



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“SENSORES POLARIMÉTRICOS DE FIBRA  
ÓPTICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE  
PELÍCULAS DELGADAS”**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA  
ELÉCTRICA - INSTRUMENTACIÓN**

PRESENTA :

**VIOLETA ALEJANDRA MÁRQUEZ CRUZ**

TUTOR:

**DR. JUAN A. HERNÁNDEZ CORDERO**



2007

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Augusto García Valenzuela  
Secretario: Dra. Rosalba Castañeda Guzmán  
Vocal: Dr. Juan Arnaldo Hernández Cordero  
1er. Suplente: Dra. Celia Angelina Sánchez Pérez  
2do. Suplente: Dr. Jorge Rodríguez Cuevas

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.

**TUTOR DE TESIS**

Dr. Juan A. Hernández Cordero

---

**FIRMA**

A mi madre, mi hermano y la memoria de mi padre.

A mi corazón.

Por estar aquí y ahora conmigo. Siempre. Con todo mi cariño.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por otorgarle a la educación un tinte universal y humano. Por hacer de mi estancia en ella un placer.

A los profesores e investigadores de la Facultad de Ingeniería, de su División de Estudios de Posgrado y del CCADET.

A Juan Hernández, por su enorme paciencia y confianza. Por la amistad brindada a lo largo de estos años.

A los sinodales que conforman mi jurado, por sus oportunas correcciones.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo. A Guillermo Pulos por todo su apoyo a lo largo de este trabajo.

Al CONACyT y a la DGEP por las becas otorgadas para llevar a cabo mis estudios de Maestría y a los proyectos NC-204 y NSF-2004-C01-8 de CONACyT.

A toda la bandera de mi generación de la Maestría, por los buenos momentos, las posadas y su amistad.

A todos los compañeros y amigos del IIM. Los de antes y los de ahora.

A mis amigos de la Facultad.

A mis amigos de toda la vida. Por estar conmigo a pesar de la distancia.

A mi segunda familia. Por permitirme formar parte de ella.

A mi madre y a mi hermano, mi gran familia, por su apoyo incondicional, amor y compañía.

A Jonatan, mi corazón, por haber llegado justo cuando más falta me hacías.

A lo que a todos nos hizo converger en este punto de la vida.

# ÍNDICE

	Página
RESUMEN	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	3
1.1. Resonadores de fibra óptica	4
1.2. Fibras ópticas láser	5
1.2.1. Propiedades ópticas y electrónicas de iones de tierras raras en matrices de vidrio	7
1.3. Configuraciones y características de resonadores de fibra óptica	9
1.3.1. Modos del resonador como ondas estacionarias	12
1.4. Polarización y birrefringencia	14
1.5. Sensores polarimétricos	16
CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS A PARTIR DE LA MEDICIÓN DE DEFORMACIONES	19
2.1 Películas delgadas y técnicas de caracterización	19
2.2 Caracterización con sensores de fibra láser	21
2.2.1 Etapa de sensado y transducción	22
2.2.2 Dispositivos empleados	23
2.2.3 Sistema mecánico	24
CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE SENSORES POLARIMÉTRICOS CON RESONADORES FABRY-PEROT	28
3.1 Resonadores con múltiples modos longitudinales	31
3.1.1. Resonador de 20 metros	33
3.1.2. Reducción del número de modos longitudinales	35
3.2 Reducción de modos con absorción saturable	40
3.2.1 Material con absorción saturable dentro de la cavidad: efectos de la longitud en las características espectrales de las señales PMB	43
3.2.2 Efectos de la concentración de iones de erbio en la sección de absorción saturable y la sección de ganancia	46
3.2.3 Efecto de los espejos del resonador en las señales LMB y PMB	48

3.2.4 Arreglo aislado de perturbaciones ambientales	51
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
4.1 Características deseadas en señales PMB para medir deformaciones	54
4.2 Comparación entre arreglos experimentales	55
4.3 Sugerencias para configuración de resonadores	61
CONCLUSIONES	64
REFERENCIAS	66

## RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio experimental sobre el desempeño de sensores polarimétricos con fibras ópticas láser en la medición de deformaciones. La motivación para desarrollar este estudio parte de la necesidad de conocer con detalle y de manera cuantitativa algunos parámetros útiles de películas delgadas ultraduras aplicadas sobre materiales para proporcionar mayor dureza y resistencia mecánica. De esta manera, el objetivo de este trabajo está orientado a determinar la utilidad de los sensores polarimétricos para caracterizar las propiedades mecánicas de este tipo de películas delgadas.

Como una etapa inicial hacia el desarrollo de un dispositivo para caracterizar películas delgadas ultraduras, se llevó a cabo la caracterización de resonadores de Fabry-Perot con distintas configuraciones. Los experimentos realizados se basan en la medición de deformaciones con este tipo de sensores de fibra láser, entre cuyas características destacan alta sensibilidad y la posibilidad de analizar su respuesta a través de las frecuencias de los modos de polarización. La idea básica es caracterizar películas delgadas de forma indirecta, mediante la medición de las deformaciones producidas en una viga Cantilever causadas por una punta de prueba que pase sobre el recubrimiento del material. La parte sensora es un segmento de fibra óptica de 3 cm dentro del resonador adherido a la viga que detecta la deformación longitudinal que se produce. Los desplazamientos verticales que producen una deformación en la viga se cuantifican a través de los cambios en las frecuencias de polarización, y la relación entre los cambios de estas frecuencias y los desplazamientos proporciona información sobre las deformaciones. De esta manera, las pequeñas deformaciones generadas en la viga tendrán una estrecha relación con algunos parámetros propios de la película, como su dureza, rugosidad, adherencia o coeficiente de fricción.

Durante el desarrollo de los diferentes experimentos pudieron determinarse algunos elementos que deben tomarse en cuenta al trabajar con sensores de este tipo, ya que precisamente debido a su alta sensibilidad, resultan demasiado vulnerables ante cualquier cambio en las variables físicas de su entorno. De esta manera, se presenta un análisis

experimental detallado sobre la estabilidad de las señales heterodinas de polarización, así como la influencia de algunos parámetros característicos del resonador en el ancho espectral de estas señales. Este tipo de análisis permite, entre otras cosas, determinar las limitantes del uso de dispositivos electrónicos como los PLLs (phase locked loops) para decodificar el sensor. En general, por las limitantes de frecuencia de los PLLs de disponibilidad comercial, es necesario trabajar con resonadores grandes, aunque como se demuestra experimentalmente, esto complica la lectura de frecuencias debido a la gran cantidad de modos longitudinales disponibles en el resonador. Para reducir la cantidad de modos y adecuar el ancho espectral de las señales se utilizaron arreglos de fibra láser con absorción saturable. El análisis experimental de estos arreglos demuestra que, a pesar de reducir los modos longitudinales, el empleo de absorbentes saturables genera nuevas inestabilidades en las frecuencias de polarización de la fibra láser haciendo complicado analizar estas señales con configuraciones sencillas.

Al final de este trabajo se presenta un análisis detallado de los parámetros de interés de las señales heterodinas de polarización para cada arreglo. En general, no fue posible encontrar un arreglo capaz de registrar de manera adecuada desplazamientos de la punta del Cantilever del orden de 10 micras, que corresponde a las dimensiones de las películas de interés; sin embargo, se determinaron los elementos que se deben tomar en cuenta siempre que se desee medir deformaciones de este tipo, así como también se encontró que el empleo de elementos con absorción saturable representa muy probablemente el siguiente paso en las aplicaciones realizadas con sensores de este tipo, donde el reto sigue siendo aislar la variable de interés.

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

El desarrollo de películas delgadas ultraduras ha llevado a dar a los materiales que se emplean como sustrato, propiedades muy diferentes y, en algunos aspectos, superiores a las que se tendrían en condiciones originales. Una vez logradas las propiedades deseadas, o con el objeto de mejorarlas, es necesario conocer cuantitativamente las nuevas superficies, identificando características particulares como su perfil, rugosidad, dureza, adherencia y coeficiente de fricción entre otras [1].

Existen diferentes métodos que se han desarrollado para tratar de conocerlas, como pruebas de rayado para conocer su adherencia [1] y la nanoindentación para conocer su dureza [1, 2], aunque es necesario desarrollar otro tipo de técnicas que permitan un conocimiento más profundo de los materiales. Dentro del campo de la óptica se han aplicado diferentes elementos, como la interferometría, microscopía de fuerza atómica, elipsometría, topografía de rayos X, difracción de incidencia de borde o espectroscopía de absorción en infrarrojo, que permiten conocer algunas propiedades de los materiales y en algunos casos su composición [2, 3]. Sin embargo, no se han desarrollado sistemas que permitan hacer una caracterización lo suficientemente amplia que permita conocer en detalle las propiedades mecánicas de las películas delgadas.

El objetivo de este trabajo es evaluar el desempeño de un sensor polarimétrico de fibra óptica láser capaz de detectar las deformaciones que causaría el rayado de una película delgada ultradura con una punta de diamante. Si se coloca un segmento de un resonador de fibra óptica sobre una punta de prueba (viga cantilever), al deformarse cambia la birrefringencia de la fibra y como consecuencia se observa un cambio en la frecuencia de los modos de polarización del resonador. En una etapa posterior y a partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se buscará optimizar el desempeño del sensor polarimétrico para medir deformaciones con muy alta sensibilidad, y obtener así un dispositivo que pueda ser útil para la caracterización de propiedades mecánicas de

películas delgadas. Como veremos más adelante, el desarrollo actual de sistemas para caracterización de dureza, adherencia o coeficiente de fricción en películas delgadas es todavía un reto. El desarrollo de un sensor que permita evaluar dichas características en películas delgadas a partir de la medición de deformaciones con alta resolución, representaría una contribución importante para este campo.

### **1.1 Resonadores de fibra óptica**

Los sensores de fibra óptica han demostrado ser útiles para detectar una gran cantidad de variables físicas tales como temperatura, deformación y presión. Además de ofrecer ventajas únicas que hacen posible su uso en ambientes extremos, la tecnología de sensores de fibra óptica permite también realizar configuraciones para medición de parámetros distribuidos y cuasi-distribuidos. Sin embargo, a pesar de que se han demostrado muchas aplicaciones prácticas de estos sensores, su empleo frecuentemente está limitado por el uso de instrumentación de laboratorio costosa y voluminosa [4, 5]. Así mismo, el desarrollo práctico de instrumentación basada en esta tecnología debe también contemplar aspectos relacionados con el acondicionamiento y procesamiento de las señales proporcionadas por el sensor. En general, se busca implementar sistemas compactos que puedan ser utilizados fuera de ambientes controlados de laboratorio, y que presenten características adecuadas de inmunidad al ruido y sensibilidad al parámetro físico a medir.

Dentro de la gran variedad de sensores de fibra óptica que han sido reportados en la literatura, las fibras dopadas con elementos de tierras raras, también llamadas fibras láser, se han investigado ampliamente para aplicaciones de termometría de fluorescencia [6] y como sensores polarimétricos entre otros [7, 8]. Un sensor de fibra láser permite detectar cambios en un parámetro físico de interés a través de la cuantificación de variaciones en la potencia, fase, longitud de onda o polarización del haz de luz coherente generado en la fibra. Estos sensores pueden ser intrínsecos o extrínsecos, y la decodificación de la información dependerá del parámetro del haz a monitorear. Las fibras láser han encontrado su mejor aplicación en los amplificadores de fibra dopada con Erblio, y actualmente se utilizan en sistemas de comunicaciones como repetidores ópticos. Por

otro lado, aunque el uso actual de los sistemas láser de fibra en otras aplicaciones está relativamente limitado, su potencial como fuentes de luz para telecomunicaciones y sensores de fibra óptica los ha hecho objeto de estudio en diversas áreas de la ciencia y la tecnología [9].

## **1.2 Fibras ópticas láser**

Las fibras ópticas láser son amplificadores ópticos que convierten una señal en un haz de mayor potencia, frecuentemente miles de veces más brillante pero, en sus demás características, idéntica a la señal original [10]. El proceso de amplificación se logra gracias al fenómeno de emisión estimulada. Una fibra óptica, a la que le han sido agregados iones de tierras raras en el núcleo, se convierte en un dispositivo activo y, al ser estimulada con una señal óptica de longitud de onda específica, provoca la emisión estimulada de los iones de elementos de tierras raras y se genera la amplificación de la señal en la banda de emisión del ión.

Las principales aplicaciones que se han desarrollado con fibras ópticas láser se centran en dos casos generales: su uso como amplificadores o como fuentes de luz láser. En el primer caso, la señal óptica que se desea amplificar se introduce a una fibra láser; por medio de un acoplador se conecta una fuente de bombeo adicional, que es la que da la energía al amplificador, y en la salida se tendrá una réplica de la señal de entrada, pero amplificada. En el segundo caso, si una parte de la señal se refleja dentro de los extremos de la cavidad formada por dos espejos y entre ellos como medio activo la fibra láser, entonces la luz es amplificada mientras viaja dentro del resonador y se convierte en un láser. Dado que el proceso ocurre dentro de una fibra óptica el volumen de estos sistemas se reduce considerablemente.

Un proceso fundamental en el funcionamiento de un material láser es la absorción, en la cual un fotón u otra fuente de energía externa excitan a un material. En general, la mayoría de los átomos se encuentra normalmente en estado de equilibrio, por lo que la absorción generalmente es bastante más probable que la emisión estimulada. Si un porcentaje importante de los átomos se excita de alguna manera hacia un estado superior,

dejando el estado inferior vacío, se produce un fenómeno denominado inversión de población. Un fotón incidente de frecuencia apropiada puede entonces poner en movimiento una gran cantidad de fotones estimulados –todos en fase-; la onda inicial continúa creciendo siempre que no haya procesos competitivos dominantes y siempre que se pueda mantener la inversión de población. En la práctica, se bombea energía para sostener la inversión y se extrae un haz luminoso después de que éste recorre el medio activo [11, 12].

El principio fundamental para lograr la amplificación coherente de un haz luminoso es la amplificación de luz por emisión estimulada de radiación, proceso conocido como LASER, por su acrónimo en inglés. La emisión estimulada permite a un fotón inducir la transición del nivel superior de energía a uno menor del átomo y, en el proceso, emitir uno o más fotones siempre bajo el principio de conservación de energía, es decir, los fotones emitidos serán de la misma energía y fase que el fotón inicial. Estos nuevos fotones pueden servir para estimular la emisión de dos fotones más, y así sucesivamente, mientras se conserven las relaciones de frecuencia y fase. Dado que estas relaciones se mantienen en el tiempo y en el espacio, el resultado de este proceso es la amplificación coherente de luz. Debido a que existe emisión estimulada cuando la energía del fotón es la misma que la diferencia de energía en la transición atómica, el proceso está restringido a una banda de frecuencias determinadas por el ancho de banda atómico [11].

Un amplificador coherente ideal es un sistema lineal que incrementa la amplitud de la señal de entrada por un valor fijo, llamado la ganancia del amplificador. Una señal sinusoidal a la entrada produce una señal sinusoidal a la salida con la misma frecuencia pero con mayor amplitud. La ganancia del amplificador ideal es constante para todas las frecuencias dentro de su ancho de banda espectral. El amplificador puede afectar a la señal de entrada con un corrimiento de fase que cambia linealmente con la frecuencia, correspondiendo a un retraso en el tiempo de la salida con respecto a la entrada. En general, un amplificador puede caracterizarse por los siguientes parámetros: ganancia, ancho de banda, corrimiento de fase, fuente de energía externa (bombeo), no linealidad y saturación en ganancia y ruido.

Los amplificadores coherentes reales entregan una ganancia y corrimiento de fase que son dependientes de la frecuencia. La ganancia y el corrimiento de fase constituyen la función de transferencia del amplificador. Para una amplitud lo suficientemente grande a la entrada, además, los amplificadores reales pueden presentar saturación, una forma de comportamiento no lineal en la cual la amplitud de la salida deja de aumentar proporcionalmente a la amplitud de la entrada. La saturación agrega componentes armónicos a la salida, ya que el ancho de banda es lo suficientemente amplio para permitir su paso. Los amplificadores reales también agregan ruido, de modo que siempre existe una componente fluctuando aleatoriamente a la salida, sin importar la entrada [11].

### **1.2.1 Propiedades ópticas y electrónicas de iones de tierras raras en matrices de vidrio**

Los iones de tierras raras tienen una larga historia en aplicaciones ópticas y magnéticas. Entre éstas sobresalen algunos dispositivos luminiscentes que emplean cristales sencillos, polvos y vidrios. Los elementos de tierras raras tienen importantes características que los distinguen de otros iones ópticamente activos: emiten y absorben en un rango de longitudes de onda muy estrecho, las longitudes de onda de las transiciones de emisión y absorción son poco sensibles al material huésped, las intensidades de estas transiciones son débiles, los tiempos de vida de estados metaestables son largos y la eficiencia cuántica tiende a ser alta, excepto en soluciones acuosas. Todas estas propiedades se deben a la naturaleza de los estados envueltos en tales procesos y dan como resultado un excelente desempeño de los iones de tierras raras en muchas aplicaciones ópticas. Los dispositivos que proveen ganancia, como láseres y amplificadores, deben tener bajas pérdidas por esparcimiento, lo que restringe las aplicaciones al empleo de cristales o sustratos de vidrio. Existen aplicaciones en las cuales se emplean materiales cristalinos, ya que tienen propiedades ópticas y térmicas adecuadas para propósitos prácticos. En otros casos se ha optado por emplear vidrios dopados con elementos de tierras raras, debido a que son más versátiles y tienen espectros de absorción y emisión anchos. Esto ha sido de gran importancia para el desarrollo de dispositivos de fibra óptica, pues las altas intensidades y grandes longitudes de interacción disponibles en este tipo de guías de

ondas las hacen superiores a sus contrapartes de vidrio en bulto para muchas aplicaciones. La mayor excepción en esto se presenta en aplicaciones que requieren pulsos de alta energía, para las cuales el pequeño volumen de la fibra óptica no puede proveer tanto almacenamiento como los medios voluminosos [9].

Las tierras raras están divididas en dos grupos de 14 elementos cada uno. Los lantánidos están caracterizados por llenar el nivel electrónico  $4f$  y comienzan con el Cerio (Ce) y termina con el Lutecio (Lu). Los actínidos se encuentran debajo de ellos en la tabla periódica, llenan el nivel  $5f$  y van desde el Torio hasta el Laurencio. A pesar de que estos elementos comparten muchas propiedades electrónicas, los de mayor importancia para sistemas láser y amplificadores son los lantánidos, sobre todo porque muchos actínidos no tienen isótopos lo suficientemente estables para emplearse en estos dispositivos. El nivel trivalente de ionización ( $3+$ ) es el más estable para los iones lantánidos, y muchos dispositivos ópticos emplean iones trivalentes. Los espectros ópticos observados en infrarrojo y visible de iones trivalentes de tierras raras son una consecuencia de la transición entre los estados  $4f$ . Para muchos iones también ocurre en el ultravioleta para longitudes de onda menores a 300 nm, a pesar de que para algunos, como el  $Ce^{3+}$  y el Praseodimio trivalente ( $Pr^{3+}$ ), los niveles  $5d$  se encuentran lo suficientemente bajos como para producir bandas de absorción fuertes y amplias en el ultravioleta [9].

Después del Neodimio ( $Nd^{3+}$ ), el Erblio ( $Er^{3+}$ ) es el ión láser de tierras raras más estudiado. Existen ocho transiciones láser reportadas para matrices cristalinas dopadas con Erblio. De éstas la más importante se da a 2700-2900 nm, y presenta aplicaciones en cirugía porque coincide con la banda fundamental de absorción de vibración del radical OH. Hasta la llegada de los fluoruros, sólo podía operarse en la transición de 1500 nm para matrices de vidrio, ya que los estados de largo tiempo de vida decaían no-radiativamente. El progreso en el estudio del Erblio fue lento, sin embargo, la evolución de las comunicaciones ópticas hacia la tercera ventana de operación centrada en 1550 nm (como se observa en la figura 1.1, donde se presentan los espectros de emisión del Erblio en diferentes sustratos) incrementó el interés en las fibras dopadas con este tipo de ión [9].

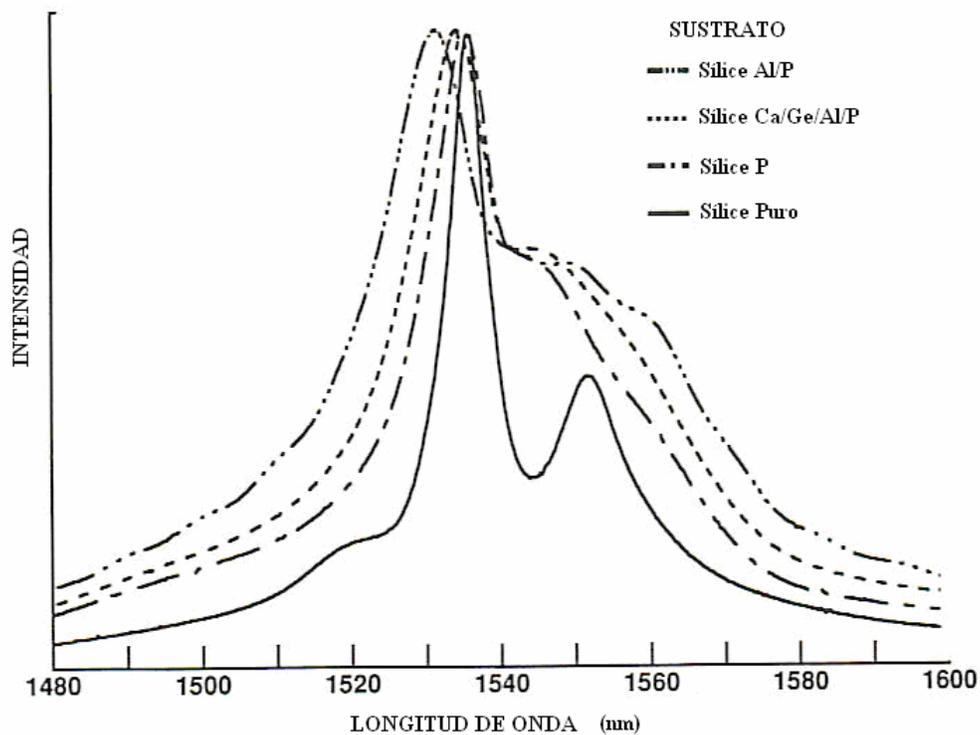


Figura 1.1 Espectro de emisión de fibras de sílice dopadas con Erblio ( $Er^{3+}$ ) para diferentes sustratos.

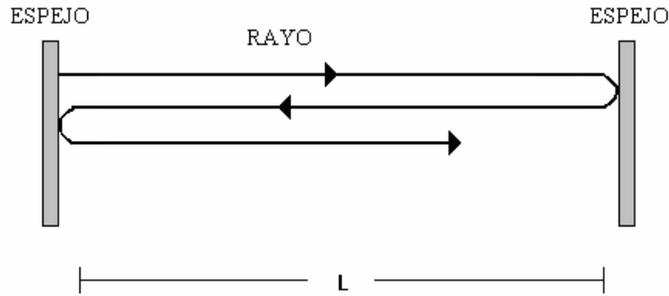
### 1.3 Configuraciones y características de resonadores de fibra óptica

Un resonador óptico, la contraparte óptica de un circuito electrónico resonante, confina y almacena luz a ciertas frecuencias de resonancia. Puede ser visto como un sistema de transmisión óptico que incorpora retroalimentación; la luz circula o es reflejada repetidamente dentro del sistema sin escapar. El resonador más simple consta de dos espejos planos paralelos entre los cuales la luz se refleja repetidamente con pocas pérdidas. La selectividad en frecuencia de un resonador óptico lo hace útil como filtro o también como analizador de espectros. Su uso más importante, sin embargo, es como un “contenedor” de energía dentro del cual se genera luz láser. Una manera simple de describir un sistema láser es como un resonador óptico que contiene un medio que amplifica la luz, donde las características del resonador determinan la frecuencia y

distribución espacial del haz láser. Ya que los resonadores tienen la capacidad de almacenar energía, también pueden emplearse para generar emisión láser.

Pueden emplearse varios enfoques para describir la operación de un resonador óptico. El enfoque más simple está basado en la óptica de rayos: se trazan rayos ópticos de la forma en la que se reflejan dentro del resonador, donde las condiciones geométricas bajo las cuales se mantienen confinados son conocidas. La óptica de ondas se emplea para determinar los modos del resonador, esto es, las frecuencias de resonancia y funciones de onda ópticas que existen de manera auto-consistente dentro del resonador. La óptica de Fourier y la teoría de propagación y difracción de la luz son necesarias para entender el efecto del tamaño finito de los espejos del resonador sobre sus pérdidas y sobre la distribución espacial de los modos [11, 12]. Aunque el análisis detallado de los resonadores requiere entonces de varios enfoques teóricos, los parámetros de operación más relevantes como las frecuencias de resonancia y el espaciamiento entre modos pueden obtenerse de manera relativamente simple.

La geometría y las propiedades espectrales de los espejos determinan las características de operación de los resonadores ópticos. Un resonador unidimensional construido con dos espejos planos, paralelos y altamente reflectivos, separados por una distancia  $L$  es conocido como resonador de Fabry-Perot (figura 1.2). La cavidad resonante de Fabry-Perot, con un medio activo entre los espejos, desempeña un papel muy importante en la operación de un láser. En las primeras fases del proceso láser se emiten fotones espontáneos y estimulados en todas direcciones; no obstante, todos ellos, con la única excepción de los que se propagan casi a lo largo del eje de la cavidad, salen rápidamente por los lados del medio activo. Por su parte, el rayo axial continúa creciendo conforme se refleja una y otra vez en los espejos para pasar a través del medio activo. Aunque el medio actúa para amplificar la onda, la alimentación óptica proporcionada por la cavidad convierte el sistema en un oscilador y, por consiguiente, en un generador de luz.



*Figura 1.2 Resonador Fabry-Perot*

La onda que se propaga dentro de la cavidad adquiere una configuración de onda estacionaria determinada por la separación  $L$  de los espejos. La cavidad resuena (es decir, existen ondas estacionarias en su interior) cuando hay un número entero  $m$  de semi-longitudes de onda cubriendo la región entre los espejos. La idea es que haya simplemente un nodo en cada espejo y esto puede ocurrir sólo cuando  $L$  es igual a un número entero múltiplo de  $\lambda/2$ , donde  $\lambda = \lambda_0/n$ ;  $n$  es el índice de refracción del medio,  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz dentro del medio y  $\lambda_0$  es la longitud de onda de la luz en el vacío. De esta manera se establece que:

$$m = \frac{L}{\lambda/2} \quad (1.1)$$

y las frecuencias de resonancia son entonces:

$$\nu_m = \frac{mc}{2L} \quad (1.2)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el medio de propagación.

Por consiguiente, existe un número infinito de posibles modos longitudinales de oscilación en la cavidad, cada uno con una frecuencia particular  $\nu_m$ . Los modos adyacentes están separados por una diferencia en frecuencia constante,

$$\nu_{m+1} - \nu_m = \Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (1.3)$$

que es el rango espectral libre del resonador y, además, es el inverso del tiempo de ida y vuelta de la onda en el resonador.

Los modos resonantes de la cavidad son considerablemente más estrechos en frecuencia que el ancho de banda de la transición atómica espontánea normal. Estos modos serán los que pueden oscilar en la cavidad y, por consiguiente, el rayo emergente estará restringido a una región cercana a esas frecuencias. Dicho de otro modo, la transición radiativa proporciona un rango relativamente ancho de frecuencias entre las cuales la cavidad seleccionará y amplificará sólo ciertas bandas estrechas y, llegando el caso, incluso una sola de tales bandas. Una manera de generar un único modo en la cavidad es ajustar la separación entre modos de tal manera que esta supere el ancho de banda de transición, permitiéndose así un sólo modo en el rango de frecuencias proporcionada por la transición atómica. La desventaja de este método particular es que limita la longitud de la región activa que aporta energía al rayo, limitando por eso la potencia de la salida del láser [10, 11].

### 1.3.1 Modos del resonador como ondas estacionarias

Una onda monocromática de frecuencia  $\nu$  tiene una función de onda [11]:

$$u(r, t) = \text{Re} \{ U(r) \exp(j2\pi\nu t) \}, \quad (1.4)$$

que representa la componente transversal del campo eléctrico, donde  $r = r(x, y, z)$  y  $z$  es la dirección de propagación de la onda. La amplitud compleja  $U(r)$  satisface la ecuación de Helmholtz,  $\nabla^2 U + k^2 U = 0$ , donde  $k = 2\pi\nu / c$  es el número de onda y  $c$  es la velocidad de la luz en el medio. Los modos de un resonador son las soluciones básicas de la ecuación de Helmholtz sujeta a las condiciones de frontera apropiadas. Para el resonador de espejos planos, las componentes transversales del campo eléctrico desaparecen en las superficies de los espejos, así que  $U(r)=0$  en los planos  $z=0$  y  $z=L$ , como se muestra en la figura 1.3.

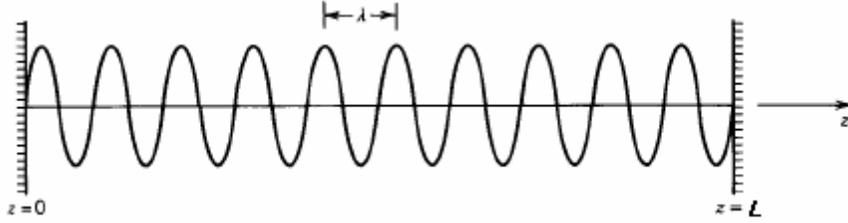


Figura 1.3 Amplitud compleja de un modo del resonador.

La onda estacionaria definida por la siguiente ecuación:

$$U(r) = A \sin kz, \quad (1.5)$$

donde  $A$  es una constante, satisface la ecuación de Helmholtz y desaparece en  $z=0$  y  $z=L$  si  $k$  satisface la condición  $kL=q\pi$ , donde  $q$  es un entero. Esto restringe a  $k$  a los valores

$$k_q = \frac{q\pi}{L}, \quad (1.6)$$

a fin de que los modos tengan amplitudes complejas  $U(r) = A_q \sin k_q z$ , donde los valores de  $A_q$  son constantes. Los valores negativos de  $q$  no constituyen modos independientes, ya que  $\sin k_{-q} z = -\sin k_{-q} z$ . El valor  $q=0$  está asociado con un modo que no transporta energía ya que  $k_0 z = 0$  y  $\sin k_0 z = 0$ . Los modos del resonador son entonces las ondas estacionarias  $A_q \sin k_q z$ , donde al entero positivo  $q=1,2,3, \dots$  se le llama número de modo. Una onda arbitraria dentro del resonador puede expresarse como una superposición de los modos del resonador, esto es

$$U(r) = \sum_q A_q \sin k_q z \quad (1.7)$$

A partir de (1.6), podemos ver que la frecuencia  $\nu = ck/2\pi$  está restringida a los valores discretos:

$$\nu_q = q \frac{c}{2L}, \quad q=1,2,3,\dots \quad (1.8)$$

que son las frecuencias del resonador. Como se muestra en la figura 1.4, las frecuencias de resonancia adyacentes están separadas por una diferencia de frecuencia constante

$$\nu_F = \frac{c}{2L} \quad (1.9)$$

Las longitudes de onda de resonancia son  $\lambda_q = c/\nu_q = 2L/q$ . En resonancia, la longitud del resonador,  $L=q\lambda/2$  es un múltiplo entero de medias longitudes de onda. Cabe notar que  $c = c_0/n$ , es la velocidad de la luz en el medio comprendido entre los dos espejos, y  $\lambda_q$  representa las longitudes de onda en el medio.

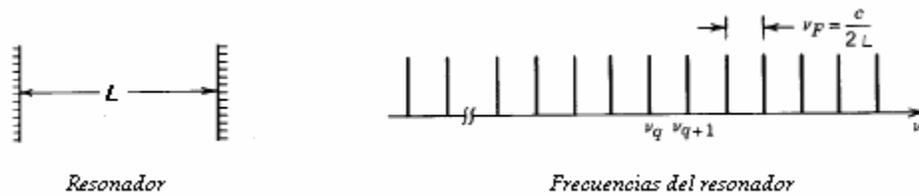


Figura 1.4 Frecuencias de resonancia de un resonador de espejos planos

#### 1.4 Polarización y birrefringencia

La polarización de la luz está determinada por la variación con el tiempo de la dirección del vector de campo eléctrico  $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ . Para la luz monocromática, los tres componentes espaciales de  $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$  varían sinusoidalmente en el tiempo con amplitudes y fases que son generalmente diferentes, así que a cada posición  $\mathbf{r}$ , la punta del vector  $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$  se mueve en un plano y traza una elipse. El plano, la orientación y la figura de la elipse generalmente varían con la posición.

En óptica paraxial, sin embargo, la luz se propaga en direcciones que se mantienen dentro de un cono estrecho centrado en el eje axial (eje  $z$ ). Las ondas son aproximadamente electromagnéticas-transversas (TEM) y entonces el vector de campo eléctrico se mantiene aproximadamente en el plano transversal (plano  $x$ - $y$ ). Si el medio es isotrópico, la elipse de polarización es aproximadamente la misma en todos lados y se dice que la onda está polarizada circularmente. La orientación y excentricidad de la elipse

determinan el estado de polarización de la onda, mientras que el tamaño de la elipse está determinado por la intensidad óptica. Cuando la elipse se convierte en una línea recta o en un círculo, se dice que la onda está polarizada linealmente o circularmente, respectivamente.

La polarización juega un papel importante en la interacción de la luz con la materia. Por ejemplo, el índice de refracción de materiales anisotrópicos depende de la polarización, lo cual implica que las ondas con diferentes polarizaciones viajan a diferentes velocidades y, como consecuencia, se presentan diferentes corrimientos de fase. En estos casos, la elipse de polarización descrita anteriormente se modifica mientras la onda avanza a través del medio. Existen también los materiales llamados ópticamente dinámicos, que tienen la capacidad natural de rotar el plano de polarización de la luz linealmente polarizada [11].

Un medio dieléctrico se dice que es anisotrópico si sus propiedades ópticas macroscópicas dependen de la dirección. Si se analiza la refracción de una onda plana en la frontera entre un medio isotrópico (por ejemplo, aire  $n=1$ ) y un medio anisotrópico (un cristal), el principio clave es que los frentes de onda de las ondas incidente y refractada deben coincidir en la frontera. Debido a que el medio anisotrópico soporta dos modos con dos diferentes velocidades de fase, se espera que para cada onda incidente haya dos ondas refractadas con dos diferentes direcciones y diferentes polarizaciones. A este efecto se le conoce como doble refracción o birrefringencia, y se presenta cuando el medio tiene un índice de refracción diferente para cada dirección dentro del material.

La birrefringencia es una característica que se presenta también en las fibras ópticas, y existen varios factores que determinan el grado de birrefringencia que puede exhibir este tipo de guías de onda. De manera general, estos factores pueden ser clasificados en intrínsecos y extrínsecos; mientras que los primeros se deben a las características del material y la geometría de la fibra, los factores extrínsecos se generan cuando agentes externos (curvatura, tensión, campos magnéticos) afectan la birrefringencia de la fibra [13]. Esta última característica implica que la birrefringencia de una fibra óptica puede

cambiarse al afectarla con un cambio físico como, por ejemplo, temperatura, presión o deformación.

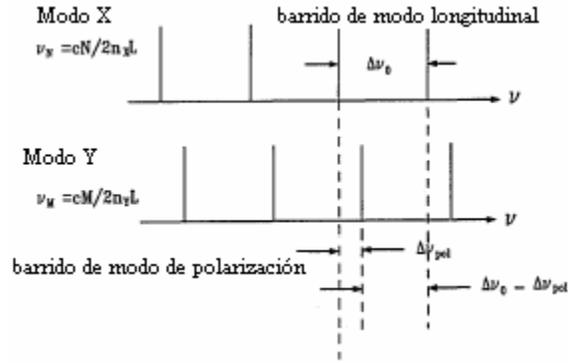
Las características de birrefringencia de las fibras ópticas generan efectos de polarización en el haz de luz que se propaga en el núcleo. Cuando la fibra se emplea dentro de un resonador, la birrefringencia ocasiona que existan modos longitudinales con diferente frecuencia para cada índice. Como veremos a continuación, a partir de estos modos se pueden obtener frecuencias heterodinas de polarización cuyo valor cambiará al cambiar la birrefringencia de la fibra. De este modo, con un resonador de fibra óptica se puede implementar un sensor para diferentes variables físicas, siempre que éstas afecten la birrefringencia del material.

### **1.5 Sensores polarimétricos**

La birrefringencia en una fibra es una característica que puede aprovecharse para realizar aplicaciones en sensores polarimétricos, en los que la polarización del haz de luz se ve afectada por el parámetro físico a medir. Tanto resonadores de fibra óptica como algunos arreglos de fibras láser han demostrado ser útiles en la medición de esfuerzos, temperatura, presión, vibraciones e intensidad de corriente [8, 14, 15]. Para sensores basados en fibras láser, se han estudiado principalmente cavidades resonantes de Fabry-Perot, empleando combinaciones de rejillas de Bragg, espejos de bulto y otros elementos ópticos. Una vez caracterizado el resonador, puede establecerse una relación entre el parámetro físico a medir y el cambio en las frecuencias de polarización (PMBs, de las siglas en inglés de *polarization mode beating*) generado como consecuencia del cambio en la birrefringencia de la fibra. El hecho de poder monitorear el parámetro de interés por medio de las frecuencias de polarización del resonador implica simplificar la decodificación del sensor, ya que empleando otros métodos, como en el caso de la interferometría o el uso de rejillas de Bragg como sensores, implica realizar mediciones de fase y longitud de onda, mientras que con este tipo de sensores polarimétricos tienen que medirse únicamente cambios en frecuencia.

Aunque el comportamiento de la polarización de un láser con cavidad anisotrópica puede ser complicado debido a la ganancia del medio, muchas de las características de interés pueden explicarse a partir de las propiedades de una cavidad pasiva. Con la finalidad de operar la fibra láser como sensor, debe medirse el cambio de la frecuencia PMB en función del cambio en la birrefringencia de la fibra, que a su vez se da como consecuencia de la variable a medir. Si se logra operar dentro de un rango lineal, es decir, que el cambio en la frecuencia PMB del resonador sea directamente proporcional al cambio en la variable de interés, puede entonces emplearse el arreglo para medir cualquier magnitud física que modifique la birrefringencia de la fibra láser.

En la figura 1.6 se muestran las líneas de los modos longitudinales para cada modo de polarización y sus frecuencias de barrido, donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $L$  es la longitud de la cavidad,  $M$  y  $N$  son números enteros, y  $n_x$  y  $n_y$  son los dos índices de refracción efectivos en los dos modos de polarización (etiquetados arbitrariamente como  $X$  e  $Y$ ). En general, los dos índices de refracción efectivos para los modos de polarización son diferentes, lo que resulta en diferencias en las frecuencias de resonancia. Las frecuencias PMB aparecen en posiciones simétricas  $\Delta\nu_{pol}$  y  $\Delta\nu_0 - \Delta\nu_{pol}$  alrededor de las frecuencias LMB del resonador (siglas en inglés de *longitudinal mode beating*) adyacentes. El cambio en  $\Delta\nu_{pol}$  debido al cambio de la birrefringencia de la fibra puede monitorearse a través de los cambios en estas frecuencias; nótese que para que estas frecuencias puedan ser observadas, las dos polarizaciones ortogonales emitidas por la fibra láser deben mezclarse con un polarizador [7, 8]. Dado que esta mezcla involucra señales a diferentes frecuencias, las señales PMB se conocen también como señales heterodinas de polarización. Después de pasar por el polarizador, las dos polarizaciones a la salida de la fibra se mezclan en un fotodetector con un ancho de banda adecuado, y la fotocorriente puede monitorearse con un analizador de radio-frecuencia.



*Figura 1.6 Frecuencias de resonancia de cada modo de eigenpolarización y sus frecuencias de barrido*

Además de ser útiles para medir esfuerzos y temperatura, los sensores polarimétricos de fibra láser pueden proporcionar información sobre la longitud de onda de emisión de la fibra [16], o también sobre la dispersión modal de polarización de dispositivos colocados dentro del resonador [17]. La sensibilidad de estos arreglos se basa en el hecho de que la birrefringencia de la fibra óptica dentro del resonador se ve afectada por los parámetros físicos a medir; sin embargo, se requiere también de métodos para medir frecuencia con la resolución adecuada para poder explotar al máximo las características de estos sensores. Esto también implica que las señales PMB deben tener un ancho espectral angosto, y por lo tanto, las características modales de la fibra láser son de gran relevancia para estos arreglos.

Hemos visto hasta ahora que es posible emplear una fibra láser con un resonador de Fabry-Perot como sensor de esfuerzos; sabiendo que los esfuerzos en un material están relacionados directamente con las deformaciones, puede pensarse en utilizar un arreglo similar a los reportados previamente para medirlas. Podemos esperar que el arreglo presente una respuesta lineal de los cambios de las frecuencias de polarización al aplicar deformaciones en la pieza a la cual se adhiera un segmento de resonador. Los experimentos realizados para demostrar esto se presentarán en las siguientes secciones. En el siguiente capítulo se presenta un panorama general sobre películas delgadas, con el fin de conocer algunas de sus características e identificar los posibles campos de aplicación de los sensores polarimétricos de fibra láser.

## CAPÍTULO 2

### CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS A PARTIR DE LA MEDICIÓN DE DEFORMACIONES

#### 2.1 Películas delgadas y técnicas de caracterización

Las películas delgadas son depósitos que se hacen en materiales (sustratos) para alcanzar propiedades que no se obtendrían en el sustrato solo. Todos los procesos para la elaboración de películas delgadas están constituidos por varias etapas. Una vez que se tiene una fuente de material para la película, el material se transporta al sustrato, se realiza el depósito, algunas veces la película se recoce o templea y finalmente es analizada para evaluar el proceso. Los resultados del análisis se emplean para ajustar las condiciones de las etapas previas para modificar las propiedades de las películas.

Una forma de análisis consiste en medir aquellas propiedades que son importantes para ciertas aplicaciones, como la dureza de un recubrimiento para herramientas, el voltaje de ruptura de un aislante o el índice de refracción de una película óptica. Muchos procesos de depósito se optimizan empleando el método relativamente empírico de medir propiedades clave de las películas como funciones de las variables del proceso que pueden ser modificadas en las primeras etapas de fabricación. Un nivel más profundo de análisis implica probar la estructura y composición de la película, ya que son factores que determinan las propiedades observadas. Este tipo de análisis generalmente es más difícil, pero provee un vínculo entre la etapa del depósito y las propiedades finales de la película, que contribuye a entender mucho mejor el proceso completo.

En muchos casos, algunas películas al final ya habrán sido monitoreadas durante el proceso de depósito empleando varias técnicas *in-situ*, pero una vez terminada y retirada la película, es posible emplear otras técnicas analíticas. Existen dos criterios para realizar el análisis de películas. Un criterio se basa en las aplicaciones, que implica realizar mediciones sobre su comportamiento, es decir, la forma en la que interactúa con el ambiente: luz, campos eléctricos y magnéticos, fuerza mecánica y calor. El segundo

criterio implica probar la estructura y composición que determinan el comportamiento de la película, además de ayudar a comprender la relación entre la etapa de depósito del material y el comportamiento de la película [2].

En cualquier situación las propiedades de una superficie sólida son importantes, ya que juegan un papel primordial en una gran cantidad de procesos, fenómenos y materiales de importancia tecnológica. Estos incluyen catálisis, corrosión y oxidación, adhesión, tribología, fricción y desgaste, fractura de metales y cerámicos, microelectrónica, compuestos, tratamiento de superficies de polímeros y plásticos, recubrimientos protectores, superconductores y reacciones de superficie en sólidos con gases, líquidos u otros sólidos [3]. Cuando se trata de herramientas con recubrimientos, su desempeño depende críticamente de la composición, estructura y propiedades mecánicas del recubrimiento y el sustrato en el que se realiza el depósito. Mientras que las pruebas analíticas permiten evaluar las primeras dos propiedades, los métodos para medir las propiedades mecánicas no están completamente establecidos.

Las técnicas de medición convencionales para propiedades mecánicas pueden tener limitaciones cuando se aplican a recubrimientos duros relativamente delgados, ya que la región en la cual debe ocurrir la deformación plástica o fractura debe estar confinada en el espesor del recubrimiento. La adhesión interfacial entre recubrimiento y sustrato es una característica relevante para las películas o recubrimientos. Se ha demostrado que existen principalmente dos métodos prácticos para estimar la adherencia al sustrato, que son la prueba de rayado y la técnica de indentación [18]. La primera se basa en medir la carga crítica (fuerza normal aplicada a una punta movable) necesaria para remover el recubrimiento durante el rayado, ya que ésta proporciona un valor característico de la adhesión, mientras que la última está asociada con una carga crítica para la formación de una grieta lateral durante la indentación y su parámetro de dureza de fractura interfacial.

La resistencia al desgaste por abrasión que presentan algunos recubrimientos tiene que ver básicamente con su dureza. La medición de la dureza de un recubrimiento presenta un problema cuando los recubrimientos son relativamente delgados ( $\leq 10\mu\text{m}$ ), ya que se requieren cargas de indentación ligeras, las cuales producen indentaciones que son

dificiles de medir sobre recubrimientos que normalmente presentan grados de rugosidad de superficie variables. Hasta ahora la mejor forma de realizar estas pruebas es empleando de una punta de sección adelgazada que pase a través del espesor del recubrimiento, mediante una técnica de rayado con una punta esférica deslizante. Estas mediciones son particularmente útiles en la interpretación de mecanismos de desgaste y la funcionalidad de recubrimientos duros empleados en el corte de metales [2].

En cualquier caso, la caracterización de las propiedades mecánicas de una película o recubrimiento requerirá realizar pruebas destructivas sobre la muestra. El conocer la geometría de la superficie o la composición del depósito no proporciona información exacta sobre sus propiedades mecánicas, como su grado de dureza, coeficiente de fricción o grado de adherencia con el sustrato.

## **2.2 Caracterización con sensores de fibra láser**

El empleo de sensores ópticos para medir pequeñas deformaciones es de interés en varios campos de aplicación. Se ha demostrado el uso de dispositivos como rejillas de Bragg para medir deformaciones, pero la implementación de estos sistemas es limitada, principalmente porque se requiere equipo sofisticado para medir los cambios en la longitud de onda del sensor en respuesta a la deformación aplicada, además de que es muy difícil lograr altas sensibilidades [19]. Sin embargo, si se sabe que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, cualquier cambio que se manifieste en una variación muy pequeña en la longitud de onda puede representar un cambio muy grande en frecuencia. Si la variable óptica de interés es el cambio en las frecuencias heterodinas del resonador, puede entonces construirse un sensor con muy alta resolución.

Un área de interés para la aplicación de los sensores de fibra óptica como medidores de deformaciones es la caracterización de películas delgadas. Empleando una configuración adecuada es posible analizar cuantitativamente la adherencia y la dureza de la película o recubrimiento en el sustrato, así como determinar su coeficiente de fricción. Se ha reportado la aplicación de sensores de fibra óptica para la caracterización de

películas delgadas mediante arreglos interferométricos [20], útil principalmente en la inspección de la topografía de la superficie.

Existe una alternativa para realizar pruebas de rayado mediante el empleo de sensores polarimétricos de fibra óptica. Como se mencionó en el Capítulo 1, ya se ha demostrado el uso de estos sensores para la medición de esfuerzos, temperatura y campos eléctricos [8, 15]. Por medio de estos dispositivos es posible alcanzar la sensibilidad adecuada para las magnitudes de fuerza requeridas en las pruebas de rayado, además de permitir la adquisición de la información de interés de manera sencilla, a través de la mezcla heterodina de frecuencias de polarización.

### **2.2.1 Etapa de sensado y transducción**

En el Capítulo 1 se mencionó que las señales generadas con la mezcla heterodina de frecuencias, conocidas como señales PMB (*Polarization Mode Beating*), se obtienen a partir de la diferencia de frecuencias de oscilación en las polarizaciones ortogonales de un resonador de fibra láser. Debido a que la frecuencia de estas señales depende directamente de la birrefringencia de la fibra dentro del resonador, una deformación de ésta generará un cambio en la frecuencia de la señal PMB.

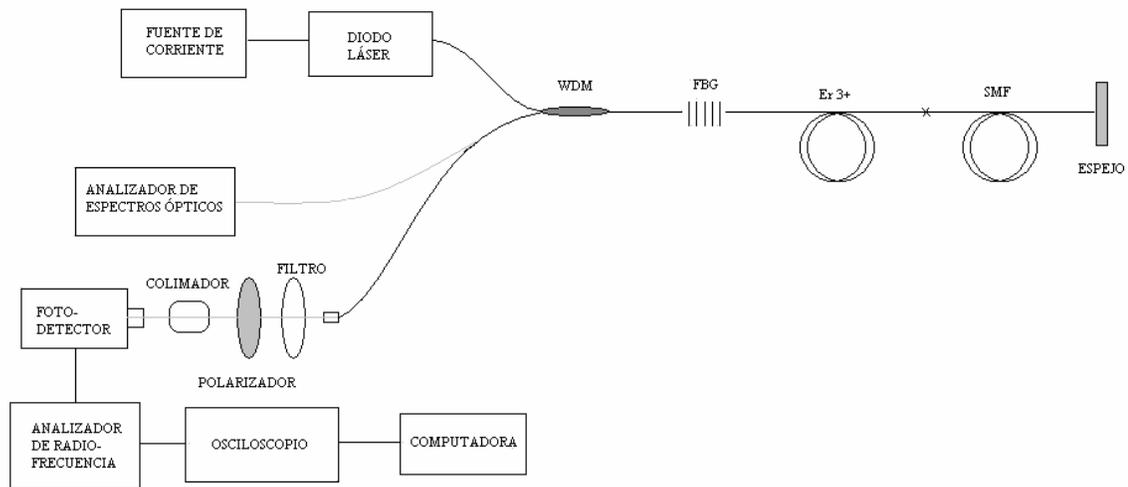
Las señales PMB son muy sensibles a los cambios en la birrefringencia del resonador, por lo que resultan de gran utilidad en el sensado de deformaciones muy pequeñas en la fibra óptica dentro de la cavidad. Empleando una configuración de resonador adecuada, puede construirse un transductor de deformaciones, es decir, un sistema que presente cambios en una señal óptica a la salida como consecuencia de una deformación proporcional en la fibra. El empleo de un sistema de este tipo permite realizar la transducción a través de la medición de la variación de las frecuencias del resonador, lo que conduce a la posibilidad de emplear circuitos electrónicos de uso común en la medición de frecuencias, además de representar un bajo costo, alta sensibilidad en las lecturas y versatilidad en cuanto al tamaño del dispositivo.

Una vez planteado el problema, es necesario analizar el desempeño de diferentes configuraciones de resonadores de fibra óptica láser, para determinar cuál de ellos

presenta las mejores características en la medición de deformaciones; estudiar la posibilidad de emplear un sistema electrónico basado en un PLL (*Phase Locked Loop*) para realizar la decodificación del sensor polarimétrico de fibra láser y analizar los resultados, para determinar la factibilidad de su aplicación en pruebas de rayado y/o indentación como herramienta en la caracterización de películas delgadas.

### 2.2.2 Dispositivos empleados

En todos los casos se estudiaron diferentes configuraciones de resonadores, todas basadas en la estructura del resonador de Fabry-Perot. En términos generales se empleó un arreglo base como el que se muestra en la figura 2.1. En muchos casos los elementos que se emplearon fueron los mismos; lo que hizo diferente a cada experimento fueron algunas modificaciones hechas en algunos parámetros, como la longitud del resonador, el tipo de fibra (monomodal, PM, láser, etc.), el número de controladores de polarización y la posición de la que se toman las lecturas de frecuencia a la salida.



*Figura 2.1 Elementos de un resonador Fabry-Perot. De la figura, WDM es un multiplexor por longitud de onda, FBG es una rejilla de Bragg,  $Er^{3+}$  y SMF es fibra monomodal.*

Los elementos que constituyen los diferentes arreglos de resonadores que se construyeron incluyen una fuente de corriente que proporciona la corriente de bombeo para operar el diodo láser, un WDM (multiplexor por longitud de onda) para separar la

energía de bombeo y la señal generada en la fibra láser y rejillas de Bragg (como espejo de ancho de banda estrecho). Estos últimos elementos se emplearon en diferentes combinaciones o con espejos de bulto de ancho espectral amplio para formar los resonadores de Fabry-Perot. Dentro de la cavidad resonante se empleó fibra láser (fibra dopada con iones de Erblio) y fibra monomodal. Se emplearon también controladores de polarización a lo largo del arreglo para modificar la birrefringencia de la fibra y poder ajustar la posición y la amplitud de las señales PMB.

Para observar el espectro de emisión a la salida, verificar que el sistema esté resonando y que exista emisión láser a la longitud de onda de Bragg se utiliza un analizador de espectros ópticos. A la salida de la fibra óptica se coloca un filtro, a fin de evitar que cualquier componente residual del bombeo interfiera con la señal de interés. Posteriormente se coloca un polarizador, que sirve para obtener las frecuencias heterodinas del resonador.

Para convertir las señales ópticas en señales eléctricas se utiliza un fotodetector, que a su vez se conecta a un analizador de radiofrecuencia. El módulo analizador de radiofrecuencia se conecta a un osciloscopio y para poder adquirir, almacenar y procesar las señales se conectan estos dispositivos a una computadora, a través de su puerto serial.

En el Capítulo 3 se presentan las diferentes configuraciones de resonadores que se caracterizaron para la medición de deformaciones, realizando cambios principalmente en longitud del resonador, longitud del medio activo (fibra láser) y posición de éste a lo largo del resonador.

### **2.2.3 Sistema mecánico**

Para realizar el análisis de los cambios de frecuencia con las deformaciones para las diferentes configuraciones de resonadores de fibra láser, se empleó un sistema mecánico como el que se muestra en la figura 2.2.

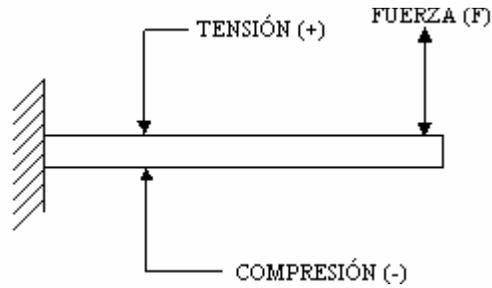


Figura 2.2 Viga cantilever

El arreglo está constituido por una viga cantilever de aluminio (con dimensiones 62.5 x 9 x 9 mm), empotrada a una base de acero inoxidable por medio de una caja rectangular y un tornillo, como se muestra en la figura 2.3. Realizando un empotramiento de esta forma se evita en gran medida el juego mecánico entre las piezas, que aún siendo aparentemente imperceptible, afecta los resultados. Si se tiene en cuenta que las deformaciones generadas como consecuencia de los desplazamientos de la punta de la viga son muy pequeñas, cualquier juego en las piezas representa grandes fuentes de error [19]. Con esta configuración es posible adherir la sección de fibra del resonador que sirve como sensor a la parte superior de la viga, y registrar la deformación elástica aplicada a la viga.

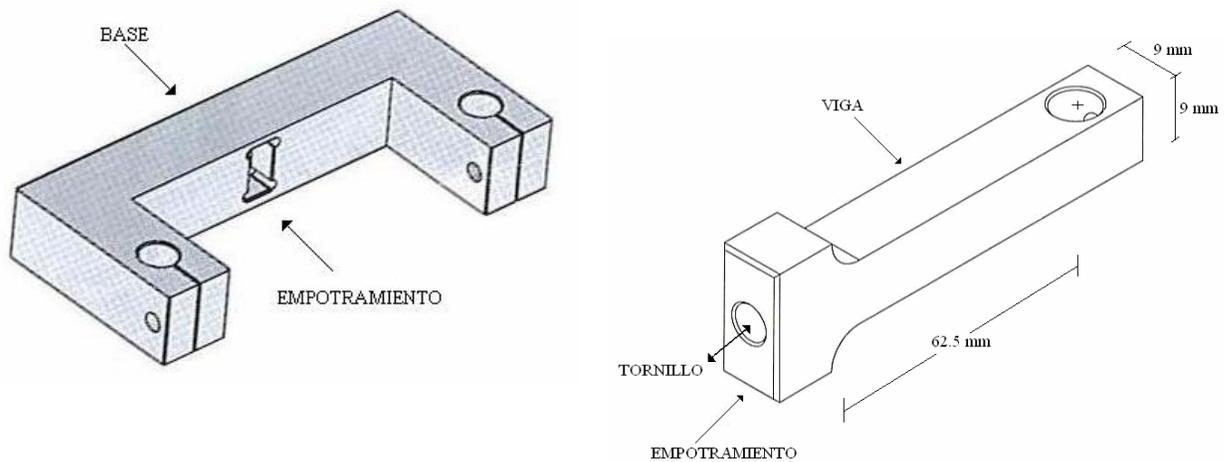
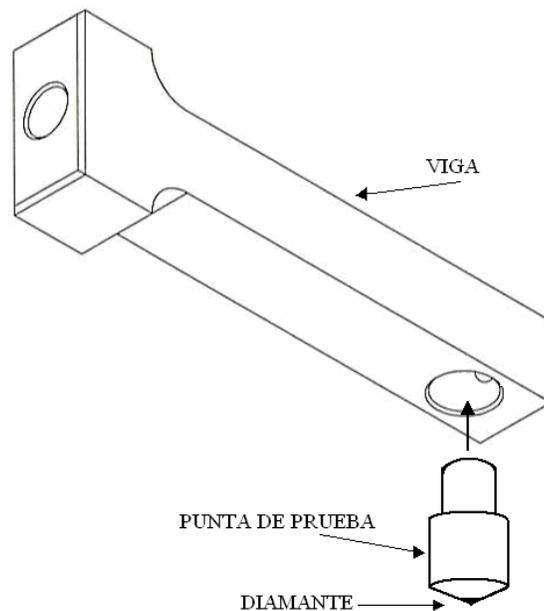


Figura 2.3 Diagramas de las piezas empleadas para el empotramiento y la viga

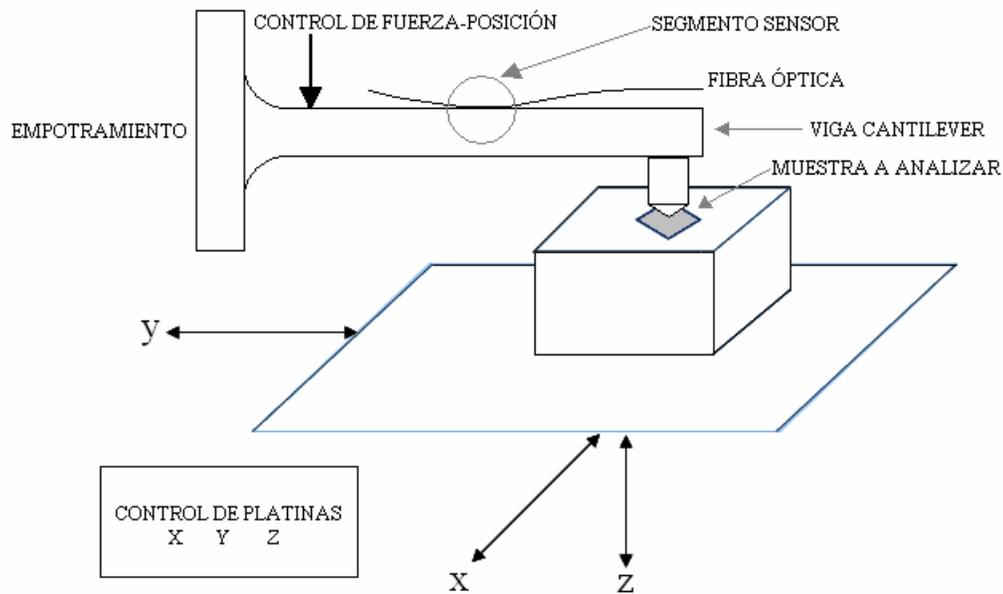
Para realizar las aplicaciones en la caracterización de películas delgadas, es necesario proveer al arreglo de una punta de prueba que realice las pruebas de rayado en las superficies. La pieza tiene una geometría cilíndrica con dos secciones de diferente diámetro; la menor de ellas permite acoplar la punta con la viga. Además la parte inferior de la pieza tiene terminación cónica, en cuyo vértice se adhirió una punta de diamante, que será la parte que esté en contacto directo con la superficie a caracterizar. En la figura 2.4 se presenta un esquema de la punta de prueba.



*Figura 2.4 Viga deformable más la punta de rayado*

Con un arreglo como el propuesto es posible adaptar las condiciones de las pruebas en la medida en la que sea necesario. En la figura 2.5 se presenta un esquema con la configuración mecánica completa. En este trabajo se hablará del análisis del sensor, que se encuentra adherido en la cara superior de la viga de aluminio y está conformado por una sección de 3 cm de fibra monomodal, que es la parte que experimentará las deformaciones. El resto del resonador se encuentra fuera de la viga y sobre la mesa de trabajo. En una etapa posterior a este trabajo, en el caso de la caracterización de la dureza

de las películas, será necesario implementar un sistema de control de fuerza para que en la punta de prueba siempre sea constante; o bien, en el caso de la determinación del coeficiente de fricción de la superficie, será necesario agregar otro sensor en una sección lateral de la viga cantilever, con la finalidad de realizar mediciones en las dos direcciones de deformación. Para realizar un barrido a lo largo de la superficie a caracterizar, será necesario adaptar un sistema de actuadores mecánicos para controlar el desplazamiento y la posición de las platinas donde se colocará la película o recubrimiento a caracterizar.



*Figura 2.5 Prototipo para caracterización de películas delgadas*

Hasta este momento se han planteado las bases para realizar el trabajo experimental. El objetivo es realizar el estudio de diferentes configuraciones de resonadores de fibra óptica para emplearlos en un sistema capaz de proporcionar una alta sensibilidad a los cambios en deformación. Se han mencionado los fundamentos de la operación de los sensores de fibra láser y se ha tratado el problema de la caracterización de las propiedades mecánicas de películas delgadas. El siguiente paso es determinar cuál es la mejor forma de llevar a cabo la caracterización de películas mediante este tipo de arreglos ópticos. En el capítulo 3 se presentan las diferentes configuraciones de resonadores que se analizaron, así como algunas de sus características.

## CAPÍTULO 3

### EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE SENSORES POLARIMÉTRICOS CON RESONADORES FABRY-PEROT

En los capítulos anteriores se presentaron los elementos teóricos que determinan el funcionamiento de un sistema de medición basado en un resonador de fibra óptica láser. Igualmente se presentó un panorama general sobre la caracterización de películas delgadas y se planteó la posibilidad de emplear un sensor polarimétrico como transductor de las deformaciones generadas en una viga cantilever. Una de las metas a largo plazo de este trabajo es encontrar un sensor con una respuesta adecuada como para permitir la detección de deformaciones muy pequeñas en la viga, como consecuencia de un desplazamiento vertical de la punta (no mayor a 10 micras) sobre la topografía de la superficie a caracterizar. Así como es necesario que el dispositivo tenga una muy alta sensibilidad, también es necesario que sea lo suficientemente estable, de modo que permita realizar mediciones repetibles con el menor error posible. En este capítulo se presenta una descripción de los diferentes arreglos estudiados, mencionando sus características generales y un análisis de los diferentes parámetros de interés en cada arreglo.

Las señales de interés en la caracterización de los resonadores empleados en la medición de deformaciones son las frecuencias de los modos de polarización (señales PMB), que se desplazan sobre el eje de la frecuencia cuando se presenta algún cambio en la birrefringencia del resonador. En contraste con este comportamiento, las frecuencias de los modos longitudinales (LMB) que se mantienen constantes independientemente de los cambios que se presenten en la birrefringencia. Las señales PMB no pueden observarse conectando directamente el fotodetector a la salida del arreglo, donde solamente pueden obtenerse las señales LMB. Para poder observar las frecuencias correspondientes a las señales PMB es necesario colocar un polarizador antes de hacer llegar la señal al fotodetector. En la figura 3.1 se presenta el ejemplo de dos gráficas obtenidas con el analizador de radiofrecuencia a la salida del resonador multimodal, donde se observan las

frecuencias PMB y sus correspondientes frecuencias LMB. Las dos espigas de las frecuencias PMB se desplazarán de manera simétrica al cambiar la birrefringencia de la fibra. En la medida en la que las espigas sean más angostas y pueda detectarse un menor cambio en frecuencia de la espiga, el sensor tendrá mejor desempeño.

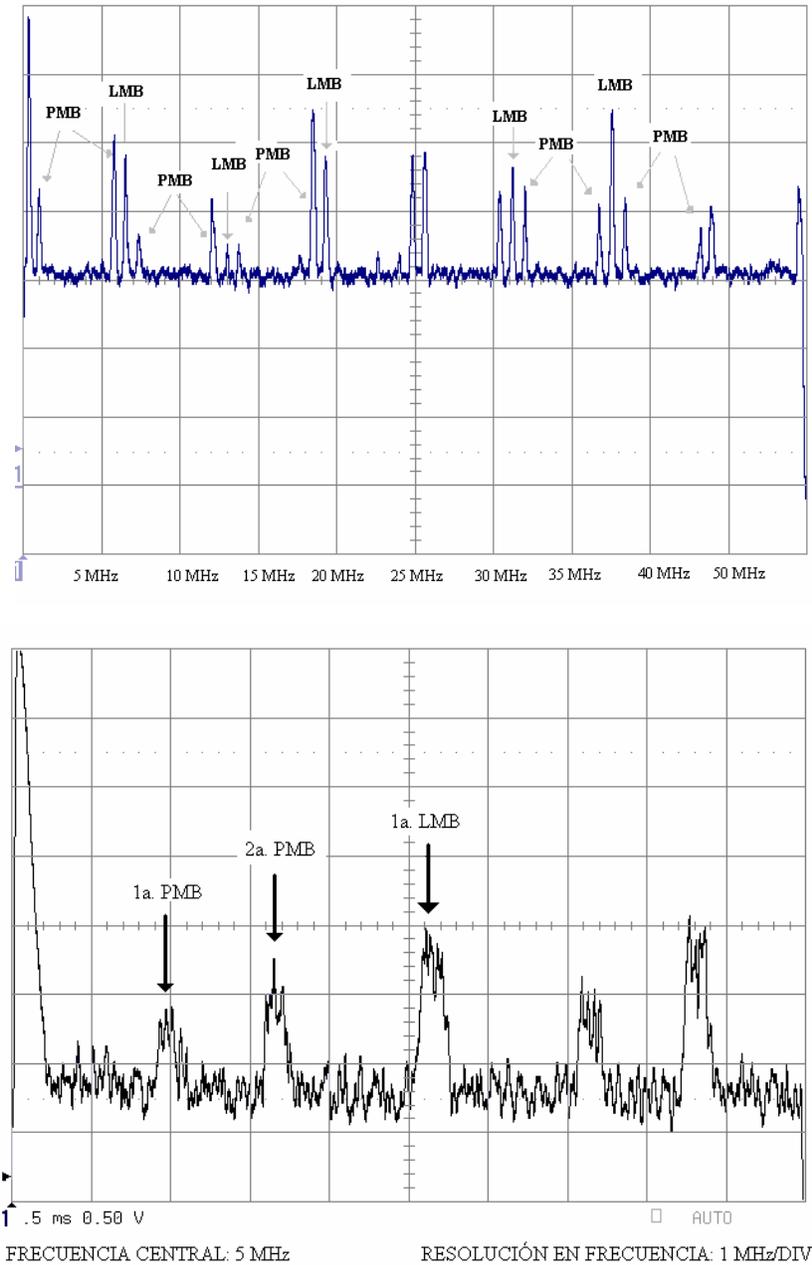


Figura 3.1. Modos longitudinales y de polarización del resonador

Tanto en las señales PMB como en las LMB, generalmente se considera que la distribución de la potencia en el dominio de la frecuencia sigue una función de forma de línea con distribución Lorentziana para cada modo [11], como se muestra en la figura 3.2. De esta función, los parámetros de interés para este estudio son la frecuencia central y el ancho espectral. La representación matemática de esta función está dada por la siguiente ecuación:

$$g(\nu) = \frac{\Delta\nu/2\pi}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu/2)^2}$$

donde:  $g(\nu)$  es la función de forma de línea Lorentziana,

$\Delta\nu$  es el ancho espectral a la mitad del máximo (FWHM, por sus siglas en inglés),

$\nu$  es la frecuencia y

$\nu_0$  es la frecuencia central del espectro.

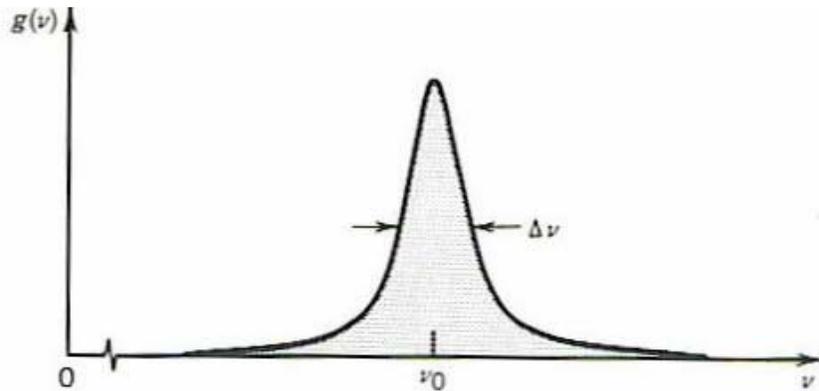
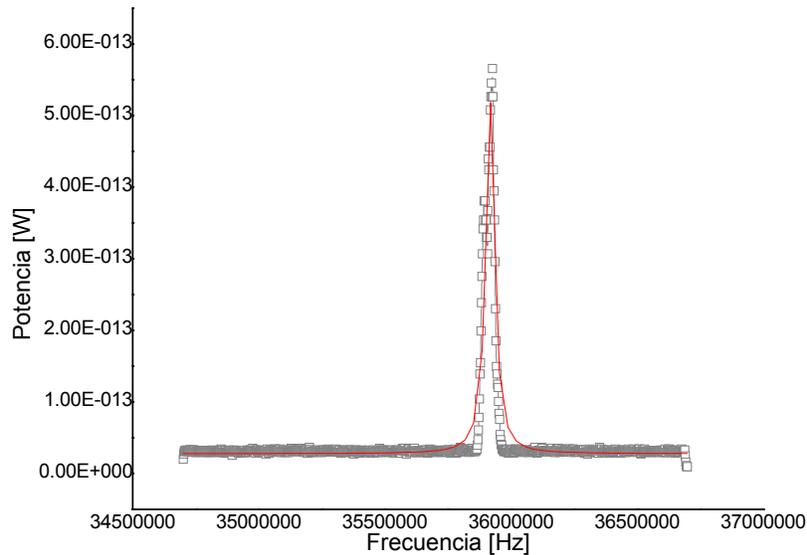


Figura 3.2 Función de forma de línea con distribución Lorentziana

En los diferentes experimentos realizados se adquirieron series de 1000 datos del osciloscopio, correspondientes a los datos medidos con el analizador de radiofrecuencia, conteniendo todos los puntos que se mostraban a lo largo del espectro. Con cada serie de datos es posible calcular la frecuencia central y el ancho espectral de la señal correspondiente en una situación determinada, mediante un ajuste no lineal de la función

Lorentziana. El ajuste se llevó a cabo empleando un software para el análisis de datos (OriginPro 7.5) de donde se obtuvieron los valores de ancho espectral y frecuencia central en cada caso. En la figura 3.3 se presenta una gráfica con una serie de datos adquiridos y su correspondiente ajuste.



*Figura 3.3 Serie de datos adquiridos y su ajuste*

Para cada resonador estudiado se presentará el análisis de la estabilidad tanto del ancho espectral de las señales como de los cambios en la posición de la frecuencia central, mostrando sus valores promedio y sus correspondientes desviaciones estándar; así como también se presentará el error promedio obtenido en el ajuste no lineal de los datos.

### **3.1 Resonadores con múltiples modos longitudinales.**

Las primeras configuraciones utilizadas para evaluar su desempeño fueron resonadores con un gran número de modos longitudinales. Se estudiaron resonadores de gran longitud (20m) contemplando la posibilidad de emplear un sistema de detección de frecuencias electrónico simple, basado en el PLL (*phase locked loop*) 54HC4046A de Texas Instruments. Un sistema de este tipo entrega a la salida una señal de voltaje directamente

proporcional a la diferencia entre la frecuencia de la señal de entrada y la frecuencia del oscilador del circuito. Un resonador grande permite tener frecuencias longitudinales lo suficientemente bajas, necesarias para realizar la detección por medio de este circuito, que puede detectar señales con frecuencia central de hasta 18MHz [21]. Sin embargo, como veremos más adelante, el uso del PLL requerirá de ajustar los parámetros de operación del resonador para obtener señales con un ancho espectral adecuado para este circuito.

El primer resonador que se analizó se presenta en la figura 3.4. En este caso se emplearon aproximadamente 5 m de fibra de Erblio ( $L_{Er}$ ) y alrededor de 15 m de fibra monomodal ( $L_{SMF}$ ), para dar como resultado un resonador de 20 m de longitud. Como límites de la cavidad se emplearon un espejo de bulto y una rejilla de Bragg con una longitud de onda pico de 1535 nm, que determina la longitud de onda de la emisión de la fibra láser.

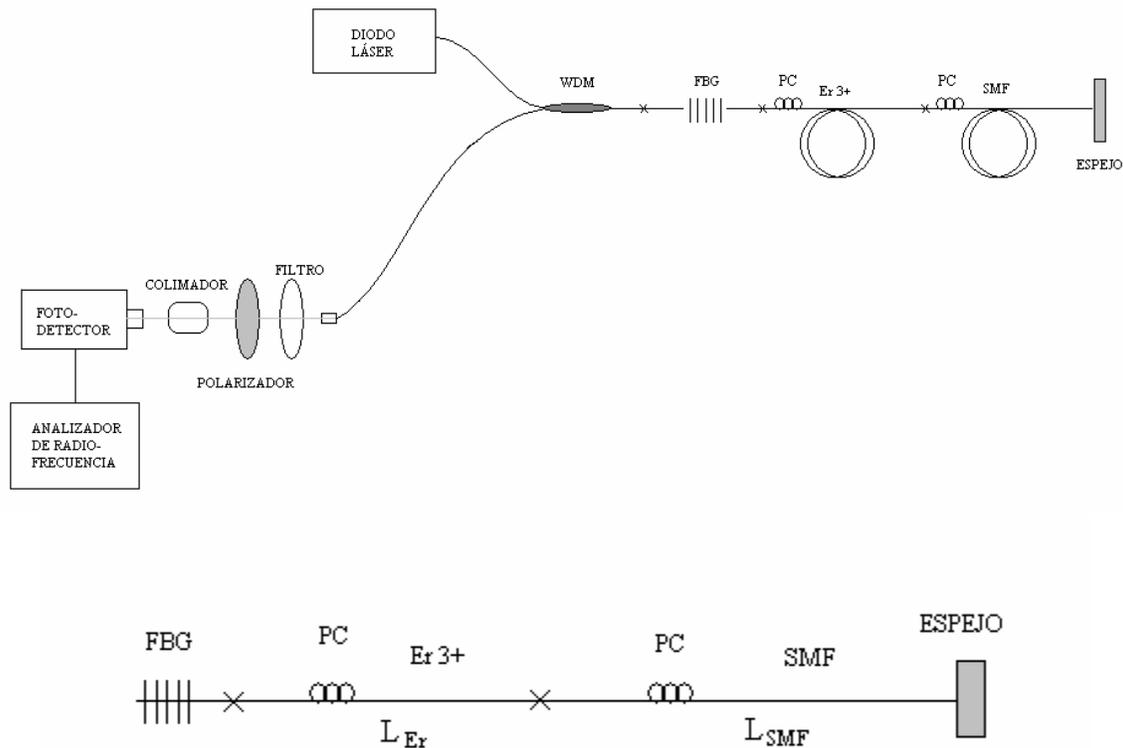


Figura 3.4. Resonador de Fabry-Perot empleado en los resonadores con múltiples modos longitudinales

Las frecuencias correspondientes a las señales LMB del resonador son múltiplos de la frecuencia correspondiente al primer modo y pueden calcularse a partir de la ecuación 1.7, para  $L=20\text{m}$ ,  $q=1$ ,  $c_0=3\times 10^8$  m/s y  $n=1.5$ . Explícitamente se tiene:

$$v_q = q \frac{c}{2L}$$
$$v_q = \frac{3 \times 10^8}{2(1.5)(20)} = 5\text{MHz}$$

De este cálculo se obtiene que el primer modo longitudinal del resonador tiene una frecuencia de 5MHz. Los siguientes se encuentran a una frecuencia múltiplo del primer modo, es decir, en 10MHz, 15MHz, 20MHz, etc., como se observa en la figura 3.1.

### 3.1.1 Resonador de 20 metros

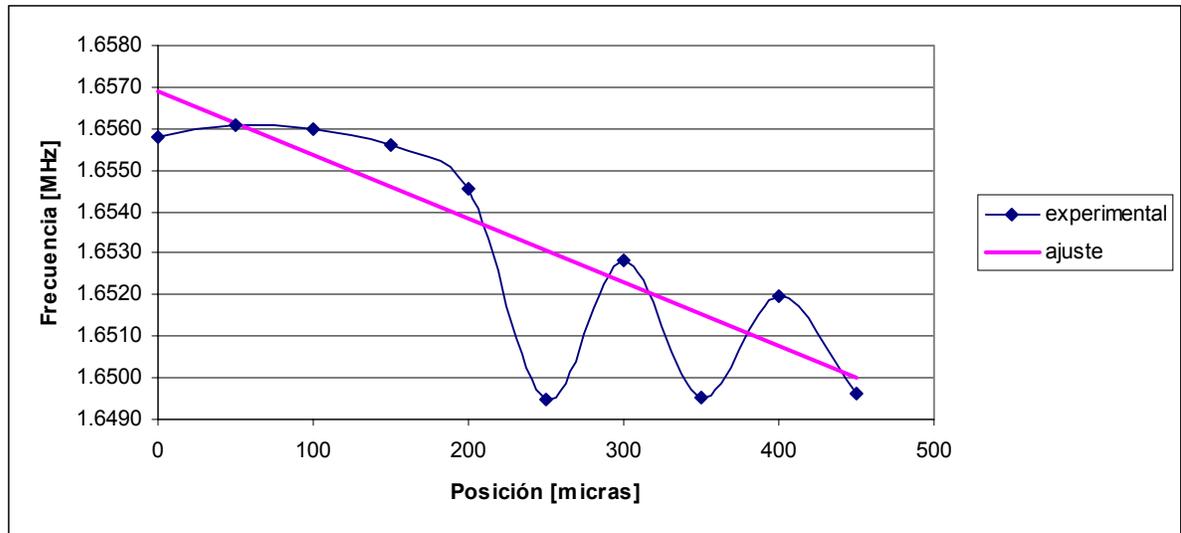
El primer experimento con el resonador de 20 m consistió en adherir una sección de la fibra monomodal a la viga y tomar datos para una posición fija, es decir, analizar la estabilidad de las señales respecto al tiempo, tomando cinco datos aislados durante un periodo de aproximadamente dos horas, con una resolución en frecuencia para el osciloscopio de 10 kHz por división. El segundo experimento de interés consistió en adherir una sección de 3 cm de fibra monomodal del resonador a la viga cantilever, para posteriormente deformarla y verificar la forma en la que cambia la frecuencia de la primera señal PMB con respecto a los desplazamientos en la punta de la viga. En este caso se realizaron desplazamientos de la punta de la viga en pasos de 50 micras, tomando una lectura para cada una de las diez posiciones diferentes y se adquirieron los datos con una resolución de 5 kHz por división. A partir de estos datos es posible realizar un ajuste lineal, para conocer la sensibilidad del dispositivo. En la tabla 3.1 se presentan los resultados obtenidos y en la figura 3.5 se presentan los datos adquiridos y el ajuste lineal en la medición de deformaciones.

En este primer arreglo se puede observar que las mediciones en general se alejan del modelo lineal teórico, lo que ocasiona grandes errores en la medición de deformaciones. Este problema se debe principalmente a la competencia entre la gran cantidad de modos

presentes en un resonador de tales dimensiones. Una posibilidad para disminuir el número de modos en el resonador, la competencia entre ellos y el ancho espectral de las señales de radiofrecuencia es reducir la longitud del resonador. A partir de estos experimentos puede observarse que el ancho espectral de las señales no permite utilizar un PLL para decodificar la respuesta del sensor, por lo que será necesario optimizar el desempeño del arreglo experimental.

<i>EXPERIMENTO 1</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>	
<i>Ancho espectral</i>	<i>5.016 kHz</i>	<i>1.159 kHz</i>	<i>126.3 Hz</i>	
<i>Frecuencia central</i>	<i>1.95652 MHz</i>	<i>10.143 kHz</i>	<i>40.868 Hz</i>	
<i>EXPERIMENTO 2</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>	
<i>Ancho espectral</i>	<i>6.410 kHz</i>	<i>1.091 kHz</i>	<i>172.2 Hz</i>	
	<i>Sensibilidad</i>	<i>Ordenada al origen</i>	<i>Error estándar</i>	<i>Coefficiente de correlación</i>
<i>Ajuste lineal</i>	<i>-15.35 Hz/micra</i>	<i>1.656911 MHz</i>	<i>1.466 kHz</i>	<i>-0.843363</i>

*Tabla 3.1 Parámetros del resonador de 20 metros. El experimento 1 corresponde a las mediciones realizadas sin realizar deformaciones y el experimento 2 corresponde a las mediciones realizadas al realizar deformaciones en la viga y el ajuste lineal de los valores obtenidos.*



*Figura 3.5 Datos adquiridos y ajuste lineal en la medición de deformaciones*

### 3.1.2 Reducción del número de modos longitudinales

El segundo arreglo que se analizó fue un resonador en la misma configuración que se presenta en la figura 3.4, con una longitud total de la cavidad de 1m, ahora con  $L_{Er} = 40$  cm y  $L_{SMF} = 60$  cm. Es importante mencionar que el funcionamiento del resonador se vuelve crítico en la medida en la que se reducen sus dimensiones. Si se reduce considerablemente la longitud del medio activo, empleando un segmento muy corto de fibra láser, puede que no se presente emisión de luz debido a la reducción de ganancia en el arreglo. Empleando esta configuración se determinó experimentalmente que aproximadamente 40 cm de fibra de Erbium eran suficientes para obtener emisión láser de la fibra. En este caso el número de modos se redujo considerablemente, ya que ahora la primera frecuencia LMB se presenta alrededor de los 100 MHz. Esta modificación se realizó con el objetivo de reducir el ancho espectral de las señales y aumentar su estabilidad, aunque no implica que ahora sea imposible emplear el PLL, pues la frecuencia ahora se encuentra fuera del rango de detección del circuito disponible para estos experimentos. Evidentemente, una opción para solucionar esta limitación es buscar un circuito capaz de decodificar las señales a estas frecuencias de operación, o bien utilizar medidores de frecuencia comerciales.

Para analizar el comportamiento de este segundo arreglo se realizaron diferentes pruebas. La primera consistió en realizar 16 lecturas de la primera señal PMB en intervalos de aproximadamente 2 minutos, sin realizar deformaciones en la viga y a una resolución en el analizador de radiofrecuencia de 200kHz por división en el osciloscopio. De manera simultánea, se realizaron mediciones de la temperatura en el lugar de la prueba, con el fin de determinar si existe alguna relación entre los cambios de frecuencia de la señal y los cambios en la temperatura. Para medir la temperatura se empleó el circuito integrado LM35 de National Semiconductor y los datos se guardaron en la computadora a través de una tarjeta de adquisición de datos USB-1608 de Measurement Computing. En las hojas de especificaciones correspondientes se reporta una exactitud para el sensor de temperatura de 0.5°C y para la tarjeta de adquisición de datos una exactitud de 0.68 mV operando en un rango de  $\pm 1V$ .

Durante las mediciones, los valores de temperatura oscilaron en un rango de 0.2°C, que se encuentra debajo de la exactitud del sensor de temperatura, así que puede considerarse que la temperatura se mantuvo constante y que los cambios de temperatura no fueron significativos. Independientemente de las variaciones de la temperatura durante la toma de datos, existen variaciones en la frecuencia que no se deben a la deformación en la viga. Estos cambios se ilustran en la gráfica de la figura 3.6 y en la tabla 3.2 se presentan los datos obtenidos a partir de este experimento.

	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>Ancho espectral</i>	<i>49.278 kHz</i>	<i>13.057 kHz</i>	<i>1.049 kHz</i>
<i>Frecuencia central</i>	<i>34.471 MHz</i>	<i>205.593 kHz</i>	<i>354.75 Hz</i>

*Tabla 3.2 Parámetros del resonador de 1m*

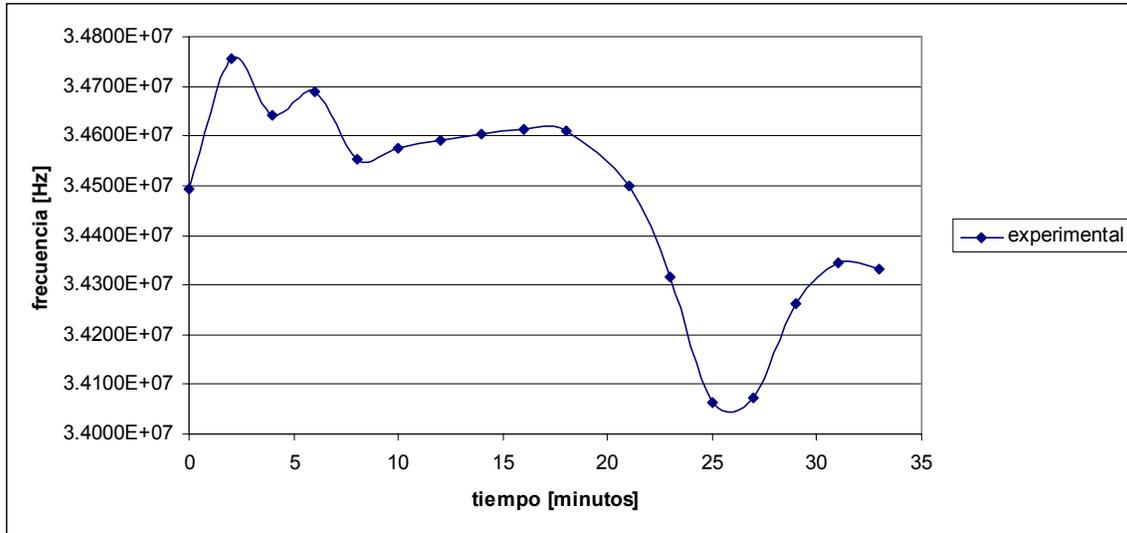


Figura 3.6 Cambios de frecuencia central respecto al tiempo y su ajuste lineal

Es importante mencionar que este comportamiento no es repetible. Aparentemente, las variaciones de la frecuencia central con respecto al tiempo ocurren de manera aleatoria, sin que sigan un patrón definido. A pesar de esta situación, en ocasiones fue posible registrar cambios en la frecuencia de la señal PMB debidos a las deformaciones de la viga, como se muestra a continuación. Se realizaron desplazamientos verticales de la punta de la viga en intervalos de 100 micras hasta llegar a 1.5 mm y se realizó una adquisición de datos para cada posición, a una resolución para el analizador de radiofrecuencia de 200 kHz por división del osciloscopio. En la figura 3.7 se muestran los valores de frecuencia central de la señal PMB obtenidos con su ajuste lineal y en la tabla 3.3 se presentan los parámetros obtenidos en este experimento.

	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>	
<i>Ancho espectral</i>	<i>54.462 kHz</i>	<i>14.214 kHz</i>	<i>1.229 kHz</i>	
	<i>Sensibilidad</i>	<i>Ordenada al origen</i>	<i>Error estándar</i>	<i>Coefficiente de correlación</i>
<i>Ajuste lineal</i>	<i>-420.74 Hz/micra</i>	<i>31.488 MHz</i>	<i>29.4483 kHz</i>	<i>-0.988478</i>

Tabla 3.3 Parámetros en la medición de deformaciones con el resonador de 1m

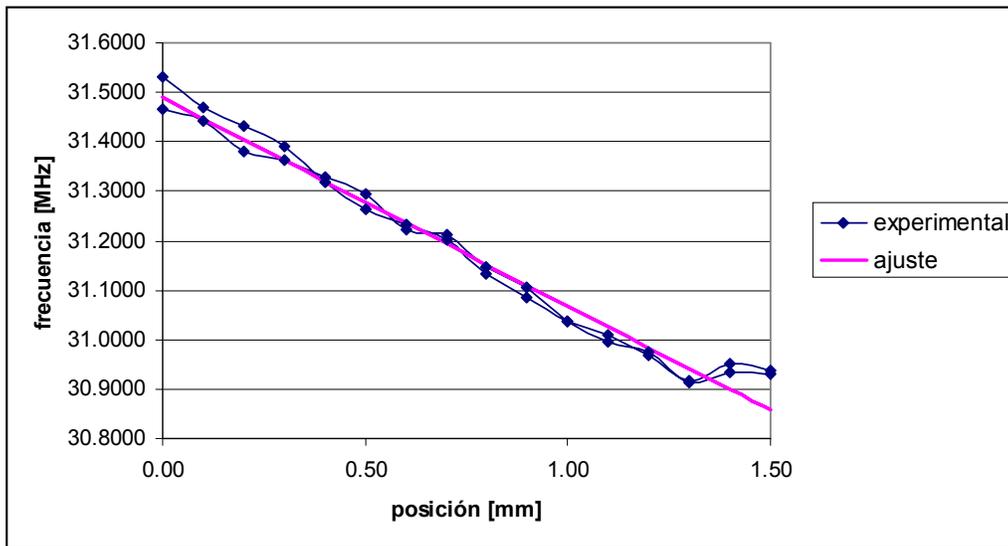


Figura 3.7 Datos adquiridos y ajuste lineal en la medición de deformaciones

Posteriormente se repitió la prueba, en esta ocasión realizando dos veces el recorrido. El primer ciclo se realizó con desplazamientos en intervalos de 50 micras, el segundo ciclo se realizó con desplazamientos en intervalos de 100 micras y se obtuvieron los parámetros que se presentan en la tabla 3.4, así como los datos y el ajuste lineal que se presentan en la gráfica de la figura 3.8.

	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>	
<i>Ancho espectral</i>	<i>57.123 kHz</i>	<i>15.326 kHz</i>	<i>1.484 kHz</i>	
	<i>Sensibilidad</i>	<i>Ordenada al origen</i>	<i>Error estándar</i>	<i>Coefficiente de correlación</i>
<i>Ajuste lineal</i>	<i>256.82 Hz/micra</i>	<i>31.345 MHz</i>	<i>79.9375 kHz</i>	<i>0.7428</i>

Tabla 3.4 Parámetros en la medición de deformaciones con el resonador de 1m

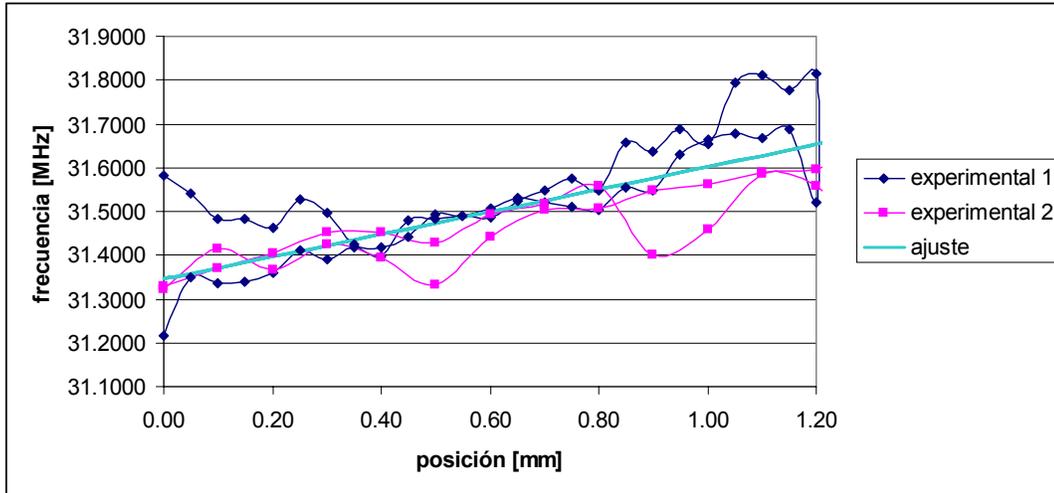
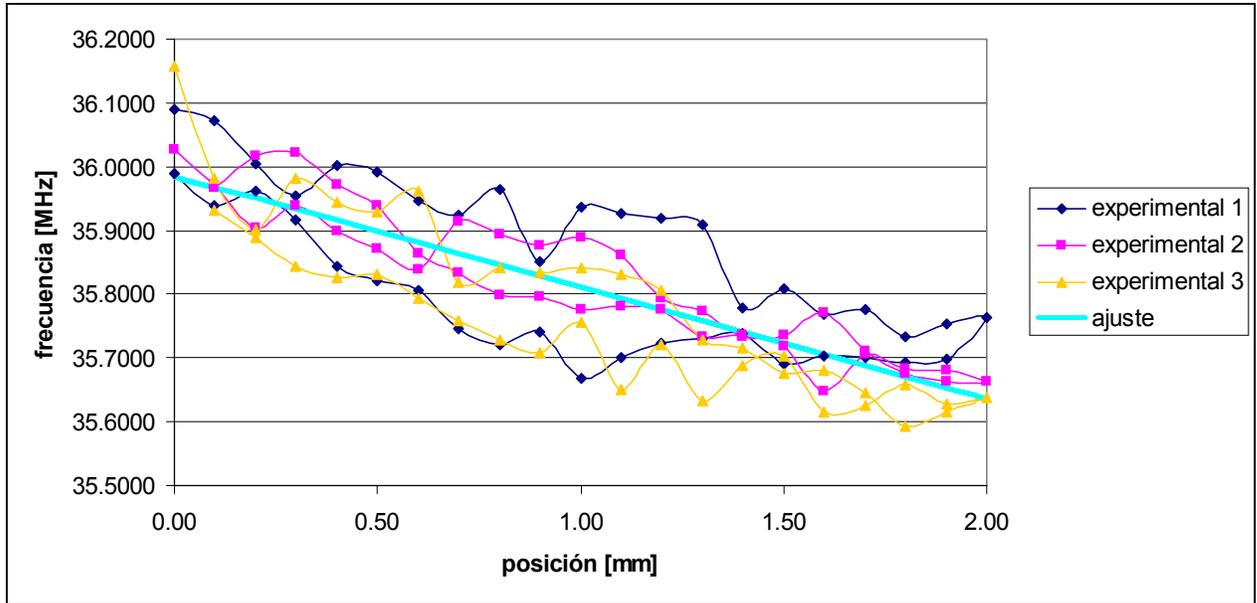


Figura 3.8 Datos adquiridos y ajuste lineal en la medición de deformaciones

Finalmente, se repitió el experimento con desplazamientos en intervalos de 100 micras y se realizaron tres ciclos completos continuos. En la tabla 3.5 se presentan los parámetros obtenidos en el experimento y en la figura 3.9 los datos adquiridos y el ajuste lineal obtenido.

	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>	
<i>Ancho espectral</i>	36.236 kHz	17.915 kHz	1.005 kHz	
	<i>Sensibilidad</i>	<i>Ordenada al origen</i>	<i>Error estándar</i>	<i>Coefficiente de correlación</i>
<i>Ajuste lineal</i>	-174.428 Hz/micra	35.985 MHz	66.3023 kHz	-0.838733

Tabla 3.5 Parámetros en la medición de deformaciones con el resonador de 1m



*Figura 3.9 Datos adquiridos y ajuste lineal en la medición de deformaciones*

Con los experimentos realizados es posible comprobar que hasta este momento y con esta configuración, es imposible realizar mediciones de deformaciones pequeñas de manera confiable. Las señales presentan tanto variaciones intrínsecas como desviaciones estándar muy grandes para la medición del ancho espectral, así como grandes errores medios cuadráticos para el caso de los ajustes lineales. Existe todavía la necesidad de reducir el número de modos que se presentan dentro del resonador, así como estabilizar las frecuencias de las señales PMB, por lo que se decidió estudiar una nueva configuración con la intención de mejorar el desempeño del sensor, mediante el uso de una sección de material con absorción saturable dentro de la cavidad.

### **3.2 Reducción de modos con absorción saturable.**

Como se mencionó en el capítulo 1, se han hecho muchos estudios sobre sensores polarimétricos aplicados a la medición de diferentes variables físicas. Sin embargo, dado que el funcionamiento de estos sensores se basa en monitorear cambios en frecuencia, es necesario controlar el número de modos longitudinales que oscilan en la fibra láser. El ancho espectral de las señales PMB es directamente proporcional al ancho espectral de la emisión de la fibra láser [22], y aunque el uso de rejillas de Bragg limita el número de

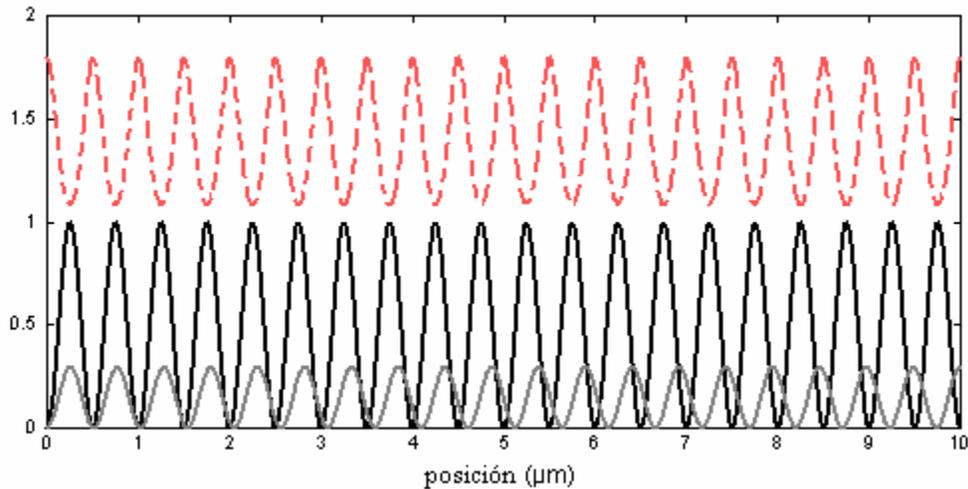
modos de oscilación, el uso de resonadores del orden de metros de longitud siempre permitirá varias frecuencias de oscilación que generarán competencia modal. Los resultados experimentales mostrados en las secciones anteriores confirman que, a pesar de que es posible obtener anchos de línea menores a los 0.06 nm con los arreglos utilizados, la competencia entre modos longitudinales sigue siendo lo suficientemente significativa como para limitar el desempeño de los sensores polarimétricos. Con base en esto, podemos establecer que una fibra láser ideal para este tipo de aplicaciones debería operar con uno o dos modos longitudinales de oscilación.

Una forma simple de reducir el número de modos longitudinales de un láser es empleando una sección de material con absorción saturable [11]; para fibras láser, el material con absorción saturable consiste en un segmento de fibra láser sin bombeo dentro del resonador [15]. La reducción del número de modos del resonador y su estabilización son las claves para lograr sensores de fibra láser de alta sensibilidad; sin embargo, en el caso de los láseres de fibra, en los cuales el medio de ganancia ocupa una parte representativa dentro de la cavidad, no es trivial alcanzar un control eficiente sobre los modos [22]. La operación de las fibras dopadas como absorbentes saturables se basa en la formación de una “rejilla” de absorción en el medio óptico (i.e., una variación periódica de la inversión de población) generada por el patrón óptico de la onda estacionaria del modo en oscilación. Este efecto de modulación espacial deja ganancia sin utilizar que permite oscilaciones de otros modos con diferentes patrones de onda estacionaria. Los modos que alcancen la máxima ganancia serán aquellos cuyos patrones de onda estacionaria tengan el mínimo traslape con el del primer modo de oscilación dentro del medio de ganancia. Esta modulación espacial de ganancia (SHB, por las siglas en inglés de *spatial hole burning*) es un efecto de saturación que se presenta en los materiales láser y que se utiliza también para generar regímenes de operación pulsados.

El efecto del SHB generado por una sección de fibra dopada sin bombear se ilustra en la figura 3.10. Como puede verse, la absorción de energía a lo largo del material genera “huecos” en la ganancia del medio. Visto de otro modo, puede decirse que el SHB es una distorsión de la figura de ganancia en un medio láser (o el espectro de pérdidas en un medio con absorción saturable) causado por los efectos de saturación de una onda

estacionaria. Cuando se sobreponen ondas de luz de ancho de banda estrecho, forman un patrón de interferencia de onda estacionaria, cuyo período es la mitad de la longitud de onda. En un medio láser de ganancia, esto tiene dos efectos: que la ganancia se sature de forma preferencial en los antinodos del patrón y que la amplificación resultante esté dominada por la densidad de excitación en los antinodos, y los nodos no sean “vistos” por la onda de luz. Esto puede conducir a la deformación de la figura espectral de la ganancia, en particular en una saturación de la ganancia que es más fuerte para la longitud de onda saturada del campo de luz que para otras longitudes de onda. De manera semejante, el espectro de pérdidas de un medio absorbedor saturable puede tener una disminución. Este efecto puede ocurrir en fibras dopadas con elementos de tierras raras y permite construir filtros ajustables y puede utilizarse en sistemas láser de fibra de una sola frecuencia [23].

Debido al modo de oscilación, en la sección de absorción saturable se forma una rejilla de absorción en lugar de una rejilla de ganancia, y la absorción mínima ocurre en los antinodos del patrón de onda estacionaria. Así, los modos cuyos patrones de onda estacionaria tengan el máximo traslape con el patrón del primer modo de oscilación experimentarán pérdidas mínimas. La porción de fibra que genera la absorción saturable actúa como un filtro estrecho paso-banda y se ha empleado exitosamente para controlar el número de modos de oscilación en resonadores de grandes longitudes [22]. Cuando tanto la rejilla de ganancia como la rejilla de absorción se encuentran cerca de los espejos, los modos de oscilación se reducen y la estructura de los modos depende de la posición de la fibra dentro de la cavidad. Además, las longitudes y la concentración de Erbium tanto de la sección de absorción saturable como del medio de ganancia desempeñen un papel importante en la determinación de los modos del láser.



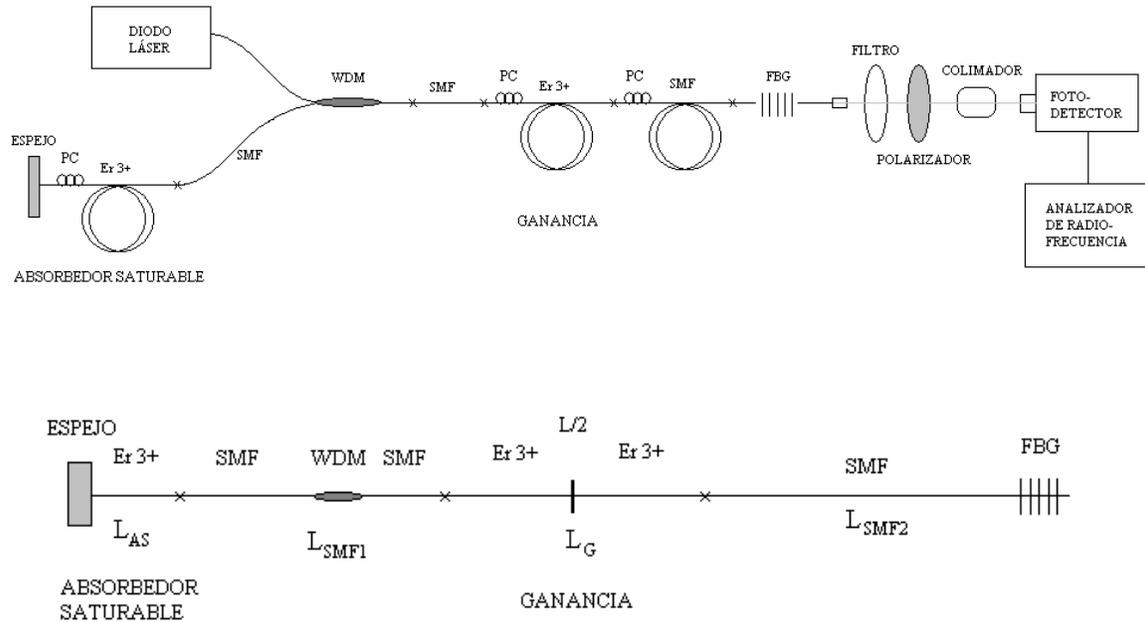
*Figura 3.10 Ilustración del SHB. Un haz intenso con el patrón de intensidad de onda estacionaria (línea negra) satura la ganancia (línea punteada). La curva gris, correspondiente a una onda más débil con una frecuencia ligeramente diferente, puede acceder a más ganancia y podrá ser amplificada.*

Además de ser útiles para reducir la competencia modal en diferentes tipos de resonadores, los materiales con absorción saturable se emplean para generar pulsos en láseres de fibra con anchos que van de los 300 fs hasta algunos picosegundos. Como se mencionó anteriormente, pueden utilizarse también para fijar de forma pasiva los modos de oscilación (*passive mode locking*) y para generar pulsos de alta energía (régimen de conmutación de factor de calidad, *Q-switching*). Adicionalmente, los medios con absorción saturable son útiles también para propósitos de filtrado no lineal fuera de resonadores de láser, mejorando la forma de los pulsos y en el procesamiento de señales ópticas [23]. En las siguientes secciones se presentarán los diferentes arreglos implementados con absorbentes saturables, utilizados para minimizar el número de modos longitudinales en los sensores polarimétricos para medir deformaciones.

### **3.2.1 Material con absorción saturable dentro de la cavidad: efectos de la longitud en las características espectrales de las señales PMB**

El tamaño de la sección de absorción dentro del resonador es importante para determinar las características de los modos longitudinales del resonador. En la figura 3.11 se presenta la configuración que se empleó para evaluar los efectos de la longitud de fibra

utilizada como material con absorción saturable, utilizando en el primer caso 2 metros de fibra de Erblio en la sección de ganancia ( $L_G$ ), y 0.5 metros en la parte de absorción saturable ( $L_{AS}$ ) colocados en la parte central del resonador. Además, se emplearon 3.5 metros de fibra monomodal entre la sección de absorción saturable ( $L_{SMF1}$ ) y la sección de ganancia, y 4 metros antes de la rejilla ( $L_{SMF2}$ ), de modo que la longitud total del resonador es de 10 metros.



*Figura 3.11 Resonador Fabry-Perot con absorción saturable, donde WDM es un multiplexor por longitud de onda, SMF es fibra monomodal, PC es un controlador de polarización,  $Er^{3+}$  es fibra de Erblio, FBG es una rejilla de Bragg,  $L_{AS}$  es la longitud de la sección de absorción saturable,  $L_{SMF1}$  y  $L_{SMF2}$  son las longitudes de la primera y segunda partes de fibra monomodal y  $L_G$  es la longitud de la fibra de ganancia en el resonador.*

En el segundo experimento, se redujo la longitud  $L_{AS}$  a la mitad, es decir, su longitud fue de 0.25 metros y se mantuvo la longitud total del resonador, de modo que se agregaron 0.25 metros a la fibra monomodal antes del WDM, resultando entonces  $L_{AS}=0.25m$  y  $L_{SMF1}=3.75m$ . Finalmente, se eliminó por completo la sección de absorción saturable, entonces  $L_{AS}=0$  y  $L_{SMF1}=4m$ .

Se analizaron los parámetros del resonador sin deformar la viga, de la misma manera que en el caso de la configuración anterior, obteniendo el ancho espectral promedio de las

señales LMB y PMB. Al igual que en los casos anteriores, se obtuvieron las desviaciones estándar de las mediciones, el error obtenido en el ajuste para el ancho espectral, la frecuencia central promedio, su desviación estándar y el error obtenido en el ajuste. En todos los casos se adquirieron datos para diferentes corrientes de bombeo y las mediciones se realizaron a una resolución en el analizador de radiofrecuencia de 100 kHz por división en el osciloscopio. En los casos correspondientes a la sección de absorción saturable de 50 cm y 25 cm, se realizó el cálculo de los parámetros para la primera señal LMB, ya que en estos casos fue imposible observar en el analizador de radiofrecuencia una señal PMB. En el tercer caso, sin la sección de absorción saturable, fue posible medir los parámetros tanto de las señales PMB como LMB. En la tabla 3.6 se presentan los resultados obtenidos.

<i>AS 50 cm - LMB</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>Ancho espectral</i>	<i>33.770 kHz</i>	<i>25.936 kHz</i>	<i>642.1 Hz</i>
<i>Frecuencia central</i>	<i>9.949 MHz</i>	<i>16.704 kHz</i>	<i>218.02 Hz</i>
<i>AS 25 cm - LMB</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>Ancho espectral</i>	<i>26.124 kHz</i>	<i>2.916 kHz</i>	<i>460.6 Hz</i>
<i>Frecuencia central</i>	<i>9.880 MHz</i>	<i>2.390 kHz</i>	<i>156.11 Hz</i>
<i>AS 0 cm - LMB</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>Ancho espectral</i>	<i>26.678 kHz</i>	<i>3.555 kHz</i>	<i>509.7 Hz</i>
<i>Frecuencia central</i>	<i>9.855 MHz</i>	<i>2.676 kHz</i>	<i>172.6 Hz</i>
<i>AS 0 cm - PMB</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>Ancho espectral</i>	<i>25.114 kHz</i>	<i>3.564 kHz</i>	<i>561.8 Hz</i>
<i>Frecuencia central</i>	<i>4.275 MHz</i>	<i>38.341 kHz</i>	<i>190.55 Hz</i>

*Tabla 3.6 Parámetros obtenidos en la caracterización de la sección de absorción saturable en diferentes proporciones dentro del resonador*

Con estos experimentos pudo comprobarse que, para que existan modos de polarización dentro del resonador empleando absorción saturable, es necesario encontrar la longitud óptima de este último. En las pruebas anteriores solamente pudieron observarse señales PMB cuando la sección de absorción saturable era reemplazado por una sección de fibra monomodal, como veremos en la siguiente sección, para poder medir deformaciones es necesario encontrar la combinación que permita la presencia de las señales PMB y que a su vez limite el número de modos en la cavidad.

### **3.2.2 Efectos de la concentración de iones de Erblio en la sección de absorción saturable y la sección de ganancia**

Anteriormente se mencionó la importancia del tamaño o la proporción de la sección de absorción saturable respecto a la sección de ganancia del resonador. Dado que no se contaba con información sobre las características de las fibras de Erblio utilizadas en los experimentos, no fue posible utilizar los métodos establecidos para calcular las proporciones adecuadas de fibras dopadas a utilizar en los resonadores. Sin embargo, siguiendo la metodología utilizada en [22], se realizó el cálculo de la proporción de fibra de Erblio que debe contener la sección de absorción saturable en términos de la concentración de Erblio. A pesar de que no se contaba con información sobre la concentración de Erblio de la fibra, si se emplea un mismo tipo de fibra tanto en la sección de ganancia como en la sección de absorción, la concentración de iones de Erblio es constante y puede obtenerse la proporción correcta de Erblio cambiando solamente las dimensiones del arreglo. Con base en los datos reportados en [22], fue posible establecer las proporciones de fibra que contendrán la concentración de iones necesaria para un desempeño adecuado del arreglo. Para esto es necesario solamente calcular el cociente de las concentraciones de fibra de ganancia y la de absorción, resultando que por cada metro de fibra de ganancia debe existir 0.3615 m de fibra en la sección de absorción saturable. Estas consideraciones prácticas se utilizaron para modificar la longitud en el arreglo inicial. La longitud total del resonador se cambió a 20 metros. En la configuración que se muestra en la figura 3.11 las longitudes de fibra utilizadas fueron:  $L_{AS}=1.45\text{m}$ ,  $L_{SMF1}=6.55\text{m}$ ,  $L_G=4\text{m}$  y  $L_{SMF1}=8\text{m}$ . Debe mencionarse que se duplicó la longitud total del

resonador debido a que empleando solamente 2 m de fibra de ganancia la potencia de la señal a la salida era muy baja.

Las características espectrales de esta nueva configuración se muestran en la figura 3.12, en donde puede observarse la reducción considerable en el número de modos dentro del resonador. En la primera gráfica se muestra el espectro de radio frecuencia de un resonador sin sección de absorción saturable y en la segunda puede observarse que al agregar la sección absorbente los modos longitudinales se reducen a tres. En la figura se observan también señales PMB, cuya aparición es eventual, durante lapsos de tiempo cortos, y muy inestables en amplitud y posición. Se realizó el análisis de la estabilidad de la primera señal LMB y se obtuvieron los parámetros que se presentan en la tabla 3.7.

<i>AS – LMB</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>Ancho espectral</i>	<i>26.601 kHz</i>	<i>3.052 kHz</i>	<i>470.2 Hz</i>
<i>Frecuencia central</i>	<i>3.814 MHz</i>	<i>2.851 kHz</i>	<i>159.14 Hz</i>

*Tabla 3.7 Parámetros del resonador de 20 m con absorción saturable*

Para tratar de eliminar las grandes variaciones en las señales PMB se buscó minimizar efectos de reflexión de la señal con la interfase de detección. Estos reflejos que regresan al resonador, generan componentes de frecuencia que interfieren con las señales de interés y ocasionan grandes inestabilidades en el sistema. Para eliminar esta posible fuente de perturbaciones se utilizó un aislador óptico a la salida del arreglo, justo antes de la etapa de detección. Adicionalmente, se agregaron al sistema controladores de polarización, para poder ajustar la birrefringencia del arreglo y de este modo tratar de estabilizar las señales en la salida. Los efectos de estas modificaciones y de otros ajustes realizados en el resonador se detallan en la siguiente sección.

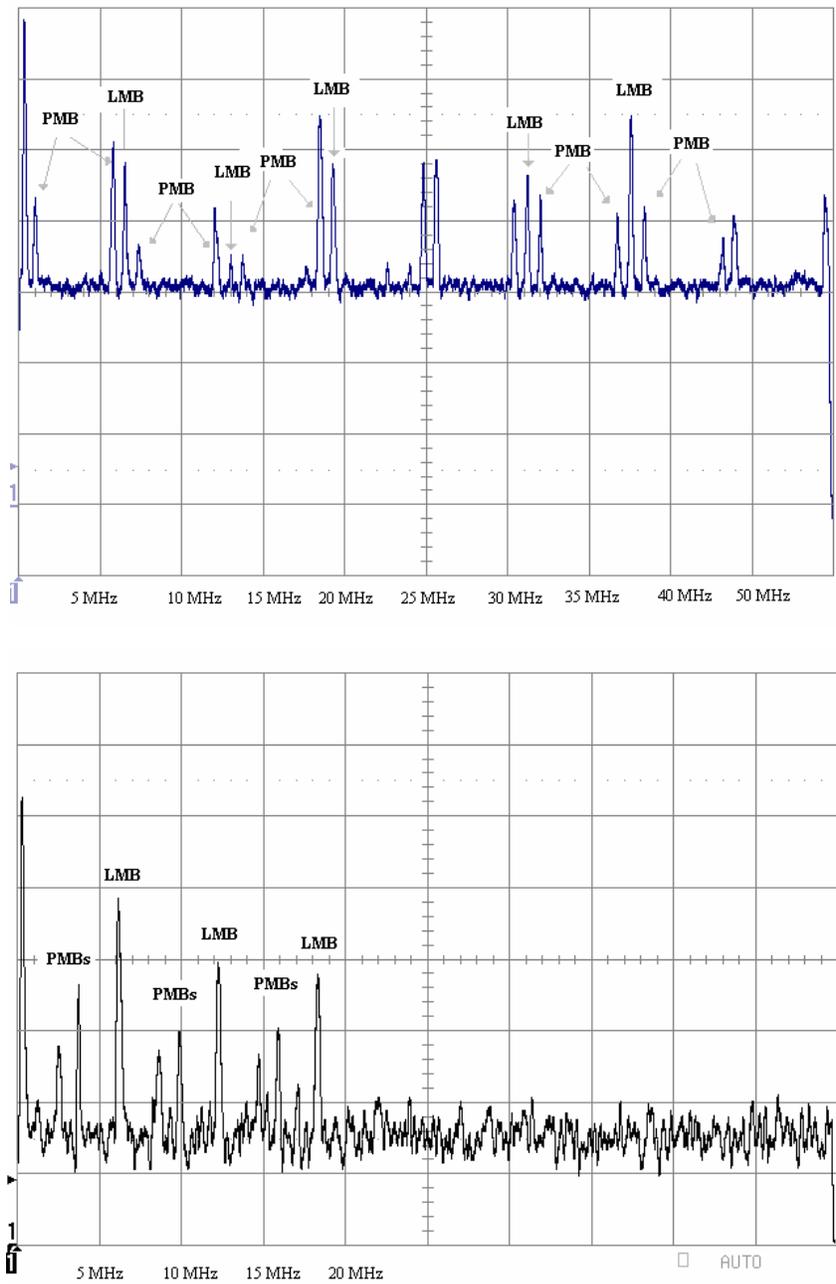


Figura 3.12 Modos longitudinales y de polarización en el resonador de 20 m con absorción saturable

### 3.2.3 Efectos de los espejos del resonador en las señales LMB y PMB

Se analizó la estabilidad de las señales de radio frecuencia utilizando distintas rejillas y agregando a la salida un aislador unidireccional y, a lo largo del resonador, controladores

de polarización. En la primera configuración, el resonador quedó definido por una rejilla de ancho espectral estrecho (longitud de onda central: 1535.376 nm y ancho espectral: 0.216 nm) y un espejo de bulto. En un segundo experimento, se reemplazó la rejilla por una de ancho espectral amplio (longitud de onda central: 1535.252 nm y ancho espectral: 1.068 nm). Finalmente se probó empleando rejillas de Bragg en ambos extremos de la cavidad, como se muestra en la figura 3.13. En la tabla 3.8 se presentan los parámetros obtenidos en el análisis de estabilidad para cada caso, donde para la primera y segunda configuraciones fue posible realizar el análisis solamente de señales LMB, mientras que para la tercera configuración pudieron también obtenerse señales PMB lo suficientemente estables como para reportar sus parámetros.

Las pruebas con las configuraciones antes descritas fueron útiles para comprobar que resulta más factible obtener las señales PMB empleando dos rejillas de Bragg como espejos en la cavidad. Cuando se empleaba solamente una rejilla y un espejo de bulto las señales correspondientes a las PMB eran muy inestables y debido a eso no fue posible realizar su caracterización. Aún así, es necesario encontrar la forma de hacer más estables las señales para poder realizar una caracterización en la medición de deformaciones.

Debe mencionarse que existe además un grupo de señales que se desplazan de manera aleatoria en el eje de la frecuencia, eventualmente se superponen a las señales de interés y aparentemente a ellas se debe que las señales en el resonador con absorción saturable se vuelvan inestables. Es por esto que no es posible realizar mediciones de deformaciones con las señales PMB, ya que el período en el que se mantienen estables sin la presencia de las señales de ruido mencionadas es de máximo uno o dos minutos. En este tiempo solamente fue posible caracterizar las señales, pero es insuficiente para permitir realizar una prueba en la medición de deformaciones. En la figura 3.14 se muestra una gráfica obtenida del analizador de radiofrecuencia donde aparecen las señales mencionadas.

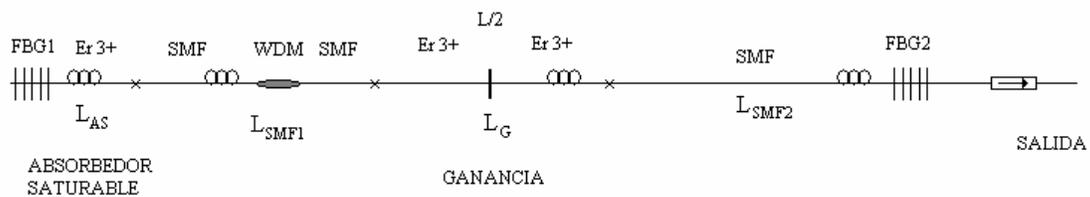
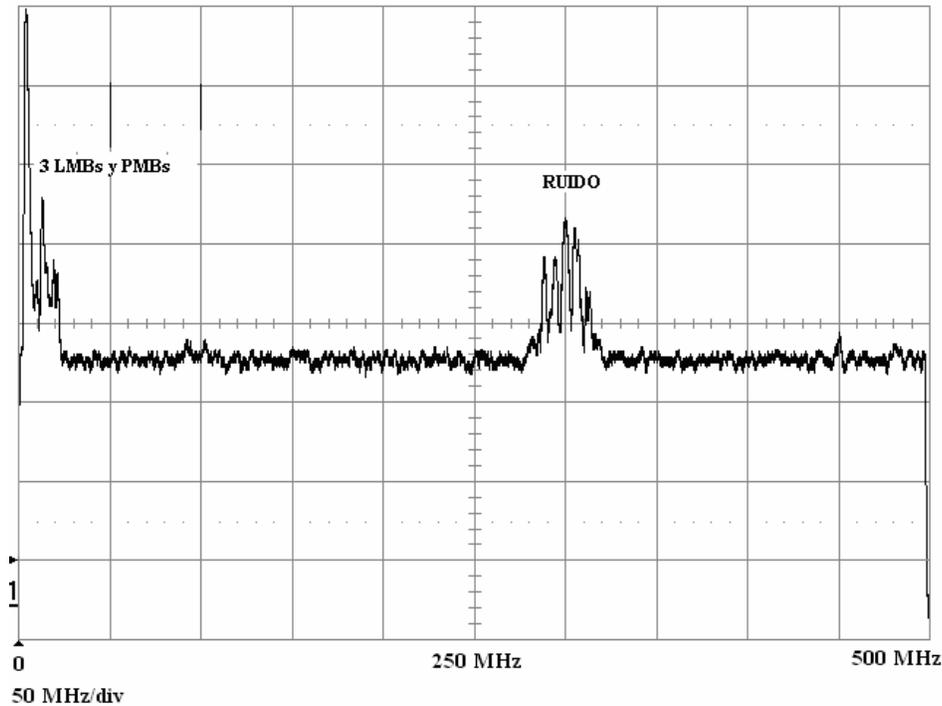


Figura 3.13 Resonador con dos rejillas de Bragg como espejos

<i>AS R1 - LMB</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>Ancho espectral</i>	26.122 kHz	2.938 kHz	449.2 Hz
<i>Frecuencia central</i>	6.143 MHz	2.357 kHz	152.2 Hz
<i>AS R2 - LMB</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>Ancho espectral</i>	27.893 kHz	2.125 kHz	504.1 Hz
<i>Frecuencia central</i>	6.018 MHz	956.4 Hz	170.4 Hz
<i>AS 2Rs - LMB</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>Ancho espectral</i>	29.596 kHz	2.510 kHz	537.8 Hz
<i>Frecuencia central</i>	5.938 MHz	2.246 kHz	181.2 Hz
<i>AS 2Rs - PMB</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>Ancho espectral</i>	28.176 kHz	3.123 kHz	520.6 Hz
<i>Frecuencia central</i>	2.0496 MHz	3.704 kHz	175.8 Hz

Tabla 3.8 Parámetros obtenidos en la caracterización de la sección de absorción saturable empleando diferentes rejillas como espejos



*Figura 3.14 Modos longitudinales y de polarización en el resonador de 20 m con absorción saturable. En el extremo izquierdo se presentan las señales LMB y PMB del arreglo, y en la parte central de la gráfica se presentan las señales aleatorias o ruido.*

### 3.2.4 Arreglo aislado de perturbaciones ambientales

Los siguientes experimentos se realizaron con el fin de determinar si la aparición del grupo de señales que afectan las mediciones tiene que ver con variaciones ambientales, como cambios de temperatura o pequeñas corrientes de aire. Para verificar esta situación, se analizó la estabilidad de las señales LMB del resonador en dos experimentos: con el arreglo expuesto al medio ambiente y, posteriormente, cubierto con una caja de unicel. El análisis se realizó midiendo los parámetros de las señales LMB, debido a que en este experimento no fue posible mantener lo suficientemente estables a las señales de polarización como para caracterizar su comportamiento. En cada caso se tomaron 20 datos en un lapso de aproximadamente 8 minutos. En la tabla 3.9 se presentan los resultados obtenidos en las dos pruebas.

Puede observarse de la tabla 3.9 que las variaciones de los valores de frecuencia central de las señales LMB disminuyen al cubrir el resonador con unicel. Sin embargo, se

presenta un aumento en el ancho espectral promedio y en su desviación estándar. Aparentemente el hecho de aislar el experimento hace más estable a la señal, pero al observar un aumento en el ancho espectral y en su variación no puede asegurarse que sea la solución óptima.

<i>AS SUn - LMB</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>Ancho espectral</i>	<i>5.462 kHz</i>	<i>2.069 kHz</i>	<i>143.5 Hz</i>
<i>Frecuencia central</i>	<i>5.9957 MHz</i>	<i>1.204 kHz</i>	<i>48.04 Hz</i>
<i>AS CUn- LMB</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>Ancho espectral</i>	<i>7.237 kHz</i>	<i>3.267 kHz</i>	<i>212.37 Hz</i>
<i>Frecuencia central</i>	<i>5.9959 MHz</i>	<i>789.43 Hz</i>	<i>69.44Hz</i>

*Tabla 3.9 Parámetros obtenidos en la caracterización del resonador con absorción saturable empleando una cubierta de unisel (AS CUn) y sin ella (AS Sun)*

En términos generales pudo observarse a lo largo de los experimentos realizados que el hecho de agregar una sección de absorción saturable a un resonador de Fabry-Perot es un recurso útil para reducir el número de modos en un resonador. Finalmente pudo obtenerse una frecuencia en el primer modo del resonador dentro del rango de operación del PLL, reduciendo considerablemente el número de modos dentro de la cavidad. Principalmente estas dos características a la larga pueden ayudar a simplificar el proceso de lectura de las frecuencias del arreglo, aunque el siguiente paso es buscar la forma de estabilizar las señales PMB y eliminar fuentes de ruido que afectan en la sensibilidad y precisión del resonador como sensor.

En el siguiente capítulo se presenta un análisis a partir de los datos obtenidos en los diferentes experimentos realizados y sus respectivos parámetros, así como diferentes detalles observados en la realización de la parte experimental. Del mismo modo se presenta un panorama general del trabajo realizado y los posibles elementos que deben tomarse en cuenta para darle continuidad a este proyecto.

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presenta el análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, resaltando las diferencias de los parámetros al emplear los diferentes arreglos y mencionando algunas particularidades de cada experimento. Básicamente, los experimentos se pueden dividir en dos grupos: resonadores multimodales y resonadores con menor número de modos (con absorción saturable). En el caso de los resonadores multimodales se estudiaron dos resonadores diferentes:

- Resonador de 20 metros, medición de estabilidad (*20m, estático*) y medición de deformaciones (*20m, deformaciones*),
- Resonador de 1 metro, medición de estabilidad (*1m, estático*) y medición de deformaciones (*1m, deformaciones 1, 2 y 3*)

En el caso de los resonadores con menor número de modos se estudiaron diferentes situaciones:

- Resonador de 10 metros con 50 cm de sección con absorción saturable (*AS, 10m, 50cm*)
- Resonador de 10 metros con 25 cm de sección con absorción saturable (*AS, 10m, 25cm*)
- Resonador de 10 metros con 0 cm de sección con absorción saturable (*AS, 10m, 0cm*), es decir, con fibra monomodal en lugar de sección con absorción saturable.
- Resonador de 20 metros con las proporciones adecuadas de sección de absorción saturable (*AS, 20m, PC*)
- Resonador de 20 metros con rejilla 1 (*AS, 20m, R1*)
- Resonador de 20 metros con rejilla 2 (*AS, 20m, R2*)
- Resonador de 20 metros con 2 rejillas (*AS, 20m, 2Rs*)
- Resonador de 20 metros con 2 rejillas sin cubierta de uniel (*AS, 20m, SUn*)
- Resonador de 20 metros con 2 rejillas con cubierta de uniel (*AS, 20m, CUn*)

Entre paréntesis se encuentran las claves con las que se hará referencia a los diferentes experimentos realizados.

#### **4.1 Características deseadas en señales PMB para medir deformaciones**

Anteriormente se mencionó que la idea de emplear este tipo de sensores en la medición de deformaciones es porque se ha reportado que presentan una muy alta sensibilidad y precisión en las mediciones. Las pruebas hechas en este trabajo se hicieron con el objeto de buscar la forma de mejorar el desempeño de los resonadores de fibra láser y poder aplicarlos en la caracterización de películas delgadas. Se mencionó en capítulos anteriores que la meta es poder realizar mediciones de desplazamientos de la punta de la viga por debajo de las 10 micras, que es el orden de las dimensiones de la sección transversal que se desean caracterizar. Existe entonces la necesidad de determinar las características que debe tener el dispositivo que permita realizar las mediciones deseadas.

Una característica de interés es la precisión de las mediciones de frecuencia central de los espectros, así como del ancho espectral de las señales, que pueden estimarse por medio de la desviación estándar de las mismas; mientras mayor sea la desviación estándar de un conjunto de datos, menor será la precisión de las mediciones. El error obtenido en el ajuste de los datos es también relevante, ya que habla de la medida en la que los valores de los puntos adquiridos para cada espectro de frecuencia se alejan del ajuste de la función de forma de línea Lorentziana que teóricamente define a cada espectro.

Otra característica de gran importancia es que debe existir una relación entre la sensibilidad o respuesta del resonador a las deformaciones y la resolución del dispositivo que se utilice para medir los cambios en la frecuencia, que en este caso es en analizador de radiofrecuencia; es decir, a mayor sensibilidad del arreglo se requiere una menor resolución en el analizador de radiofrecuencia.

Los cambios en las frecuencias PMB del resonador debidos a las deformaciones siguen un comportamiento lineal sobre el eje de la frecuencia, según se ha reportado con anterioridad. Para caracterizar la sensibilidad del dispositivo se hace un ajuste lineal de

los valores previamente obtenidos para la frecuencia central de cada señal PMB en el ajuste de las señales con forma de línea Lorentziana. Del modelo lineal calculado se obtiene un valor de pendiente o sensibilidad, una ordenada al origen y el error medio cuadrático en el ajuste. A diferencia de la desviación estándar y el error debido al ajuste de la señal Lorentziana, el error medio cuadrático alude al error que se obtiene en el ajuste lineal de los datos correspondientes a la frecuencia central de cada señal.

Finalmente, puede considerarse que cualquier sensor tiene un buen desempeño siempre que tenga una alta sensibilidad y será mejor en la medida en la que sean menores los valores correspondientes a cada uno de los errores mencionados.

#### 4.2 Comparación entre arreglos experimentales

En la tabla 4.1 se presentan los diferentes valores obtenidos para el cálculo del ancho espectral promedio de las señales PMB en los diferentes experimentos, con la desviación estándar y el error promedio en el ajuste de forma porcentual. Debe mencionarse que hubo experimentos en los que no fue posible caracterizar el comportamiento de las señales PMB porque en algunos arreglos no existían, o bien, debido a su inestabilidad.

	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>20 m, estático</i>	<i>5.016 kHz</i>	<i>23.11 %</i>	<i>2.518 %</i>
<i>20m, deformaciones</i>	<i>6.410 kHz</i>	<i>17.02 %</i>	<i>2.686 %</i>
<i>1m, estático</i>	<i>49.278 kHz</i>	<i>26.50 %</i>	<i>2.219 %</i>
<i>1m, deformaciones1</i>	<i>54.462 kHz</i>	<i>26.10 %</i>	<i>2.257 %</i>
<i>1m, deformaciones2</i>	<i>57.123 kHz</i>	<i>26.83 %</i>	<i>2.598 %</i>
<i>1m, deformaciones3</i>	<i>36.236 kHz</i>	<i>49.44 %</i>	<i>2.773 %</i>
<i>AS, 10m, 0cm</i>	<i>25.114 kHz</i>	<i>14.19 %</i>	<i>2.237 %</i>
<i>AS, 20m, 2 rejillas</i>	<i>28.176 kHz</i>	<i>11.08 %</i>	<i>1.848 %</i>

*Tabla 4.1 Ancho espectral en señales PMB*

La importancia de tener un ancho espectral pequeño radica en la precisión de las mediciones de la frecuencia central, que finalmente determina la deformación o desplazamiento de la punta de la viga. Mientras menor sea el ancho espectral, menor incertidumbre existirá en la posición de la frecuencia central de la señal.

Contrario a lo que se esperaba, al hacer más corto el primer resonador de 20 m, aumentaron tanto el ancho espectral como la desviación estándar de las mediciones. Se pensaba que al hacer un resonador de menor longitud y al existir un número menor de modos dentro de la cavidad, se disminuiría y se estabilizaría el ancho espectral de las señales. Una posible explicación al comportamiento contrario es que el emplear una sección tan pequeña de fibra de ganancia (40 cm) implica la existencia de inestabilidades en las frecuencias del resonador, muy probablemente debidas a la competencia modal. A pesar de que los modos se encuentran más separados en un resonador de menor longitud, es más fácil que los modos intercambien ganancia por inestabilidades propias del resonador, ya que se vuelve más susceptible a variaciones ambientales. Es decir, cuando se afecta una sección de 3 cm con una deformación, la respuesta es diferente para el caso de un resonador de 20 m que para uno de 1 m. En el caso de los dos arreglos con absorción saturable reportados en la tabla 4.1, el ancho espectral disminuyó un poco, sin ser mejor que el primer arreglo estudiado. En este caso la característica que superó a las situaciones anteriores fue la desviación estándar, teniendo un valor considerablemente menor.

En la tabla 4.2 se presentan los valores correspondientes al ancho espectral medido en las señales LMB, para los casos en los que fue imposible caracterizar este parámetro en señales PMB. Todos los valores que se presentan en la tabla corresponden a arreglos en los que se empleó absorción saturable.

En los casos presentados en la tabla 4.2 los valores de ancho espectral en general fueron altos comparados con los últimos dos experimentos, donde se presentaron los menores valores de desviación estándar para los casos en los que se empleó la rejilla de espectro amplio en combinación con un espejo de bulto o bien con la otra rejilla. Se presentó un cambio en los valores medidos al realizar las pruebas de estabilidad

empleando una cubierta de unicel y sin ella; los valores promedio de ancho espectral disminuyeron, sin embargo, su desviación estándar aumentó considerablemente. Muy probablemente los cambios se deban al hecho de que, en los últimos dos experimentos, el arreglo se colocó sobre una base de unicel, a diferencia de los casos anteriores, en los que el arreglo se encontraba sobre la superficie metálica de la mesa del experimento. El hecho de haber empleado la base de unicel hace que las perturbaciones ambientales, como los cambios de temperatura, afecten en menor medida al arreglo, por ser un material aislante térmico.

	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>AS, 10m, 50cm</i>	<i>33.770 kHz</i>	<i>76.80 %</i>	<i>1.901 %</i>
<i>AS, 10m, 25cm</i>	<i>26.124 kHz</i>	<i>11.162 %</i>	<i>1.763 %</i>
<i>AS, 10m, 0cm</i>	<i>26.678 kHz</i>	<i>13.326 %</i>	<i>1.9106 %</i>
<i>AS, 20m, PC</i>	<i>26.601 kHz</i>	<i>11.473 %</i>	<i>1.768 %</i>
<i>AS, 20m, R1</i>	<i>26.122 kHz</i>	<i>11.247 %</i>	<i>1.7196 %</i>
<i>AS, 20m, R2</i>	<i>27.893 kHz</i>	<i>7.618 %</i>	<i>1.807 %</i>
<i>AS, 20m, 2Rs</i>	<i>29.596 kHz</i>	<i>8.481 %</i>	<i>1.817 %</i>
<i>AS, 20m, SUn</i>	<i>5.462 kHz</i>	<i>37.88 %</i>	<i>2.627 %</i>
<i>AS, 20m, CUn</i>	<i>7.237 kHz</i>	<i>45.14 %</i>	<i>2.935 %</i>

*Tabla 4.2 Ancho espectral en señales LMB*

En la tabla 4.3 se presentan los valores de frecuencia central obtenidos para las señales PMB de manera estática. A diferencia de las tablas correspondientes a los valores de ancho espectral, en este caso el valor promedio de la frecuencia central no determina la bondad de un sensor. El parámetro que es útil en este caso es la desviación estándar. En la medición de la frecuencia central de las señales se obtienen valores porcentuales menores que en el caso del ancho espectral, debido a que el porcentaje está calculado con base en el valor promedio, siendo en el caso de las frecuencias centrales mayores que los valores obtenidos para anchos espectrales. Sin embargo, es de utilidad conocer la proporción en la que cambian las desviaciones estándar en cada caso, porque así es

posible determinar el arreglo que presentó una mayor estabilidad. En la tabla 4.3 puede observarse que el arreglo que presenta una menor desviación estándar es el que tiene sección con absorción saturable y emplea dos rejillas de Bragg como espejos, aunque es a su vez el que presenta un mayor error promedio en el ajuste. En este caso, como se esperaba, mejoró el desempeño del arreglo. Es importante mencionar que, aunque aparentemente los valores porcentuales de desviación estándar son pequeños y al estar referidos al valor de frecuencia central, pueden representar un error elevado si la sensibilidad del arreglo no es lo suficientemente alta como para superar esta limitante.

	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>20 m, estático</i>	<i>1.95652 MHz</i>	<i>0.5184 %</i>	<i>2.089 e-5 %</i>
<i>1m, estático</i>	<i>34.471 MHz</i>	<i>0.5964 %</i>	<i>1.0291 e-5 %</i>
<i>AS, 10m, 0cm</i>	<i>4.275 MHz</i>	<i>0.8969 %</i>	<i>4.457 e-5 %</i>
<i>AS, 20m, 2 rejillas</i>	<i>2.0496 MHz</i>	<i>0.1807 %</i>	<i>8.577 e-5 %</i>

*Tabla 4.3 Frecuencia central en señales PMB*

En la tabla 4.4 se presentan los valores de frecuencia central que se obtuvieron para las señales LMB, con sus respectivos valores porcentuales de desviación estándar y de error promedio en el ajuste de cada señal. De los datos presentados puede verse que la menor desviación estándar porcentual para los valores de frecuencia central de señales LMB se obtuvo en el arreglo que emplea dos rejillas de Bragg como espejos, en la prueba en la que se empleó una cubierta de unicel sobre el resonador. Como se esperaba, en la última prueba se obtuvo el valor más estable de frecuencia central, aunque no puede asegurarse que se deba a la cubierta de unicel, ya que los valores de desviación estándar de resto de los experimentos se encuentran aproximadamente en el mismo orden de magnitud y en algunos casos con valores muy cercanos. Además, la última configuración, si bien aportó el valor más estable de frecuencia central para la señal LMB, debido a su inestabilidad no permitió siquiera caracterizar la señal PMB, que es realmente la señal de interés.

	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error promedio en el ajuste</i>
<i>AS, 10m, 50cm</i>	<i>9.949 MHz</i>	<i>0.1679 %</i>	<i>2.191 e -3 %</i>
<i>AS, 10m, 25cm</i>	<i>9.880 MHz</i>	<i>0.0242 %</i>	<i>1.580 e -3 %</i>
<i>AS, 10m, 0cm</i>	<i>9.855 MHz</i>	<i>0.0272 %</i>	<i>1.751 e -3 %</i>
<i>AS, 20m, PC</i>	<i>3.814 MHz</i>	<i>0.0747 %</i>	<i>4.173 e -3 %</i>
<i>AS, 20m, R1</i>	<i>6.143 MHz</i>	<i>0.0384 %</i>	<i>2.478 e -3 %</i>
<i>AS, 20m, R2</i>	<i>6.018 MHz</i>	<i>0.01589 %</i>	<i>2.832 e -3 %</i>
<i>AS, 20m, 2Rs</i>	<i>5.938 MHz</i>	<i>0.0378 %</i>	<i>3.052 e -3 %</i>
<i>AS, 20m, Sun</i>	<i>5.9957 MHz</i>	<i>0.0201 %</i>	<i>8.012 e -4 %</i>
<i>AS, 20m, CUn</i>	<i>5.9959 MHz</i>	<i>0.01317 %</i>	<i>1.158 e -3 %</i>

*Tabla 4.4 Frecuencia central en señales LMB*

Después de haber analizado la estabilidad del ancho espectral y de la frecuencia central de las señales, la siguiente etapa es analizar la sensibilidad que presentan al aplicar deformaciones al arreglo. En la tabla 4.5 se presentan los valores correspondientes a cada uno de los parámetros que definen al modelo lineal correspondiente a cada experimento. El análisis de la respuesta del resonador a las deformaciones solamente se pudo analizar en los primeros dos arreglos, que fueron el resonador de 20 metros y de 1 metro, ya que nunca se alcanzó la estabilidad suficiente en las señales PMB en los arreglos con sección de absorción saturable como para medir su respuesta ante las deformaciones.

En la tabla aparecen los datos correspondientes a la sensibilidad o pendiente, la ordenada al origen, el error medio cuadrático del ajuste, la incertidumbre de las mediciones obtenida a partir del error medio cuadrático y, con base en la incertidumbre, el mínimo desplazamiento de la punta de la viga que se puede medir con este arreglo, permitiendo una incertidumbre de 10%.

	<i>Sensibilidad</i>	<i>Ordenada al origen</i>	<i>Error medio cuadrático</i>	<i>Incertidumbre</i>	<i>Mínimo desplazamiento</i>
<i>20m, deformaciones</i>	<i>-15.35 Hz/micra</i>	<i>1.656911 MHz</i>	<i>2.148745 MHz</i>	<i>1.4658 kHz</i>	<i>955 micras</i>
<i>1m, deformaciones1</i>	<i>-420.74 Hz/micra</i>	<i>31.488 MHz</i>	<i>0.8672 GHz</i>	<i>29.448 kHz</i>	<i>700 micras</i>
<i>1m, deformaciones2</i>	<i>256.82 Hz/micra</i>	<i>31.345 MHz</i>	<i>6.390 GHz</i>	<i>79.937 kHz</i>	<i>3113 micras</i>
<i>1m, deformaciones3</i>	<i>-174.428 Hz/micra</i>	<i>35.985 MHz</i>	<i>4.396 GHz</i>	<i>66.302 kHz</i>	<i>3801 micras</i>

*Tabla 4.5 Parámetros de los modelos lineales como respuesta a las deformaciones*

Como pudo observarse al realizar los experimentos, los cambios que se registraron sin deformar la viga son muy grandes, y en cualquier caso pueden afectar las mediciones. En general la sensibilidad de los arreglos estudiados es baja y la incertidumbre muy alta, lo que ocasiona que, a partir de los parámetros calculados se estimen como mínimos desplazamientos posibles valores muy por arriba de la meta de la medición de desplazamientos menores a 10 micras. Además, el comportamiento de los arreglos no es repetitivo, es decir, la birrefringencia cambia con el tiempo de manera aparentemente aleatoria, ya que al realizar tres experimentos para realizar el ajuste lineal en el resonador de 1m se presentaron parámetros diferentes en cada caso, e incluso en el segundo caso hubo un cambio en el sentido de la pendiente. Este cambio se atribuye al hecho de haber monitoreado la segunda señal PMB, ya que al ser simétricas, ésta presenta un aumento en la frecuencia como respuesta a la deformación aplicada.

A grandes rasgos puede realizarse una comparación de la sensibilidad de los experimentos realizados respecto a los resultados reportados en artículos (por ejemplo en la referencia [7]). En la referencia se reporta una sensibilidad de  $-4.1 \text{ kHz}/\mu\epsilon$ . Si en los resultados obtenidos experimentalmente se traduce el desplazamiento de la punta de la viga a deformación, al ser directamente proporcionales, se obtienen valores de sensibilidades de  $-15.35 \text{ Hz}/\mu\epsilon$ ,  $-420 \text{ Hz}/\mu\epsilon$ ,  $256 \text{ Hz}/\mu\epsilon$  y  $-174.4 \text{ Hz}/\mu\epsilon$ . En el mejor de los casos se obtuvo una sensibilidad 10 veces menor a la reportada y se observó que aumentó al emplear un resonador de menor tamaño.

Con base en los resultados obtenidos y lo observado al desarrollar cada uno de los experimentos se presenta en la siguiente sección una serie de detalles que deben tomarse en cuenta para cualquier análisis futuro de sensores de este tipo.

### **4.3 Sugerencias para configuración de resonadores**

El uso de un PLL simplificaría considerablemente la lectura de las señales de polarización de un resonador en la medición de deformaciones. Sin embargo, su aplicación conlleva una serie de complicaciones que no se previeron al inicio de este trabajo. Para poder emplear un PLL es necesario que se filtre adecuadamente la señal a la salida del resonador para eliminar los modos que no son de interés y que pueden interferir al realizarse la lectura solamente de uno de ellos. Igualmente es necesario que las señales tengan un ancho espectral lo suficientemente estrecho como para permitir un funcionamiento adecuado del circuito PLL. Además, se requiere que las frecuencias del resonador sean lo suficientemente bajas como para permitir el uso de circuitos con disponibilidad comercial. Por otro lado, en lo referente a la parte mecánica del arreglo, puede considerarse que la nueva configuración implementada permite disminuir el error en las mediciones, ya que no se determinó que existiera juego mecánico en las piezas.

En este trabajo se buscó encontrar un arreglo capaz de medir deformaciones con la suficiente sensibilidad como para medir desplazamientos en la punta de la viga menores a 10 micras. No se encontró tal arreglo pero se determinaron varios elementos que se deben considerar para mejorar el desempeño de los resonadores:

- En primer lugar debe considerarse que la birrefringencia de la fibra dentro de un resonador cambia de manera aparentemente aleatoria respecto al tiempo. Es necesario encontrar una causa para este comportamiento y hacer la caracterización correspondiente, para evitar que esto sea una fuente de error.
- Es necesario aislar completamente los arreglos de cambios de temperatura y posibles corrientes de aire, para hacer que los únicos cambios medidos en las señales PMB sean los debidos a las deformaciones de la viga.
- El agregar controladores de polarización a un arreglo permite el ajuste de la posición y la amplitud de las señales PMB. Sin embargo, los cambios que genera

en la birrefringencia no son completamente estables respecto al tiempo, como sucedió en el caso del análisis del arreglo con dos rejillas de Bragg como espejos y posteriormente al estudiar su comportamiento con una cubierta de unicel y sin ella. El arreglo era el mismo, sin embargo, al manipular el resonador y reajustar los controladores de polarización, no fue posible observar las señales PMB de forma estable como para caracterizar su comportamiento respecto a las deformaciones.

- Hasta este momento la mejor manera de disminuir el número de modos dentro de la cavidad resonante y que estos presenten bajas frecuencias es mediante el empleo de una sección de absorción saturable. Sin embargo, es necesario conocer algunas otras características para tener un desempeño óptimo. En nuestro caso se desconocían las proporciones de iones de Erbium en la fibra, así como también el hecho de haber empleado fibra con una misma concentración y haber alterado las proporciones en longitud de fibra láser dentro del resonador pueden haber afectado los resultados.
- Es necesario considerar correctamente las proporciones de fibra de ganancia, que permitan a la salida señales con la suficiente potencia y que además sean lo suficientemente estables como para poder medirse.
- Debe realizarse un control de la polarización de manera más efectiva. El empleo de controladores de polarización no permite cuantificar la forma en la que cambian la birrefringencia de la fibra, además de presentar ciertas inestabilidades respecto al tiempo. Se intentó estabilizar la polarización dentro del resonador empleando una sección de fibra de alta birrefringencia, pero se presentan grandes pérdidas de potencia debido a que no corresponde en ambas fibras el diámetro de campo modal (MFD).

Las inestabilidades en las señales RF se deben, además de fluctuaciones térmicas, a competencia modal dentro del láser. Si la ganancia lo permite puede haber más modos compitiendo que a su vez van a generar cambios en el ancho espectral. La estabilidad del láser es entonces importante. Una forma de dar estabilidad al láser es no forzando las frecuencias del resonador a cierta longitud de onda, como puede verse al emplear dos rejillas de Bragg como espejos, en lugar de una rejilla y un espejo de bulto.

Un elemento que debe tomarse en cuenta al darle continuidad a esta investigación es el tamaño de la parte del resonador que se adhiere a la viga y que se deforma actuando como sensor. Debe determinarse la longitud óptima, ya que debido al análisis mecánico, la deformación de la fibra –y como consecuencia su birrefringencia- cambiarían de forma no lineal al hacer mayor la parte que funciona como sensor; así como reducirla en exceso implicaría un cambio muy pequeño en la birrefringencia, que haría inestables a las señales de polarización.

El primer paso que debe seguirse para continuar con este trabajo es lograr estabilizar las señales PMB, mediante la reducción del número de modos del láser, alcanzando idealmente un láser monomodal. Mediante este trabajo pudo determinarse que el empleo de una sección de absorción saturable dentro de un resonador es una herramienta muy valiosa en la reducción del número de modos dentro de una cavidad. Otro elemento que debe atacarse es la estabilización de las señales de polarización mediante el control de la birrefringencia del resonador. Existe una posibilidad mediante el empleo de fibra de alta birrefringencia a lo largo de todo el resonador. Esto mantendría el estado de polarización a lo largo del arreglo y haría más eficiente el uso de los controladores de polarización. Es necesario también tener especial cuidado en los cambios ambientales que afectan al arreglo. Aunque las variaciones térmicas no parezcan muy grandes, debe tenerse un especial cuidado en ellas, ya que aunque no se hayan podido registrar con el sensor de temperatura empleado, implican cambios en el índice de refracción del arreglo, lo que finalmente conduce a un cambio en el patrón de la onda estacionaria dentro del resonador, tanto en la sección de ganancia como en la sección de absorción saturable. Es precisamente este comportamiento, inicialmente problemático, el que hace a este tipo de resonadores tan sensibles al emplearlos como sensores. Una gran ventaja es que responden con alta sensibilidad a una gran cantidad de variables físicas y precisamente el reto está, ya sea en encontrar la forma de aislar al sensor de los cambios físicos externos que no sean la variable de interés, o bien, encontrar la forma de procesar las señales ópticas con el fin de poder discriminar las señales leídas.

## CONCLUSIONES

Los sensores polarimétricos de fibra láser son útiles en la medición de deformaciones siempre y cuando puedan aislarse de los cambios de otras variables físicas, ya que al ser la birrefringencia el parámetro que cambia con las deformaciones, ésta puede también presentar variaciones debidas a cambios en temperatura o algunas otras perturbaciones ambientales, que afectan las mediciones.

Al analizar los resultados obtenidos y enfrentarlos con los objetivos iniciales se reconoce que por medio de los experimentos realizados no fue posible llegar a la meta de la medición de desplazamientos de la punta de la viga menores a 10 micras con un error menor al 10%. Se encontró que deben resolverse muchos problemas inherentes a cada configuración antes de poder alcanzar los resultados deseados. El querer construir un dispositivo versátil, sin tener la complicación de un analizador de radiofrecuencia, a partir de un circuito electrónico, complicó la medición de las frecuencias. Un elemento que determina la factibilidad de emplear un PLL es la longitud del resonador, que a su vez establece las frecuencias de operación. Sin embargo, un resonador de longitud útil para esta aplicación implica la presencia de muchos modos dentro de la cavidad y el incremento del ancho espectral de las señales, imposibilitando su lectura por medio del circuito.

De manera independiente a la medición de frecuencias empleando el PLL se analizaron las señales PMB y se encontró que es posible emplearlas para la medición de deformaciones/desplazamientos verticales de la punta de la viga. Tienen una respuesta que puede ajustarse a un modelo lineal, aunque no se logran los resultados deseados.

Posteriormente se determinó que mediante el empleo de una sección de absorción saturable dentro del resonador se reduce de manera notable el número de modos, situación que reduciría el ancho espectral, y aumentaría la estabilidad de las señales. Sin embargo en los experimentos realizados hubo dificultad para caracterizar las señales PMB, muy probablemente debido a que la absorción saturable hace menor la potencia a

la salida del resonador y puede llegar a hacer desaparecer las señales sensibles a los cambios en la birrefringencia.

Los puntos clave a considerar en la continuación de este trabajo serán principalmente la determinación de las dimensiones del resonador, así como las proporciones de fibra de Erbium y su concentración de iones, para poder encontrar la proporción adecuada y llegar a construir un resonador monomodal; el aislamiento de perturbaciones ambientales y cualquier cambio en otras variables físicas siempre representa un importante problema a resolver y éste es mayor en la medida en la que se emplee un dispositivo tan sensible a ellas.

## REFERENCIAS

- [1] Valli, J., "A review of adhesion test methods for thin hard coatings". American Vacuum Society, 1986.
- [2] [15] Donald L. Smith, Thin-Film Deposition: Principles and Practice, McGraw-Hill, 1995.
- [3] H. Bubert y H. Jenett, Surface and Thin Film Analysis, Wiley-VCH, 2002.
- [4] Francis T. S. Yu, Shizhuo Yin, Fiber Optic Sensors, Marcel Dekker, 2002.
- [5] Brian Culshaw, John Dakin, Optical Fiber Sensors, Vol. 3: Components and Subsystems, Artech House, 1996.
- [6] K. T. V. Grattan, B. T. Meggitt, Optical Fiber Sensor Technology, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [7] G. A. Ball, G. Meltz, and W. W. Morey, "Polarimetric heterodyning Bragg-grating fiber-laser sensor," *Optics Letters*, Vol. 18, No. 22, pp. 1976-1978, 1993.
- [8] H. K. Kim, S. K. Kim, H. G. Park and B. Y. Kim, "Polarimetric fiber laser sensors," *Optics Letters*, Vol. 18, No. 4, pp. 317-319, 1993.
- [9] Michel J.F. Digonnet, Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers, 2<sup>nd</sup> edition, Marcel Dekker, Inc. 1993.
- [10] Ian Clarke. "Cladding pumped technology". IPG Photonics Corporation, 2001.
- [11] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, Fundamentals of Photonics, John Wiley and Sons, Inc. 1991.
- [12] E. Hecht, Óptica, 3a. Edición, Addison Wesley Iberoamericana, 2000.
- [13] Sott. C. Rashleigh, "Origins and Control of Polarization Effects in Single-Mode Fibers," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. LT-1, pp. 312-331, 1983.
- [14] S. Tseng, C. Chen, "Fabry-Perot Cavities with Birefringent Single-Mode Fibers and their Applications as Polarimetric Sensors," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 7, pp. 1956-1963, 1989
- [15] Myung Lae Lee, Jin Sik Park, Wang Joo Lee, Seok Hyun Yun, Yong Hee Lee and Byoung Yoon Kim, "A polarimetric current sensor using an orthogonally polarized dual-frequency fibre laser," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 9, pp. 952-959, 1998.

- [16] J. Hernández-Cordero, V. A. Kozlov, T. F. Morse, “Highly Accurate Method for Single-Mode Fiber Laser Wavelength Measurement,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, pp. 83-85, 2002.
- [17] N. Li, F. Luo, S. Unlu, T. F. Morse, J. Hernández-Cordero, J. Battiato, D. Wang, “Intra-cavity fiber laser technique for high accuracy birefringence measurement,” *Optics Express*, Vol. 14, pp. 7594-7603, 2006.
- [18] P.K. Mehrotra and D. T. Quinto, “Techniques for evaluating mechanical properties of hard coatings,” *American Vacuum Society*, 1985.
- [19] Violeta A. Márquez Cruz, Análisis comparativo de parámetros de extensómetros de resistencia eléctrica y rejillas de Bragg para la medición de deformaciones (Tesis de Licenciatura), Facultad de Ingeniería, UNAM, 2004.
- [20] V. A. Márquez Cruz, G. Pulos Cárdenas, J. Hernández-Cordero, “Sensores polarimétricos de fibra óptica para la caracterización de películas delgadas,” 5<sup>o</sup> *Congreso Iberoamericano de Sensores*. Ibersensors 2006.
- [21] Texas Instruments, CD54HC4046A High Speed CMOS Logic Phase-Locked-Loop with VCO Datasheet, 2003.
- [22] Hyo Sang Kim, Seung Kwan Kim, and Byoung Yoon Kim, “Longitudinal mode control in few-mode erbium-doped fiber lasers,” *Optics Letters*, Vol. 21, No. 15, 1996.
- [23] RP Photonics, Encyclopedia of Laser Physics and Technology, <http://www.rp-photonics.com/>