and Actuators Published by Elsevier, January (2005).
- [1.9] J. Villatoro, D. Monzón Hernández, and d. Luna Moreno. : "In – line optical fiber sensors based on cladded multimode tapered fibers," Applied Optics Vol. 43, No. 32, 10 November 2004.
- [1.10] J. Villatoro and David Monzon Hernández. : "Fast detection of hydrogen with nano fiber tapers coated with ultra thin palladium layers," Optics Express Vol. 13, No. 13, 27 June 2005.
- [1.11] A.Othonos and K. Kalli, Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing, (Boston: Artech House, 1999), chapter 5.
- [1.12] A.D. Kersey, T.A. Berkoff, and W. W. Morey, "Fiber-grating based strain sensor with phase sensitive detection," Proc. SPIE, 1777, p. 61, 1992.
- [1.13] W.W. Morey, "Distributed fiber grating sensors", Proc. 7<sup>th</sup> Optical Fiber Sensor Conf., Iree Australia, Sydney, p. 285, 1990
- [1.14] M.G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow, and J. P. Dakin, "Optical in-fiber grating hight pressure sensor," Electron. Lett., 29, 4, p. 398-399, 1993.
- [1.15] W.W. Morey, G. Meltz, and J. M. Welss, "Evaluation of a fiber Bragg grating hydrostatic pressure sensor," Int. Conf. optical Fiber Sensors, PD-4, Monterrey, CA, 1992.
- [1.16] M. LeBlanc, S.T. Vohra, T. E. Tsai, and E.J. Friebele, " Transverse load sensing by use of pi-phase-shifted fiber Bragg gratings," Opt. Lett., 24, 16, pp. 1091-1093, 1999.

- [1.17] M.J. Gander, W. N. MacPheson, R. McBride, J.D. Jones, L.Zhang, and A. H. Greenaway, "Bend measurement using Bragg gratings in multicore fiber," *Electron. Lett.*, 36, 2, pp. 120-121, 2000.
- [1.18] M. H. Hathaway, N.E. Fisher, D.J. Webb, C.N. Pannell, D.A. Jackson, L.R. Gavrilov, J. W. Hand, L.Zhang, and I. Bennion, "Combined ultrasound and temperature sensor using a fiber Bragg grating," *Opt. Comm.*, 171, pp. 225-231, 1999
- [1.19] T. A. Berkoff and A.D. Kersey, "Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 8, 12, pp. 1667-1679, 1996.
- [1.20] Y. Ogawa, J.I. Iwasaki, and K. Nakamuta, "A multiplexing load monitoring system of power transmission lines using fiber Bragg gratings," *Proc. Int. Conf. Optical Fiber Sensors*, Williamsburg, VA, pp. 468-471, Oct. 1997.
- [1.21] P. J. Henderson, N. E. Fisher and D. A. Jackson, "Current metering using fiber-grating based interrogation of a conventional current transformer," *Proc. Int. Conf. Optical Fiber Sensors*, Williamsburg, VA, pp. 186-189, Oct. 1997.
- [1.22] A.D. Kersey and M.J. Marrone, "Fiber Bragg grating high- magnetic-field probe," *Proc. Int. Conf. Optical Fiber Sensors*, Glasgow, pp. 53-56, Oct. 1994.
- [1.23] G. Yu, J. A. R. Williams, W. Zhang, L.Zhang, "Bragg gratings based magnetic field sensor," *Proc. PREP 99*, Manchester, UK, pp. 179-186, Jan. 5-7, 1999.
- [1.24] Y. Yang, Y.T. Teng, J.S. Sirkis, B.A. Childers, J.P. Moore, and L.D. Melvin. "Characterization of fiber Bragg grating based Palladium tube hydrogen sensors," *Proc. Conf. Smart Structures and Materials*, California, March 1-4, 1999.
- [1.25] T. S . Yu Francis. : "Fiber Optics Sensors", Ed. Marcel, Dekker, Inc. (Chapter 2).
- [1.26] Zhengyu Huang, Yizheng Zhu, Xiaopei Chen, and Anbo Wang. : "Intrinsic Fabry-Perot Fiber Sensor for Temperature and Strain Measurements," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 17, No. 11, November 2005.
- [1.27] P.A. leilabady and M. Corke, " All-fiber-optic remote sensing of temperature employing interferometric techniques," *Opt. Lett.*, 12, p 773, 1987.
- [1.28] C. E. lee and H. F. Taylor, "Interferometric optical fibre sensors using internal mirrors," *Electron. Lett.*, 24, p. 193, 1988.
- [1.29] Stephen W. James, Imran Ishaq, G. J. Ashwell, and Ralph p. Tatam.: "Cascaded long - period gratings with nanostructured coatings," *Optics Letters* Vol. 30, No. 17, September 1, 2005.
- [1.30] R. Falciasi, A. G. Mignani, A. Vannini, *Sen. & Act. B*, **74**, 74-77 (2001)
- [1.31] Jong H. Lim, Hyun S. Jang, and Kyung S. Lee. : "Mach – Zehnder interferometer formed in a photonic crystal fiber based on a pair of long – period fiber gratings," *Optics Letters* Vol. 29, No. 4, February 14, 2004.
- [1.32] A. Dandridge, "Fiber optic sensors base don the Mach-Zehnder and Michelson interferometers", in *Fiber optic Sensors: An Introduction for engineers and Scientists*, Eric Udd, ed., Wiley, New York, 1991.
- [1.33] Michel J. F. Digonnet : "Rare – Earth – Doped Fiber Lasers and Amplifiers", 2da edición, Ed. Marcel, Dekker, Inc. (Chapter 3).

- [1.34] Michel J. F. Digonnet : “Rare – Earth – Doped Fiber Lasers and Amplifiers”, 2da edición, Ed. Marcel, Dekker, Inc. (Chapter 7).
- [1.35] Michel J. F. Digonnet : “Rare – Earth – Doped Fiber Lasers and Amplifiers”, 2da edición, Ed. Marcel, Dekker, Inc. (Chapter 8).
- [1.36] Anthony E. Siegman: “Lasers”. University Science Books, Sausalito, California (Chapter 27)
- [1.37] Yu. O. Barmenkov, A. Ortigosa – Blanch, A. Díez, J. L. Cruz, and V. Andrés. : “ Time – domain fiber laser hydrogen sensor,” Optics Letters Vol. 29, No. 21, November 1, 2004.
- [1.38] D. Zalvidea, A. Díez, J. L. Cruz, and M. V. Andrés. : “ Hydrogen sensor based on a palladium – coated fibre – taper with improved time – response,” Sensors and Actuators, accepted 23 May 2005, published by Elsevier.
- [1.39] I. J. Sola , J. C. Martín, and J.M. Álvarez, “Nonlinear response of a unidirectional erbium-doped fiber ring laser to sinusoidally modulated pump power,” Opt. Comm. 212, pp. 359- 369, (2002).

# Capítulo 2

## “Láser de fibra dopada con Erblio”

- 2.1 Introducción.
- 2.2 Espectroscopía básica.
- 2.3 Láser de fibra bombeado a 980nm.
- 2.4 Niveles de energía para el  $er^{+3}$  bombeado a 980nm.
- 2.5 Dispositivos opticos usados en el láser de fibra dopado con  $Er^{+3}$ .
  - 2.5.1 Espejo de Faraday.
  - 2.5.2 Multiplexor de división de longitud de onda (WDM).
- 2.6 Conclusiones.
- 2.7 Referencias.

## 2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se mostrara las principales propiedades espectroscópicas del erbio, con el fin de comprender los niveles de energía del erbio, ya que de estos niveles de energía se obtendrán las ecuaciones de razón que describen la evolución de la población de los niveles energéticos.

Como el láser de fibra esta compuesto de un medio activo formad por fibra dopada con erbio, es fundamental conocer la fenomenología de lo que sucede cuando esta fibra dopada funge como amplificador. También se dará una reseña de los dispositivos ópticos que forman el láser de fibra con el cual se desarrollaran los diversos experimentos.

Se explicara a que tipo de longitud de onda es conveniente bombear para trabajar con una longitud de onda apta para las comunicaciones.

## 2.2 ESPECTROSCOPIA BÁSICA

Los láseres de fibra dopada con Erblio han sido extensamente estudiados, sobre todo por su potencial en las comunicaciones. Este tipo de dispositivo produce un amplio rango de banda, desde un ancho de banda corto a uno amplio, ya sea para láseres de modo continuo o láseres pulsados, todos para un rango en longitud de onda de  $1.5\mu\text{m}$  aproximadamente a  $1.62\mu\text{m}$  para una transición  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  de Erblio. En la tabla 2.1 se muestra resumida las principales propiedades de un láser de fibra de onda continua.

**Table 3** Characteristics of Representative cw Er-Doped Silica Fiber Lasers, Listed in Order of Increasing Pump Wavelength

| Laser wavelength    | Pump wavelength     | Erbium concentration                   | Fiber length | Other features      | Threshold             | Slope efficiency     | Output power @ max. pump power  |
|---------------------|---------------------|--|--------------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------|
| 1.566 $\mu\text{m}$ | 514.5 nm            | 35 ppm Er ion                          | 13 m         | Ar-ion laser pump   | 44 mW <sup>(b)</sup>  | 10% <sup>(b)</sup>   | 56 mW @ 0.6 W <sup>(b)</sup>    |
| ~1.56 $\mu\text{m}$ | 532 nm              | 150 ppm Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1 m          | Ring laser          | 10 mW <sup>(b)</sup>  | 5.1% <sup>(b)</sup>  | 1.8 mW @ 45 mW <sup>(b)</sup>   |
| 1.535 $\mu\text{m}$ | 532 nm              | 100 ppm Er                             | 15 m         | Doubled Nd:YAG      | NA                    | 28% (NA)             | 1 W @ 3.6 W <sup>(NA)</sup>     |
| 1.56 $\mu\text{m}$  | 806 nm              | 500 ppm Er                             | 3.7 m        | LD array pump       | 10 mW <sup>(b)</sup>  | 16% <sup>(b)</sup>   | 8 mW @ 56 mW <sup>(b)</sup>     |
| 1.62 $\mu\text{m}$  | 808 nm              | 300 ppm Er                             | 1.5 m        | LD pump             | 3 mW <sup>(b)</sup>   | 3.3% <sup>(b)</sup>  | 0.13 mW @ 7 mW <sup>(b)</sup>   |
| 1.56 $\mu\text{m}$  | 980 nm              | 0.08 wt% Er                            | 0.9 m        | Dye laser           | 2.5 mW <sup>(a)</sup> | 58% <sup>(a)</sup>   | 4.7 mW @ 11.3 mW <sup>(a)</sup> |
| ~1.54 $\mu\text{m}$ | 980 nm              | 1100 ppm Er                            | 9.5 m        | Ti:sapphire/Tunable | >10 mW <sup>(b)</sup> | >49% <sup>(b)</sup>  | 260 mW @ 540 mW <sup>(b)</sup>  |
| 1.552 $\mu\text{m}$ | ~1.46 $\mu\text{m}$ | 1370 ppm Er ion                        | 5 m          | Two LD pumps        | 37 mW <sup>(b)</sup>  | 14% <sup>(b)</sup>   | 8 mW @ 93 mW <sup>(b)</sup>     |
| 1.552 $\mu\text{m}$ | 1.47 $\mu\text{m}$  | 1370 ppm Er ion                        | 7 m          | LD pump             | 44 mW <sup>(a)</sup>  | 6.3% <sup>(a)</sup>  | ~1 mW @ 60 mW <sup>(a)</sup>    |
| 1.555 $\mu\text{m}$ | 1.48 $\mu\text{m}$  | ~45 ppm Er                             | 60 m         | LD pump/Ring laser  | 6.5 mW <sup>(b)</sup> | 38.8% <sup>(b)</sup> | 3.3 mW @ 15 mW <sup>(b)</sup>   |
| ~1.56 $\mu\text{m}$ | 1.48 $\mu\text{m}$  | 110 ppm Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 42.6 m       | LD pump             | 4.8 mW <sup>(a)</sup> | 58.6% <sup>(a)</sup> | 14.2 mW @ 29 mW <sup>(a)</sup>  |

Tabla 2.1 Características representativas de un láser de fibra de onda continua dopado con Erbio para diferentes bombeos en longitud de onda[2.1].

La principal transición de interés en el láser de fibra dopada con Erblio es en la alta ganancia  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ , transición centrada alrededor de 1.55  $\mu\text{m}$ . Varias bandas estan disponibles para poblar el estado metaestable  ${}^4I_{13/2}$ , las bandas mas relevantes para bombear se muestran en la siguiente diagrama de niveles (Figura 2.1) :

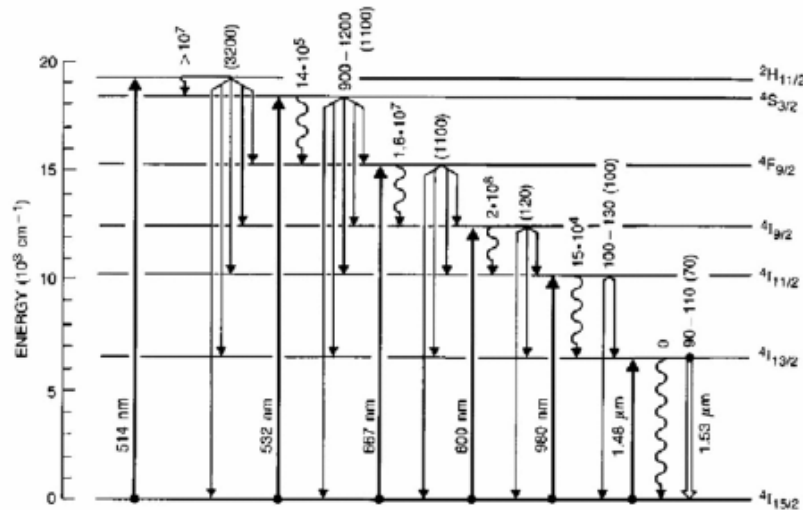


Figura 2.1 Diagrama de niveles de Energía del Erblio, donde se muestra las bandas de absorción, así como las transiciones radiativas y no radiativas. Los números corresponden a a la razon de decaimiento (s<sup>-1</sup>) [2.2]

Con la tecnología actual, ya es posible bombear láseres con longitudes de onda cercanas a 810, 980 y 1480 nm. Otras bandas útiles de bombeo incluyen 660, 532, 514.5nm. Desafortunadamente los bombeos para 514.5 y 810 nm sufren un fuerte fenómeno llamado Absorción de Estado Excitado (ESA), esto provoca un indeseable pérdida en los fotones de bombeo. Como sea, la sílica dopada con Erblio puede ser bombeada eficientemente a varias longitudes de ondas libres del fenómeno ESA, incluyendo a aquellas cercanas a 532, 660, 980 y 1480nm. Sin embargo, para bombeos cercanos a 532 y 660nm, se presentan pérdidas considerables por el efecto Stokes, mientras que para bombeos cercanos a 980 y 1480 nm, las pérdidas por el efecto Stokes son mínimas, razón por la cual es preferible trabajar con estos bombeos. Sin embargo, es preferible trabajar con bombeos de 980nm, debido a que es mucho mas costoso generar bombeos a una longitud de onda de 1480nm.

## 2.3 LÁSER DE FIBRA BOMBEADO A 980nm

Bombeando láseres de fibra dopado con Erblio cerca de los 980nm es atractivo, debido a que en esta longitud de onda se tiene la mas alta eficiencia en la ganancia, además de eso, también esta libre de del fenómeno ESA.



En un láser de tres niveles de energía como lo es el láser de fibra dopado con Erblio, la longitud de la fibra es un parámetro de diseño muy importante que afecta el Umbral (*threshold*), la pendiente de eficiencia y la longitud de onda. Cualquier longitud de fibra cuando no es bombeada, actúa como un fuerte absorbedor de la longitud de onda del láser de fibra e incrementa el umbral. Por consiguiente, para un juego de fibras y parámetros de bombeo dados, existe una longitud de fibra que minimiza el Umbral. Por lo tanto, incrementando la longitud de la fibra aumenta la potencia de bombeo absorbida, y de esta manera aumenta la potencia de salida. Es obvio que los cambios en la potencia de salida y absorbida dependen de la potencia de bombeo.

La longitud de la fibra también afecta la longitud de onda del láser de fibra, si la fibra es demasiado larga, la parte terminal de la fibra más alejada de la fuente de bombeo permanece intacta y absorbe fuertemente la señal, normalmente en el lado de la longitud de onda de menor valor en el espectro de ganancia, donde la absorción del estado base (GSA) es fuerte. Como resultado, si la longitud de la fibra se incrementa, la longitud de onda del láser tiene un corrimiento e incrementándose ésta hacia longitudes de onda mayor.

La dependencia de la longitud de onda del láser de fibra con la longitud de la fibra puede ser abrupta o lisa, y esto es afectado por la espectroscopia. El cambio de la longitud de onda es siempre pronunciado, y un ejemplo de esto se ilustra en la figura 2.2.

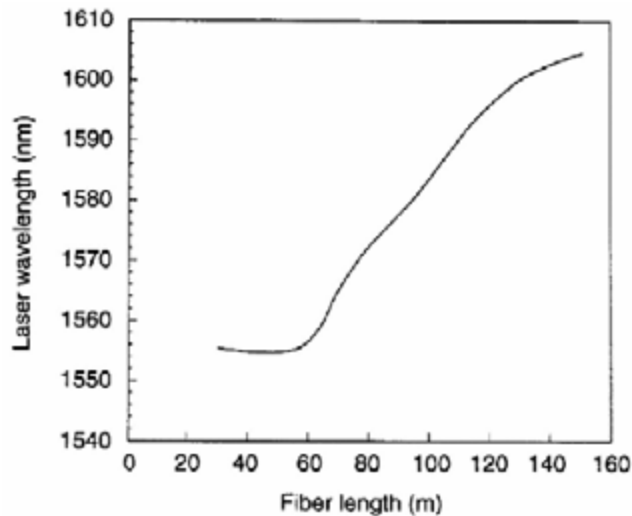


Figura 2.2 Dependencia de la longitud de onda del láser respecto a la longitud de la fibra para un láser de fibra dopada con Erblio bombeado a 808 nm con cavidad formada con espejos en bulto. [2.1]

En la figura 2.2 se muestra un gráfico relacionado a un láser de fibra con cavidad formada con espejos en bulto, ya que si el resonador estuviera formado con FBG, el espectro resultante no tendría un corrimiento significativo con los parámetros del láser (bombeo, cavidad de la fibra dopada).

## 2.4 NIVELES DE ENERGIA PARA EL $\text{Er}^{+3}$ BOMBEADO A 980nm

Las ecuaciones de razón o balance de un láser pueden ser usadas para describir el comportamiento de osciladores y amplificadores pulsados siempre que la dinámica temporal involucrada sea lenta comparada con el recíproco del ancho de línea de la transición láser, condición que se cumple a primera instancia.

Contrario a la situación encontrada en los láseres en Mode-Locked, los láseres en Q-Switch los pulsos ópticos no son lo suficientemente cortos para afectar la dispersión. Los efectos no lineales serán ignorados en esta descripción, ya que la sílica es un material que prácticamente carece de propiedades no lineales. Sin embargo, la propagación guiada de un modo bien confinado a largas distancias en una fibra óptica con bajas pérdidas, puede aumentar los efectos no lineales, aun en bajas potencias. Estos efectos pueden ser dañinos y usualmente ocurren antes de que surja un daño óptico.

A continuación se modelara un láser de tres niveles, cuyo diagrama de niveles de energía se muestra a continuación:

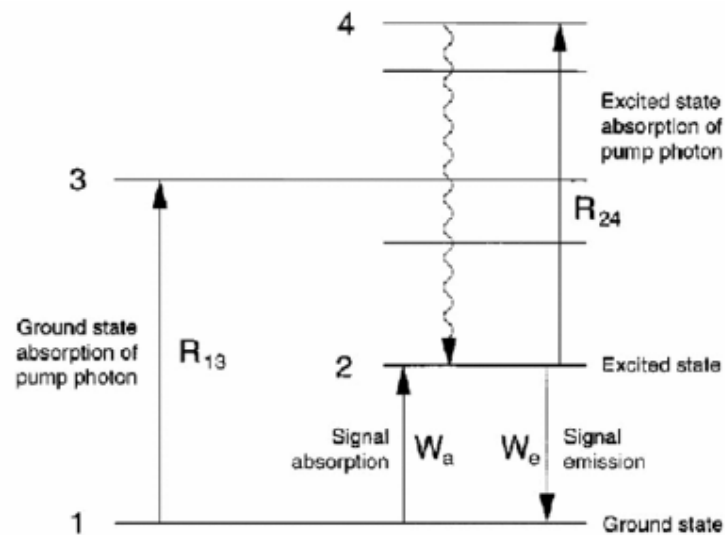


Figura 2.3 Niveles de Energía del Erbio cuando es bombeado a 980nm [2.3]

La figura 2.3 es aplicable para el caso en el cual se está desarrollando el análisis experimental, es decir, para el caso de un láser de fibra bombeado a 980 nm. Iones en el estado base son excitados hacia la banda de bombeo por la absorción de fotones bombeados de energía  $h\nu_p$ , donde  $h$  es la constante de Planck y  $\nu_p$  es la frecuencia de bombeo. La relajación del nivel superior (nivel 4) sucede demasiado rápido debido a la interacción multifonónica, ocurre mucho más rápido que la razón típica de bombeo, que puede ser considerada instantánea, así que la población total de iones está dividida solamente entre los niveles (1) y (2). El decaimiento del nivel 2 al estado base por la emisión espontánea de fotones con energía  $h\nu_s$ , donde  $\nu_s$  es la frecuencia de la señal óptica, tal decaimiento ocurre en un tiempo de constante  $\tau_2$ . La razón de las

transiciones estimuladas ( $W_e$  y  $W_a$ ) entre los niveles (1) y (2) son determinados por la intensidad del campo del láser y la sección eficaz de interacción entre fotones y átomos (*cross sections*) para la emisión ( $\sigma_e$ ) y para la absorción ( $\sigma_a$ ). La absorción por el estado excitado del bombeo (R24) y del campo láser no serán tomadas en cuenta para este modelo, debido a que no toman parte en la operación práctica del láser de fibra dopados con Erblio (bombeado a 980 nm) cuando este se encuentra operando cerca de 1.55  $\mu\text{m}$ .

Con lo antes dicho en el párrafo anterior, se puede modelar un diagrama de dos niveles de energía equivalente (figura 2.4) que describa el comportamiento de las transiciones láser para un láser de fibra dopado con Erblio con un bombeo en 980 nm.

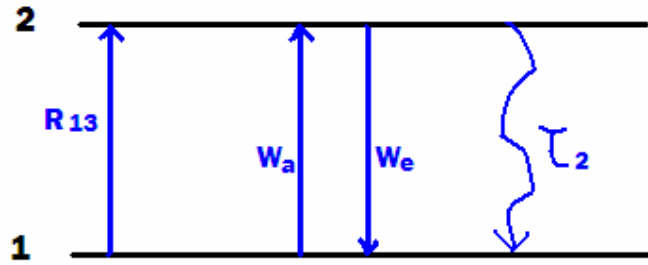


Figura 2.4 Diagrama de Niveles de Energía equivalente para un láser de Fibra dopado con Erblio bombeado a 980 nm.

Por lo tanto, la evolución de la población en los niveles del láser puede ser descrita por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial N_2(z,t)}{\partial t} = R_{13}(z,t)N_1(z,t) + W_a(z,t)N_1(z,t) - W_e(z,t)N_2 - \frac{1}{\tau_2}N_2(z,t)$$

Factorizando:

$$\frac{\partial N_2(z,t)}{\partial t} = [R_{13}(z,t) + W_a(z,t)]N_1(z,t) - \left[ W_e(z,t) + \frac{1}{\tau_2} \right] N_2(z,t) \quad (2.1)$$

$$N_1(z,t) + N_2(z,t) = N_0 \quad (2.2)$$

Donde  $N_j(z,t)$  es la densidad de población en el nivel  $j$  en la posición  $z$  a lo largo de la fibra dopada a un tiempo  $t$ , y  $N_0$  es la total concentración total de iones [2.4]. La razón de cambio en las transiciones son:

$$R_{13}(z,t) = \frac{\sigma_p [I_p^+(z,t) + I_p^-(z,t)]}{h\nu_p} \quad (2.3)$$

$$W_a(z,t) = \frac{\sigma_a [I_s^+(z,t) + I_s^-(z,t)]}{h\nu_s} \quad (2.4)$$

$$W_e(z,t) = \frac{\sigma_e [I_s^+(z,t) + I_s^-(z,t)]}{h\nu_s} \quad (2.5)$$

Donde  $\sigma_p$  es la sección eficaz del GSA del bombeo,  $I_p^+(I_s^+)$  y  $I_p^-(I_s^-)$  representan la intensidad del bombeo (señal) del modo propagándose en la dirección  $z$  positiva y negativa respectivamente. Normalmente  $I_p^-(z,t) = 0$  debido a que se supone que el bombeo se guía o direcciona hacia un solo lado.

Las ecuaciones (2.1) hasta (2.5) describen la evolución temporal de la inversión de población en  $z$  a lo largo de de la fibra óptica. El modelo debe ser completado por las ecuaciones que describen la evolución de las intensidades de bombeo (2.6) y de la señal (2.7), cual puede ser derivada considerando la energía de balance para cada punto a lo largo de la fibra.

$$\left[ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} \right] I_p^\pm(z,t) = -\sigma_p I_p^\pm(z,t) N_1(z,t) \quad (2.6)$$

$$\left[ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} \right] I_s^\pm(z,t) = -\sigma_s I_s^\pm(z,t) [N_2(z,t) - \gamma_s N_1(z,t)] + \frac{\Delta\Omega N_2(z,t) h\nu_s}{4\pi\tau_2} \quad (2.7)$$

Donde  $\gamma_s = \frac{\sigma_a}{\sigma_e}$ . El primer término del lado derecho de la ecuación (2.7) representa la contribución de la transición estimulada al campo láser. El segundo término originado de la emisión espontánea,  $\frac{\Delta\Omega}{4\pi}$  representa parte de fotones espontáneos que son guiados, donde  $\Delta\Omega$  es el ángulo de captura que depende de la apertura numérica de la fibra.

## 2.5 DISPOSITIVOS OPTICOS USADOS EN EL LÁSER DE FIBRA DOPADO CON $Er^{+3}$

En esta sección se describirá conceptos básicos de los dispositivos ópticos hechos de fibra a utilizar en el láser de fibra dopado con Erblio bombeado a 980nm. En el arreglo experimental se utilizaran los siguientes dispositivos ópticos:

- Espejo de Faraday.
- Multiplexor de división de longitud de onda (WDM).
- Rejilla de Bragg (FBG).
- Rejilla de periodo largo (LPG).

### 2.5.1 Espejo de Faraday

En 1821 Faraday construyó dos dispositivos para producir lo que ahora llamamos rotación electromagnética. En 1845 descubrió el efecto magneto óptico. Evidencia experimental de que la luz y el magnetismo estas relacionados. Las bases teóricas de la relación (radiación electromagnética) fue desarrollada en los 1860's y 1870's por Maxwell. Materiales que naturalmente actúan como rotadores de polarización, tiene la propiedad conocida "actividad óptica"

Si un medio ópticamente isotrópico es puesto en un campo magnético, induce una anisotropía y el plano de polarización lineal propagándose en la dirección del campo, sufre una rotación  $\beta$ . A esto se le conoce como Efecto Faraday o Magneto óptico [2.5].

$$\beta = vBd$$

$\beta$ : ángulo de rotación [rad]

$v$ : Cte. de Verdet [rad / T.m]

$B$ : campo magnético [T]

$d$ : longitud del cristal [m]

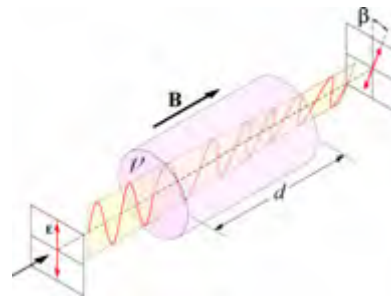


Figura 2.5 Efecto Faraday.

El efecto Faraday es resultado de resonancia ferromagnética. La resonancia causa que la onda se descomponga en dos rayos polarizados circularmente con propagaciones a diferentes velocidades (*birrefringencia circular*). Se considera que los rayos se recombinan cuando emergen del medio, sin embargo, debido a la diferencia de velocidades de propagación hacen que la fase neta se anule, resultando la rotación en ángulo de la polarización lineal.

En el espejo de Faraday, cuando la onda se propaga en dirección del campo magnético  $\mathbf{B}$ , el medio se comporta como un medio ópticamente activo *left-handed* y cuando se está propagando en la dirección opuesta debido a una reflexión, el medio se comporta como un medio ópticamente activo *right-handed*, por lo tanto la reflexión es doble.

En particular el espejo de Faraday rota el plano de polarización  $45^\circ$  y cuando la luz se refleja existe una rotación total a  $90^\circ$  siendo ésta perpendicular a la polarización de entrada. El espejo de Farady se puede representar por medio de un rotador y un espejo (figura 2.6).

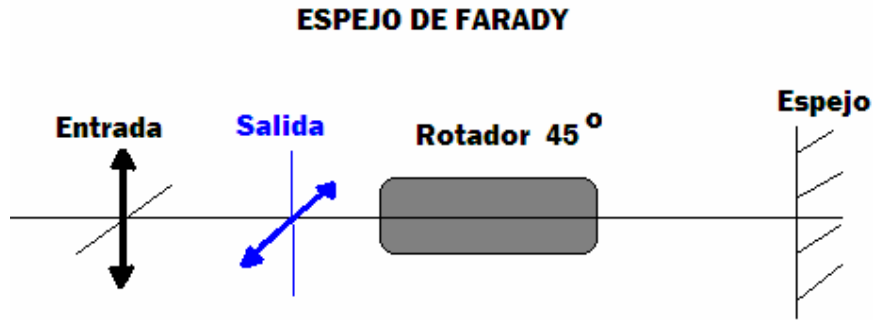


Figura 2.6 Forma de representar un espejo de Faraday por medio de un espejo y un rotador a 45°.

El espejo de Faraday puede ayudar a eliminar sensibilidad a la polarización de un sistema de fibra óptica, como lo es el eliminar polarización de las fluctuaciones producidas en un sistema de un láser de fibra óptica, es decir, ayuda a tener una buena estabilidad en láseres de este tipo.

### 2.5.2 Multiplexor de división de longitud de onda (WDM)

El WDM (multiplexación de división de longitud de onda), en el cual varios canales banda-modulados se transmiten a lo largo de una sola fibra pero con cada canal situado en una diversa longitud de onda (figura 2.7). Los canales del WDM se separan en longitud de onda para evitar interferencia cuando son multiplexados por un de fibra óptica no-ideal. Las longitudes de onda se pueden encaminar individualmente a través de una red o recuperar individualmente por los componentes longitud de onda-selectivos. El WDM permite que utilicemos mucha de la anchura de banda de la fibra, aunque en varios dispositivos, sistemas, y ediciones de la red limitarán la utilización de la anchura de banda completa de la fibra.

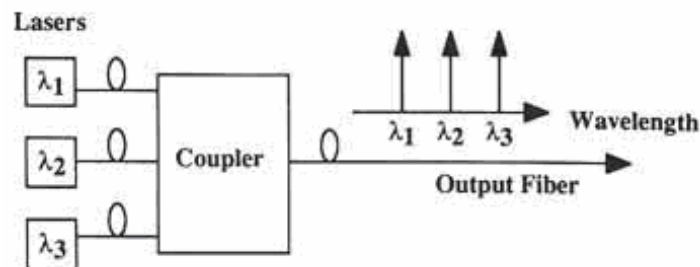


Figura 2.7 Diagrama esquemático de un WDM, donde diversas longitudes de onda pueden propagarse a través de una fibra óptica.

Un WDM común de fibra tiene la siguiente forma:

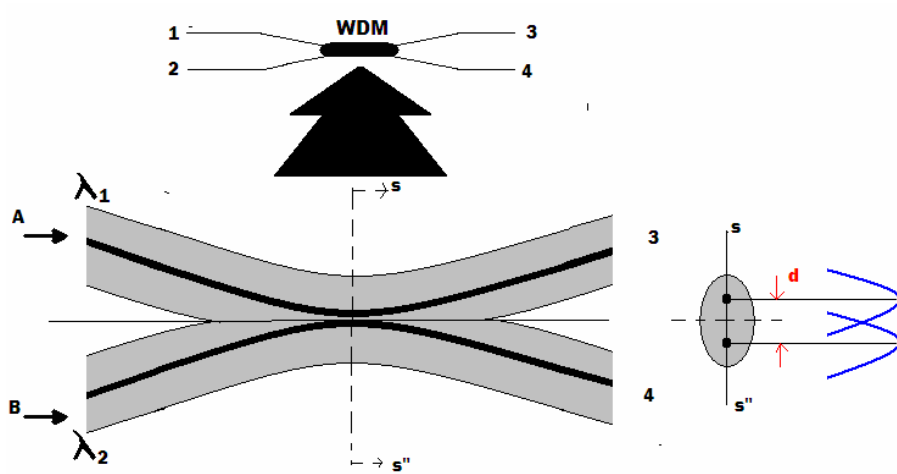


Figura 2.8 Vista estructural y de un corte transversal de un WDM hecho de fibra.

En la figura anterior se muestra como se encuentra físicamente un WDM típico, como la luz guiada no está centrada en el núcleo, existe un traslape. El traslape y el acoplamiento de la luz, son unos de los principios en el cual se basa la propagación de diversas longitudes de onda a través de una fibra.

El atenuador tiene el fin de inserción de pérdidas, que para nuestro caso, en un sistema láser de fibra, colocado dentro de la cavidad. En cuanto a los conceptos de la rejilla de Bragg y rejilla de periodo largo, éstos ya fueron expuestos en el capítulo 1 sección 1.3.2 y 1.3.4 respectivamente.

## 2.6 CONCLUSIONES

Se describieron las principales características espectroscópicas de erbio, así como los niveles de energía y la evolución de la población en tales niveles.

Un láser de fibra dopado con erbio bombeado a 980 nm se puede representar con un diagrama de dos niveles de energía ( ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ).

Para trabajar en una longitud de onda apta para las comunicaciones (aproximadamente 1550nm) es más óptimo trabajar con bombeos de 980nm. Desafortunadamente los bombeos para 514.5 y 810 nm sufren un fuerte fenómeno llamado Absorción de Estado Excitado (ESA), esto provoca una indeseable pérdida en los fotones de bombeo. Como sea, la sílica dopada con Erblio puede ser bombeada eficientemente a varias longitudes de ondas libres del fenómeno ESA, incluyendo a aquellas cercanas a 532, 660, 980 y 1480nm. Sin embargo, para bombeos cercanos a 532 y 660nm, se presentan pérdidas considerables por el efecto Stokes, mientras que para bombeos cercanos a 980 y 1480 nm, las pérdidas por el efecto Stokes son mínimas, razón por la cual es preferible trabajar con estos bombeos. Sin embargo, es preferible trabajar con bombeos de 980nm, debido a que es mucho más costoso generar bombeos a una longitud de onda de 1480nm.



---

## 2.7 REFERENCIAS

---

- [2.1] Michel J. F. Digonnet : “Rare – Earth – Doped Fiber Lasers and Amplifiers”, 2da edición, Ed. Marcel, Dekker, Inc. (Chapter 3).
- [2.2] Michel J. F. Digonnet : “Rare – Earth – Doped Fiber Lasers and Amplifiers”, 2da edición, Ed. Marcel, Dekker, Inc. (Chapter 10).
- [2.3] Michel J. F. Digonnet : “Rare – Earth – Doped Fiber Lasers and Amplifiers”, 2da edición, Ed. Marcel, Dekker, Inc. (Chapter 7).
- [2.4] I.J. Sola, J.C. Martin, J.M. Álvarez, and S. Jarabo. : “Erbium doped fibre characterisation by laser transient behaviour analysis” *Optics Communications* 193 (2001) 133-140.
- [2.5] J.L. Cruz, M.V. Andrés, and M.A. Hernández.. : “Faraday effect in standard optical fibers: dispersion of the effective Verdet constant,” *Applied Optics* Vol. 35, No. 6, 20 February 1996.

# **Capítulo 3**

## **“Estudio experimental del régimen transitorio de un láser de fibra dopado con erbio”**

- 3.1 Introducción
- 3.2 Desarrollo experimental preliminar
- 3.3 Estudio del láser de fibra con pérdidas de la cavidad láser.
- 3.4 Estudio del láser de fibra con pérdidas en la cavidad variables por la temperatura aplicada a la rejilla de bragg.
- 3.5 Estudio del láser de fibra con pérdidas en la cavidad variables por la temperatura aplicada a la rejilla de periodo largo.
- 3.6 Conclusiones.

### 3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se mostrarán los diversos arreglos experimentales utilizados para armar los sensores basados en un láser de fibra, así como la metodología utilizada para realizar el estudio de los sensores diseñados.

Se realizarán tres tipos de estos sensores con cavidad láser como elemento sensible a través de la variación de las pérdidas del resonador. Para el primer sensor se variarán las pérdidas de la cavidad por medio de un atenuador, para el segundo y tercer sensor, la variación de pérdidas de la cavidad se produce por la interacción de corrimientos de los espectros de una FBG y una LPG cuando se les aplica calor por separado.

A través de la cavidad, con estos tipos de sensores podemos sensar diversos parámetros de interés, al existir modificaciones de las pérdidas de la cavidad, ésta provoca un cambio en el régimen transitorio del láser, el cual se puede estudiar su comportamiento o tendencia a tales cambios del régimen transitorio y del tiempo de dominio del sensor de láser de fibra.

### 3.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL PRELIMINAR

Como primer paso se armó el siguiente arreglo experimental mostrado en la figura 3.1, con la finalidad de estudiar el comportamiento y la potencia de bombeo generada por el diodo láser.

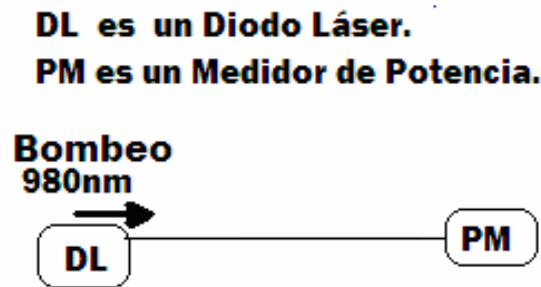


Fig. 3.1 Arreglo experimental para estudiar el comportamiento de la potencia de salida debido al bombeo aplicado al diodo láser.

Con el arreglo antes mostrado se graficó la pendiente de la potencia de salida del diodo láser, a la que llamaremos potencia de bombeo, éste comportamiento se ilustra en la figura 3.2 con la finalidad de localizar el umbral.

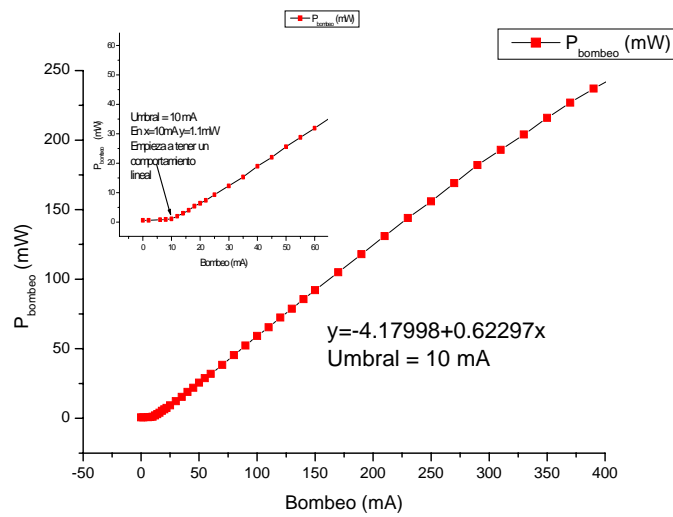


Fig. 3.2 Localización del Umbral y tendencia lineal del laseo del arreglo mostrado en la figura 3.1

Se puede notar que a un bombeo entre 0 y 10 existe un comportamiento no lineal debido a la emisión espontánea. A un bombeo mayor de 10 mA el comportamiento tiende a ser lineal, esta linealidad expresa el laseo existente en la fibra óptica. Cuando se empieza a variar el bombeo (mA) de manera creciente, la potencia de salida con respecto a la variación de este bombeo comienza a ser lineal, a ese valor se le conoce umbral, llamado comúnmente *threshold*. Este valor describe el bombeo necesario para que exista la generación láser. Al ir incrementando el bombeo por encima del valor del umbral, se amplificará la potencia de salida de manera lineal, tal y como se aprecia en la figura 3.2.

Se prosiguió a localizar el umbral de otro arreglo experimental, en este arreglo se añadió un espejo de Faraday (FRM), una rejilla de Bragg y fibra dopada con Erblio (figura 3.3). La finalidad de agregar el espejo de Faraday y la FBG es la de formar la cavidad láser del láser de fibra, mientras que la fibra dopada con erbio funge como el medio activo para provocar la amplificación láser. El uso del FRM ayuda a hacer un láser estable, además, tiene un espectro mas amplio de trabajo que una FBG, así se puede evitar el problema de que las longitudes de onda de resonancia no coincidan por causas externas cuando se usa una cavidad formada por dos FBG.

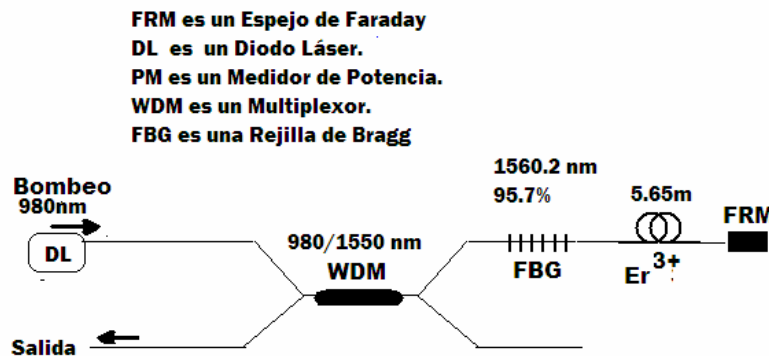


Fig. 3.3 Diagrama esquemático de un láser de fibra óptica.

De igual manera, se tomaron las variaciones de la potencia de salida al ir variando el bombeo. Para el láser de fibra mostrado en la figura 3.3 se obtuvo un umbral de 27.3 mA correspondiente a una potencia de bombeo de 12.83mW. Esto se logra apreciar en la figura 3.4.

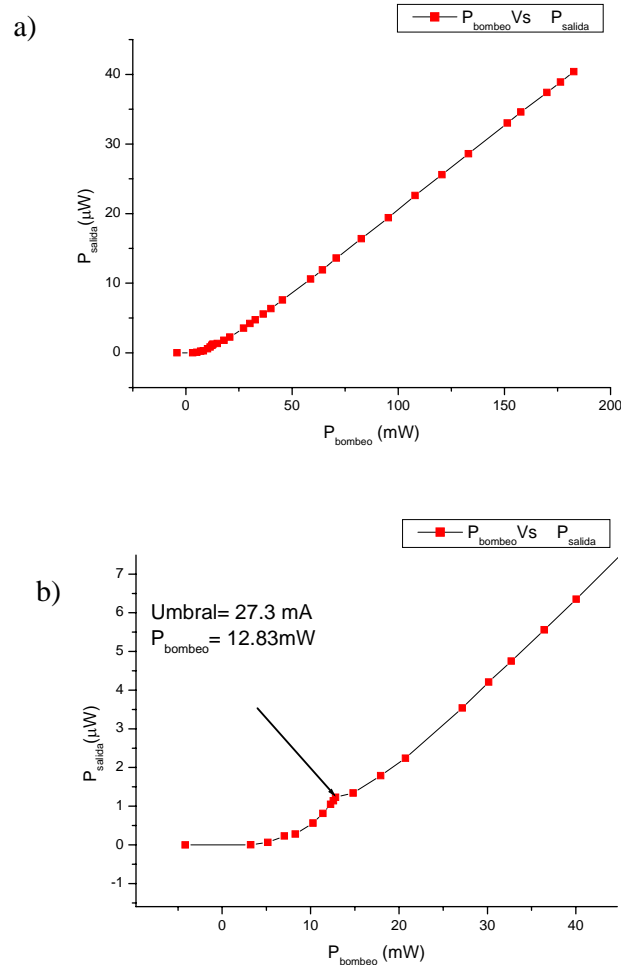


Fig. 3.4 Localización del Umbral para el láser de Fibra mostrado en la figura 3.3 En la figura 3.4 a) se observa la tendencia lineal del láser de fibra óptica. La figura 3.4 b) es un acercamiento de la figura 3.4 a) con el fin de visualizar el Umbral.

En la figura 3.4 se logra visualizar fácilmente el cambio abrupto donde comienza a comportarse de forma lineal a una potencia de bombeo de 12.83 mW, mismo punto en el cual indica la localización del umbral.

Una manera de comprobar la localización del umbral es conectando un analizador de espectros a la salida. Por lo tanto, se obtuvieron diversos espectros correspondientes a diferentes bombeos, es decir, se fue incrementando el bombeo hasta visualizar el láser en dichos espectros. Es sencillo visualizar cuando el láser de fibra empieza a lasear, debido a que en el espectro se genera un pico en la longitud de onda de resonancia de la rejilla de Bragg, tal y como se muestra en la figura 3.5.

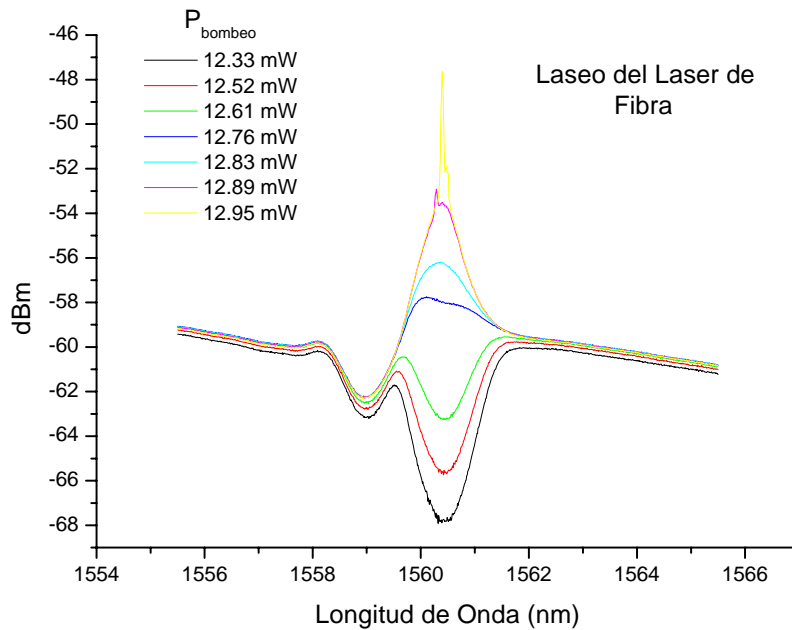


Fig. 3.5 Esta figura muestra los espectros obtenidos al ir variando el bombeo, esto se hace con la finalidad de localizar el Umbral.

En la figura 3.5 se observa claramente el momento en el que el láser de fibra comienza a lasear, este se nota cuando sobresale un pico en el espectro con centro en la longitud de onda de resonancia de la rejilla de Bragg. Además, se logra ver en los espectros la transición de emisión espontánea a láser.

Si se bombea el láser de fibra por debajo del umbral, y este bombeo se incrementa, la emisión espontánea aumenta, esta sigue incrementando hasta llegar al valor del umbral. Cuando el bombeo llega a su valor de umbral, la emisión espontánea comienza a decrecer aumentando abruptamente el láser denotado por un pico, esto se puede visualizar en la figura anterior. También se puede ver que se va incrementando la potencia de bombeo en pequeñas cantidades en la región cercana al umbral, y que con esta pequeña variación al llegar al umbral, se tiene una gran concentración de energía en un ancho de longitud de onda pequeño, provocando una gran cantidad de energía contenida en un ancho de longitud de onda muy estrecho (nm), pero comúnmente se menciona que la energía se concentra en un punto.

Se prosiguió con armar otro arreglo experimental análogo al arreglo anterior mostrado en la figura 3.3, solo que ahora la rejilla de Bragg se empalmó en otra terminal del multiplexor, este arreglo se muestra en la figura 3.6. De igual forma, la rejilla de Bragg y el espejo de Faraday forman la cavidad del láser de fibra, y la fibra dopada con erbio (medio activo) se encuentra dentro del resonador.

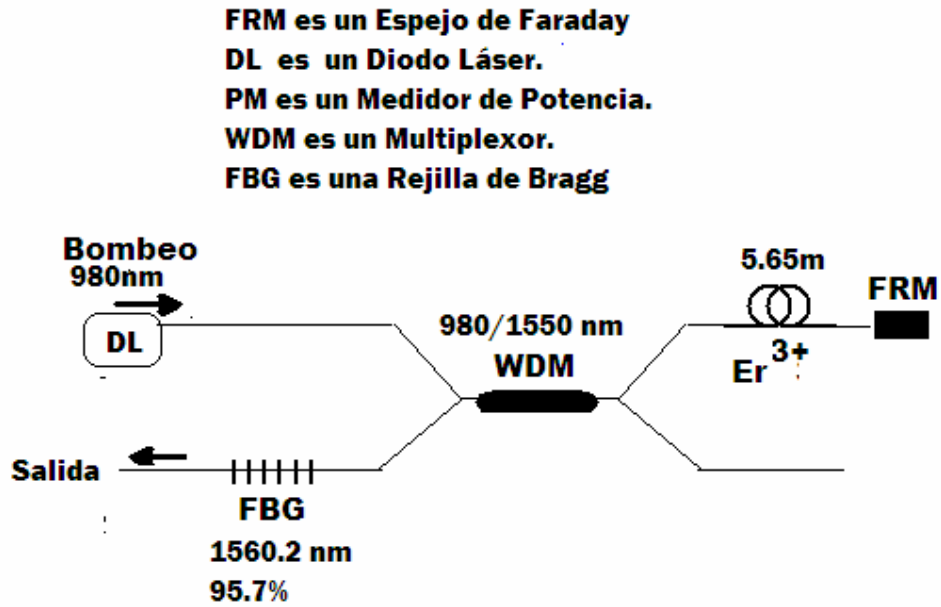


Fig. 3.6 Diagrama esquemático de un láser de Fibra Óptica.

También se obtiene el valor del umbral para este láser de fibra por medio de mediciones en la potencia de salida, así como en los cambios del espectro al ir variando el bombeo. Tales resultados se muestran en la figura 3.7 y 3.8:

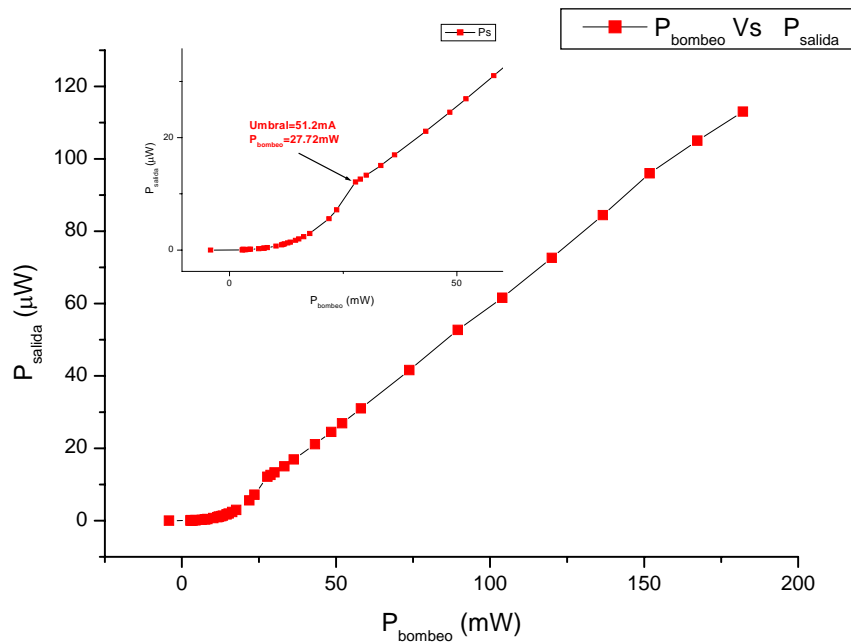


Fig. 3.7 Localización del Umbral para el láser de Fibra mostrado en la figura 3.6 por medio de la medición en la potencia de salida del arreglo.

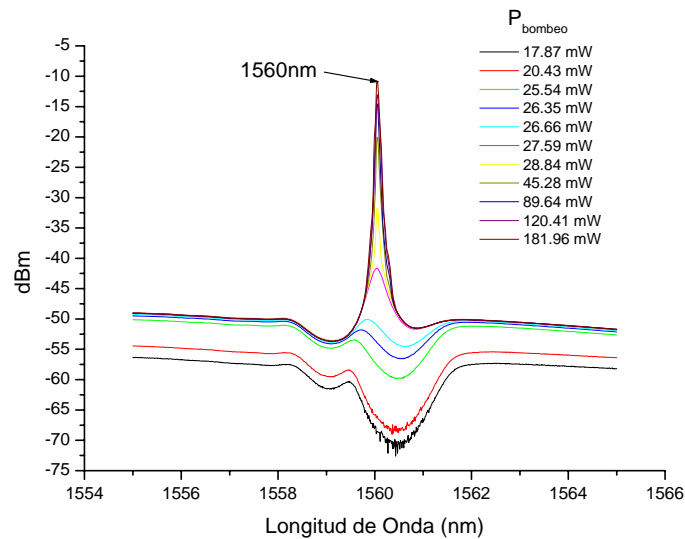


Fig. 3.8 En esta figura se muestra la variación de los espectros del láser de fibra al ir incrementando el bombeo.

Este láser de fibra óptica mostrado en la figura 3.6 será el arreglo en el cual nos basaremos para estudiar el estado transitorio de un láser de fibra. Por lo tanto hay que mencionar que el:

- Bombeo con un diodo láser a 980nm.
- WDM 980/1550nm.
- Cavidad formada por un espejo de Faraday y una rejilla de Bragg con longitud de onda de resonancia de 1560.2 nm.
- El medio activo es una fibra dopada con Erblio (300ppm) con las siguientes características:

-Diámetro de la fibra de 125 $\mu$ m.

-NA = 0.23

-Longitud de corte de 910nm.

-Atenuación de  $3.5 \frac{dB}{Km}$  a 1200nm

-Absorción de  $\begin{cases} 4.9 \frac{dB}{m} & a & 979nm \\ 6.25 \frac{dB}{m} & a & 1531nm \end{cases}$

La razón por la cual en este láser de fibra (figura 3.6) tiene un umbral mayor que su análogo mostrado en la figura 3.3, es debido a que existe mas pérdidas de la cavidad láser, entre mayor sean las pérdidas de la cavidad, mayor será el valor del umbral.



Todos los arreglos experimentales anteriores contenidos en el capítulo 3 se realizaron para conseguir la habilidad en el empalmado y toma de mediciones para tener una mayor confiabilidad, además estos experimentos se realizaron más de una vez para demostrar que estos experimentos tienen repetibilidad.

Por lo tanto, a los sensores basados en láser de fibra óptica, se le harán estudios para caracterizar, comprender y describir el comportamiento del régimen transitorio para poder ser aplicables a sensar un parámetro de interés a través de la variación de pérdidas de la cavidad.

### 3.3 ESTUDIO DEL LÁSER DE FIBRA CON PÉRDIDAS DE LA CAVIDAD LÁSER.

Se prosiguió a diseñar un arreglo que funcione como sensor hecho con láser de fibra dopada con erbio capaz de sensar varios parámetros, pero existe un fluido de interés, el cual uno de los más estudiados por razones anteriormente explicadas, es el hidrógeno. El sensor en presencia del fluido provoca variaciones o modificaciones de las pérdidas en la cavidad, provocando un cambio en el régimen transitorio del láser. Para simular las variaciones de pérdidas en la cavidad se hará uso de un atenuador, es decir, el fin es diseñar y caracterizar el comportamiento del régimen transitorio y del tiempo de dominio del sensor de láser de fibra debido a las variaciones de las pérdidas de la cavidad.

Para montar este sensor, se basará en el arreglo mostrado en la figura 3.6, pero con una pequeña variante, se le insertará un atenuador dentro de la cavidad, en el brazo de salida del WDM para simular las variaciones de las pérdidas en la cavidad láser, y también se le agregará un Diodo Emisor de Luz (LED) con la finalidad de calibrar las pérdidas en la cavidad. Por lo tanto, el arreglo del sensor del cual se va a realizar el estudio del régimen transitorio se muestra en la figura 3.9.

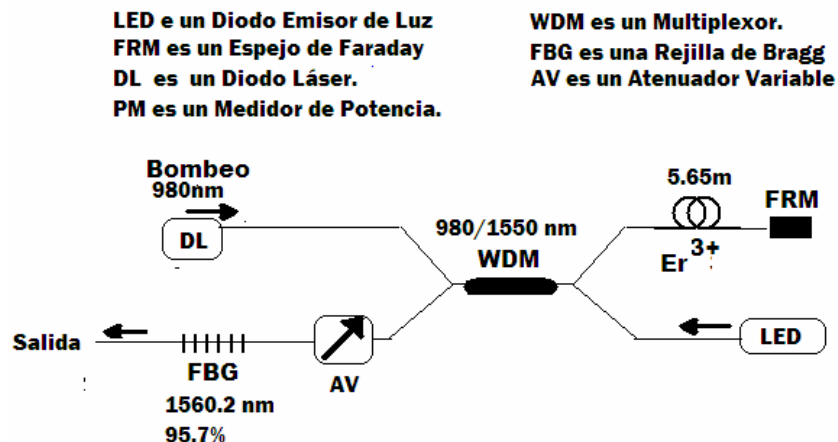


Fig. 3.9 Arreglo experimental para simular y calibrar las pérdidas en la cavidad láser y para realizar el estudio del régimen transitorio de un láser de fibra.

Para poder calibrar las pérdidas en la cavidad se necesita la curva característica del atenuador a utilizar, para ello, solo se activa el LED (1280nm) teniendo el bombeo desactivado. Haciendo uso de un fotodetector con centro en 1280nm se mide la potencia de salida, esto se visualiza en la figura 3.10.

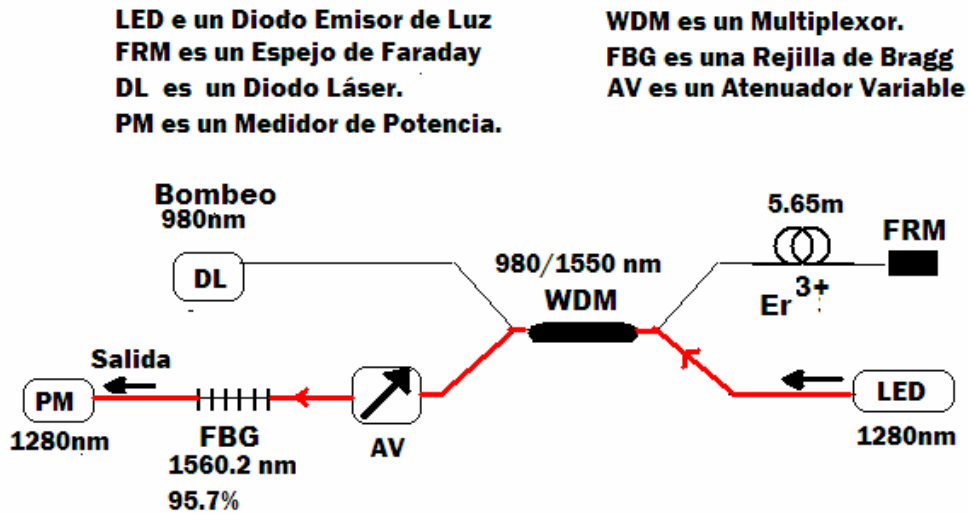


Fig. 3.10 Arreglo experimental para variar las pérdidas en la cavidad y obtener la curva característica del atenuador.

La curva característica del atenuador resultante al ir variando todo el rango del atenuador se aprecia en la siguiente figura:

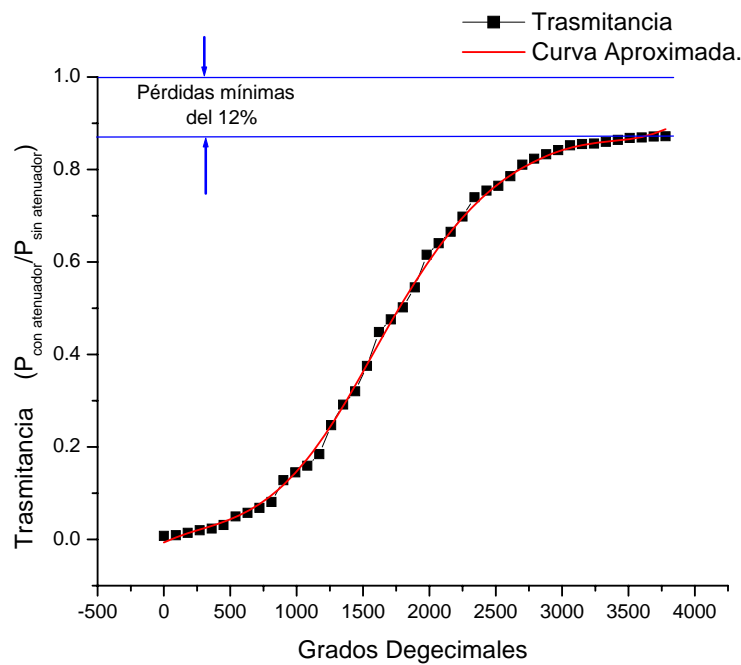


Fig. 3.11 Curva característica del atenuador.

En la figura 3.11 se logra apreciar una pérdida del 12% (pérdidas mínimas) al integrar el atenuador al arreglo experimental. (Ver figuras 3.6 y 3.9). Por tal razón se debe recalcular la localización del umbral debido a que puede existir una variación en el umbral a consecuencia del empalme del atenuador. Para ello, se coloca el atenuador en las pérdidas mínimas, se desactiva el LED a 1280nm, se activa el bombeo, y colocando un medidor de potencia a la salida, tal y como se muestra en la figura 3.12.

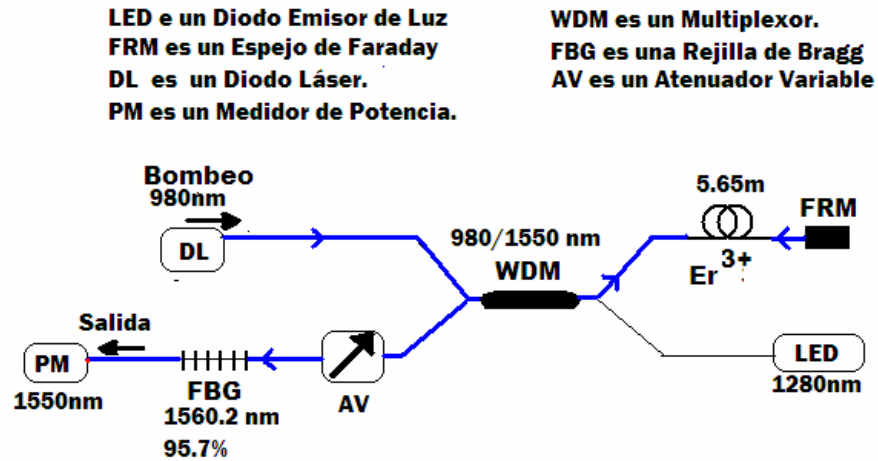


Fig. 3.12 Arreglo experimental para localizar el umbral en pérdidas mínimas.

Como se mencionó anteriormente, colocando el atenuador en el rango donde la curva se satura (pérdidas mínimas). Las mediciones en la potencia de salida al ir variando el bombeo se muestra en la figura 3.13.

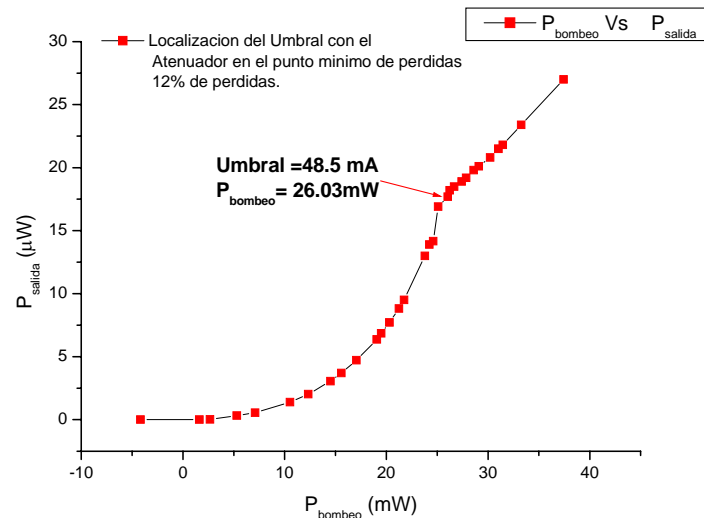


Fig. 3.13 Localización del Umbral para el Láser de Fibra (Ver figura 3.12) con pérdidas mínimas.

Se obtiene un umbral de 48.5mA correspondiente a una potencia de bombeo de 26.03mW, con este valor del umbral calculado se basará el estudio y caracterización del sensor basado en pérdidas en la cavidad, para ello se tomaran diferentes valores por

debajo del umbral, y se demostrará que un valor menor pero mas cercano al umbral se obtendrá un sensor con mayor sensibilidad. Esto se demostrará en las páginas siguientes.

Como este sensor se basa en la modificación de las pérdidas en la cavidad láser, para variar las pérdidas en la cavidad se hace uso del arreglo experimental mostrado en la figura 3.10 y de la ecuación (3.1).

$$\frac{P_{inicial}}{P_x} = 10^{\frac{dB}{10}} \tag{3.1}$$

- Donde
- dB* Son las pérdidas en decibeles que se desean insertar.
  - $P_{inicial}$  Es la potencia inicial o potencia en las pérdidas mínimas (Ver Fig. 3.11, zona de saturación)
  - $P_x$  Es la potencia buscada correspondiente a las pérdidas insertadas en decibeles.

Despejando  $P_x$  se tiene:

$$P_x = \frac{P_{inicial}}{10^{\frac{dB}{10}}} \tag{3.2}$$

De esta manera se puede controlar las pérdidas en la cavidad, es decir, podemos saber cuantos decibeles se están insertando haciendo mediciones de potencia con el arreglo mostrado en la figura 3.10. Por ejemplo, si deseo insertar perdidas de 2 dB, primeramente me voy a la zona de saturación y mido la potencia de salida ( $P_{inicial}$ ), inserto el valor de 2 dB y el valor de la potencia obtenida ( $P_{x\ 2dB}$ ) en la ecuación (3.2), obtengo el valor arrojado por la ecuación (3.2) que corresponde a  $P_x$ . Físicamente comienzo a variar el atenuador del desde el valor  $P_{inicial}$  hasta el valor  $P_x$ . De esta manera me aseguro de insertar las pérdidas en dB de manera correcta a la cavidad láser.

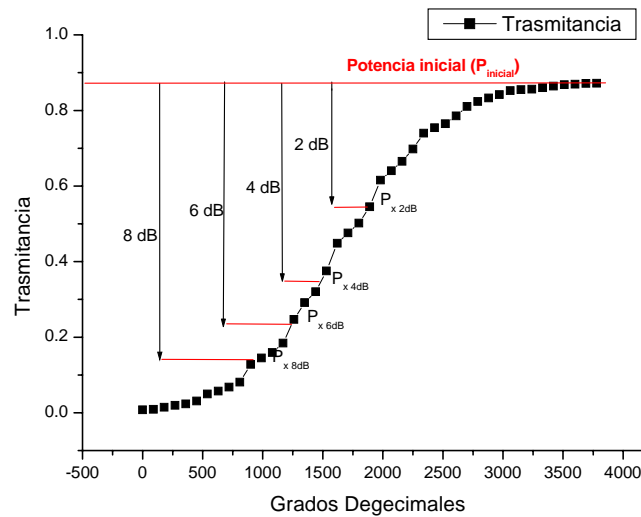


Fig. 3.14 Esta figura muestra la curva característica del atenuador, así como la tendencia de los valores de potencia al ir variando las pérdidas en dB con el atenuador.

El sensor en presencia del fluido provoca variaciones o modificaciones de las pérdidas en la cavidad, provocando un cambio en el régimen transitorio del láser. Para simular las variaciones de pérdidas en la cavidad se hará uso de un atenuador, es decir, el fin es diseñar y caracterizar el comportamiento del régimen transitorio y del tiempo de dominio del sensor de láser de fibra debido a las variaciones de las pérdidas en la cavidad.

Para estudiar el régimen transitorio del láser de fibra, se necesita modular la señal de entrada o bombeo, se insertará una señal cuadrada por medio de un generador de señales. Para visualizar el régimen transitorio y medir el tiempo de dominio se hará uso de un osciloscopio, donde la señal modulada del generador de frecuencias y la señal de salida están sincronizadas para medir el tiempo de dominio. Esto se visualiza en diagrama esquemático mostrado en la figura 3.15.

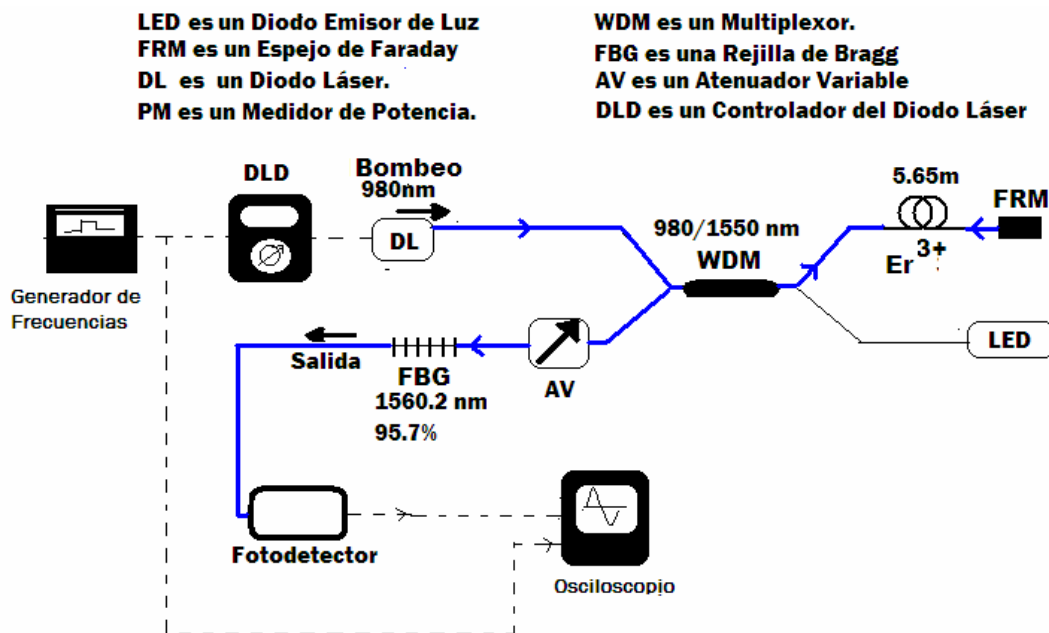


Fig. 3.15 Arreglo experimental para modular con una señal cuadrada y poder medir el Tiempo de dominio del régimen transitorio del láser de fibra.

Se estudiara el régimen transitorio del láser de fibra con cuatro valores de potencia de bombeo diferentes por debajo del umbral, con la finalidad de estudiar la sensibilidad del sensor. Los cuatro valores que se tomaran serán 25.1mW, 0mW, 5.16mW y 14.51mW. En las siguientes páginas se explicará con mas detalle del porque se escogieron estos valores.

Primeramente se analizara una corriente o bombeo con señal cuadrada de 0mA (0mW), es decir, cuando se inserta un voltaje modulado (señal cuadrada), ésta provoca una variación en la corriente con comportamiento de señal cuadrada, esto se debe a que la corriente y el voltaje están íntimamente relacionados. Al modificar estos parámetros también se varía la potencia de bombeo. Por lo tanto, esta modulación tendrá una potencia de bombeo base ( $P_{base}$ ) de 0 mW, y una potencia de bombeo de referencia ( $P_{ref}$ ) de 89.27mW (figura 3.16).

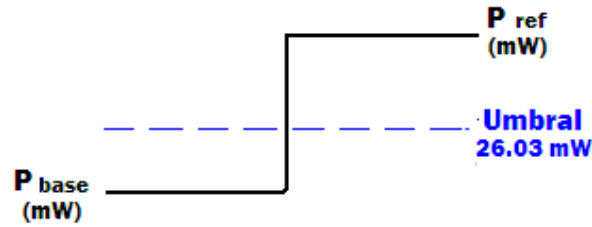


Fig. 3.16 Variación de la potencia de bombeo al insertar una señal Cuadrada.

La figura 3.16 muestra la potencia de bombeo, como este bombeo está modulado por el generador de frecuencias, en consecuencia, el bombeo está compuesto por dos valores, a los que llamaré  $P_{base}$  y  $P_{ref}$ . La  $P_{base}$  tendrá un valor por debajo del umbral, es decir, un valor de potencia por debajo de la potencia necesaria para que de lugar el umbral. Por lo contrario, la  $P_{ref}$  tendrá un valor por encima del umbral.

Se escogió la potencia de bombeo base ( $P_{base}$ ) de 0 mW debido a que se quiere estudiar el régimen transitorio en un bombeo por debajo del umbral (26.03mW) pero lejano a él. Por lo tanto, para un bombeo de 0 mW se variarían las pérdidas desde 0dB hasta 8 dB, que son las mayores pérdidas que nos puede dar el atenuador utilizado.

Hay que enfatizar que 0 dB, no significa que no existan pérdidas, hay que aclarar y diferenciar que existen pérdidas en el sistema del láser de fibra (ya sea por empalmes, una fuga, etc.), y otras son las pérdidas variables en el atenuador (0 dB a 8 dB), hay que recordar que este es un sensor con la cavidad sensible para sensar un parámetro de interés, en donde este parámetro de interés provoca un cambio en estas pérdidas de cavidad y en consecuencia provoca un cambio en el régimen transitorio. Por ejemplo, en la cavidad podría estar un *taper* con una película delgada de paladio, por lo tanto, la variación de pérdidas con el atenuador simula los cambios de pérdidas que provocaría el *taper*.

Para variar e insertar las pérdidas (dB) se hará uso del arreglo mostrado en la figura 3.10 y de la ecuación (3.2). Para medir el Tiempo de dominio del régimen transitorio del láser de fibra para cada una de las pérdidas (dB) insertadas se hará uso del arreglo mostrado en la figura 3.15.

El régimen transitorio del láser se caracteriza por sus oscilaciones amortiguadas antes de llegar a un estado estable [3.1]. El tiempo de dominio es el tiempo comprendido entre el comienzo del bombeo swicheado y la presencia del primer pulso del régimen transitorio del láser (ver figura 3.17).

Por ejemplo, el régimen transitorio para una  $P_{base}=0$  mW con 0 dB se tiene un tiempo de dominio ( $T_d$ ) de 2285.5  $\mu$ s, el régimen transitorio con las condiciones ya dichas se visualiza en la figura 3.17.

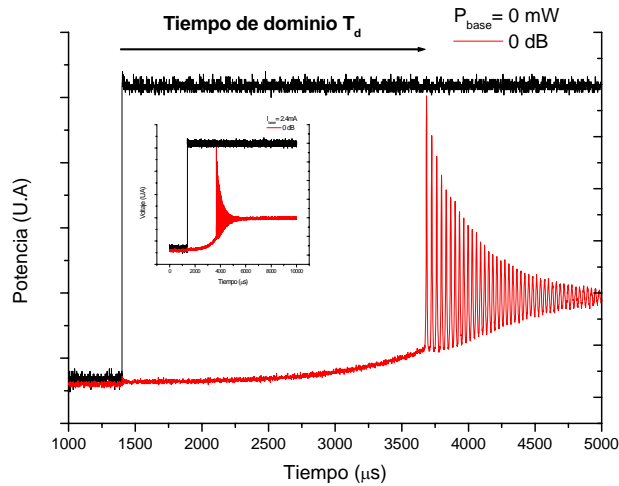


Fig. 3.17 Régimen transitorio para una  $P_{base}$  de 0 mW con 0dB de pérdidas insertadas en la cavidad.

De igual manera se calcula el tiempo de dominio para cada pérdida insertada desde 0dB hasta 8dB para una  $P_{base} = 0$  mW. En la gráfica 3.18 se puede observar la variación del tiempo de dominio al ir modificando las pérdidas de la cavidad para una  $P_{base} = 0$  mW:

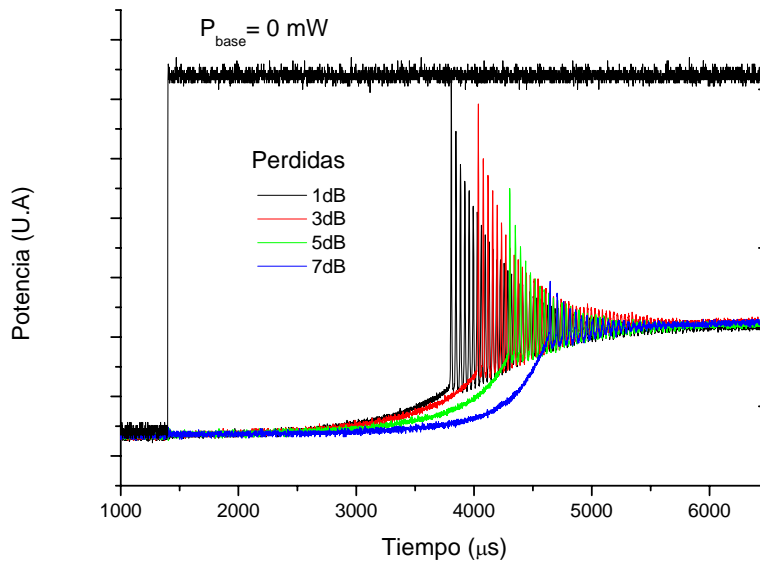


Fig. 3.18 Variación del tiempo de dominio ( $T_d$ ) al ir modificando las pérdidas en la cavidad láser.

Con esta información se puede sacar un gráfico donde muestre el comportamiento del tiempo de dominio con respecto a las pérdidas en la cavidad, lo antes mencionado se observa en la figura 3.19.

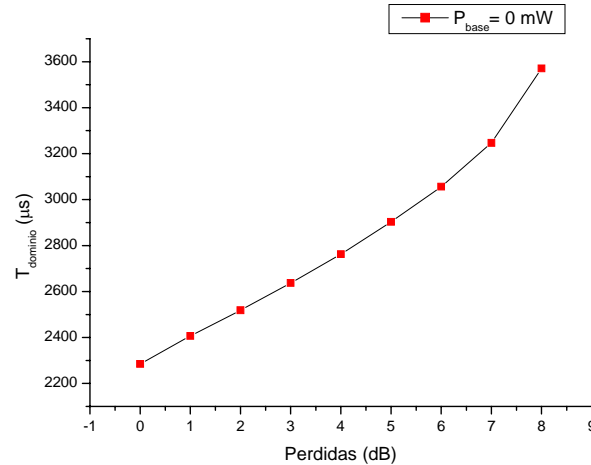


Fig. 3.19 Comportamiento no lineal del tiempo de dominio ( $T_d$ ) con respecto a las pérdidas en la cavidad para una  $P_{\text{base}}$  de 0 mW.

Para seguir con el estudio de la sensibilidad del láser de fibra, ahora se escogerá una potencia de bombeo base ( $P_{\text{base}}$ ) de 25.1 mW debido a que también se quiere estudiar el régimen transitorio en un bombeo por debajo del umbral (26.03mW) pero cercano a él. De igual manera, para un bombeo de 25.1 mW se variarán las pérdidas desde 0 dB hasta 8 dB.

Usando el mismo procedimiento descrito para una  $P_{\text{base}}$  de 0 mW en los párrafos anteriores, se obtiene el gráfico para una  $P_{\text{base}}$  de 25.1mW, donde se muestra la variación del tiempo de dominio con respecto a las pérdidas insertadas a la cavidad (figura 3.20).

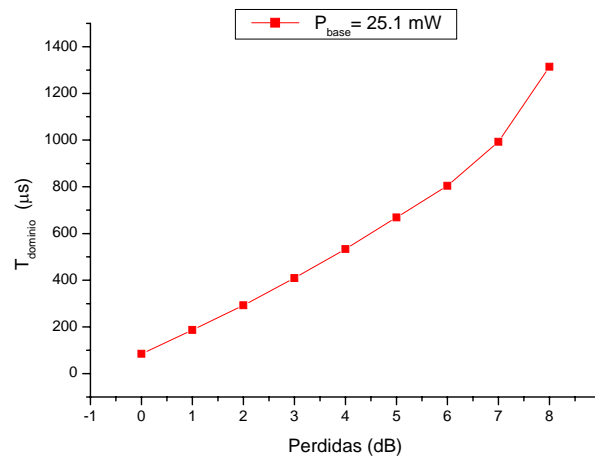


Fig. 3.20 Comportamiento no lineal del tiempo de dominio ( $T_d$ ) con respecto a las pérdidas en la cavidad para una  $P_{\text{base}}$  de 25.1 mW.



Análogamente se hará lo mismo con las potencias base ( $P_{base}$ ) de 5.16mW y 14.51mW, con la finalidad de estudiar la sensibilidad en corrientes o bombeos comprendidos entre 0 mW y 25.1mW, que representa el valor mas lejano y cercano respectivamente al valor del umbral (26.03 mW). Por lo tanto, en el grafico 3.21 se muestra el comportamiento del tiempo de dominio con respecto a las pérdidas en la cavidad para las diferentes potencias base ( $P_{base}$ ) estudiadas experimentalmente.

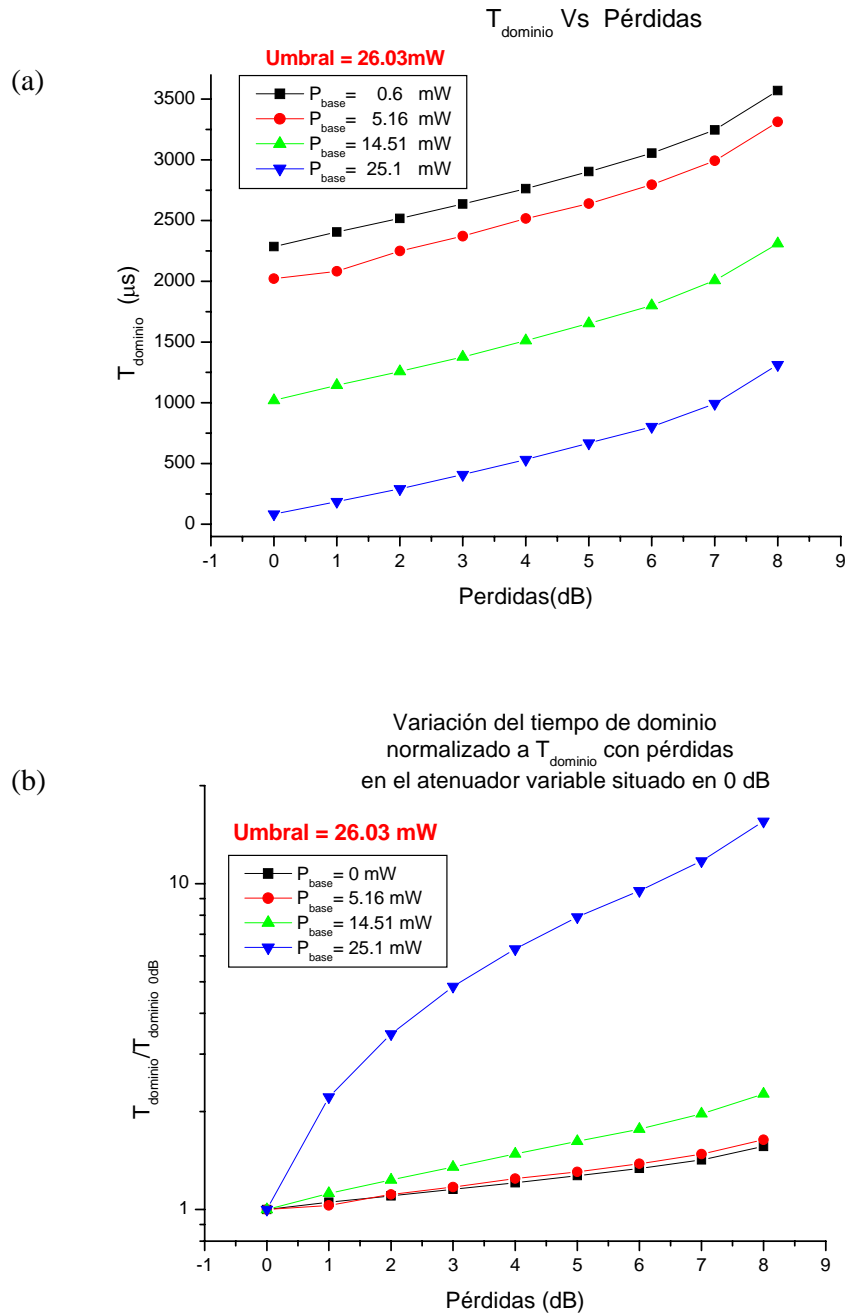


Fig. 3.21 (a) Tendencia del tiempo de dominio ( $T_d$ ) con respecto a las pérdidas en la cavidad. (b) Variación del tiempo de dominio normalizado.

En la figura 3.21(a) se observa que entre mas cercano sea el bombeo por debajo del umbral, se tiene un tiempo de respuesta mucho más rápido. Esto se demuestra que para un bombeo de 25.1 mW a 0 dB se tiene un  $T_d$  de 90 $\mu$ s, mientras que para un bombeo de 5.16mW se tiene un  $T_d$  cercano a 2000  $\mu$ s.

En la figura 3.21(b) se observa la variación del tiempo normalizado, es decir, a cada curva correspondiente a un valor de potencia base, se normaliza tomando como referencia el valor del tiempo de dominio a 0 dB respectivamente, esto se hace con la finalidad de obtener un valor relativo para visualizar fácilmente las variaciones del tiempo de dominio. En este gráfico se demuestra que para una potencia de bombeo cercana pero por debajo del umbral (25.1 mW) se tiene un amplio rango de variación, cosa que no sucede con potencias de bombeo lejanas y por debajo del umbral, tales como lo son las de potencias de bombeo de 0, 5.16 y 14.51 mW. Por lo tanto, para una potencia base de 25.1mW se tiene mayor sensibilidad  $\left(\frac{\Delta T_d}{\Delta P}\right)$ , donde  $T_d$  es el tiempo de dominio y  $P$  son las pérdidas en la cavidad.

Ya con los datos experimentales obtenidos, también se graficó el comportamiento del Umbral con respecto a las pérdidas, el cual se muestra en la figura 3.22.

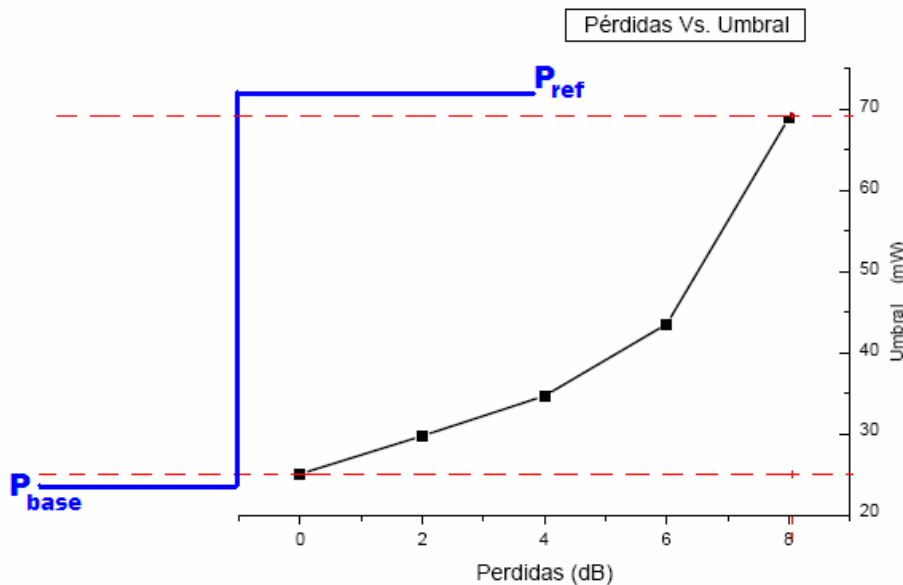


Fig. 3.22 Comportamiento del Umbral con respecto a las pérdidas en la cavidad.

Otra cosa que hay que enfatizar, es que se demostró que se tiene mayor sensibilidad cuando se bombeo cerca pero por debajo del umbral, pero también hay que aclarar que se debe hacer el bombeo en el punto donde exista mayor atenuación, que para nuestro gráfico son las pérdidas en atenuador variable de 8 dB, colocando en este punto, se tendrá un mayor rango variable de detección.

Con esto se concluye este estudio que para aplicar este tipo de láseres de fibra como sensor, es fundamental trabajar en valores por debajo pero cercanos al umbral correspondiente a 8 dB.

### 3.4 ESTUDIO DEL LÁSER DE FIBRA CON PÉRDIDAS EN LA CAVIDAD VARIABLES POR LA TEMPERATURA APLICADA A LA REJILLA DE BRAGG.

Para este estudio nos basaremos en el siguiente arreglo experimental :

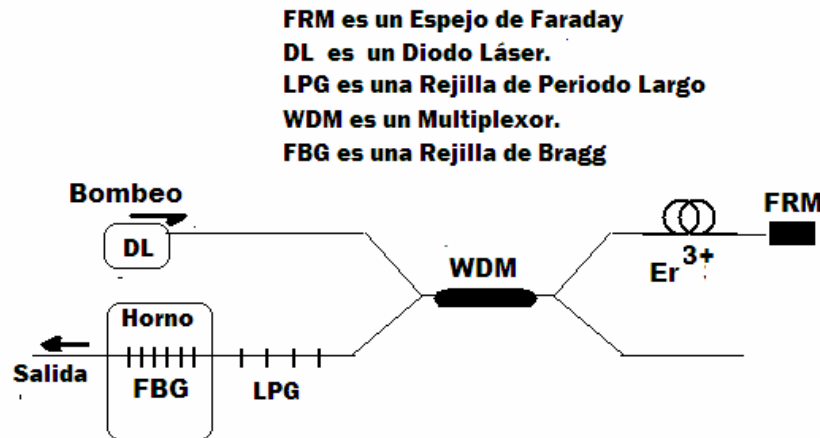


Fig. 3.23 Arreglo experimental usado para el estudio del régimen transitorio del láser de fibra al variar la Temperatura en la FBG.

La idea principal del estudio al arreglo mostrado en la figura 3.23 es simple, si se tiene una rejilla de periodo largo a una temperatura constante ( $T_{\text{ambiente}}$ ), y una FBG (rejilla de Bragg) a la que se estará variando su temperatura por medio de un horno, esta modificación en la temperatura ocasionará un corrimiento en la longitud de onda de resonancia de la rejilla de Bragg.

Al ir variando la temperatura, el pico correspondiente a la rejilla de Bragg tendrá un corrimiento en longitud de onda con respecto al espectro de la LPG. Al tener esta variación provocada por la Rejilla de Bragg, también ocurrirá una variación en pérdidas en el espectro resultante, debido a que también existe una variación en profundidad al ir desplazándose el pico correspondiente a la Rejilla de Bragg al ir variando la Temperatura en esta rejilla. Esta idea de estudio se puede visualizar en la figura 3.24.

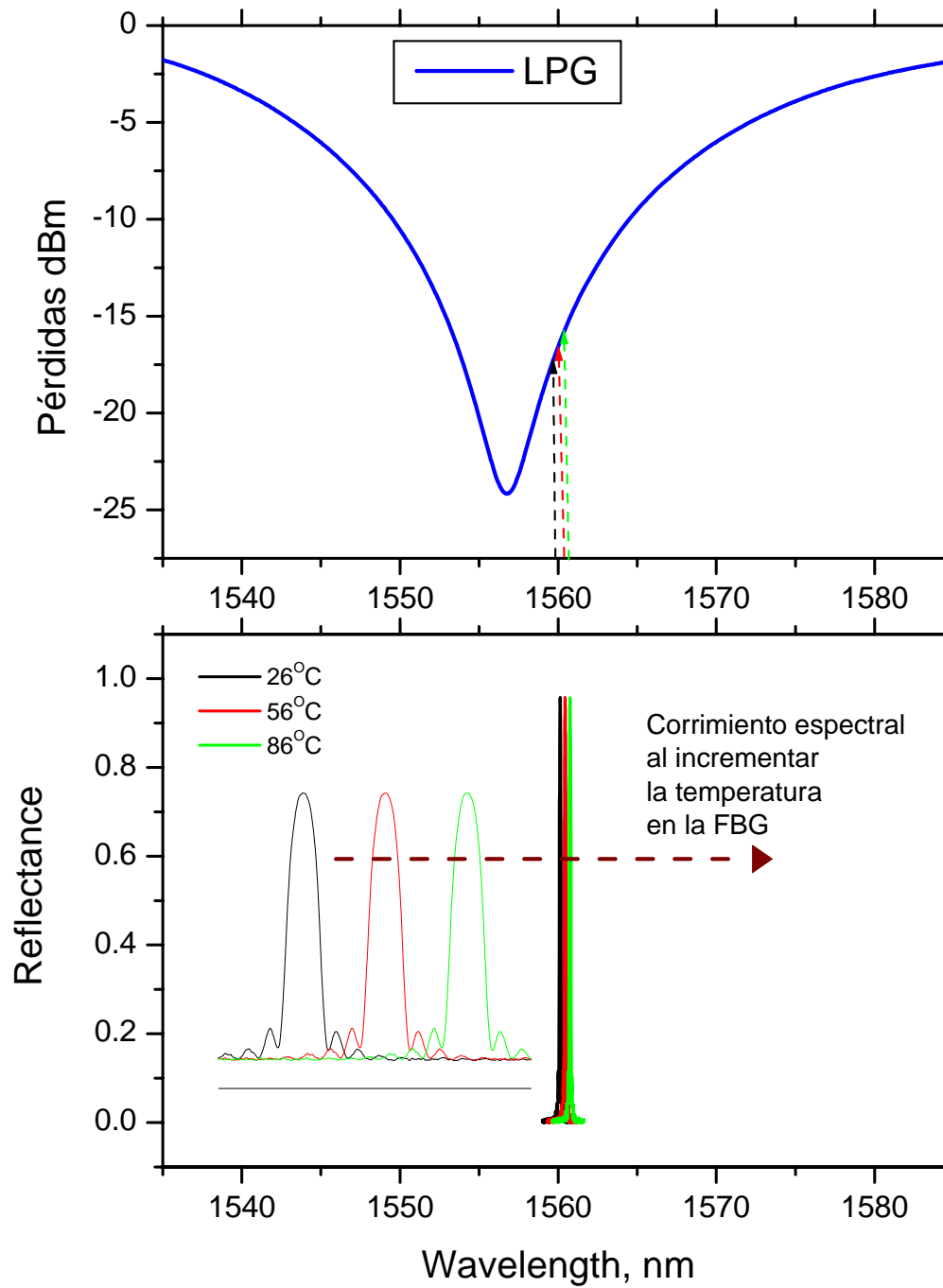


Fig. 3.24 Corrimiento espectral de la longitud de resonancia de la rejilla de Bragg debido a los cambios de temperatura aplicados, tomando como referencia el espectro de la LPG.

Por lo tanto, se puede hacer un estudio del régimen transitorio del láser de fibra y estudiar la tendencia del tiempo de dominio con respecto a la temperatura. Para el estudio de régimen transitorio se hará uso del arreglo experimental ilustrado en la figura 3.25.

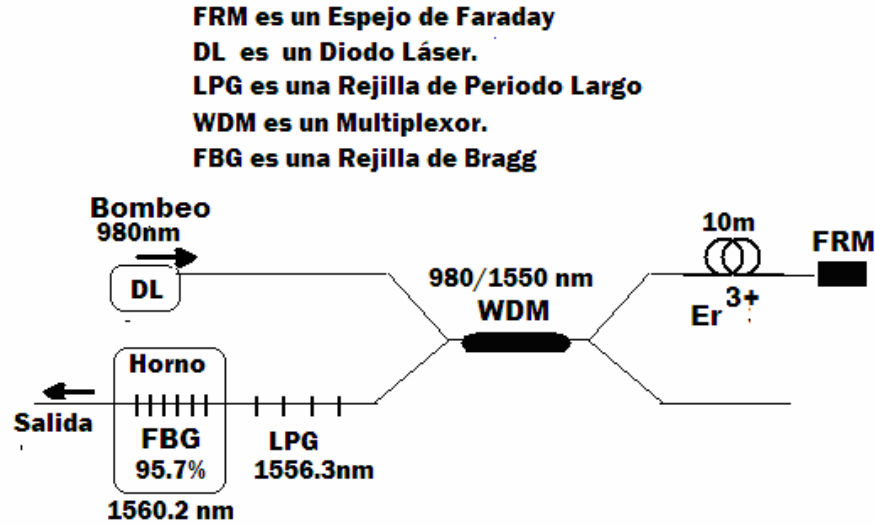


Fig. 3.25 Arreglo experimental usado para el estudio del régimen transitorio del láser de fibra al variar la temperatura en la FBG.

Para este arreglo se utiliza 10 m en vez de 5.65m de fibra como medio activo, esto se debe a que la rejilla de periodo largo sobrepasa el rango de pérdidas en el cual nosotros podemos variar con la temperatura, por tal razón se le añade mas fibra dopada con erbio.

Se localiza el Umbral para el arreglo mostrado en la figura 3.25, se obtiene un umbral de 17.94 mW. En la siguiente figura se muestran los espectros del láser de fibra cuando se incrementa el bombeo hasta llegar al laseo, así como la tendencia de la potencia de salida con respecto a la potencia de bombeo.

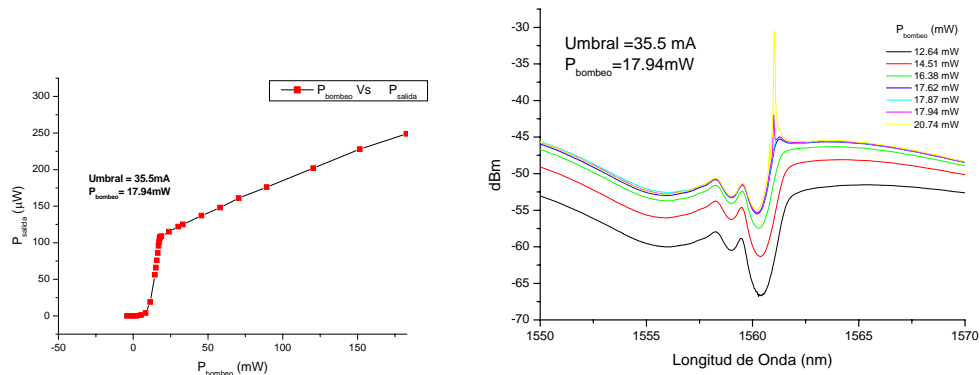


Fig. 3.26 La gráfica situada en la izquierda muestra la tendencia de la potencia de salida Vs. bombeo, y la gráfica de la derecha muestra los espectros de del láser de fibra al incrementar el bombeo hasta llegar al laseo.

De igual manera que el estudio hecho en el la sección 3.3 del presente capítulo, para estudiar el régimen transitorio del láser de fibra, se necesita modular la señal de entrada o bombeo, se insertara una señal cuadrada por medio de un generador de señales. Para visualizar el régimen transitorio y medir el tiempo de dominio se hará uso de un osciloscopio, donde la señal modulada del generador de frecuencias y la señal de salida están sincronizadas para medir el tiempo de dominio, esto se visualiza en la figura 3.27.

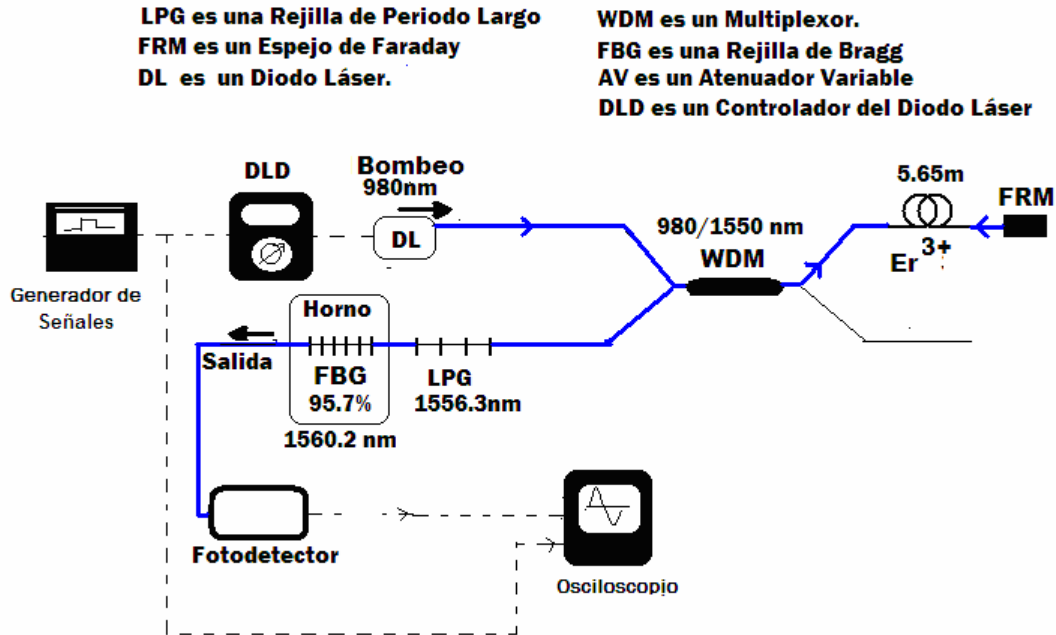


Fig. 3.27 Arreglo experimental para modular con una señal cuadrada y poder medir el tiempo de dominio del régimen transitorio del láser de fibra al variar la temperatura en la rejilla de Bragg.

Se estudiara el régimen transitorio del láser de fibra con dos valores de potencia de bombeo diferentes por debajo del umbral, con la finalidad de estudiar la sensibilidad  $\frac{\Delta T_d}{\Delta T}$  del sensor, donde  $T_d$  es el tiempo de dominio y  $T$  es la temperatura en centígrados aplicada a la FBG. Los dos valores que se tomaran serán 0mW, y 34.2mA para varias temperaturas aplicadas a la Rejilla de Bragg.

Primeramente se analizara un bombeo con señal cuadrada de 0 mA (0mW), es decir, cuando se inserta un voltaje modulado (señal cuadrada), esta provoca una variación en la corriente con comportamiento de señal cuadrada, esto se debe a que la corriente y el voltaje están íntimamente relacionados. Al modificar estos parámetros también se varía la potencia de bombeo. Por lo tanto, esta modulación tendrá una potencia de bombeo base ( $P_{base}$ ) de 0mW, y una potencia de bombeo máxima ( $P_{max}$ ), la cual variara al incrementar o disminuir el Voltaje modulado (Señal cuadrada). Esto se visualiza en la figura 3.28.

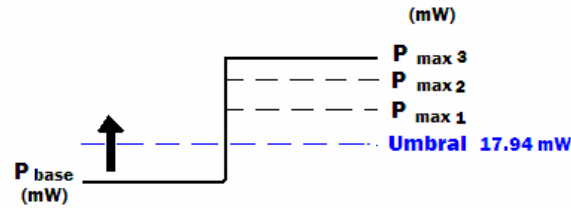


Fig. 3.28 Variación de la Corriente  $P_{\max}$  al variar el voltaje de la señal Cuadrada.

La figura 3.28 muestra la potencia de bombeo, como este bombeo está modulado por el generador de frecuencias, en consecuencia, el bombeo está compuesto por dos valores, a los que llamaré  $P_{\text{base}}$  y  $P_{\text{max}}$ . La  $P_{\text{base}}$  tendrá un valor por debajo del umbral, es decir, un valor de potencia por debajo de la potencia necesaria para que de lugar el umbral. Por lo contrario, la  $P_{\text{max}}$  tendrá un valor por encima del umbral.

Se tomó la potencia de bombeo base ( $P_{\text{base}}$ ) de 0 mW debido a que se quiere estudiar el régimen transitorio en un bombeo por debajo del umbral (17.94 mW) pero lejano a él. Por lo tanto, para un bombeo de 0 mW se variará la temperatura desde la ambiente (27°C) hasta una temperatura de 96°C, que es un rango en donde se evita que la temperatura dañe a la rejilla de Bragg al aplicarle calor.

Por ejemplo, el régimen transitorio para una  $P_{\text{base}}=0\text{mW}$  a temperatura ambiente con una  $P_{\text{max}}$  de 62.04 mW se tiene un tiempo de dominio ( $T_d$ ) de 4326  $\mu\text{s}$ , este régimen transitorio con las condiciones ya dichas se puede visualizar en la figura 3.29.

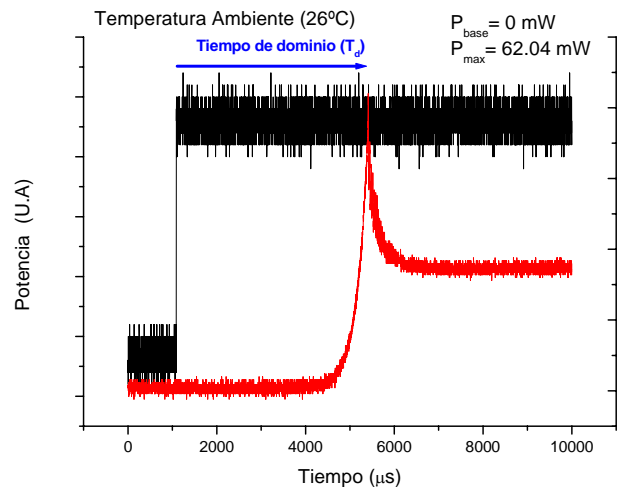


Fig. 3.29 Régimen transitorio para una  $P_{\text{base}}$  de 0 mW a temperatura ambiente con 1V de voltaje modulado.

De igual manera se calcula el tiempo de dominio para diferentes  $P_{\text{max}}$ . En la siguiente gráfica (figura 3.30), se puede observar la variación del tiempo de dominio al ir modificando las  $P_{\text{max}}$  a una temperatura ambiente con una potencia de bombeo base de  $P_{\text{base}}=0\text{mW}$ .

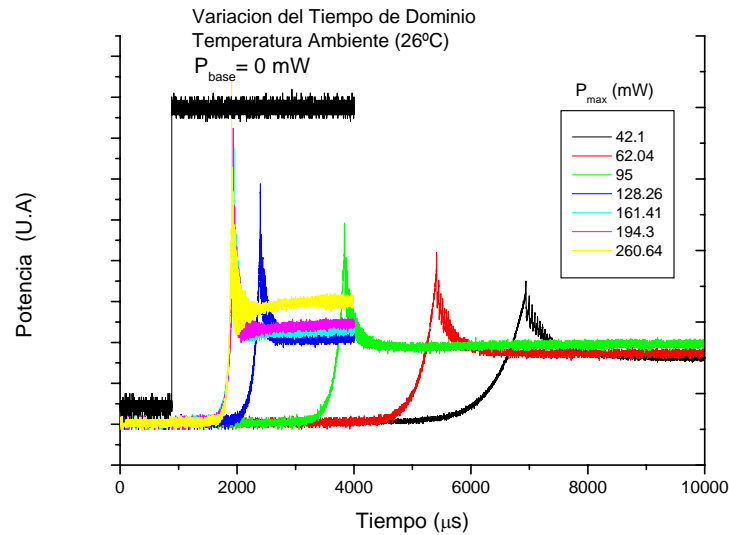


Fig. 3.30 Variación del tiempo de dominio ( $T_d$ ) al ir modificando las  $P_{max}$  por medio del voltaje modulado con una potencia de bombeo base ( $P_{base}$ ) de 0 mW a una Temperatura Ambiente en la FBG.

Para seguir con el estudio del la sensibilidad del láser de fibra, ahora se tomará la potencia de bombeo base ( $P_{base}$ ) de 17.13 mW, debido a que se también se desea estudiar el régimen transitorio en un bombeo por debajo del umbral (17.94mW) pero cercano a el. De igual manera, para un bombeo de 17.13 mW a una temperatura ambiente, se variara el voltaje modulado, en consecuencia la  $P_{max}$  por medio del generador de señales. En la grafica 3.31 se puede observar la variación del tiempo de dominio al ir modificando las  $P_{max}$  a temperatura ambiente con una  $P_{base}=17.13mW$ .

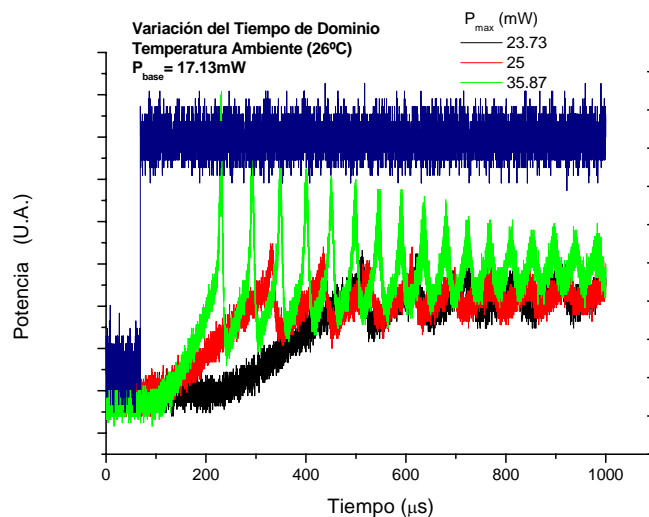


Fig. 3.31 Variación del tiempo de dominio ( $T_d$ ) al ir modificando el voltaje modulado con una  $P_{base}$  de 17.13 mW a una temperatura ambiente en la rejilla de Bragg.



Con la información obtenida de las gráficas 3.30 y 3.31 se puede graficar la tendencia del tiempo de dominio con respecto a la potencia de bombeo máxima ( $P_{max}$ ), hay que recordar que al variar el voltaje modulado se modifica la potencia de bombeo máxima (Ver figura 3.28). Por lo tanto, se procedió a realizar estas graficas para las potencias de bombeo base de 0 mW y 17.13 mW para una temperatura ambiente (figura 3.32).

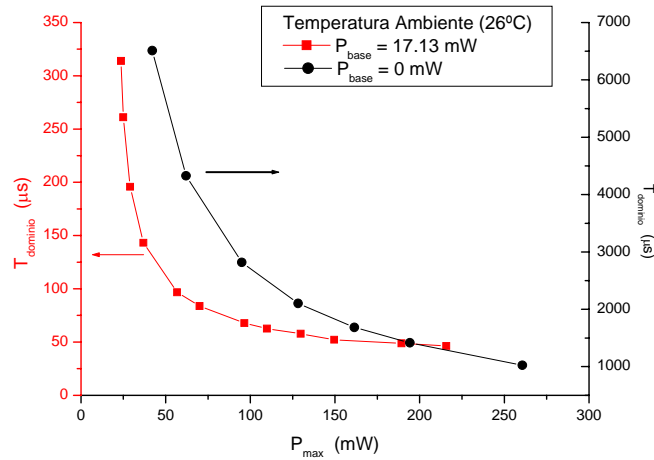


Fig. 3.32 Comportamiento no lineal del tiempo de dominio ( $T_d$ ) con respecto a las potencias de bombeo máximas producidas por los cambios en el voltaje modulado.

La grafica 3.32 muestra claramente que existe mayor sensibilidad en un bombeo de 17.13 mW, tiene un tiempo de respuesta mucho mas rápido que el tiempo de respuesta correspondiente a un bombeo de 0mW. El siguiente paso fue obtener este tipo de gráficos (semejantes a la figura 3.32), pero ahora para diferentes temperaturas. Usando la misma metodología se obtienen los siguientes dos gráficos (figura 3.33 y 3.34).

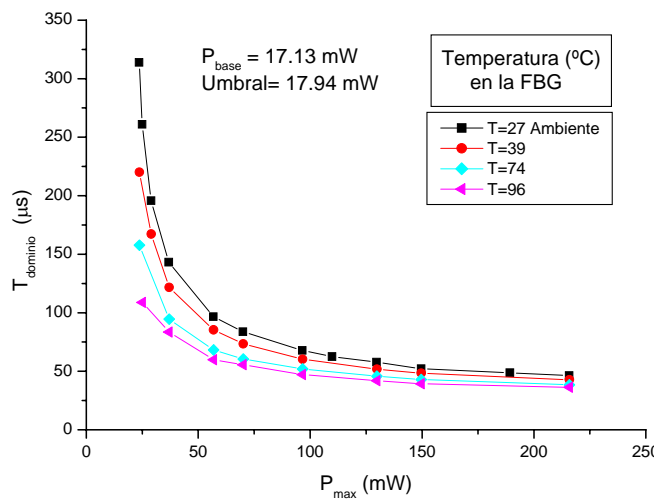


Fig. 3.33 Tendencia del tiempo de dominio ( $T_d$ ) con respecto a las potencias ( $P_{max}$ ) producidas por los cambios en el voltaje modulado para diferentes temperaturas .para una  $p_{base}$  de 17.13 mW.

En la figura 3.33 se nota la variación de las curvas cuando se aplica calor a diferente temperatura a la FBG, debido a que la potencia base se encuentra muy cerca pero por debajo del umbral. Caso contrario pasa con una potencia base de 0 mW (figura 3.34), donde no existe cambio significativo alguno en la curva con la variación de la temperatura, esto se debe a que los 0 mW es un valor muy lejano del umbral, por lo tanto la sensibilidad casi es nula.

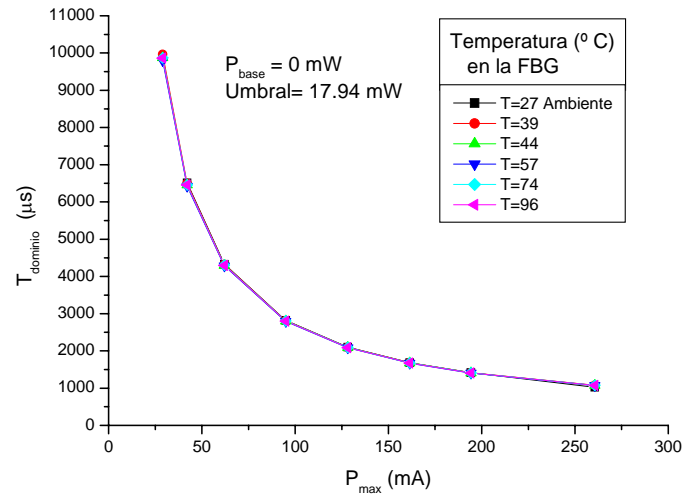


Fig. 3.34 Tendencia del tiempo de dominio ( $T_d$ ) con respecto a las potencias ( $P_{max}$ ) producidas por los cambios en el voltaje modulado para diferentes temperaturas, para una  $P_{base}$  de 0 mW.

Con los gráficos 3.33 y 3.34 se tiene la suficiente información para graficar la tendencia del tiempo de dominio con respecto a la temperatura, y de esta manera entender la tendencia de las curvas. Por lo tanto, las gráficas obtenidas ya normalizadas se muestran en la figura 3.35.

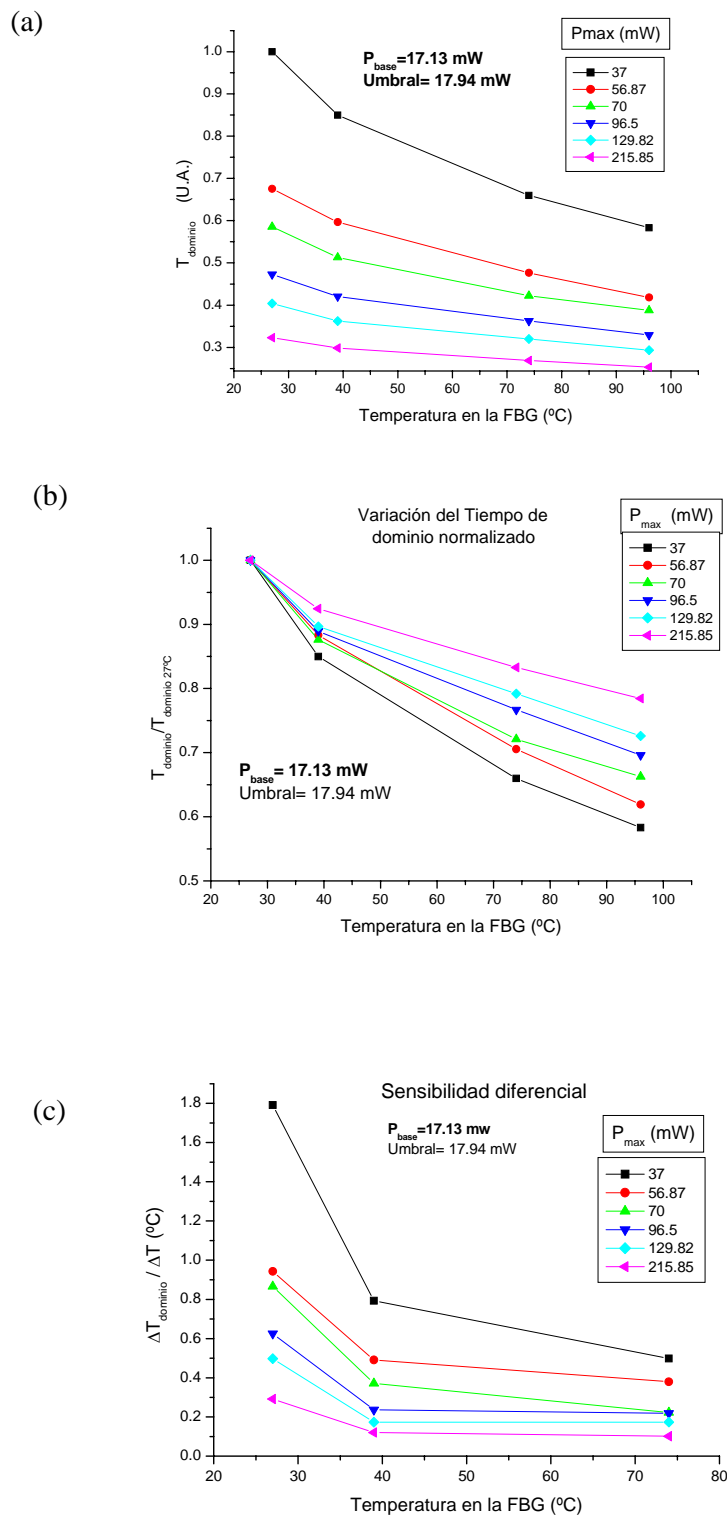


Fig. 3.35 Graficos del  $T_d$  Vs  $T(^{\circ}\text{C})$  aplicada a la FBG para diversas  $P_{max}$  tomando como  $P_{base} = 17.13 \text{ mW}$ . (a)Tendencia del  $T_d$  con respecto a la temperatura. (b) Variación del tiempo de dominio normalizado. (c)Gráfico de la sensibilidad diferencial.

La figura 3.35(a) muestra la variación del tiempo de dominio con respecto a la temperatura aplicada, en ese gráfico se observa que se tiene mucha sensibilidad cuando se trabaja una potencia base de bombeo (17.13mW) cercana pero por debajo del umbral (umbral en 17.94mW).

La figura 3.35 (b) muestra la variación del tiempo de dominio normalizado. Éste gráfico demuestra que usando una  $P_{base}$  ya mencionada en el párrafo anterior acompañada por una  $P_{max}$  por encima pero no tan lejana del umbral, se tiene un mayor rango de variación ( $P_{max}=37mW$ ).

La figura 3.35 (b) demuestra lo anterior dicho, donde se tiene mayor sensibilidad para una  $P_{max}$  de 37mW utilizando una  $P_{base}$  de 17.13mW.

Ahora se analizarán los gráficos correspondientes a  $P_{base}$  de 0mW, un valor muy lejano y por debajo del umbral.

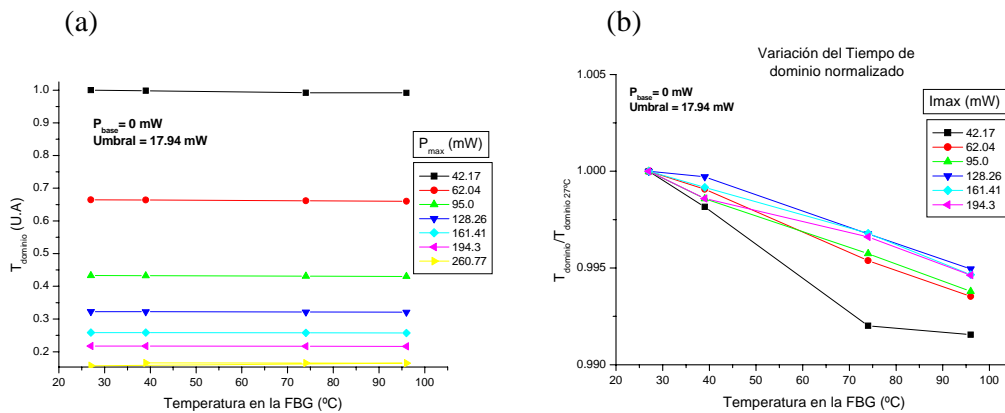


Fig. 3.36 (a) Tendencia del tiempo de dominio con respecto a la temperatura aplicada a la FBG para diversas  $P_{max}$  tomando como  $P_{base} = 0 mW$ . (b) Variación del tiempo de dominio normalizado.

La figura 3.35 muestra la variación del tiempo de dominio para diversas potencias de bombeo máximas ( $P_{max}$ ) al aplicar calor a la Rejilla de Bragg para diferentes valores de temperatura. Mientras que en la figura 3.36(a) se muestra que no hay variación significativa en el tiempo de dominio al variar la temperatura en la Rejilla de Bragg para las distintas potencias de bombeo máximas ( $P_{max}$ ), esto se debe a que se tomo una potencia de bombeo base ( $P_{base}$ ) de 0 mW, bombeo muy lejano al Umbral (17.94 mW), lo que provoca la escasa o nula sensibilidad para este bombeo.

La figura 3.36 (b) sustenta lo antes dicho, en este gráfico se muestra la variación del tiempo de dominio normalizado, donde la razón de cambio existente para  $P_{base}$  de 0 mW es prácticamente nula. De esta manera queda terminado el segundo estudio aplicado al sensor.

### 3.5 ESTUDIO DEL LÁSER DE FIBRA CON PÉRDIDAS EN LA CAVIDAD VARIABLES POR LA TEMPERATURA APLICADA A LA REJILLA DE PERIODO LARGO.

El estudio que se le hará al sensor es muy similar en metodología y concepto al estudio realizado en la sección 3.4 del presente capítulo. Solo con la diferencia que para este estudio, se aplicará calor por medio de un horno a la rejilla de periodo largo y no a la rejilla de Bragg, este se visualiza en el siguiente arreglo experimental:

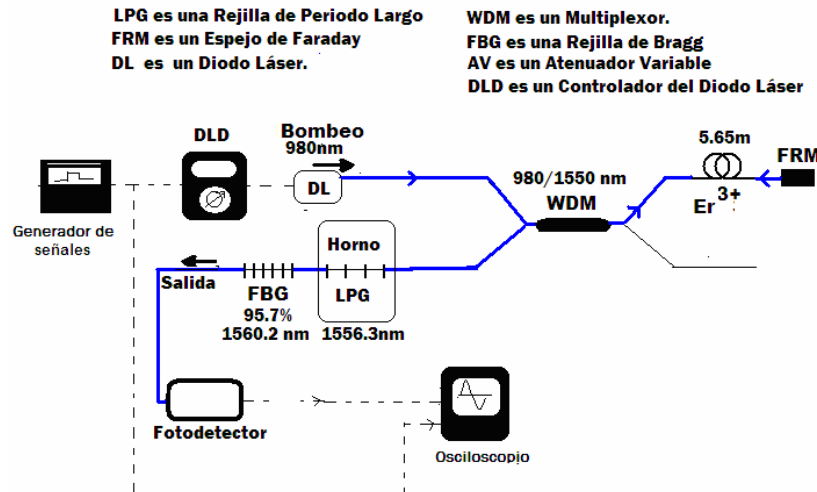


Fig. 3.37 Arreglo experimental para modular con una señal cuadrada y poder medir el Tiempo de dominio del régimen transitorio del láser de fibra al variar la Temperatura en la Rejilla de Periodo Largo.

De igual forma, la idea principal del estudio al arreglo mostrado en la figura 3.37 es simple, si se tiene una rejilla de Bragg a una temperatura constante ( $T_{\text{ambiente}}$ ), y una rejilla de periodo largo a la que se estará variando su temperatura por medio de un horno, esta modificación en la temperatura ocasionará un corrimiento en la longitud de onda del espectro de la rejilla de periodo largo. Al ir variando la temperatura, el pico correspondiente a la rejilla de periodo largo tendrá un corrimiento en longitud de onda tomando como referencia el espectro de la Rejilla de Bragg. Al tener esta variación provocada por la rejilla de periodo largo, también ocurrirá una variación en pérdidas en el espectro resultante (debido al arreglo de la figura 3.37), debido a que también existe una variación en profundidad al ir desplazándose el pico correspondiente a la rejilla de periodo largo al ir variando la temperatura en esta rejilla. Esta idea es muy semejante a la ilustrada en la figura 3.24, solo que ahora se espera que el espectro de la FBG será fijo, y el espectro de la LPG tendrá un corrimiento espectral debido al calor aplicado.

Para estudiar el régimen transitorio del láser de fibra, se necesita modular la señal de entrada o bombeo (Figura 3.37), se insertara una señal cuadrada por medio de un generador de señales. Siguiendo la misma metodología descrita en la sección 3.4, aplicando el calor a la rejilla de periodo largo en vez de la rejilla de Bragg se tienen los siguientes gráficos (3.38 y 3.39) que describen el comportamiento de la potencia de bombeo  $P_{\text{max}}$  con respecto al tiempo de dominio a diferentes temperaturas para las potencias de bombeo  $P_{\text{base}}$  de 17.13 mW y 0 mW respectivamente.

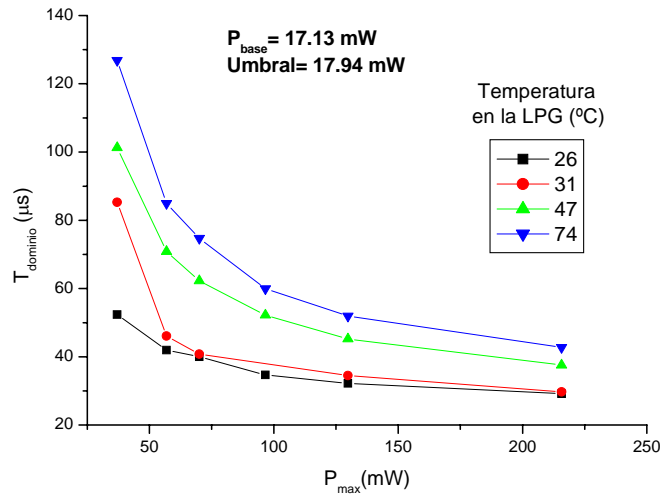


Fig. 3.38 Tendencia del tiempo de dominio ( $T_d$ ) con respecto a las potencias  $P_{max}$  producidas por los cambios en el voltaje modulado para diferentes temperaturas ,para una  $P_{base}$  de 17.13 mW.

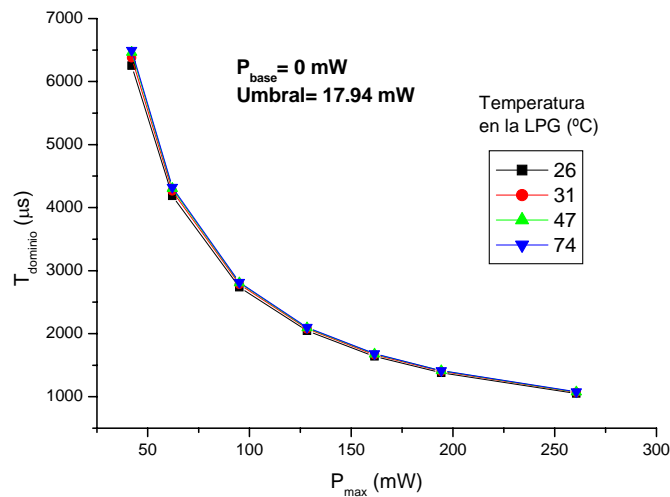


Fig. 3.39 Tendencia del tiempo de dominio ( $T_d$ ) con respecto a las potencias  $P_{max}$  producidas por los cambios en el voltaje modulado para diferentes temperaturas ,para una  $P_{base}$  de 0 mW.

La figura 3.38 muestra en sus curvas que a una  $P_{base}$  (17.13mW) cercana pero por debajo del umbral (17.94mW) se tiene un cambio al ir variando la temperatura en la LPG, es decir, que hay mas sensibilidad  $\left( \frac{\Delta T_d}{\Delta T_{LPG}} \right)$  a esa potencia base, donde  $T_d$  es el tiempo de dominio y  $T_{LPG}$  es la temperatura en centígrados aplicada a la LPG.

Mientras tanto, la figura 3.39 muestra todo lo contrario, es decir, a  $P_{base}$  (0 mW) lejanas pero por debajo del umbral no te tiene cambio significativo alguno, por lo tanto la sensibilidad es casi nula.

Con los gráficos 3.38 y 3.39 se tiene la suficiente información para graficar la tendencia del tiempo de dominio con respecto a la temperatura para las  $P_{base}$  de 17.13 mW y 0 mW (figura 3.40 y 3.41 respectivamente).

Analizando  $P_{base} = 17.13\text{mW}$ :

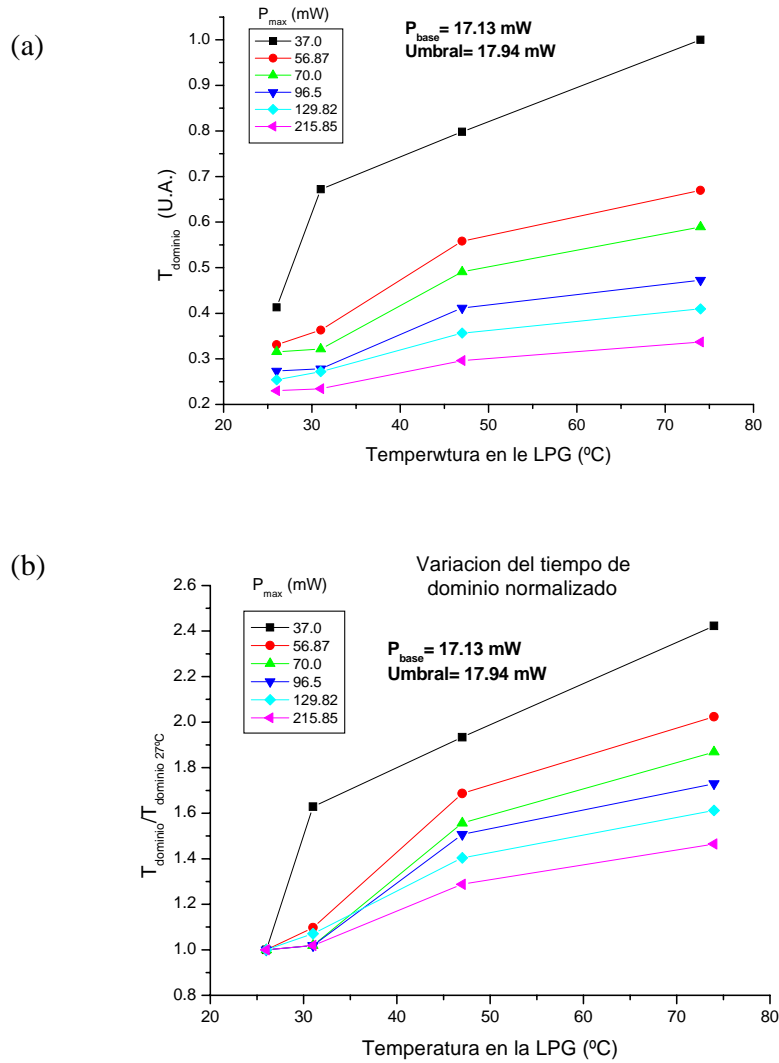


Fig. 3.40 Tendencia del tiempo de dominio ( $T_d$ ) con respecto a la temperatura aplicada a la LPG. (b) Variación del tiempo de dominio normalizado. Ambos gráficos para diversas  $P_{max}$  tomando como  $P_{base}$  de 17.13 mW.

En la figura 3.40(a) se puede ver que existe variación del tiempo de dominio para diversas potencias de bombeo máximas al aplicar calor a la LPG para diferentes valores de temperatura, esto se debe a que se tiene una  $P_{base}$  (17.13mW) cercana pero por debajo del umbral. En la figura 3.40 (b) muestra la variación del tiempo de dominio, donde éste gráfico demuestra que se tiene mayor rango de variación cuando se tienen potencias  $P_{max}$  por encima (37mW), pero no tan lejanas del umbral (17.94mW).

Analizando el gráfico para una  $P_{base} = 0$  mW:

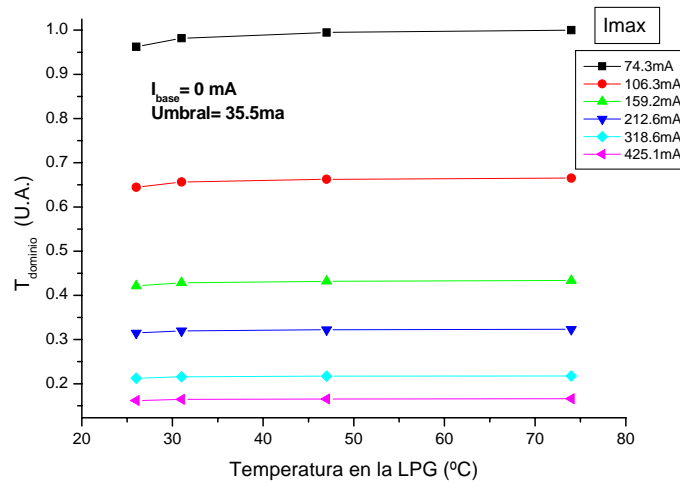


Fig. 3.41 Tendencia del tiempo de dominio ( $T_d$ ) con respecto a la temperatura aplicada a la Rejilla de Periodo Largo para diversas  $P_{max}$  tomando como  $P_{base}$  de 0 mW

La figura 3.41 muestra que no hay variación significativa en el tiempo de dominio al variar la temperatura en la rejilla de periodo largo para las distintas potencias de bombeo máximas, esto se debe a que se tomó una potencia de bombeo base de 0 mW, bombeo muy lejano al umbral (17.94mW), lo que provoca la escasa o nula sensibilidad cuando se trabaja en este bombeo.

Lamentablemente para los gráficos mostrados en la figura 3.40 no se tiene un comportamiento regular, y esto hace difícil de aplicarlo a un sensor. Por lo tanto, para corroborar estos resultados, se realizarán pruebas de temperatura a la LPG por separado, para ello se hará el arreglo mostrado en la figura 3.42.

Estudios realizados anteriormente a las LPG muestran que al aplicar calor e ir incrementando la temperatura, las bandas de resonancia tienen un corrimiento en longitud de onda hacia longitudes de onda mayor [3.3]. Por tal razón, las LPG son atractivas para poder ser aplicables a sensores, debido a que tienen un comportamiento lineal en temperatura y esfuerzo con respecto a la longitud de onda [3.4-3.5]



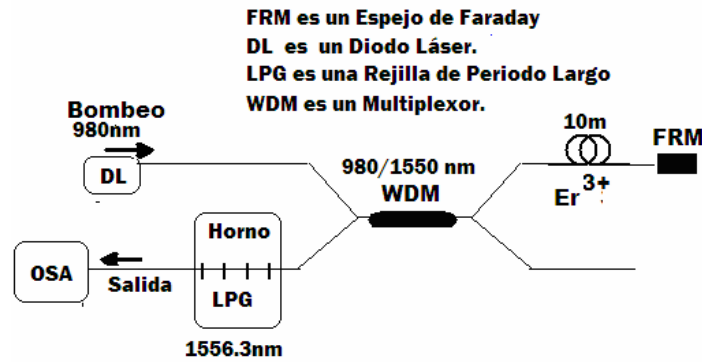


Fig. 3.42 Arreglo experimental para obtener los diversos espectros de la LPG al variar su Temperatura.

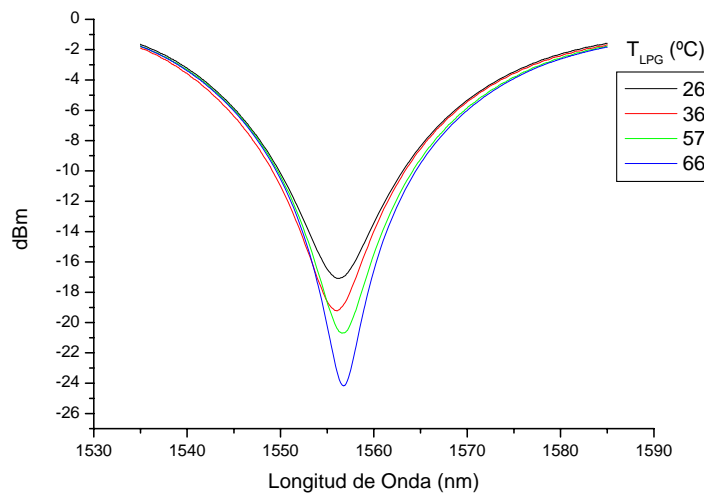


Fig. 3.43 Variación del espectro de la Rejilla de Periodo Largo al aplicar calor mediante un horno.

La figura 3.43 muestra los resultados experimentales de la variación del espectro de la rejilla de periodo largo (banda de resonancia) utilizada en el láser de fibra al aplicar calor e ir variando la temperatura. La figura 3.44 muestra el corrimiento en longitud de onda y el cambio de la profundidad del espectro de la LPG (atenuación) con respecto a la variación de la temperatura aplicada.

De acuerdo a la figura 3.44, a 36 °C observamos un corrimiento de la longitud de onda de resonancia hacia longitudes de onda menor, y a 57°C y 66°C el corrimiento se da en sentido contrario. Tomando en cuenta la teoría de rejillas de periodo largo [3.2], y las características de la fibra convencional, en esta rejilla esperaríamos un corrimiento de longitudes de onda mayor. Por lo anterior consideramos que durante el experimento algún factor externo (curvamiento, compresión, etc.) altero el resultado obtenido a la temperatura de 36°C. Respecto al contraste de modulación la rejilla muestra el comportamiento esperado. Adicionando a esto, para ver una modificación en longitud de onda más notable, es preferible variar la temperatura hasta un valor de 250 °C [3.3].

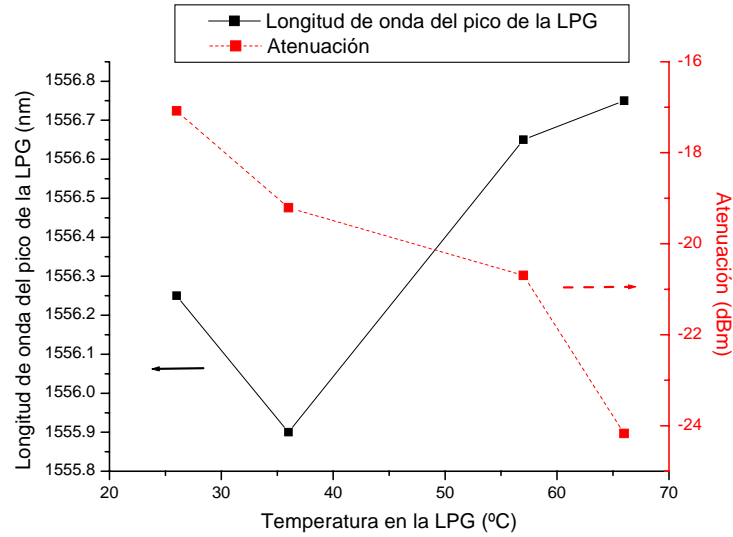


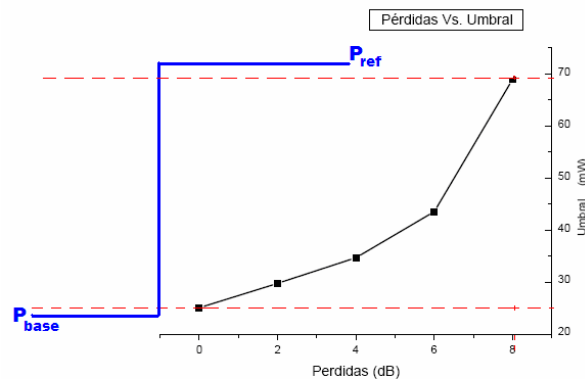
Fig. 3.44 Variación de longitud de onda y la atenuación al modificar la temperatura en la LPG.

Por lo tanto, para una caracterización adecuada del comportamiento espectral de una LPG es recomendable repetir esta misma prueba en un futuro con un control más estricto en el desarrollo del experimento.

### 3.6 CONCLUSIONES

#### **Primer estudio: Láser de fibra con pérdidas de la cavidad láser.**

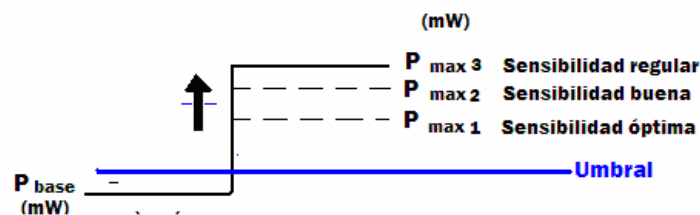
- Entre mas cercano sea la potencia de bombeo ( $P_{base}$ ), pero por debajo del valor del umbral, se tiene un tiempo de respuesta mucho más rápido y mayor sensibilidad, los cambios mas notorios para nuestro caso se visualizan en la región de 7 dB y 8 dB. Por lo tanto, para tener un mayor rango de variación cuando se bombea cercano pero por debajo del umbral ( $P_{base}$ ) correspondiente a 0dB hasta un bombeo máximo ( $P_{ref}$ ) por encima pero no lejano del umbral correspondiente a 8 dB. (0 y 8 dB son pérdidas variables provocadas por el atenuador).



- Cuando se bombea con una potencia ( $P_{base}$ ) por debajo del umbral, se tiene que bombear a un valor cercano del umbral, debido a que la sensibilidad disminuye cuando la  $P_{base}$  se aleja del umbral.

#### **Segundo estudio: Láser de fibra con pérdidas en la cavidad variables por la temperatura aplicada a la FBG.**

- Se tiene mayor rango de variación y muy buena sensibilidad cuando se usa una potencia de bombeo ( $P_{base}$ ) cercana pero por debajo del umbral acompañada con una  $P_{max}$  por encima pero no tan lejana del umbral.



**Tercer estudio: Láser de fibra con pérdidas en la cavidad variables por la temperatura aplicada a la LPG.**

- Experimentalmente se obtuvo mayor sensibilidad cuando se trabaja con una potencia de bombeo ( $P_{base}$ ) cercana pero por debajo del umbral.
- Se tiene mayor rango de variación y muy buena sensibilidad cuando se usa una potencia de bombeo ( $P_{base}$ ) cercana pero por debajo del umbral acompañada con una  $P_{max}$  por encima pero no tan lejana del umbral.
- Experimentalmente la LPG no tiene un corrimiento lineal de la longitud de onda hacia longitudes de onda mayor al incrementar la temperatura, esto se debió a factores externos de estrés, por lo tanto es necesario realizar en un futuro pruebas de temperatura y estrés. Se recomienda modificar la temperatura a valores más altos para ver un cambio más notable en los corrimientos en longitud de onda de las bandas de resonancia de la LPG, preferiblemente dentro de un rango de 0 a 250 °C. También es necesario desarrollar experimentos acerca de la manera en cómo se acoplan los modos guiados o del núcleo a modos del revestimiento, así como caracterizar este tipo de rejillas.
- Es por eso que para este tercer estudio, los resultados obtenidos del comportamiento del tiempo de dominio con respecto a la temperatura en la LPG no son fiables hasta realizar los estudios antes mencionados, por lo tanto, no se puede afirmar los resultados hasta realizar nuevas investigaciones.

### 3.7 REFERENCIAS

- [3.1] I. J. Sola , J. C. Martin, and J.M. Álvarez, “Nonlinear response of a unidirectional erbium-doped fiber ring laser to sinusoidally modulated pump power,” *Opt. Comm.* 212, pp. 359- 369, (2002).
- [3.2] Mei Nar Ng, and Kin Seng Chiang, “Thermal effects on the transmission spectra of long-period fiber gratings” *Optics Communications* 208 (2002) 321-327 15 July 2002.
- [3.3] Vikram Bhatia and Ashish M. Vengsarkar, “Optical fiber long-period grating sensors” *Optics Letters/Vol. 21, No. 9, Mayo 01, 1996.*
- [3.4] Byeong Ha Lee and Junji Nishii, “Bending sensitivity of in-series long-period fiber gratings” *Optics Letters/Vol. 23, No. 20, October 15, 1998.*
- [3.5] Vikram Bhatia, David Campbell, and Richard O. Claus, “Simultaneous strain and temperature measurement with long-period grating” *Optics Letters/Vol. 22, No. 22, May 01, 1997.*



Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

---

---

# “Conclusiones”

---

## CONCLUSIONES

Se desarrollo y estudio un láser de fibra óptica dopado con erbio con pérdidas variables en la cavidad, para ser aplicado como sensor cuya cavidad es el elemento sensible. La ventaja de este tipo de sensor, es que puede ser aplicado para sensar diversos parámetros, todo dependiendo la cabeza de sensor que se use dentro de la cavidad. En el primer estudio (Láser de fibra con pérdidas de la cavidad láser) las pérdidas en la cavidad se variaron por medio de un atenuador colocado dentro de la cavidad láser, mientras que en el segundo y tercer estudio se variaron las pérdidas en la cavidad por medio de la temperatura, es decir, se modifican las pérdidas en la cavidad por la interacción de los corrimientos de los espectros de la LPG y FBG al aplicar calor.

Este tipo de sensor se basa en el régimen transitorio del láser, cuando la cavidad sufre una variación de pérdidas provocadas por el parámetro a detectar, ésta modificación induce a un cambio en el régimen transitorio. Esto permite medir el parámetro de interés a una lectura de tiempo (Tiempo de dominio).

Con los dos tres estudios realizados para los tres sensores fabricados se demostró que para sensores que entre mas cerca sea la potencia de bombeo ( $P_{base}$ ), pero por debajo del valor del umbral, se tiene un tiempo de respuesta mucho más rápido y mayor sensibilidad. También se demostró que si se bombea con una  $P_{base}$  por debajo del umbral, pero lejana a el, la sensibilidad disminuye, y entre mas lejano este, la sensibilidad tiende a ser nula.

En el segundo estudio (Láser de fibra con pérdidas variables en la cavidad por la temperatura aplicada a la FBG) también se demostró que se tiene mayor rango de variación y muy buena sensibilidad cuando se usa una potencia de bombeo ( $P_{base}$ ) cercana pero por debajo del umbral acompañada con una potencia de bombeo  $P_{max}$  por encima pero no tan lejana del umbral.

En el tercer estudio (láser de fibra con pérdidas en la cavidad variables por la temperatura aplicada a la LPG), básicamente, esta es una nueva forma de sensar un parámetro de interés, aunque experimentalmente no se obtuvieron los resultados deseados (debidos a factores externos de estrés) para este estudio, pero por otro lado se consolido que si es posible usar esta idea para ser aplicada como sensor con la cavidad como elemento sensible. Por lo tanto, este estudio es muy prometedor y queda abierto a nuevas investigaciones. Donde parte de estas investigaciones consistirá en modificar la temperatura a valores más altos para ver un cambio mas notable en los corrimientos en longitud de onda de las bandas de resonancia de la LPG, preferiblemente dentro de un rango de 0 a 250 °C. También es necesario desarrollar experimentos acerca de la manera en cómo se acoplan los modos guiados o del núcleo a modos del revestimiento, así como caracterizar este tipo de rejillas.

En cuanto al valor de la sensibilidad en los sensores desarrollados, no es posible dar a conocer un valor exacto, debido que no es tan sencillo obtener este de valor sin realizar otros estudios que llevarían mayor tiempo. Pero la sensibilidad depende principalmente de la estabilidad propia del láser.

---

Por lo tanto, los sensores basados en láseres de fibra óptica con la cavidad láser como elemento sensible tienen un gran potencial para ser aplicados como sensores, esto se debe a que puede detectar un parámetro de interés por medio de la variación de pérdidas en la cavidad, y aun mas importante, transformar esta variación a lecturas de tiempo (tiempo de dominio), lo cual lo hace un sensor muy confiable y de alta repetibilidad. Las lecturas en tiempo de dominio también facilitan detectar y medir el parámetro de interés por medio de una electrónica barata en comparación a otros sistemas de detección.

De esta manera queda finalizado este estudio al sensor basado con fibra láser dopado con erbio con cavidad sensible agradeciendo al lector su tiempo e interés en este trabajo.