



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

*"CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE
RESONADORES EN CONFIGURACIÓN DE ANILLO
PARA FIBRAS ÓPTICAS LÁSER"*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A N :

GUSTAVO ADOLFO PIÑA GARCÍA

PIERO OSVALDO ROCHE APARICIO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN HERNÁNDEZ CORDERO



MÉXICO

2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mis papás: Adrián Piña Romero y Ofelia García Chávez, por todo su cariño, apoyo, paciencia y comprensión.

A mis hermanos: Adrián, Catalina, Georgina, Carmen y Rafael por aprender a crecer y a vivir juntos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por permitirme formar parte de ellas.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales por abrirme sus puertas y proporcionarme un lugar y los instrumentos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Juan Hernández Cordero por su apoyo, confianza, paciencia e interés en la realización de este trabajo de tesis.

A todos mis profesores de la Facultad de Ingeniería por compartirme sus conocimientos, porque muchos de mis conocimientos aprendidos de ellos sirvieron para desarrollar este trabajo de tesis.

A mis compañeros del Instituto de Investigaciones en Materiales, y en especial a: Adán, Violeta, Jonathan y Blancas; por haber hecho mi estancia en el Instituto muy agradable.

Gustavo Piña

AGRADECIMIENTOS

A mis padres: Rebeca y Manuel por todo su apoyo.

A mis hermanos: Danna y Alejandro por su cariño.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería y al Instituto de investigación en Materiales.

Al Dr. Juan A. Hernández Cordero por su ayuda, comprensión e interés durante el desarrollo de la tesis.

A todos los compañeros de la Facultad de Ingeniería y del Instituto que de alguna u otra manera me ayudaron.

Al CONACYT por su apoyo económico a través de los proyectos NC-204 y NSF2004C01-8.

Piero

ÍNDICE

	INTRODUCCIÓN	1
	OBJETIVO	2
	CAPÍTULO 1	
	Antecedentes	3
1.1	Guías de onda	3
1.1.1	Fibras ópticas.....	3
1.1.2	Clasificación de las fibras ópticas.....	3
1.1.3	Propagación de la luz en fibras ópticas.....	5
1.1.4	Mecanismos de propagación de la luz.....	8
1.2	Fibras ópticas láser	9
1.2.1	¿Qué es una fibra óptica láser?.....	9
1.2.2	Fuentes de luz.....	9
1.2.3	Funcionamiento del láser.....	11
1.3	Dispositivos utilizados en fibras ópticas	13
1.3.1	Acopladores de fibra óptica.....	13
1.3.2	Multiplexor por división de longitud de onda.....	14
1.3.3	Controlador de polarización.....	14
1.4	Polarización en fibras ópticas láser	15
1.4.1	Polarización de la luz.....	15
1.4.2	Polarización de la luz en fibras ópticas y fibras ópticas láser Modos ortogonales de polarización.....	18
1.4.3	Birrefringencia.....	19
1.4.4	Características de polarización en fibras ópticas láser.....	21
1.4.5	Generación de las frecuencias heterodinas de polarización.....	22

CAPÍTULO 2

Efectos birrefringentes en resonadores de anillo	24
2.1. Resonadores en anillo	24
2.2. Descripción de los resonadores en anillo con birrefringencia híbrida	25
2.2.1. Dispositivos utilizados en los arreglos experimentales.....	26
2.3. Experimentos con resonadores en anillo con birrefringencia híbrida	29

CAPÍTULO 3

Operación unidireccional y bidireccional	35
3.1 Arreglo experimental unidireccional	35
3.1.1 Dispositivos utilizados en el arreglo.....	37
3.2 Caracterización del arreglo experimental	38
3.2.1 Sintonización del arreglo experimental.....	40
3.3 Arreglo experimental bidireccional	42

CAPÍTULO 4

Señales heterodinas de polarización	46
4.1 Frecuencias de resonancia	46
4.1.1 Dispositivos utilizados en la etapa de RF.....	48
4.2 Obtención de las señales heterodinas de polarización	52
4.2.1 Señales heterodinas para resonadores en anillo con birrefringencia híbrida.....	52
4.2.2 Señales heterodinas para resonadores en anillo en operación unidireccional y bidireccional.....	55

CAPÍTULO 5

Conclusiones.....	60
--------------------------	-----------

APÉNDICE

Artículos publicados en memorias en extenso.....	62
---------------------------------------------------------	-----------

Referencias y bibliografía.....	75
----------------------------------------	-----------

INTRODUCCIÓN

Las fibras ópticas tienen una gran variedad de aplicaciones en las comunicaciones y en el desarrollo de sistemas de medición basados en sensores de fibra óptica. Esto se debe a las características de este tipo de guía de onda, en particular, su capacidad para transportar información por grandes distancias y su tamaño reducido.

El uso de fibras ópticas láser para las aplicaciones anteriormente mencionadas, permite desarrollar sistemas compactos que pueden presentar características únicas y de gran utilidad. El estudio de la configuración anillo de resonadores de fibra óptica es muy importante para determinar las características fundamentales de la luz que se genera con estos dispositivos, y reconocer los parámetros del haz láser que pueden ser utilizados en diversos campos de aplicación.

La configuración de anillo de fibras ópticas láser permite que el haz de luz se transmita en dos direcciones dentro del anillo, con lo que se genera oscilación de varios modos longitudinales y distorsión en la ganancia de la fibra. Esta limitación puede evitarse introduciendo un aislador óptico dentro del anillo, el cual obliga a una operación unidireccional [1]. Los resonadores en anillo fabricados con dispositivos de fibra óptica han sido de gran interés, sobre todo para el desarrollo de giroscopios de tamaño compacto. Así como también para el desarrollo de sensores polarimétricos.

En este trabajo se propone un arreglo experimental que permite analizar las características espectrales de la emisión láser para diferentes combinaciones de fibra óptica dentro de un resonador en anillo en modo de operación unidireccional y bidireccional. Además, se presentan también las señales heterodinas de polarización, que son de utilidad para decodificar información de sensores polarimétricos de fibra óptica y en este caso son útiles para obtener información sobre la birrefringencia dentro del resonador óptico. Estas señales se obtienen mediante la mezcla electrónica de las frecuencias de oscilación de las dos polarizaciones ortogonales que de manera natural se generan en los resonadores de fibra óptica láser.

OBJETIVO

Implementar un arreglo en anillo de fibra óptica láser utilizando acopladores ópticos para conocer las características de polarización del haz láser y reconocer las ventajas que presenta esta configuración para distintas áreas de aplicación. Evaluar el comportamiento de las señales heterodinas de polarización obtenidas con este arreglo y determinar su utilidad para obtener información sobre las características geométricas y birrefringentes del resonador.

CAPÍTULO 1.

Antecedentes.

1.1 Guías de onda.

Una guía de onda óptica es una estructura dieléctrica que funciona como “conducto” para el haz de luz y que transporta la energía a frecuencias en el rango de la luz. La idea básica de una guía de onda es llevar luz con pérdidas mínimas de un punto a otro. El principio de operación es el confinamiento del haz de luz en el dieléctrico central.

1.1.1 Fibras ópticas.

Una fibra óptica es una guía de onda formada por dos cilindros concéntricos en los cuales el índice de refracción del material del cilindro interno (núcleo) es mayor al del cilindro externo (revestimiento); con esto se garantiza la propagación de la luz en su interior con base en la reflexión total interna (Figura 1.1).

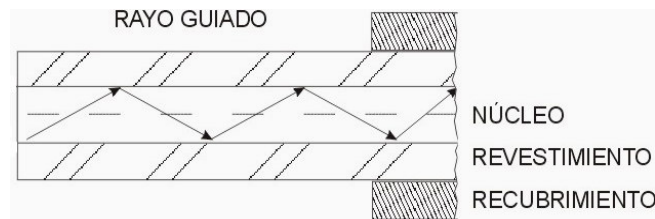


Figura 1.1 Sección transversal típica de una fibra óptica.

1.1.2 Clasificación de fibras ópticas.

Dependiendo del tipo de propagación del haz de luz en el interior de la fibra, éstas se clasifican en los siguientes tipos:

❖ Fibra multimodo de índice escalonado.

Las fibras multimodo permiten más de un modo de propagación; es decir, el haz de luz se propaga en muchas direcciones. El núcleo de estas fibras está constituido por un material uniforme cuyo índice de refracción es claramente superior al de la cubierta que lo rodea. El paso desde el núcleo hasta la cubierta conlleva por tanto un cambio total del índice, de ahí su nombre de índice escalonado (Figura 1.2 a).

❖ Fibra multimodo de índice gradual.

Su principio se basa en que el índice de refracción en el interior del núcleo no es único y decrece cuando se desplaza del núcleo hacia el revestimiento (Figura 1.2 b).

❖ Fibra monomodo.

Es el caso conceptualmente más simple, ya que se trata de una fibra de índice escalonado pero con un diámetro del núcleo tan pequeño (inferior a 10 micras) que sólo permite la propagación de un modo, el fundamental (Figura 1.2). Este tipo de fibra se usa en enlaces de gran distancia.

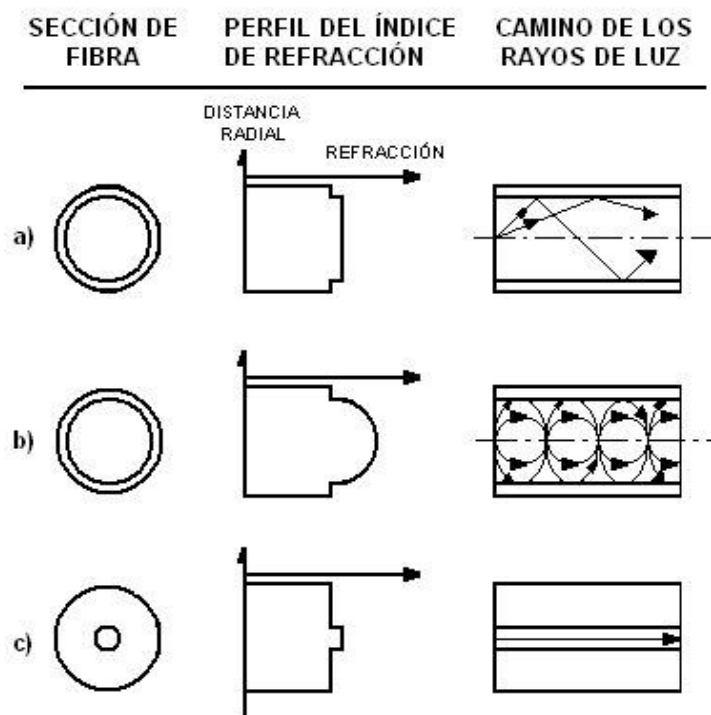


Figura 1.2 Tipos de fibra óptica: a) fibra multimodo de índice escalonado, b) fibra multimodo de índice gradual y c) fibra monomodo.

1.1.3 Propagación de la luz en las fibras ópticas.

La propagación de la luz en una fibra óptica se puede explicar mediante el uso de las leyes de la óptica geométrica, empleando las leyes de reflexión y refracción; la luz es considerada como un rayo y la propagación de la luz en el interior de la fibra se efectúa y mantiene mediante reflexiones múltiples en la interfaz núcleo-revestimiento.

Siempre que el diámetro de estas fibras sea grande comparado con la longitud de onda del haz de luz, la naturaleza ondulatoria inherente del mecanismo de propagación es de poca importancia y el proceso obedece a las leyes conocidas de la óptica geométrica. Debido a que la longitud de onda de las ondas electromagnéticas en el infrarrojo y visible es muy pequeña, el estudio de la propagación en el interior de la fibra puede efectuarse con el modelo de rayos luminosos. Según estas leyes, al incidir un rayo luminoso sobre una interfaz entre dos medios de distinto índice de refracción (núcleo y revestimiento en una fibra óptica), una parte del rayo se refleja y otra se refracta.

La refracción ocurre cuando la luz pasa de un medio isotrópico homogéneo a otro; el rayo de luz se inclinará en la interfaz entre los dos medios. La expresión matemática que describe el fenómeno de la refracción es conocida como la *Ley de Snell*, dada por:

$$n_0 \text{ sen } \theta_0 = n_1 \text{ sen } \theta_1 \quad (1-1)$$

donde n_0 es el índice de refracción del medio en que la luz viaja inicialmente, n_1 es el índice de refracción del segundo medio, θ_0 es el ángulo entre el rayo incidente y la normal a la interfaz, θ_1 es el ángulo entre el rayo refractado y la normal a la interfaz.

La Figura 1.3 (a) muestra el caso de la luz que pasa de un medio con índice alto a un medio con índice bajo. Aunque la refracción está ocurriendo, una cierta porción del rayo incidente es reflejada si $\theta_0 < \theta_c$ donde θ_c es llamado ángulo crítico. Como se muestra en la Figura 1.3 (b), si el rayo de luz refractado se propaga a lo largo de la interfaz, el rayo no penetra en el medio de índice más bajo; y en ese punto, $\text{sen } \theta_c$ es igual a la unidad. Pero si $\theta_0 > \theta_c$, el rayo incidente es completamente reflejado en la

interfaz y ninguna refracción tiene lugar (ver Figura 1.3 (c)). Este fenómeno es conocido como la *reflexión total interna* (ver Figura 1.4).

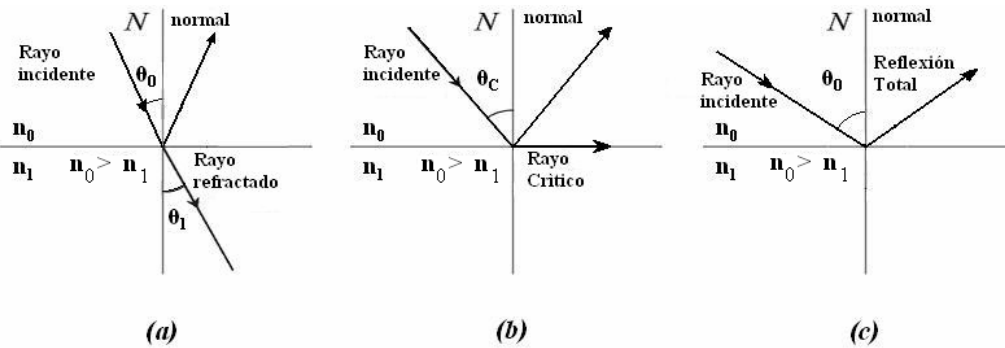


Figura 1.3 Rayo incidente en una interfaz plana entre un medio de alto índice y bajo índice.

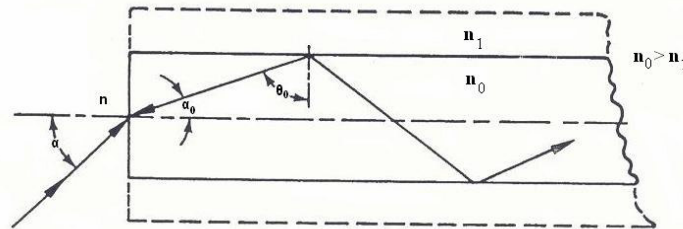


Figura 1.4 Paso del rayo a través de una interfaz dieléctrica.

En la Figura 1.4 se representa esquemáticamente un rayo de luz incidente en el extremo de una fibra óptica con un ángulo de acuerdo con la Ley de Snell, éste será refractado pasando dentro del núcleo. Si el rayo viaja a través del medio con índice de refracción alto con un ángulo mayor que θ_c , se reflejará en la interfaz núcleo-revestimiento, tendrá reflexiones múltiples y se propagará a través de la fibra óptica. Considerando la Ley de Snell (Ecuación (1-1)) para la fibra óptica, el índice del núcleo (n_0), el índice del revestimiento (n_1), y el índice del medio circundante (n), podemos obtener:

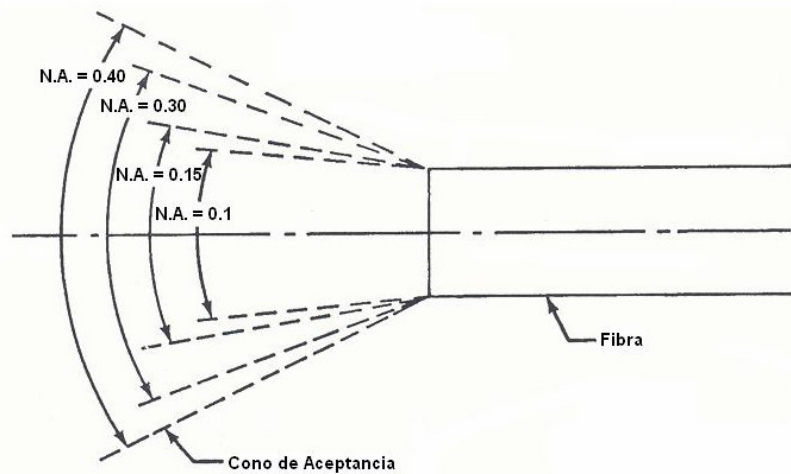
$$n \operatorname{sen} \alpha = n_0 \operatorname{sen} \alpha_0 = n_0 \operatorname{sen} (\pi/2 - \theta_c) = n_0 \left[1 - (n_1/n_0)^2 \right]^{1/2} *$$

$$= (n_0^2 - n_1^2)^{1/2} = N.A.$$

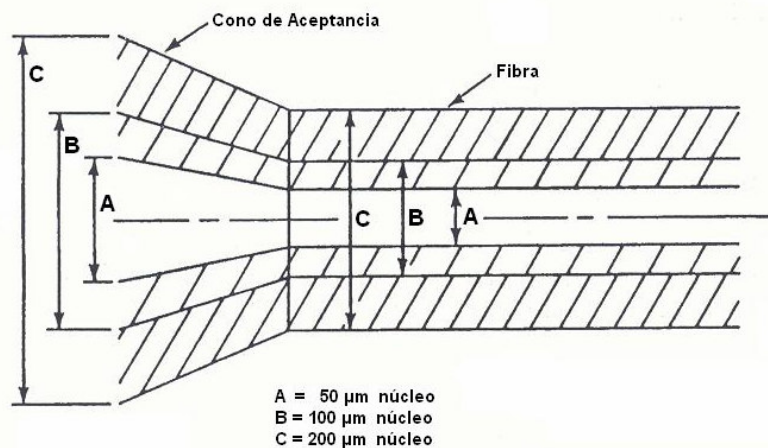
* Para $\theta_0 = \theta_c$, $\theta_1 = 90^\circ$; por consiguiente, $\operatorname{sen} \theta_c = n_1/n_0$.

$$N.A. = \sqrt{n_0^2 - n_1^2} \quad (1-2)$$

Este parámetro se conoce como la apertura numérica (*N.A.*, por sus siglas en inglés). La *N.A.* es una medida de la capacidad de aceptación de luz de la fibra óptica y está determinada por la diferencia en el índice refracción entre el núcleo y el revestimiento. Una *N.A.* mayor permite a la fibra acoplar la luz con un ángulo incidente mayor (α) (Figura 1.5 (a)). La eficacia de acoplamiento también aumenta cuando el diámetro de la fibra aumenta (ver Figura 1.5 (b)). Por consiguiente, la eficacia de colección-de luz aumenta cuando el núcleo, diámetro y cono de aceptación de la fibra son mayores.



(a) Apertura Numérica



(b) Tamaño del Núcleo

Figura 1.5 Paso del rayo en una interfaz plana cilíndrica y dieléctrica.

1.1.4 Mecanismos de propagación de la luz.

De acuerdo con la óptica geométrica, los rayos de luz cumplen con las siguientes reglas:

- a) En cualquier medio, los rayos viajan a una velocidad (v) igual a:

$$v = \frac{c}{n} \quad (1-3)$$

donde c es la velocidad de los rayos en el vacío y n es el índice de refracción del medio ($n=1$ para el vacío).

- b) Los rayos viajan en línea recta, a menos que exista un cambio del índice de refracción.
- c) Cuando un rayo llega a una frontera entre dos medios con diferentes índices de refracción, en el que el rayo pasa de un medio con índice de refracción alto a un medio con índice de refracción bajo y $\theta_1 > \theta_c$, éste es reflejado y el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, como se ilustra en la Figura 1.6

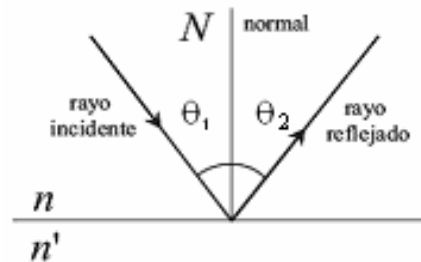


Figura 1.6. Reflexión de la luz en un espejo, $\theta_1 = \theta_2$.

$$\theta_1 (\text{incidencia}) = \theta_2 (\text{reflexión})$$

Para poder hacer que la luz se propague a través de una fibra óptica, es necesario que en la interfaz entre el núcleo y el revestimiento se presente el fenómeno de la *reflexión total interna*. Esto se puede lograr cubriendo el núcleo (vidrio) con alguna capa metálica, para que la luz sufra reflexiones múltiples durante su trayectoria. Sin embargo, las reflexiones se darán con determinadas pérdidas producidas por la atenuación del rayo de luz (ver Figura 1.7), y el proceso de fabricación sería complicado.

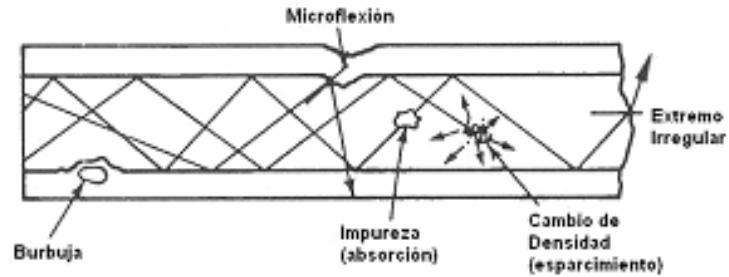


Figura 1.7 Paso del rayo en una fibra óptica y sus causas de atenuación.

La manera simple de fabricar fibras ópticas es utilizando materiales dieléctricos (plástico, vidrio). Si se garantiza una diferencia de índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento, la reflexión total interna permite que la propagación de la luz se realice mediante reflexiones múltiples y con pérdidas mínimas.

1.2 Fibras ópticas láser.

1.2.1 ¿Qué es una fibra óptica láser?

Una fibra óptica láser tiene un núcleo dopado con iones de materiales que pertenecen al grupo de las tierras raras, para formar una fibra activa capaz de amplificar luz. La energía de excitación es luz láser que se bombea a través de un acoplador óptico, lo que origina que los fotones sean absorbidos en el núcleo de la fibra, produciendo de esta manera la inversión de población y la estimulación necesaria para provocar una salida láser a la longitud de onda característica del material con que fue dopada la fibra.

1.2.2 Fuentes de luz.

Entre las diferentes fuentes ópticas que existen, los dos tipos de fuentes ópticas más importantes por su uso en los sistemas de fibra óptica son los diodos emisores de luz (LED) y los diodos láser (LD). Esto es debido a que sus características físicas permiten el desarrollo de fuentes compatibles en tamaño con las fibras, y la emisión de luz es a las longitudes de onda requeridas.

Los diodos emisores de luz (LED's) son fuentes de luz *no coherente* (radiando luz en todas direcciones). Los LED's son diodos semiconductores p-n que para emitir luz se polarizan directamente. La energía luminosa emitida por los diodos emisores de luz es proporcional al nivel de corriente de polarización del diodo.

Los diodos láser (LD) son fuentes monocromáticas coherentes de emisión estimulada, y contienen una cavidad resonante que sirve para realizar la realimentación óptica necesaria para el sistema. La oscilación láser se alcanzará si el nivel de corriente suministrado al dispositivo es lo suficientemente grande para que la ganancia óptica compense las pérdidas. Al nivel de corriente donde se alcanza el equilibrio entre pérdidas y ganancia se denomina *corriente de umbral*.

El LED respecto al LD tiene una mayor estabilidad térmica, pero su emisión óptica no es coherente. Como se muestra en la Figura 1.8, el LD tiene una mayor potencia de salida con respecto al LED, debido a que en los LED's la potencia se distribuye en un espectro más ancho que en el LD. En el LD el haz es coherente y la potencia de salida óptica depende de la temperatura. A diferencia de los LD, los LED's son dispositivos muy robustos y no requieren de un circuito de excitación con compensación de temperatura y de protección contra transitorios. Por encima de la corriente de umbral, el espectro de los LD tiene un ancho de línea muy angosto, y para muchos propósitos prácticos se considera monocromático.

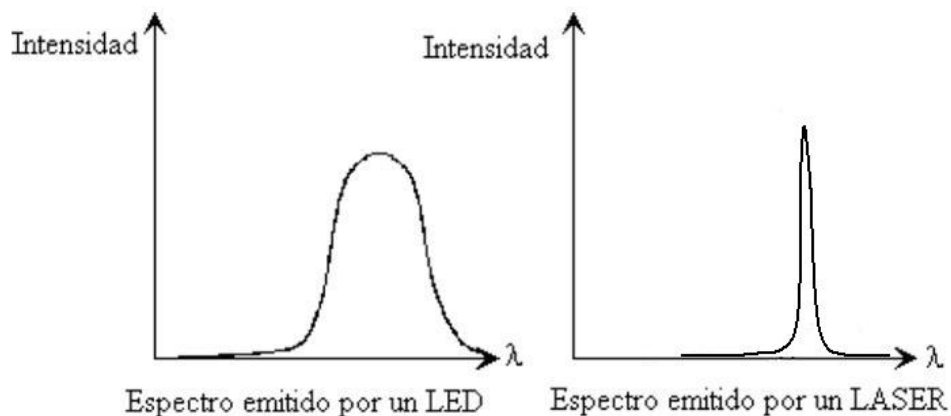


Figura 1.8 Espectros de emisión del LED y LD.

1.2.3 Funcionamiento del láser.

El láser (por sus siglas en inglés “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”) es un dispositivo que genera o amplifica radiación electromagnética *coherente*, es altamente direccional, y tiene intensidad alta. Como se muestra en la Figura 1.9, los componentes físicos mínimos y necesarios para hacer funcionar el láser son: 1) la ganancia del medio láser, 2) el mecanismo de bombeo, y 3) una estructura específica llamada cavidad resonante.

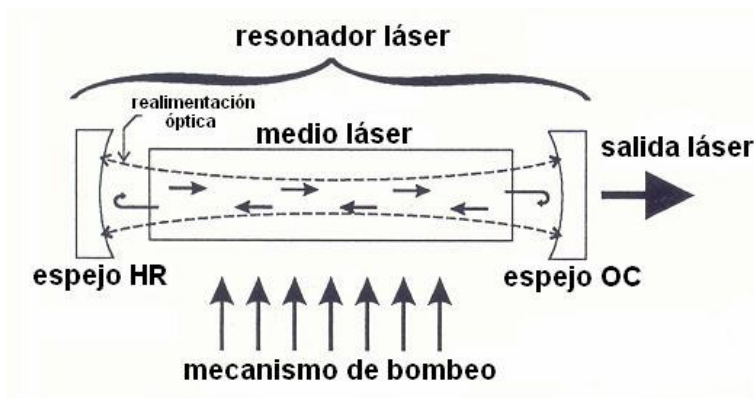


Figura 1.9. Elementos de un oscilador láser típico.

Los tres procesos fundamentales asociados con la interacción de la luz y la materia que tienen particular relevancia para el láser son: 1) *absorción*, 2) *emisión espontánea*, o decaimiento, y 3) *emisión estimulada*. La energía (E) de un fotón puede encontrarse por medio de la ley de Planck: $E = h\nu$, donde h es la constante de Planck y ν la frecuencia. Un átomo puede tener transición entre niveles de energía, teniendo una diferencia de energía entre estos niveles (ΔE). Si un átomo es excitado dentro de un estado de energía bajo, y si se produce una transición de electrones de un nivel de energía bajo a uno alto, se llevará a cabo el proceso denominado *absorción* (ver Figura 1.10). Si un átomo está en un estado de excitación, puede decaer espontáneamente a un estado de energía bajo, emitiendo un fotón con una frecuencia $\nu = \Delta E / h$ particular; esta transición de energía se conoce como *emisión espontánea*, y se muestra gráficamente en la Figura 1.10. Adicionalmente, si el decaimiento del electrón se estimula por la interacción del material con otro fotón, emitiendo un segundo fotón, se genera *emisión*

estimulada. Una característica importante del fotón emitido de manera estimulada es que tiene la misma frecuencia (ν) y fase que el fotón que genera la transición [2].

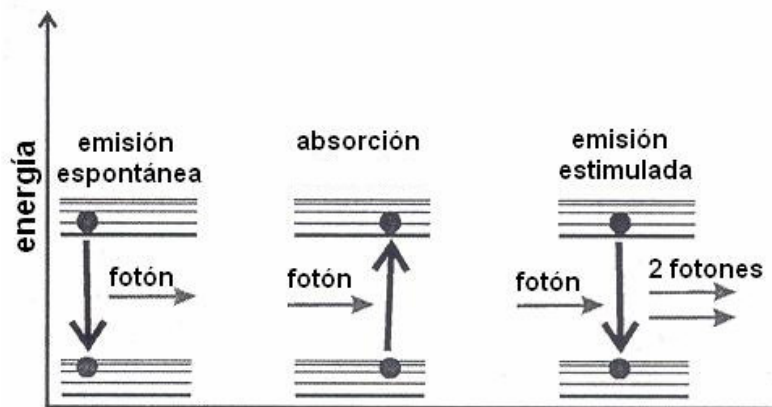


Figura 1.10. Representación de la emisión espontánea, absorción, y emisión estimulada.

La luz láser se obtiene en el interior de la cavidad resonante cerrada por espejos (HR y OC, por sus siglas en inglés “Highly Reflective” y “Output Coupler”, respectivamente) uno de los cuales es sólo parcialmente reflejante (OC). En dicha cavidad, está contenido el medio activo que se lleva a un estado inestable mediante el aporte de energía, generalmente eléctrica (ver Figura 1.9) hasta que se llega al estado denominado "inversión de población". Aquí el número de átomos en estado inestable es superior al número de átomos en estado de reposo. En algún momento, uno de los átomos en estado de excitación volverá al estado de reposo emitiendo un fotón; si este fotón incide sobre uno de los átomos que permanecen en estado de excitación, éste al volver al estado de reposo emitirá otro fotón. Estos fotones al incidir a su vez sobre otros átomos en estado de excitación provocarán la emisión de más fotones, algunos de los cuales se desplazarán a lo largo del eje longitudinal de la cavidad y, al reflejarse en los espejos de los extremos recorrerán la cavidad resonante en uno y otro sentido amplificando el proceso de emisión de luz. Si se mantiene el proceso, suministrando continuamente energía al medio, la radiación constantemente producida emergerá por el espejo parcialmente reflejante [2].

Los sistemas de fibra láser funcionan bajo los mismos principios. El medio activo es una fibra dopada con tierras raras, y los resonadores pueden implementarse con dispositivos ópticos convencionales, o bien, utilizando dispositivos de fibra óptica.

1.3 Dispositivos utilizados en fibras ópticas.

En un principio, las fibras ópticas fueron diseñadas solamente como medios de transmisión. Sin embargo, la miniaturización de la tecnología ha impulsado la sustitución de los componentes de óptica clásica por dispositivos ópticos basados únicamente en fibras y óptica integrada.

Los dispositivos de fibra óptica pueden clasificarse en dos tipos: activos y pasivos. Los dispositivos activos son aquellos que requieren de algún tipo de energía externa para su funcionamiento y que además generan amplificación o ganancia al sistema, mientras que los dispositivos pasivos no requieren más que ocupar un lugar en el arreglo óptico para realizar su función o bien, transferir la energía de un lugar a otro sin aportar ganancia al sistema.

1.3.1 Acopladores de fibra óptica.

La característica principal de los acopladores de fibra óptica es transferir luz de una guía a otra. Una forma para producir esto es fundiendo dos fibras ópticas a través de un cierto proceso, hasta lograr que los núcleos estén unidos y exista transferencia de energía, derivando todo esto en un arreglo de cuatro brazos (ver Figura 1.11).

Un acoplador de fibra óptica equivale a un separador de haz de luz. La unión o zona de acoplamiento se caracteriza por un coeficiente que determina el porcentaje de intensidad de la onda que se acopla de una fibra a otra. El dispositivo más usado es el acoplador de 3 [dB], en el que el 50% de la luz que entra se acopla a cada una de las fibras de salida.

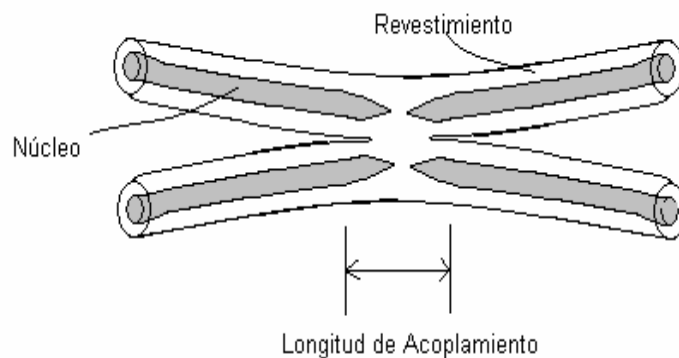


Figura 1.11 Acoplador de fibra óptica.

1.3.3 Multiplexor por división de longitud de onda.

Es un dispositivo de derivación selectiva en longitud de onda, diseñado para permitir que en una fibra en la que se transmiten varias longitudes de onda, éstas puedan combinarse o separarse (dependiendo de la longitud de onda de la señal). Se utiliza en las fibras láser para separar la longitud de onda de bombeo (LD) de la longitud de onda de emisión del resonador óptico.

1.3.4 Controlador de polarización.

Los controladores de polarización son útiles para cambiar de manera controlada el estado de polarización de la luz que se propaga por una fibra óptica. Dicho dispositivo basa su funcionamiento en el aumento de la birrefringencia por presión en la fibra y rotación en la sección de la fibra en donde se aplica presión (ver Figura 1.12). Al aplicar la fuerza se genera un retraso de fase en la onda dependiendo de la orientación con respecto a los ejes birrefringentes inducidos. Al rotarse los ejes, la polarización a la salida del tramo de la fibra puede girarse con respecto a los ejes birrefringentes nominales de la fibra (ver Figura 1.13).

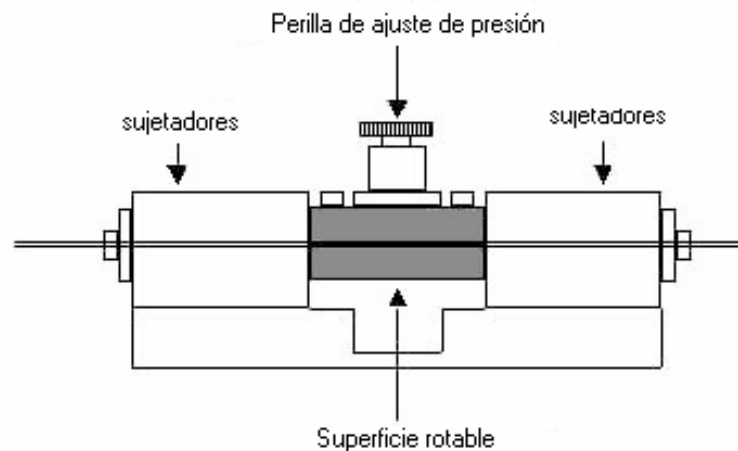


Figura 1.12 Controlador de polarización.

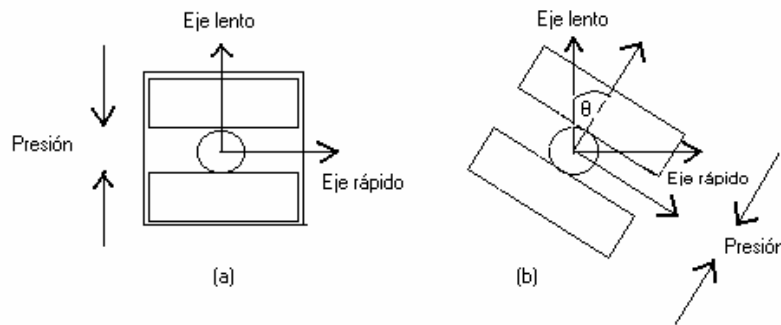


Figura 1.13 (a) Modificando la birrefringencia, aplicando presión, (b) es posible controlar la orientación de los ejes birrefringentes inducidos por la presión ejercida.

1.4 Polarización en fibras ópticas láser.

1.4.1 Polarización de la luz.

La teoría electromagnética permite considerar a la luz como una onda electromagnética transversal que se propaga en el espacio, produciendo con ello un desplazamiento de energía. La polarización se puede definir como la orientación que toma el campo eléctrico cuando la onda se propaga. Al viajar la luz, se pueden presentar diferentes estados de polarización tales como polarización lineal, circular y elíptica.

Polarización lineal.

Una onda electromagnética transversal con polarización lineal es aquella en la cual la orientación del vector de campo eléctrico tiene una orientación constante aunque su magnitud y sentido varían con el tiempo (ver Figura 1.14).

Podemos representar dos campos eléctricos asociados a una onda óptica en la forma:

$$\mathbf{E}_x(z, t) = \hat{i} E_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad (1-4)$$

$$\mathbf{E}_y(z, t) = \hat{j} E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \quad (1-5)$$

donde k es la constante de propagación y ε es la diferencia de fase relativa entre las ondas, ambas viajando en la dirección z .

El campo eléctrico resultante se puede representar de la siguiente manera:

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{E}_x(z, t) + \mathbf{E}_y(z, t) \quad (1-6)$$

Si ε es cero o un múltiplo entero de $\pm 2\pi$, se dice que las ondas están en fase. En ese caso la ecuación (1-6) queda

$$\mathbf{E} = (\hat{i} E_{0x} + \hat{j} E_{0y}) \cos(kz - \omega t) \quad (1-7)$$

La onda resultante tiene por consiguiente una amplitud fija igual a $(\hat{i} E_{0x} + \hat{j} E_{0y})$, y se dice que está linealmente polarizada.

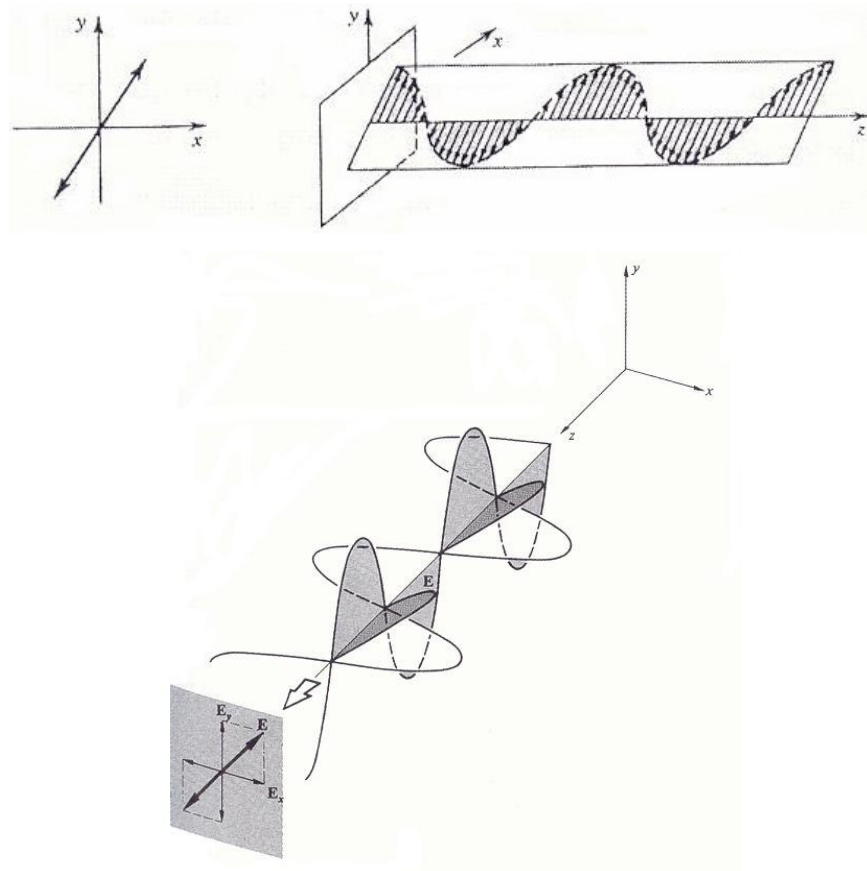


Figura 1.14. Luz polarizada linealmente.

Polarización circular.

Otro caso especial de interés particular aparece cuando ambas ondas tienen amplitud constante ($E_{0x} = E_{0y} = E_0$) y la dirección del campo eléctrico es variable en el tiempo. Por lo tanto la onda resultante es

$$\mathbf{E} = E_0 [\hat{i} \cos(kz - \omega t) + \hat{j} \sin(kz - \omega t)] \quad (1-8)$$

En la Figura 1.15 se puede observar que la amplitud de \mathbf{E} es una constante, pero la dirección de \mathbf{E} no está restringida, como antes, a un solo plano.

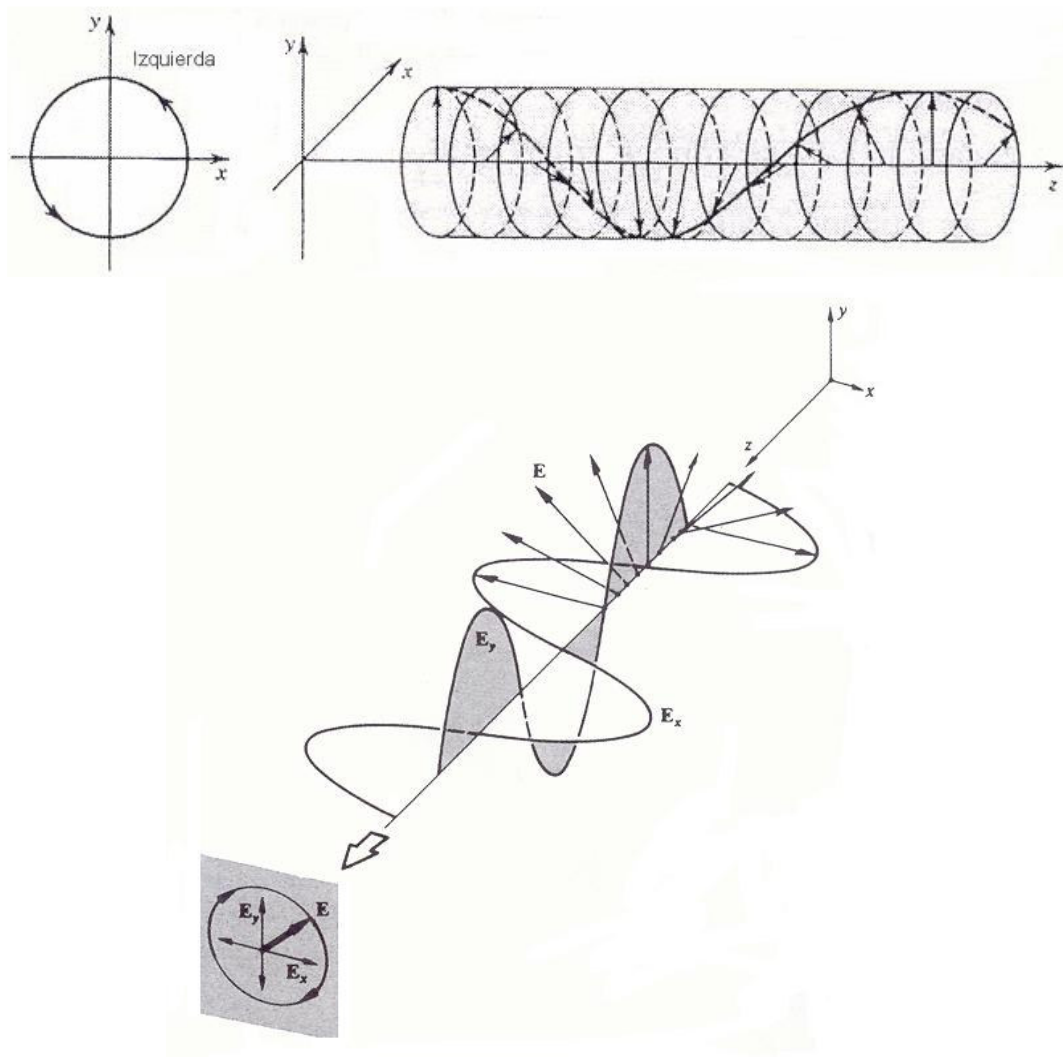


Figura 1.15. Luz con polarización circular.

Polarización elíptica.

Por lo que a la descripción matemática se refiere, tanto la luz lineal como circular se pueden considerar como casos especiales de la luz **elípticamente polarizada**. Esto significa que, en general, la resultante del vector campo eléctrico \mathbf{E} girará cambiando también su magnitud (ver Figura 1.16). En tales casos el extremo de \mathbf{E} trazará una elipse, la forma de la elipse dependerá de las componentes de campo eléctrico ortogonales en las que se descompone.

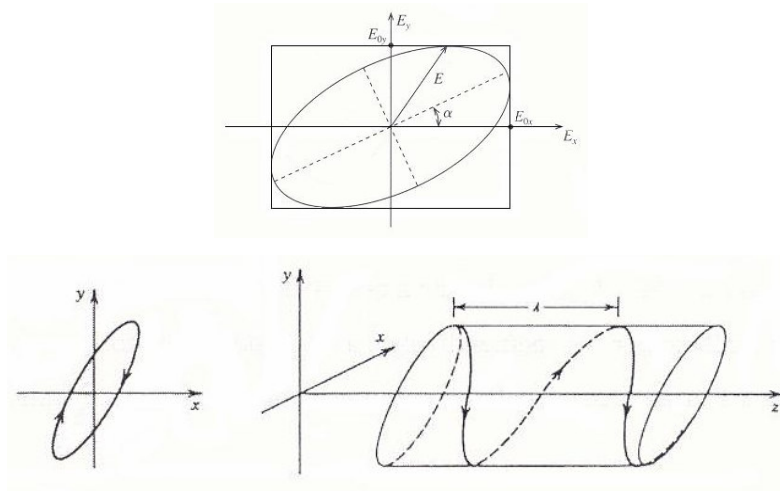


Figura 1.16. Luz con polarización elíptica.

1.4.2 Polarización de la luz en fibras ópticas y fibras ópticas láser: modos ortogonales de polarización.

La clasificación de los modos de propagación en una fibra óptica se hace tomando en cuenta la orientación de los campos eléctricos y magnéticos de la onda luminosa. Puede establecerse una clasificación con base en la distribución de intensidades en la dirección radial y azimutal de la fibra. De esta forma, se pueden obtener los modos linealmente polarizados (LP_{lm}), que se obtienen de combinar los modos de propagación TE, TM, HE y EH. Esto da como resultado la representación de un campo eléctrico total polarizado en alguna de las direcciones de los ejes cartesianos. Entonces, se pueden combinar ciertos modos y obtener configuraciones de campo linealmente polarizados (ver Figura 1.17) [3].

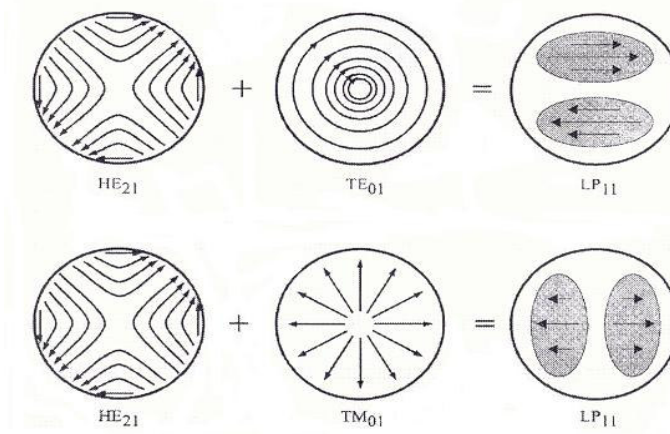


Figura 1.17. Obtención de los modos LP₁₁.

Por convención, se puede escoger que el campo eléctrico se propague en alguno de los ejes de referencia x o y , y dado que tales direcciones son ortogonales, los modos que coincidan con la referencia se llamarán *modos característicos de polarización de una fibra* [3].

1.4.3 Birrefringencia.

Debido a la geometría, las fibras ópticas monomodales pueden soportar dos modos de polarización ortogonales. Para una fibra ideal con una simetría circular perfecta, los dos modos no se degeneran y por tanto, cualquier estado de polarización guiado a través de la fibra se propagará sin cambio alguno. Pero en realidad, imperfecciones tales como asimetrías laterales por presión sobre la fibra y núcleos no circulares, rompen con la simetría ideal produciendo la degeneración de los modos. Cada modo se propaga con una velocidad de fase diferente y esta diferencia entre los índices de refracción efectivos se define como la *birrefringencia de la fibra* [4].

$$B = n_y - n_x, \quad \text{o} \quad \beta = k_0 (n_y - n_x) \quad (1-9)$$

Una birrefringencia uniforme causa un estado de polarización general que evoluciona en una secuencia periódica de estados conforme la luz se propaga. La longitud sobre la cual la diferencia de fase es múltiplo de 2π , es definida como la

longitud de abatimiento ($L_B = 2\pi/\beta$). Ya que el estado de polarización se repetirá después de la longitud de abatimiento, este parámetro es uno de los más empleados para cuantificar la birrefringencia de la fibra. Las fibras que mantienen la polarización se fabrican tratando de minimizar L_B . Las fibras de baja birrefringencia (LB) (por sus siglas en inglés “Low Birefringence”) se fabrican tratando de reducir la asimetría circular al mínimo, mientras que las de alta birrefringencia (HB) (por sus siglas en inglés “High Birefringence”) persiguen un propósito opuesto, ya que deliberadamente se rompe con la simetría circular de la fibra al incorporar elementos que inducen esfuerzos en el revestimiento, o a través del uso de núcleos elípticos [4].

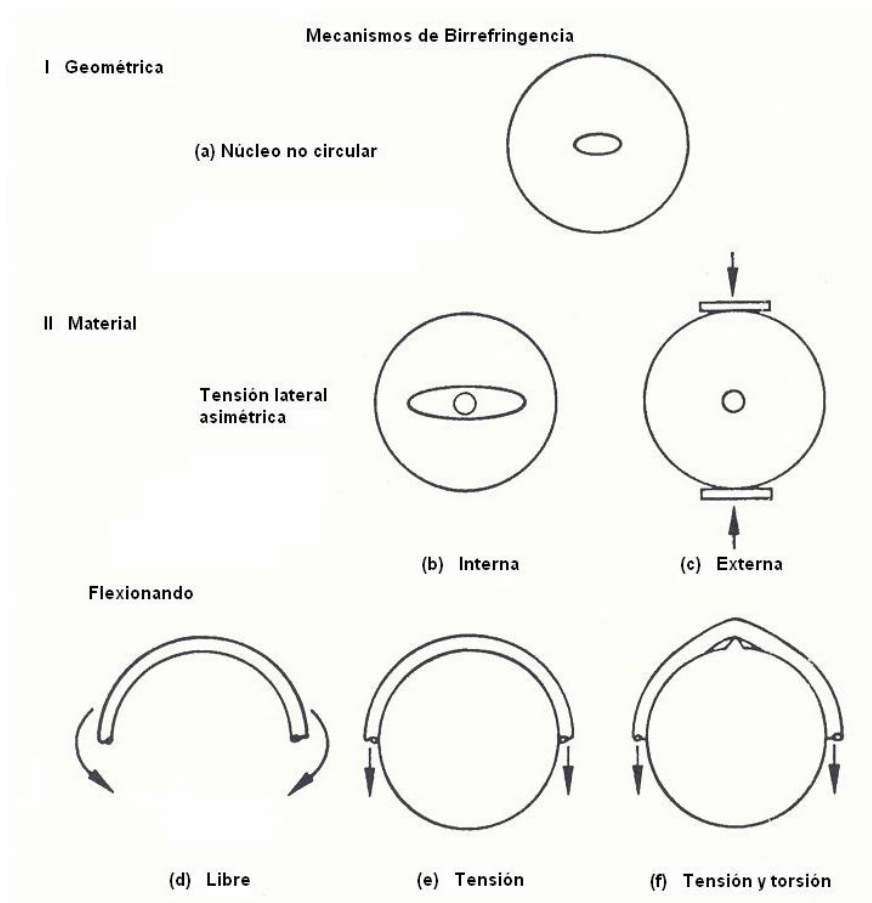


Figura 1.18. Mecanismos de birrefringencia debidos a la geometría y al material en la fibra óptica.

Existen diversos mecanismos para introducir birrefringencia en fibras monomodo convencionales. Estos mecanismos birrefringentes, geométricos y generados por materiales (núcleos no circulares y esfuerzos asimétricos laterales) se introducen

durante la fabricación, y por esta razón, se fija la birrefringencia una vez que la fibra ha sido terminada. Los mecanismos externos tales como esfuerzos asimétricos, curvaturas y tensión, también contribuyen a la birrefringencia (ver Figura 1.18).

Por convención, el modo orientado en una dirección preferencial x se considera como modo rápido e y como el modo lento (ver Figura 1.19). En fibras que mantienen la polarización (PM) (“Polarization Maintaining”) los mecanismos internos birrefringentes de la fibra dominan y por esta razón, los factores externos son poco efectivos para alterar la birrefringencia [4].

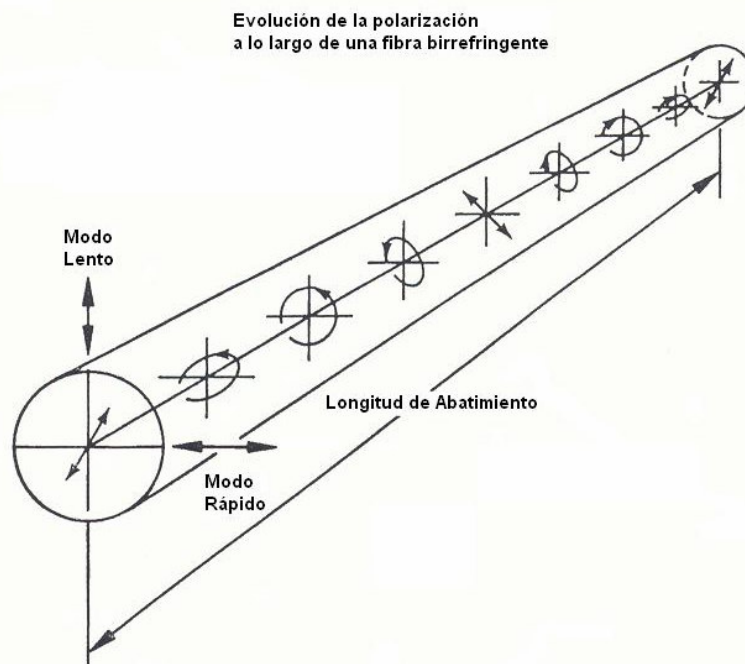


Figura 1.19. Efecto de birrefringencia uniforme sobre el estado de polarización de un haz introducido inicialmente con luz linealmente polarizada a 45° con respecto a los ejes principales de la fibra óptica.

1.4.4 Características de polarización en fibras ópticas láser.

El origen de las propiedades de polarización de fibras láser monomodales está relacionado con las características de birrefringencia en la fibra. Los dos estados de polarización que soporta el modo fundamental de la fibra son ortogonales. Las propiedades de polarización de la fibra láser, dependen también de la orientación del bombeo con respecto a los ejes de polarización de la fibra; es posible obtener un sólo modo de polarización, y de igual forma dos modos ortogonales a dos longitudes de onda

diferentes [5]. El primer estado de polarización que alcanzará el umbral es el que coincide con la polarización de bombeo mientras que el otro estado oscilará para niveles más altos de bombeo. El primer modo de polarización en alcanzar el umbral también tendrá la eficiencia más alta y en ausencia de pérdidas dependientes de la polarización ambos estados tienen la misma probabilidad de oscilar.

1.4.5 Generación de las frecuencias heterodinas de polarización.

El cambio en la birrefringencia de la fibra láser en respuesta a las perturbaciones externas se traduce directamente a un cambio en la frecuencia de abatimiento de los dos modos mutuamente ortogonales de polarización propia en la cavidad de la fibra láser.

La mezcla heterodina de señales ópticas involucra dos haces de luz (moduladora y oscilador local) que se mezclan en el fotodetector para generar una señal eléctrica. Como resultado, se tendrá la modulación de la fotocorriente del detector a una frecuencia igual a la diferencia de las frecuencias de las dos señales ópticas. En un sistema basado en fibras ópticas láser, las señales serán generadas por la propia fibra a consecuencia de la birrefringencia, tal como se mencionó anteriormente [3].

Cuando dos o más señales ópticas se presentan simultáneamente en la misma región del espacio, la respectiva función de onda total de cada una de estas dos señales ópticas es la suma de las funciones de onda individuales. Este principio básico de superposición es consistente con la linealidad en la ecuación de onda. Para ondas monocromáticas coherentes de la misma frecuencia, el principio de superposición también es aplicable a las amplitudes complejas y no se aplica para las intensidades ópticas. La intensidad de la superposición de dos o más ondas no es necesariamente la suma de sus intensidades. Esta diferencia se atribuye a la interferencia entre estas ondas. La interferencia depende de las relaciones entre las fases de las ondas que se superponen [4].

La dependencia de la intensidad de una onda policromática no coherente en el tiempo, se puede atribuir a la interferencia entre las componentes monocromáticas coherentes que constituyen la onda. La intensidad de la onda policromática no coherente se determina usando la ecuación de interferencia:

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos[2\pi(\nu_2 - \nu_1)t] \quad (1-10)$$

La intensidad, como se observa en la ecuación, varía sinusoidalmente a una frecuencia $|\nu_2 - \nu_1|$, que es conocida como *frecuencia de abatimiento*. Este efecto también es conocido como *luz de abatimiento o luz mezclada*. El abatimiento ocurre en la electrónica cuando la suma de dos señales sinusoidales se lleva a cabo en un dispositivo no lineal, llamado mezclador y produce señales sumando o restando las frecuencias. En la óptica, esto se observa al analizar la señal de los fotodetectores en el dominio de la frecuencia [3].

En un resonador óptico en configuración de anillo, cuyo funcionamiento será explicado en el siguiente capítulo, se obtienen dos tipos de señales en función de sus parámetros: las que son generadas en el resonador por los modos longitudinales, llamadas señales LMB (“Longitudinal Mode Beating”) y las que se generan al mezclar los dos modos ortogonales de polarización, llamadas señales PMB (Polarization Mode Beating). Las señales PMB se pueden obtener al hacer pasar dos modos de polarización ortogonales a través de un prisma de Glan-Thompson que los mezcla. Las señales PMB que se generan por este medio están en función de la diferencia de las frecuencias de las señales LMB involucradas.

Las señales heterodinas de polarización obtenidas con distintas configuraciones de resonador de anillo, son de utilidad para obtener información sobre la birrefringencia dentro del resonador óptico. El uso de las señales PMB en aplicaciones de sensado es muy simple: al afectar la birrefringencia de la fibra, la diferencia de frecuencias de polarización cambia y, por lo tanto, las frecuencias de las señales PMB cambiará de igual manera [4].

En los siguientes capítulos se presentará el arreglo experimental con el cual se trabajó, se mostrará la importancia de la obtención de las señales heterodinas de polarización y de los espectros ópticos para la caracterización del arreglo. En el capítulo 4 se presentan las características principales de las señales PMB obtenidas con distintas configuraciones de resonador de anillo, y se discute su aplicación para monitoreo de cambios en índice de refracción.

Capítulo 2.

Efectos birrefringentes en resonadores de anillo.

En este capítulo se explica el análisis de los efectos birrefringentes en resonadores en configuración de anillo. Se describe el primer arreglo experimental y los dispositivos que se utilizaron en el arreglo: sus características técnicas y su función. Posteriormente, se describen los experimentos realizados para estudiar la birrefringencia y características de polarización del haz láser obtenido con este tipo de resonador óptico.

2.1 Resonadores en anillo.

El desarrollo de sistemas láser basados en fibras se enfoca al uso de *resonadores de fibra óptica*, sobre todo por su tamaño compacto. Un *resonador óptico* es un dispositivo que almacena energía y confina luz a ciertas frecuencias de resonancia. Un *resonador de anillo* de fibra óptica se ilustra en la Figura 2.1, junto con el dispositivo equivalente en óptica de bulto [6]. Dos de los brazos de un acoplador se unen, como se ilustra, para formar una trayectoria en la cual la luz pueda propagarse.

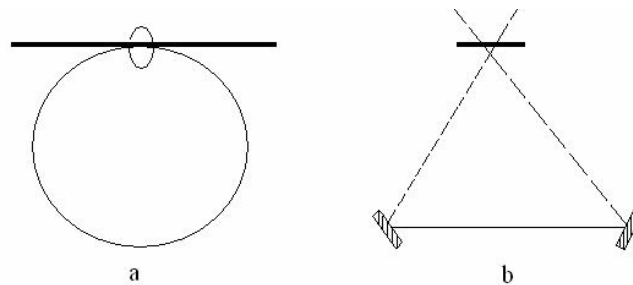


Figura 2.1 a) Resonador en anillo de fibra óptica. b) Dispositivo equivalente.

Los resonadores láser fabricados con fibras ópticas con propiedades birrefringentes, y en particular los que combinan fibras de baja y alta birrefringencia, permiten ajustar las características de polarización de manera controlada. Esto se logra

al poder ajustar la birrefringencia del resonador por medio de controladores de polarización colocados en la fibra de baja birrefringencia, mientras que la polarización generada con estos ajustes tiende a permanecer estable gracias a la fibra de alta birrefringencia. Este tipo de arreglo se conoce como resonador con birrefringencia híbrida [7].

2.2 Descripción de los resonadores en anillo con birrefringencia híbrida.

El propósito del primer arreglo experimental utilizado en este trabajo fue observar los efectos de realizar ajustes en la birrefringencia de un *resonador de anillo* mediante cambios en la posición de los controladores de polarización, y la combinación de fibras de alta y baja birrefringencia.

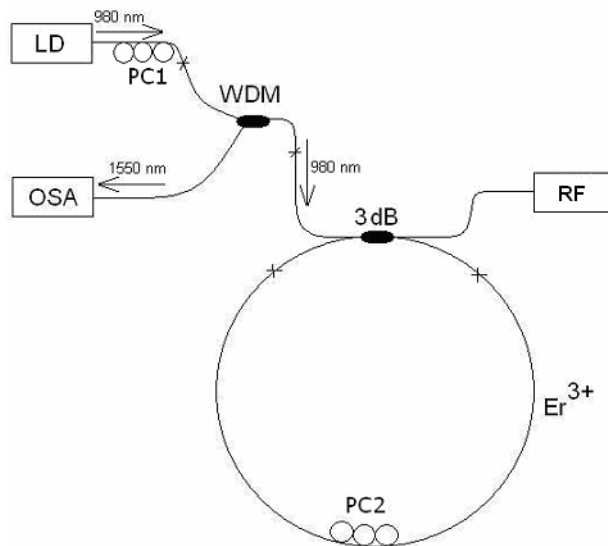


Figura 2.2 Arreglo experimental típico utilizado para estudiar efectos birrefringentes (RF: Etapa de detección de radiofrecuencia).

En la Figura 2.2 se muestra el arreglo experimental típico para observar estos efectos; se utiliza un diodo láser (LD) que proporciona la energía de bombeo a una longitud de onda de 980 [nm] y tiene como potencia máxima de salida 200 [mW]. La salida del diodo láser se empalmó a un multiplexor por longitud de onda (WDM); éste tiene 3 brazos: un brazo por el cual entra la energía de bombeo a la longitud de onda del diodo láser, otro para transmitir el bombeo hacia la fibra láser a través de un acoplador

óptico de 3 [dB] y el tercer brazo para transmitir la emisión de la fibra láser a un dispositivo de análisis. La fibra dopada con erbio (3 [m] de longitud) se empalmó a dos brazos del acoplador óptico de 3 [dB] para formar el anillo (longitud total de 5 [m]). La fibra láser se bombea a través del WDM y la emisión se registra en un analizador de espectros ópticos (OSA) a través del mismo WDM, como se muestra en la Figura 2.2. Los efectos de los ajustes en la polarización dentro del anillo se observaron en el OSA al ajustar un controlador de polarización (PC2) colocado dentro del anillo.

La etapa de detección de radiofrecuencia está formada por varios dispositivos ópticos; en el capítulo 4 se explicará a detalle la importancia de esta etapa y los dispositivos que la forman.

2.2.1 Dispositivos utilizados en los arreglos experimentales.

Los componentes de fibra óptica y dispositivos empleados en estos experimentos se detallan a continuación junto con algunas de sus características técnicas más relevantes. Algunos de estos componentes han sido mencionados en el capítulo anterior, y ahora solo se mencionará su utilidad y funciones principales.

Controlador de diodo láser.

El controlador de diodo láser (Figura 2.3), tiene como funciones principales controlar la temperatura del diodo láser y mantener estable la corriente de inyección suministrada al láser semiconductor. La temperatura a la que se opera es a 25 [°C] y se programó para tener como un máximo de corriente a la salida de 200 [mA] para protección del diodo láser.



Figura 2.3 Controlador del diodo láser.

Diodo láser (LD).

El diodo láser contiene en sus especificaciones una curva de calibración por medio de la cual se pueden obtener las potencias de bombeo disponibles a la salida de la fibra óptica a la cual está acoplado el diodo láser. Esto es de utilidad para determinar las curvas de eficiencia de la fibra láser, con la que se puede determinar el umbral del sistema. El diodo (Figura 2.4) se coloca en una montura (Figura 2.5), que va conectada al controlador. Estos elementos constituyen la etapa de bombeo del sistema láser.

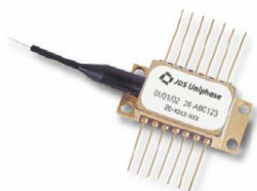


Figura 2.4 Diodo láser.



Figura 2.5 Montura del diodo láser.

WDM 980/1550 [nm].

Este dispositivo consta de tres brazos de fibra óptica: con dos de ellos se puede bombear la fibra láser que forma el anillo y el otro permite registrar la emisión de la fibra láser (Figura 2.6). El WDM está diseñado para transmitir luz a diferentes longitudes de onda, uno de los brazos para un rango de 960-1000 [nm] λ_1 (entrada para bombear con un LD a 980 [nm]), y los restantes para un rango de 1530-1580 [nm] λ_2 , se encuentra comprendido entre los rangos de emisión de la fibra láser. Las pérdidas típicas son del orden de los 0.4 [dB] para λ_1 y 0.6 [dB] para λ_2 .

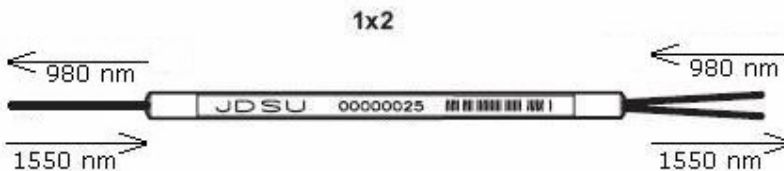


Figura 2.6 Multiplexor por longitud de onda (WDM).

Acoplador óptico de 3 [dB].

El acoplador utilizado es de 3 [dB] y, según sus especificaciones técnicas, el 50% de la luz que entra se acopla a cada una de las fibras de salida para un rango espectral que va de los 1520 a los 1570 [nm] (Figura 2.7). Este dispositivo consta de 4 brazos de fibra óptica monomodal, dos de ellos se utilizan para formar el anillo mientras que el otro brazo de entrada se usa para bombear la fibra láser (a través del WDM) que se encuentra contenida dentro del anillo. El brazo de salida se utiliza para ser conectado al analizador de radiofrecuencia (RFA).



Figura 2.7 Acoplador óptico de 3 [dB].

Controladores de polarización.

En estos experimentos se utilizaron dos controladores de polarización, que permiten cambiar el estado polarización de luz que se propaga a través de la fibra láser (PC1 y PC2) (Figura 2.8). El principio de funcionamiento de estos dispositivos se describió en el capítulo anterior.



Figura 2.8 Controlador de polarización.

Analizador de espectros óptico.

El analizador de espectros óptico (OSA del inglés “*optical spectrum analyzer*”) utilizado en los arreglos experimentales se muestra en la Figura 2.9. Con este dispositivo se monitorea y registra la emisión de la fibra láser en longitud de onda y potencia de emisión. Tiene una entrada especial para fibra óptica y una unidad para discos de 3 ½ para almacenar imágenes y datos de la emisión láser. La resolución máxima que proporciona este equipo es de 0.06 [nm], y la mayoría de los espectros reportados en este trabajo fueron adquiridos con una resolución de 0.1 [nm].

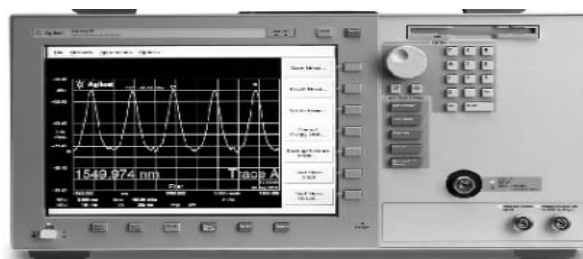


Figura 2.9. Analizador de espectros óptico.

2.3 Experimentos con resonadores en anillo con birrefringencia híbrida.

Una de las etapas críticas es el empalme de las fibras ópticas en el arreglo experimental, ya que las pérdidas que existan en los empalmes afectarán la eficiencia de la cavidad láser. Si los empalmes no son adecuados, no es posible ver la emisión de la fibra láser (Figura 2.10) y por lo tanto habrá demasiadas pérdidas dentro de la cavidad.

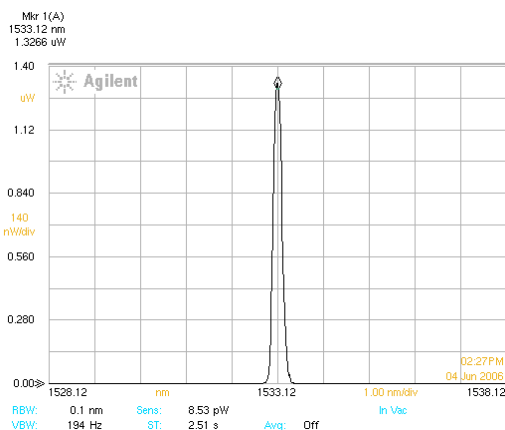


Figura 2.10 Emisión láser obtenida a una sola longitud de onda.

Para encontrar la emisión láser, es importante también suministrar una corriente de bombeo lo suficientemente alta como para que se puedan superar las pérdidas que pudieran haber en el resonador a causa de los empalmes y que comience la condición de oscilación. Es importante el ajuste del controlador de polarización PC1, ya que éste permite controlar el bombeo hacia la fibra láser.

Una vez establecida la oscilación láser, por medio de ajustes en el controlador de polarización PC2 que se encuentra ubicado dentro del anillo, es posible obtener varias emisiones láser oscilando a distintas longitudes de onda de manera controlada. Los efectos de los ajustes en la polarización dentro del anillo se observaron en el OSA. Haciendo ajustes en el nivel de corriente mediante el controlador del diodo láser, se determinaron también las potencias de la emisión láser en el OSA, esto para obtener el umbral de corriente del arreglo experimental, tal y como se muestra en la Figura 2.11.

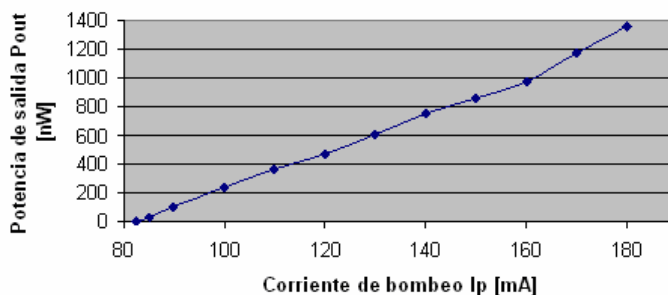


Figura 2.11 Obtención del umbral de corriente para una sola longitud de onda.

Podemos observar que el comportamiento de la potencia de la emisión de la fibra láser tiende a ser lineal, y por lo tanto se traza una recta con los puntos obtenidos, el ajuste de esta recta es:

$$P_{out} = 13.28I_p - 1100.1 \quad (2.3.1)$$

El umbral de corriente puede ser determinado a partir de la ecuación de la recta que se obtuvo como tendencia de todos los datos que se tomaron, y puede obtenerse de la siguiente manera:

$$I_{umbral} [mA] = 1100.1/13.28 = 82.80 [mA] \quad (2.3.2)$$

CAPÍTULO 2 Efectos birrefringentes en resonadores de anillo.

Como puede observarse, la emisión láser no inicia en el origen. Esto es característico de todo sistema láser debido a que para que se den las condiciones de oscilación, la ganancia dentro del resonador debe ser mayor a las pérdidas. En este caso, el umbral es a una corriente de bombeo de 82.80 [mA]. Las pérdidas se deben a los empalmes, a las reflexiones generadas por los dispositivos utilizados, y al acoplador de 3 [dB] (Figura 1.7).

Como ya se mencionó anteriormente, mediante ajustes en el controlador de polarización (PC2) que se encuentra dentro del anillo, se generan cambios en el espectro de emisión de la fibra. Este tipo de comportamiento es el que ha sido reportado previamente por varios autores [8, 9], y fundamentalmente se caracteriza por la posibilidad de ajustar un determinado número de longitudes de onda que oscilan en el resonador mediante el controlador de polarización (Figura 2.12).

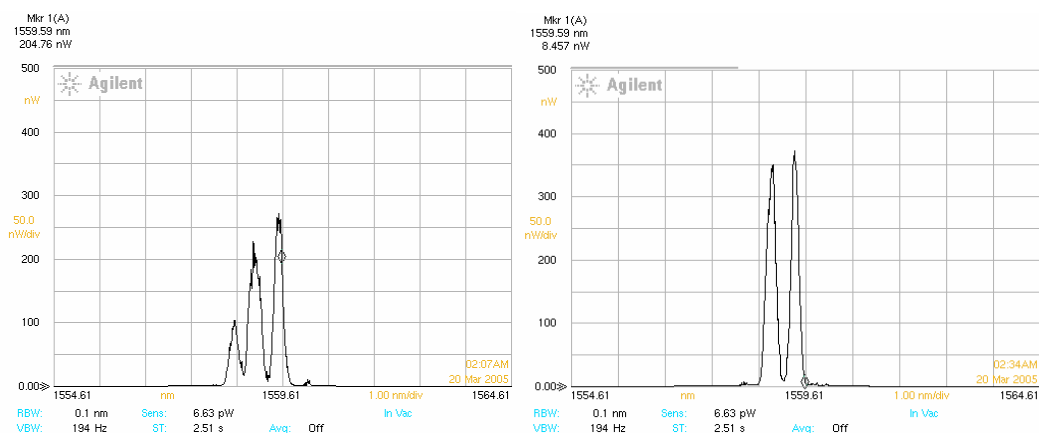


Figura 2.12 Espectros obtenidos con la fibra láser en configuración de anillo. El número de longitudes de onda puede ajustarse con el controlador de polarización PC2.

De la figura anterior podemos notar que es posible obtener hasta tres longitudes de onda oscilando de manera simultánea. El problema principal de este tipo de arreglo es que el espectro no es estable. Estas inestabilidades se deben tanto al medio activo como a las fluctuaciones en la birrefringencia de la fibra dentro del anillo; adicionalmente, el acoplador también contribuye a este comportamiento, ya que el coeficiente de acoplamiento de 3 [dB] es constante para un rango espectral que va desde los 1520 hasta los 1570 [nm], de acuerdo con las especificaciones del fabricante mencionadas con anterioridad.

Con el objeto de lograr una mayor estabilidad de las emisiones láser en el resonador en anillo, se aumentó la birrefringencia en la cavidad óptica. Las fibras que se utilizan para mantener la polarización (PM por sus siglas en inglés “polarization maintaining”), son usadas extensamente en sensores de fibra óptica y otras aplicaciones donde se requiere una polarización deseada y estable. Una fibra PM es una fibra de birrefringencia alta, con ejes lentos y rápidos predeterminados (Figura 1.19). Si la polarización de entrada es alineada con uno de los ejes, continuará sin cambiar después de propagarse a lo largo de la fibra. Conectar dos fibras PM es una difícil tarea que implica alineación exacta de los ejes de la fibra, mientras se mantiene baja pérdida en la conexión. El diseño más comercial y común en este tipo de fibra Hi-Bi es el tipo PANDA. Este diseño difiere en el perfil transversal del índice de refracción debido a la presencia de tensión aplicada por elementos insertados en el revestimiento de la fibra óptica.

Para observar los efectos de la birrefringencia en las características espectrales de la fibra láser, se realizaron dos series de experimentos: una sin utilizar fibra de birrefringencia alta (Hi-Bi por sus siglas en inglés “High Birefringence”) y otro más agregando un tramo de esta fibra en el resonador (Figura 2.13).

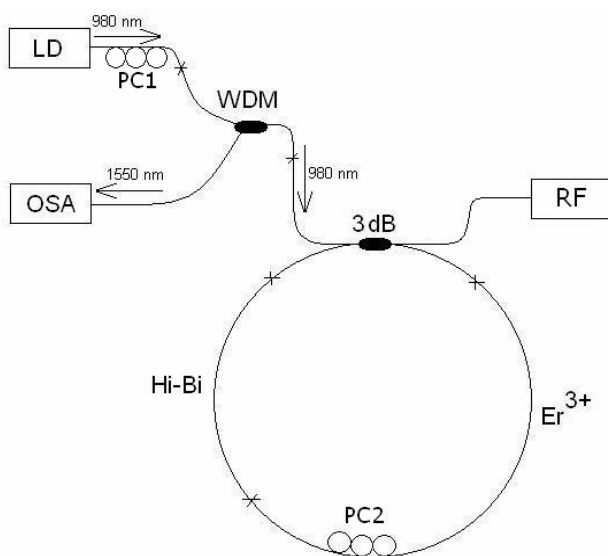


Figura 2.13 Arreglo experimental utilizado para estudiar efectos birrefringentes. La caracterización del arreglo se lleva a cabo con un tramo de fibra de Hi-Bi.

Esencialmente, se añadieron al anillo 2.5 [m] de fibra de alta birrefringencia (Hi-Bi, tipo PANDA), y el controlador de polarización PC2 se colocó en la región cercana al empalme entre la fibra de erbio y la fibra Hi-Bi. En la Figura 2.14 se muestra uno de los espectros obtenidos con este arreglo; es evidente el cambio de longitud de onda de emisión debido al incremento en la longitud del anillo. Al igual que en el caso anterior, fue posible obtener hasta tres longitudes de onda oscilando de manera simultánea mediante ajustes en el controlador de polarización PC2. Sin embargo, en este caso, las características espectrales resultaron más estables debido a que las longitudes de onda están mejor definidas, y únicamente después de algunos minutos de operación continua se observaron cambios significativos en el espectro. El incremento en estabilidad se genera gracias a la inclusión de la fibra de alta birrefringencia en la cavidad.

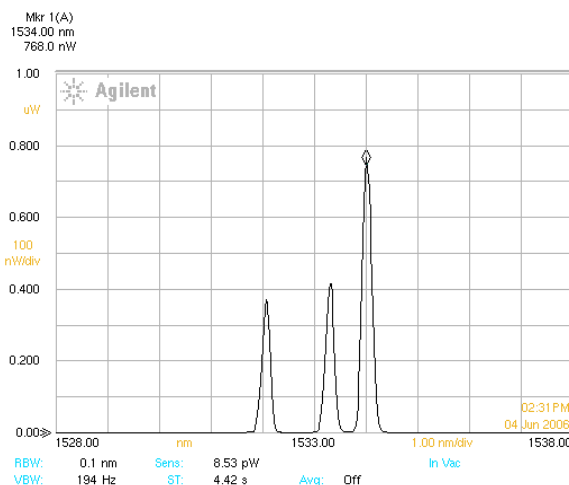


Figura 2.14 Espectro obtenido con la fibra láser en configuración de anillo agregando un tramo de fibra Hi-Bi. El número de longitudes de onda puede ajustarse con el controlador de polarización PC2.

A primera vista, los resultados indican que la inclusión de un tramo de fibra Hi-Bi dentro del anillo efectivamente ayuda a la estabilidad de la emisión de la fibra láser. Intuitivamente, y de acuerdo con reportes previos [9], puede esperarse que un incremento en la longitud de la fibra Hi-Bi aumente el número de longitudes de onda que oscilan en este arreglo. Sin embargo, al aumentar la longitud de este tipo de fibra, nunca se observaron más de tres longitudes de onda, lo cual puede deberse a que la anisotropía de ganancia no permite generar los efectos necesarios para la oscilación de más de tres longitudes de onda.

CAPÍTULO 2 Efectos birrefringentes en resonadores de anillo.

Los resultados obtenidos muestran que la birrefringencia del resonador tiene una influencia directa en las características espectrales de la fibra láser. Otros efectos importantes de la birrefringencia pueden observarse en las frecuencias heterodinas de polarización. Dado que estas frecuencias son muy útiles para diversas aplicaciones, los efectos birrefringentes en el espectro de radiofrecuencia de la fibra láser serán analizados en el capítulo 4.

En el siguiente capítulo se explicarán los modos de operación bidireccional y unidireccional de este tipo de resonador óptico, los dispositivos ópticos que se utilizan para el estudio de los modos de operación y los efectos que se producen al trabajar con ambos tipos de operaciones.

Capítulo 3.

Operación unidireccional y bidireccional.

Un aspecto importante en el funcionamiento de un resonador de anillo es la forma en la que se transmite el haz de luz a través del anillo; es decir, si la luz viaja dentro del anillo en dos direcciones o sólo en una dirección (modo de operación). Existen dos modos de operación básicamente: *modo bidireccional* y *unidireccional*; en la *operación bidireccional*, el haz de luz se transmite a través del anillo en dirección de las manecillas del reloj y en dirección contraria. Entre otros efectos, en el modo de operación bidireccional la competición entre los modos de polarización se produce con mayor fuerza debido a la interferencia existente entre la emisión en ambas direcciones [1]. En la *operación unidireccional* la transmisión del haz de luz es en una sola dirección. Un método eficaz para lograr este modo de operación en fibras ópticas es la inserción de un aislador óptico (se explicará su funcionamiento más adelante) dentro del anillo. Debido al alto grado de aislamiento que ofrece este dispositivo y a las bajas pérdidas por inserción, se considera como el mejor método para transmitir un haz de luz en una sola dirección dentro de la cavidad.

La de fibra de erbio ofrece un amplio rango de sintonización debido a su ancho de banda espectral, por lo que es posible la inserción de un elemento sintonizable dentro de la cavidad (FFP TF) con el propósito de sintonizar la emisión láser. Se han obtenido rangos de sintonización cercanos a los 50 [nm] con arreglos similares al que se estudiará en este capítulo, formados básicamente por fibra de erbio, controladores de polarización, aisladores ópticos y FFP TF's. Otra característica importante de los láseres unidireccionales es que puede obtenerse emisión a una sola frecuencia de resonancia con un ancho de línea angosto del orden de [kHz] [1].

3.1 Arreglo experimental unidireccional.

En general, la operación unidireccional genera propiedades espectrales más estables, ya que la competencia por ganancia entre modos es menor [1]. Como se

mencionó anteriormente, la operación unidireccional se logra utilizando un aislador (ISO del inglés “isolator”) dentro del anillo, la función de este dispositivo es permitir el paso del haz únicamente en una dirección.

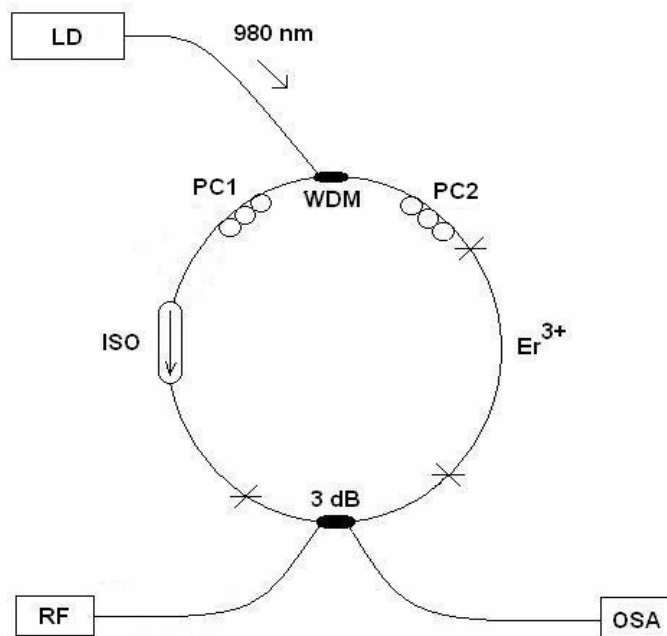


Figura 3.1 Resonador en anillo en modo unidireccional.

El arreglo experimental utilizado para estudiar los efectos del modo de operación en las características de polarización se describe como sigue: la fibra dopada con erbio (3 [m] de longitud) se empalmó a un brazo del WDM y a su vez a un brazo de un acoplador de 3 [dB] para formar parte del anillo, la entrada del ISO se empalmó con el otro brazo del WDM y la salida se unió a otro brazo del acoplador óptico (longitud total del anillo de 10 [m]). La fibra láser se bombea a través de un WDM con un LD y la emisión se registra en el OSA a través de un brazo del acoplador como se muestra en la Figura 3.1. Los efectos de los ajustes en la polarización dentro del anillo se observaron en el OSA al modificar la posición de los controladores de polarización (PC1 y PC2). Como puede verse en la figura, se utilizó una configuración similar a la empleada en los experimentos anteriores.

3.1.1 Dispositivos utilizados en el arreglo.

Aislador Óptico (ISO).

El aislador óptico es un dispositivo pasivo que permite transmitir la luz en sólo una dirección (Figura 3.2). Es usado comúnmente para impedir la reflexión de la luz al pasar a través de él. Generalmente el ISO está diseñado para ser acoplado sin la necesidad de colocar conectores extras, es decir, este dispositivo cuenta con conectores propios para integrarse al sistema en cual el se utilizará.

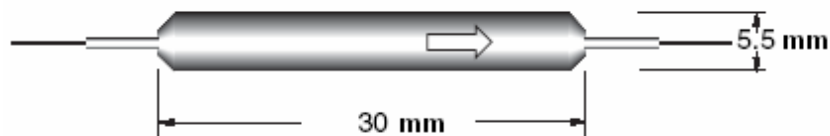


Figura 3.2 Aislador Óptico.

Filtro Fabry Perot Sintonizable (FFP TF).

El FFP TF es un dispositivo basado en una cavidad Fabry Perot (FP) que permite filtrar y sintonizar la longitud de onda que se transmite a través de él (Figura 3.3). La función de un FFP TF es realizar una selección dinámica de la transmisión de una longitud de onda por medio de un mecanismo de control. Este tipo de dispositivo es muy utilizado debido a su mínima dependencia a la polarización.



Figura 3.3 FFP TF.

La longitud de onda central para la cual está diseñado el filtro, está determinada por la longitud de la cavidad FP, es decir, la longitud de onda de selección puede ser modificada fácilmente, cambiando la longitud de la cavidad resonante. Esta longitud es controlada por medio de un actuador piezoeléctrico, y a través de éste se producen cambios de la longitud de la cavidad resonante al aplicar voltaje. Para el arreglo utilizado, este filtro es útil para sintonizar la longitud de onda de emisión de la fibra láser.

3.2 Caracterización del arreglo experimental.

El propósito del segundo arreglo experimental utilizado en este trabajo fue observar los efectos del modo de operación en las características de polarización del anillo, mediante la inserción de un aislador óptico y un elemento sintonizable (se explicará más adelante). Para la operación bidireccional, al igual que en el primer arreglo (Capítulo 2), se realizaron ajustes en la birrefringencia del anillo mediante la inserción de fibra de alta y baja birrefringencia, pero con este arreglo el aumento de la birrefringencia no produjo efectos espectrales favorables, ya que se obtuvo emisión a longitudes de onda múltiples y señales heterodinas inestables. Esto puede deberse a fluctuaciones en la ganancia ocasionadas por la pérdida de energía dentro del anillo (acoplador), las cuales permiten emisión en varios modos y por lo tanto se presenta competencia modal.

El modo de operación unidireccional presentó las mismas características de polarización cuando el haz de luz se transmitió en dirección de las manecillas del reloj y en dirección contraria, por lo que no se encontraron diferencias en los espectros ópticos ni tampoco en los espectros de radiofrecuencia (éstos se analizarán en el siguiente capítulo). El espectro óptico típico registrado en el OSA presentó hasta dos longitudes de onda, las emisiones se registraron en 1559.72 y 1560.61 [nm]. Todos los espectros obtenidos se midieron a una resolución de 0.1 [nm]. El espectro es además estable y con un ancho a la mitad del máximo de 0.3 [nm]. (Figura 3.3). La emisión a longitudes de onda múltiples puede tener diversas aplicaciones, como por ejemplo, para fuentes de luz para sistemas de comunicación multiplexados [1].

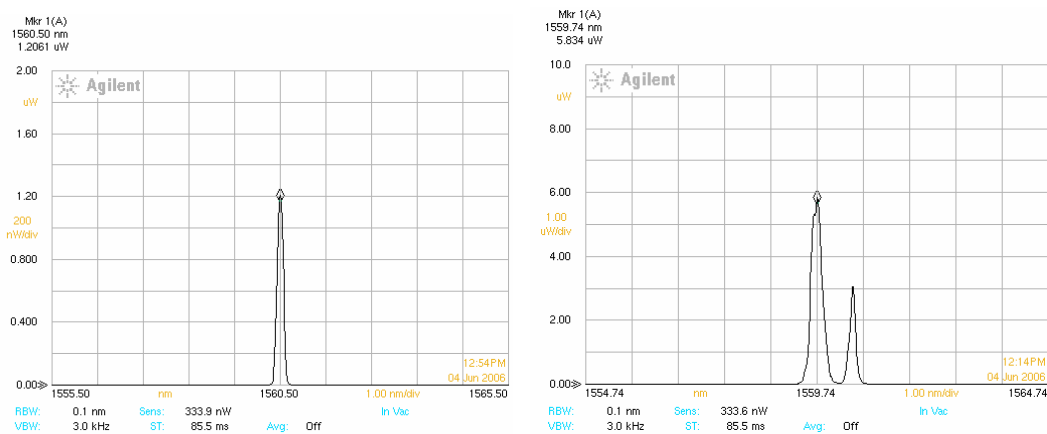


Figura 3.3. Espectros ópticos típicos (operación unidireccional).

Como ya fue mencionado anteriormente, la cavidad soporta dos modos ortogonales de polarización, éstos se comportan como dos canales de emisión con parámetros específicos como frecuencias, umbrales y eficiencia. Por medio de los controladores de polarización es posible caracterizar cada modo de polarización. Así es posible encontrar las emisiones láser de los modos ortogonales de polarización y conocer sus umbrales de corriente. El umbral de corriente es útil para determinar la corriente mínima de bombeo en la cual se da emisión láser, es decir cuando la ganancia dentro del resonador es mayor a las pérdidas.

De acuerdo con reportes anteriores [4], el primer modo de polarización que alcanza el umbral es el que coincide con la polarización de bombeo, mientras que el otro estado oscilará para niveles más altos de bombeo. La metodología para ajustar el funcionamiento de cada modo de polarización es la siguiente: se coloca a una de las salidas del arreglo (Figura 3.1), un colimador sobre una montura metálica seguido de un polarizador y una fibra multimodal, estos dispositivos son alineados manualmente con las perillas de ajuste de las monturas metálicas. El haz de luz se transmite a través del colimador, prisma de Glan-Thompson (el funcionamiento de ambos se explicará en el siguiente capítulo) y a su vez por una fibra multimodal (necesaria para transmitir la emisión hacia el OSA); una vez establecida la emisión, se ajustan los controladores de polarización de manera que se obtenga la mayor potencia en la emisión. Posteriormente se registra el espectro óptico de emisión para una polarización, después se gira el polarizador 90° y se observa que la emisión se mantenga, si efectivamente es así, entonces la emisión láser contiene dos modos de polarización ortogonales. Ésta fue la forma con la cual se comprobó que la cavidad dentro del arreglo contenía dos modos de

polarización ortogonales. El proceso requiere de una variación metódica de la corriente suministrada al diodo láser para cada uno de los modos de polarización ortogonales (Figura 3.4).

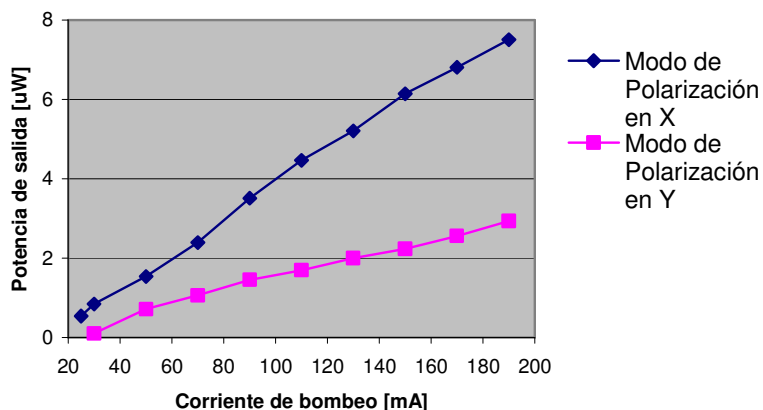


Figura 3.4 Curvas características de los modos de polarización.

Como puede verse en la Figura 3.4, la polarización asignada arbitrariamente a la orientación X es la primera en emitir. Los umbrales para cada polarización pueden estimarse de las ecuaciones de la recta. En este caso, el umbral de la polarización X es a una corriente de bombeo de 25 [mA], mientras que para la polarización Y es de 30 [mA].

3.2.1 Sintonización del arreglo experimental.

Parte importante de la caracterización del arreglo fue estudiar los efectos del modo de operación en la sintonización de la emisión láser. Para esto se incluyó un FFP TF, en el arreglo como se muestra en la Figura 3.5.

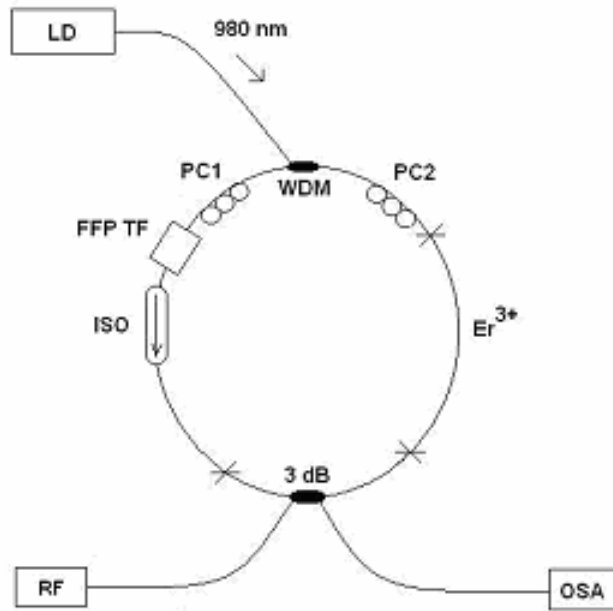


Figura 3.5 Resonador en anillo unidireccional, el FFP TF permite ajustar la longitud de onda de emisión láser.

Los controladores de polarización fueron fijados a una posición para la cual el espectro óptico presentara mejores características espectrales (longitudes de onda bien definidas y estables). La sintonización fue realizada mediante la variación metódica del voltaje de corriente directa que suministra el controlador al FFP TF. El rango de sintonización registrado fue de 45 [nm] (Figura 3.6).

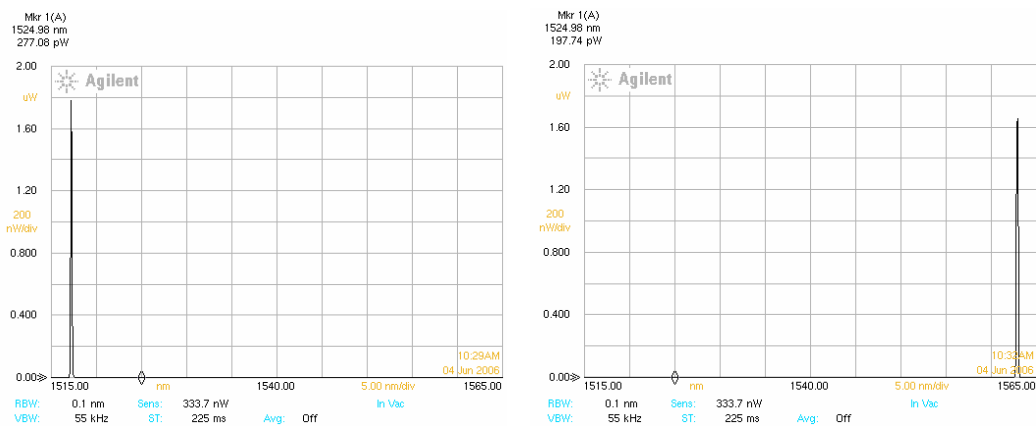


Figura 3.6 Rango de sintonización (1517-1562 nm).

El rango de sintonización es muy cercano al reportado anteriormente (50 [nm]) pero con características espectrales diferentes [1]. La inserción del FFP TF permitió reducir el ancho de línea de la emisión a la mitad (Figura 3.7). También permite emisión láser a una sola longitud de onda dentro del rango de sintonización. Una aplicación de los sistemas láser con este tipo de características es como fuentes de luz para espectroscopia, con la característica de un ancho de línea del orden de [kHz] [1].

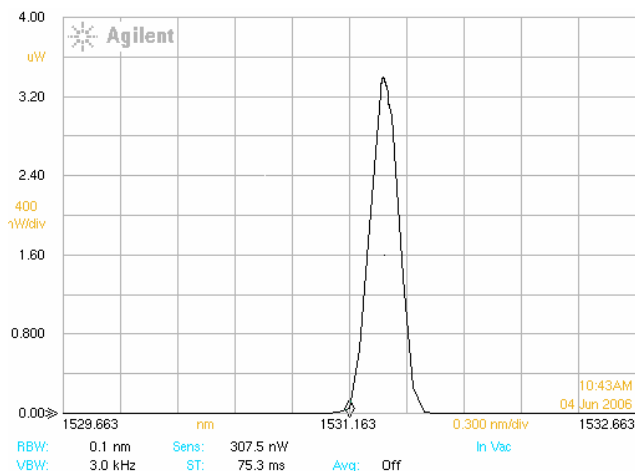


Figura 3.7 Espectro óptico (con un ancho a la mitad del máximo de 0.15 [nm]).

3.3 Arreglo experimental bidireccional.

En el capítulo anterior se caracterizó un arreglo en modo de operación bidireccional, presentándose emisiones múltiples principalmente. A continuación se analizarán las características espectrales de la operación bidireccional con el arreglo sintonizable (Figura 3.8).

La operación bidireccional permite que el haz de luz viaje a través del anillo en ambas direcciones, generando características espectrales diferentes a las de la operación unidireccional, ya que no se limita el número de longitudes de onda que pueden amplificarse en el arreglo.

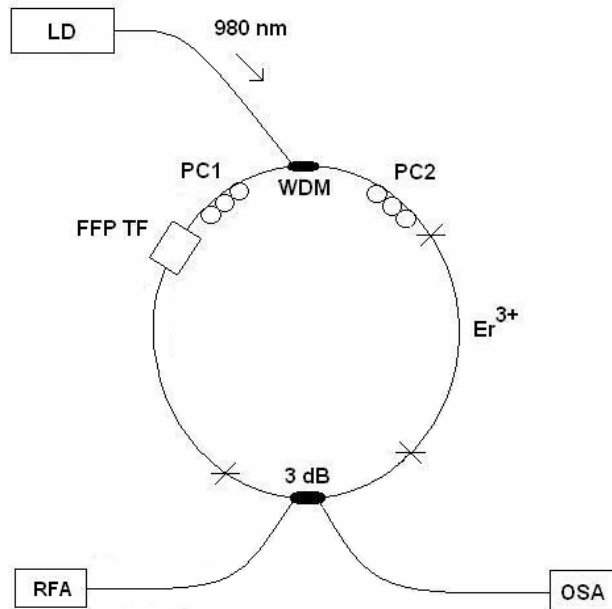


Figura 3.8 Resonador en anillo en modo bidireccional (inserción de un FFP TF).

El FFP TF fue colocado en el interior del anillo con el objetivo de sintonizar la longitud de onda de emisión láser. El arreglo permite obtener emisión estable (en amplitud y longitud de onda) dentro de un rango de sintonización de 1558.3-1562.3 [nm] y emisión a longitudes de onda múltiples fuera de ese rango (dentro del ancho de banda del erbio) debido a que existe la suficiente ganancia para obtener emisión en la zona de ganancia (Figura 3.9).

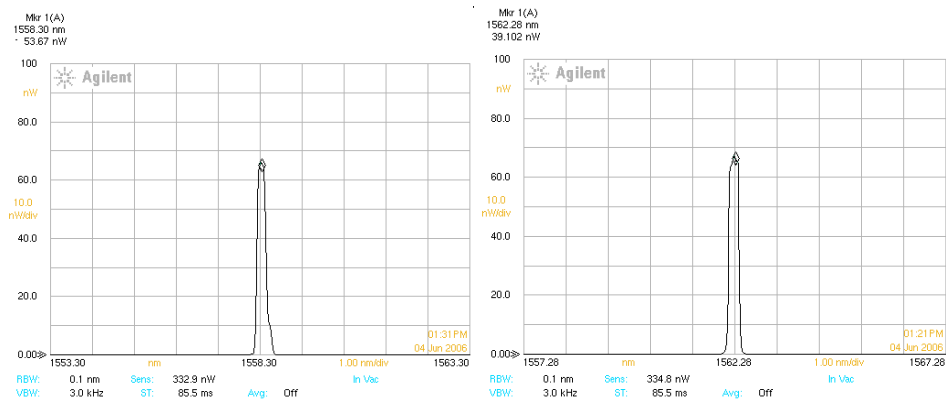


Figura 3.9 Espectro dentro del rango de sintonización óptimo (4 [nm]).

La inclusión del filtro FFP-TF permite adecuar la ganancia de la fibra de tal manera que, además de las longitudes de onda que pueden amplificarse con las longitudes de fibra utilizadas, es posible también amplificar la longitud de onda

CAPÍTULO 3 Operación unidireccional y bidireccional.

seleccionada con el filtro. Fuera del rango de sintonización, se presenta emisión a longitudes de onda múltiples (no bien definidas e inestables en amplitud y longitud de onda), como se muestra en la Figura 3.10.

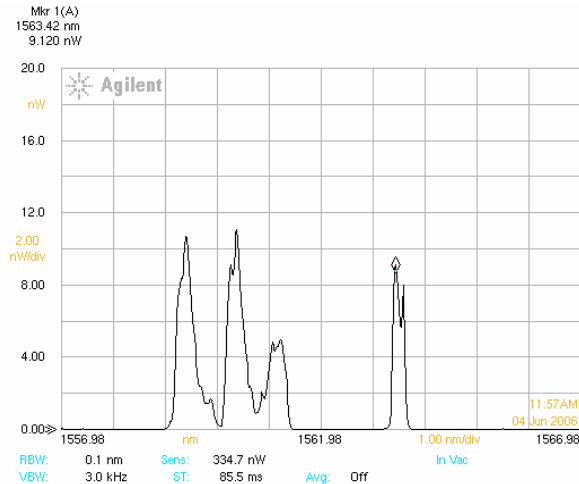


Figura 3.10 Espectro óptico fuera del rango de sintonización (emisiones múltiples inestables).

Evidentemente, el rango de operación adecuado para este arreglo se limita a la región de ganancia máxima determinada por la longitud de fibra activa. El modo de operación unidireccional permite obtener características espectrales mucho mejor definidas que las logradas en modo bidireccional. En este último caso, el ancho de la emisión láser se mantiene en 0.3 [nm] y en modo unidireccional se reduce a la mitad (0.15 [nm]) al incluir el FFP TF dentro de la cavidad resonante (Figura 3.11).

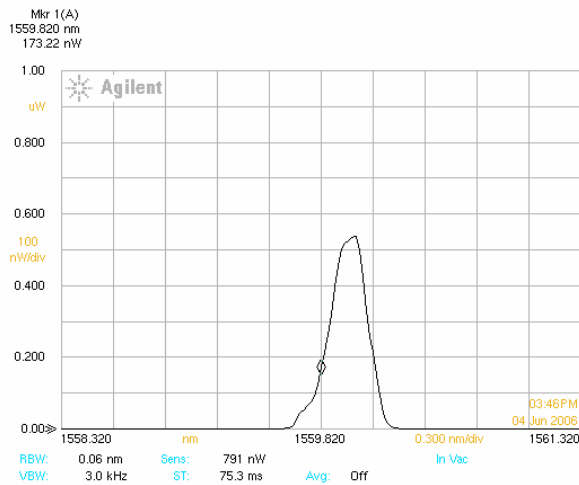


Figura 3.11 Emisión láser dentro del rango de sintonización óptico (ancho de la emisión láser de 0.3 [nm])

CAPÍTULO 3 Operación unidireccional y bidireccional.

Las diferencias espectrales principales entre los modos de operación bidireccional y unidireccional se muestran en la siguiente tabla:

Modo de operación unidireccional. Modo de operación bidireccional.		
Emisión con fibra de baja birrefringencia.	Una longitud de onda.	Una y múltiples longitudes de onda.
Ancho de línea	0.15 [nm]	0.3 [nm]
Rango de sintonización	45 [nm]	4 [nm]
Emisión con birrefringencia híbrida.	Múltiples longitudes de onda inestables.	Múltiples longitudes onda estables.
Ancho de línea	Variable	0.25 [nm]

En el siguiente capítulo se presentará el estudio de las señales heterodinas: definición y comportamiento de éstas en los dos modos de operación, así como la variación de las longitudes de onda con respecto a las señales heterodinas de polarización.

Capítulo 4.

Señales heterodinas de polarización.

Las señales heterodinas de polarización se han utilizado en los últimos años como una manera alternativa y simple para decodificar información de sensores polarimétricos de fibra óptica [10]. Estas señales se obtienen mediante la mezcla electrónica de las *frecuencias de oscilación* de las dos polarizaciones ortogonales que de manera natural se generan en los resonadores de fibra óptica láser. Dado que las fibras son inherentemente birrefringentes, las frecuencias de oscilación de cada polarización tienen una diferencia proporcional a la birrefringencia del resonador. De esta manera, cualquier cambio en birrefringencia se puede detectar monitoreando la diferencia de frecuencias. Adicionalmente, estas señales proporcionan también información sobre la longitud de onda de emisión de las fibras, ya que los efectos dispersivos en la fibra óptica varían de manera diferente para cada polarización debidos también a la birrefringencia [11]. De esta manera, es posible obtener información relevante sobre la birrefringencia de los resonadores de fibra óptica mediante el análisis de estas señales.

4.1 Frecuencias de resonancia.

Como se explicó en el primer capítulo, se obtuvieron dos tipos de señales en función de los parámetros del resonador en anillo: las que son generadas en el detector por los modos longitudinales (LMB) y las que se pueden generar al mezclar los dos modos de polarización (PMB). Las frecuencias de las señales LMB son múltiplos de una frecuencia dada por la ecuación siguiente:

$$f = \frac{mc}{nL} \quad (4-1)$$

donde:

CAPÍTULO 4 Señales heterodinas de polarización.

n es el índice efectivo de refracción del núcleo de la fibra, L es la longitud de la cavidad, c es la velocidad de la luz y m es un número entero positivo. El origen de las señales PMB y la manera en que se obtienen, se muestra en la Figura 4.1. Las señales PMB que se generan por este medio están en función de la diferencia de las frecuencias de las señales LMB involucradas.

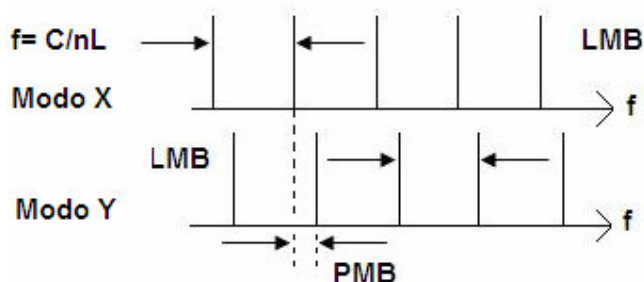


Figura 4.1 Señales LMB y PMB. L es la longitud del resonador y n es el índice de refracción de cada eje birrefringente.

En los arreglos experimentales se cuenta con dos controladores de polarización (PC1 y PC2). En el primero, PC1 se usó para controlar la polarización del bombeo del diodo láser y PC2 para ajustar la polarización de la fibra de baja birrefringencia. En el segundo arreglo experimental, ambos controladores fueron usados para ajustar la polarización de la fibra de baja birrefringencia dentro de la cavidad; es decir, permiten ajustar las diferencias de frecuencia de las señales PMB. Para observar dichas señales fue necesario colocar: un colimador, un filtro paso altas, un polarizador, una lente y un foto-detector óptico de alta velocidad a la salida del brazo del acoplador óptico (como se muestra en las Figuras 2.2 y 3.1, bloque RF). Todos estos dispositivos se utilizaron para hacer el análisis de detección de radiofrecuencia (RF), y en el siguiente apartado será explicada la utilización y función de cada uno de estos elementos. Cabe mencionar que es de vital importancia la alineación de la etapa de detección de RF. El proceso de alineación se realizó manualmente, auxiliándose de las perillas de ajuste encontradas en las monturas mecánicas que fueron usadas para sostener cada elemento de la etapa de detección de RF, y adicionalmente se usó un visor de luz a la longitud de onda del infrarrojo, con el cual es posible ver la emisión del LD, y facilitar así el procedimiento de alineación del haz de luz. En la Figura 4.2, se muestra la forma en la que fueron colocados cada uno de los dispositivos que conforman la etapa de detección de RF.

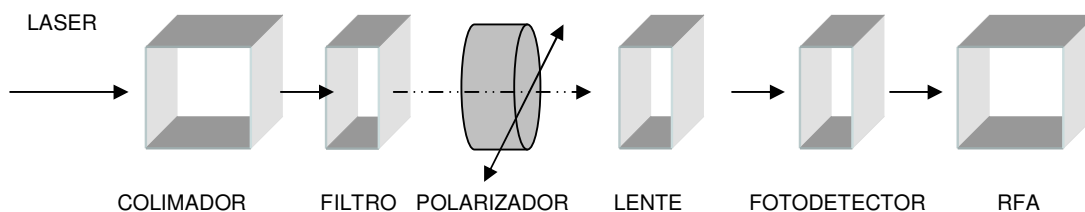


Figura 4.2 Etapa de detección de RF.

4.1.1 Dispositivos utilizados en la etapa de RF.

Los dispositivos que se utilizaron en la etapa de radiofrecuencia se detallan a continuación.

Colimador.

El colimador es un dispositivo óptico en el que a partir de un haz de luz divergente, se obtiene un haz paralelo (Figura 4.3). Consiste en una lente objetivo bien ajustada con un retículo en su plano focal. Es utilizado para alinear el haz láser que se propaga en el aire con otro dispositivo (Figura 4.4).

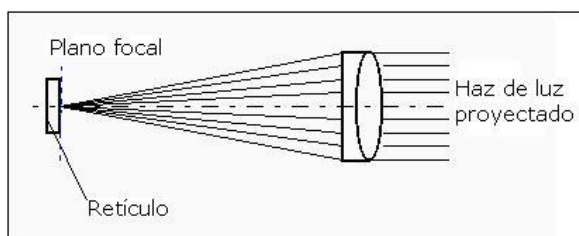


Figura 4.3. Principio de operación del colimador.



Figura 4.4. Colimador.

Filtro paso altas.

Este dispositivo permite reflejar longitudes de onda (de un haz de luz), menores a 1250 [nm], y transmitir longitudes de onda mayores; es decir, atenúa longitudes de

CAPÍTULO 4 Señales heterodinas de polarización.

onda que son menores a 1250 [nm] (Figura 4.5). Es muy útil en el proceso de detección de radiofrecuencia, ya que refleja la longitud de onda del bombeo residual que se transmite a través de la fibra óptica. Alcanza la máxima transmisión (90%) en la región de paso y en la región de rechazo (0.01%).



Figura 4.5. Comportamiento del Filtro paso altas.



Figura 4.6. Filtro.

Polarizador (Glan-Thompson).

Este polarizador divide el haz de luz en dos componentes ortogonales de polarización y es útil para obtener las frecuencias heterodinas de polarización (PMB) porque mezcla los dos modos de polarización ortogonales del haz de luz (Figura 4.7). Trabaja en un rango de longitudes de onda comprendido entre 350 [nm] y 2300 [nm].

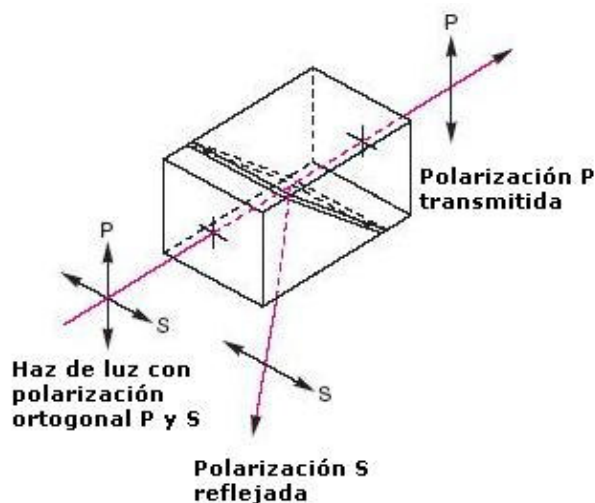


Figura 4.7. Principio de operación del polarizador.

Lente.

Se utiliza para amplificar el haz de luz; debido a que el haz de luz previamente tuvo que haber sido colimado, filtrado y polarizado, la potencia del haz se atenúa y por lo tanto es necesario amplificar la señal óptica antes de ser transmitida. (Figura 4.8).



Figura 4.8. Lente – 10X.

Foto-detector.

Este dispositivo es un transductor: convierte una señal óptica en una señal eléctrica, tiene un rango espectral de 800–1800 [nm] y un ancho de banda de 1 [GHz]. En uno de sus extremos tiene una entrada para fibra óptica, en donde entra la emisión de la fibra láser y por el otro extremo se le coloca un adaptador para realizar conexiones a un osciloscopio o a un adaptador de analizador de espectros (Figura 4.9).



Figura 4.9. Foto-detector.

CAPÍTULO 4 Señales heterodinas de polarización.

Osciloscopio.

Este equipo de medición se muestra en la Figura 4.10, tiene una impedancia de entrada de 50 [Ω] y un ancho de banda de 500 [MHz]. La salida del foto-detector va conectada a uno de los canales del osciloscopio para observar el nivel de voltaje que se está recibiendo; es importante verificar el voltaje máximo para realizar el proceso de alineación del haz y así poder obtener la máxima amplitud de las señales heterodinas de polarización, una vez que se haya alineado correctamente el haz de luz. Las señales que se obtienen del osciloscopio se almacenan en una computadora a través del programa *LeCroy ScopeExplorer, Versión 2.21.0*.



Figura 4.10. Osciloscopio.

Adaptador de analizador de espectros ópticos.

Éste se utiliza para adaptar el equipo a un osciloscopio y formar un analizador de radiofrecuencia y tiene una resolución de hasta 3 [kHz] (Figura 4.11).



Figura 4.11. Adaptador de analizador de espectros ópticos.

4.2 Obtención de las señales heterodinas de polarización.

4.2.1 Señales heterodinas para resonadores en anillo con birrefringencia híbrida.

Para obtener las señales heterodinas generadas por la emisión del primer arreglo experimental (Figura 2.2), el brazo sin utilizar del acoplador de 3 [dB] se empalmó a una fibra óptica con un colimador en el extremo. El haz colimado se guió a través de un filtro paso altas para eliminar el bombeo residual; posteriormente, se utilizó un prisma de Glan-Thompson para mezclar las polarizaciones ortogonales del haz de luz que se generan a través de la fibra óptica, y la detección se realizó con un foto-detector de alta velocidad conectado a un analizador de radiofrecuencia. Un espectro típico obtenido con este arreglo se muestra en la Figura 4.12, en donde se pueden distinguir tanto la señal generada por el abatimiento de las frecuencias longitudinales de oscilación (LMB), como las señales heterodinas de polarización (PMB).

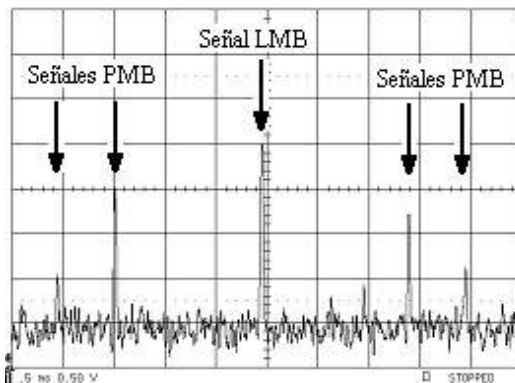


Figura 4.12. Señales heterodinas de polarización (PMB's) y LMB's obtenidas con el arreglo mostrado en la Figura 2.2 (Resolución: 5 [MHz] / div, -30 [dBm] / div, centro 35 [MHz]).

La caracterización de los arreglos mediante las *señales heterodinas de polarización*, consistió en observar sus variaciones, tanto en frecuencia como en amplitud, mediante ajustes en el controlador de polarización PC2 para diferentes combinaciones de fibra dentro del anillo.

Los espectros ópticos de las frecuencias de resonancia de la emisión láser (señal LMB fundamental y las señales PMB's) se visualizan en el *analizador de radiofrecuencias*. En la Figura 4.13, puede observarse la frecuencia de resonancia f_{LMB} para el primer arreglo experimental (sin fibra de Hi-Bi.). La ecuación (4-1) proporciona el siguiente valor de frecuencia de resonancia, considerando $n=1.46$ debido a que el

CAPÍTULO 4 Señales heterodinas de polarización.

material con el que está hecho el núcleo de la fibra óptica es en mayor parte dióxido de silicio (SiO_2) y su índice de refracción es $n = 1.4584 \approx 1.46$ [12]*, $L = 5$ (longitud total del anillo), y c es la velocidad de la luz en el vacío:

$$f_{LMB} = \frac{3 \times 10^8}{(1.46)(5)} = 41.1 [\text{MHz}]$$

En los resultados teóricos ($41.1 [\text{MHz}]$) y experimentales ($35 [\text{MHz}]$) se tiene un error de 14.8 %, ($6.1 [\text{MHz}]$ de diferencia); esta diferencia puede deberse a que el índice de refracción del núcleo de la fibra no es totalmente homogéneo y que la longitud total en el anillo no es exactamente de 5 [m], esto debido a errores de medición.

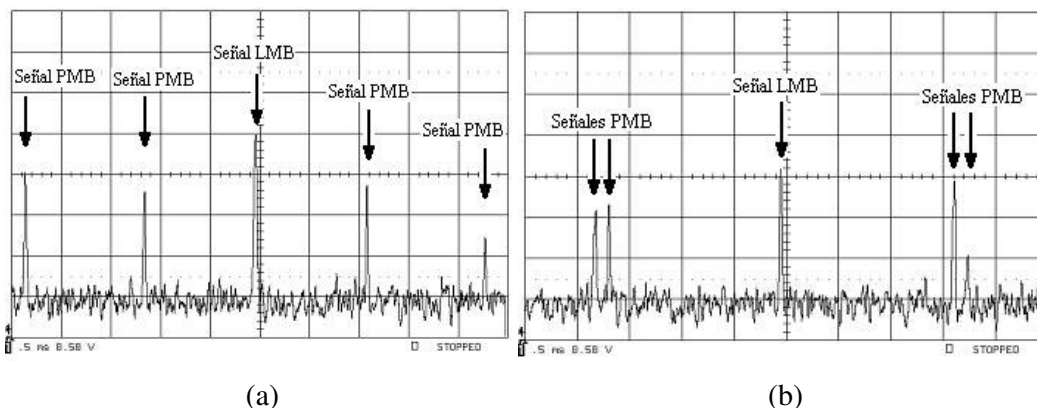


Figura 4.13. Señales heterodinas de polarización (PMB's) y LMB's obtenidas con el arreglo mostrado en la Figura 2.2 (Resolución: 5 [MHz] / div, -30 [dBm] / div, centro 35 [MHz]) ajustadas para 2 posiciones diferentes del controlador de polarización PC2.

En la Figura 4.13 (a), las señales heterodinas se ajustaron para una operación de tres longitudes de onda oscilando de manera simultánea (ver Figura 2.4). Al hacer ajustes en la posición del controlador de polarización PC2, que se encuentra dentro del anillo, se puede notar un desplazamiento de las señales PMB's, tal y como se muestra en la Figura 4.13 (b). Las señales heterodinas se ajustaron para una operación de dos longitudes de onda estables y oscilando de manera simultánea (ver también Figura 2.4).

Continuando con la caracterización del primer arreglo experimental, se realizaron diferentes combinaciones de fibra en el anillo. La primera de ellas consistió en utilizar 5 [m] de fibra de alta birrefringencia, como se muestra en la Figura 2.5. A partir de esta combinación, fue posible obtener señales heterodinas de polarización

* Tabla 4.1 Índices de refracción aproximados de varias sustancias página 95.

CAPÍTULO 4 Señales heterodinas de polarización.

(PMB) pero los ajustes en el controlador de polarización PC2 no generaron desplazamiento alguno en las frecuencias de las señales PMB. De acuerdo con este comportamiento, las polarizaciones generadas en el anillo con fibra de alta birrefringencia son ortogonales entre sí, aunque la diferencia de frecuencias permanece constante a pesar de que se ajuste la birrefringencia dentro del resonador utilizando el controlador de polarización PC2. Aparentemente, la longitud de fibra utilizada es suficiente como para garantizar una orientación fija de las polarizaciones que oscilan en el arreglo.

Posteriormente se redujo la longitud de fibra de Hi-Bi utilizada en el anillo (2.5 [m]) y se obtuvieron nuevamente señales LMB's y PMB's (Figura 4.14). Con tal combinación, la frecuencia de las señales PMB's pudo ser modificada mediante ajustes en el controlador de polarización PC2. De igual manera, de la ecuación (4-1) se obtuvo el valor de la frecuencia de resonancia f_{LMB} considerando $n = 1.46$, $L = 7.5$ (longitud total del anillo), y c es la velocidad de la luz en el vacío:

$$f_{LMB} = \frac{3 \times 10^8}{(1.46)(7.5)} = 27.4 [MHz]$$

En los resultados teóricos ($27.4 [MHz]$) y experimentales ($29.4 [MHz]$) se tiene un error de 8% (2 [MHz] de diferencia).

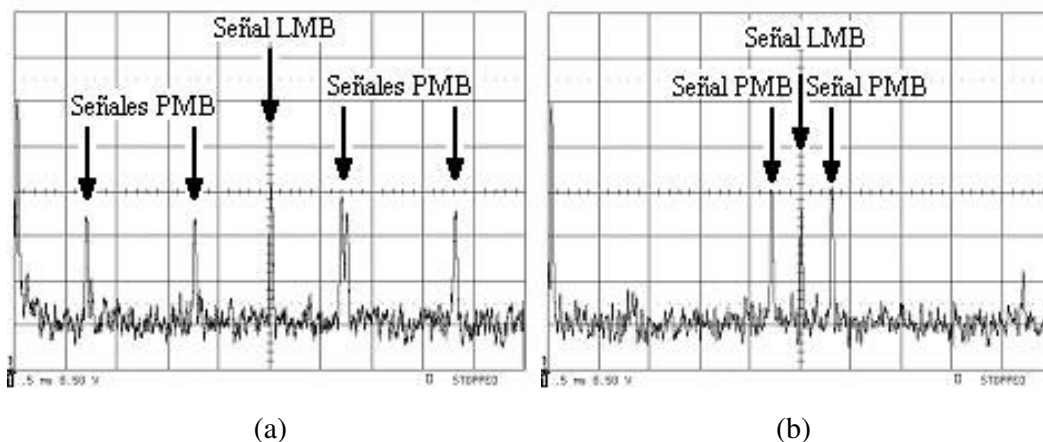


Figura 4.14. Señales heterodinas de polarización (PMB's) y LMB's obtenidas con el arreglo mostrado en la Figura 2.5 (Resolución: 5 [MHz] / div, -30 [dBm] / div, centro 29.4 [MHz]) para 2 posiciones diferentes del controlador de polarización PC2.

CAPÍTULO 4 Señales heterodinas de polarización.

En la Figura 4.14 (a), las señales heterodinas se ajustaron para una operación de dos longitudes de onda oscilando de manera simultánea. Al ajustar la posición del controlador de polarización PC2, para una operación de tres longitudes de onda oscilando de manera simultánea (ver Figura 2.6), también se realiza un desplazamiento simétrico en frecuencia de las señales PMB's alrededor de la frecuencia LMB, tal y como se muestra en la Figura 4.14 (b).

Como era de esperarse, al agregar fibra de alta birrefringencia, se aumenta la estabilidad de las señales heterodinas de polarización, además de que la frecuencia de resonancia f_{LMB} se reduce debido a que la relación entre ésta y la longitud del anillo es inversamente proporcional. En ambas caracterizaciones (con Hi-Bi y sin Hi-Bi) del primer arreglo experimental, las señales PMB's se desplazaron en una forma simétrica con respecto a las señales LMB haciendo modificaciones en la posición del controlador de polarización PC2.

4.2.2 Señales heterodinas para resonadores en anillo en operación unidireccional y bidireccional.

Para obtener las señales heterodinas generadas por la emisión del arreglo experimental mostrado en la Figura 3.5 (Resonador en anillo en modo unidireccional), primero se caracterizó sin la inserción del FFP TF dentro del resonador. Uno de los brazos de entrada del acoplador de 3 [dB] se empalmó a una fibra óptica monomodal con un colimador en el extremo, el haz de luz colimado se guió a través de cada uno de los elementos de la etapa de detección de radiofrecuencia.

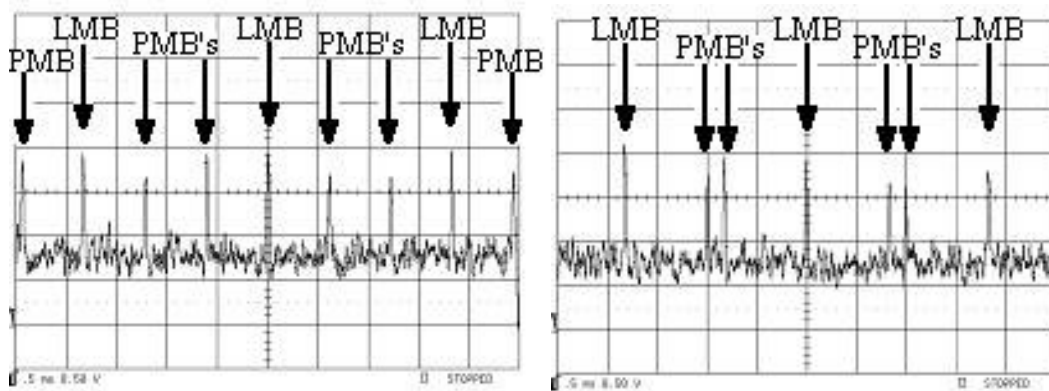


Figura 4.15. Señales heterodinas de polarización (PMB's) y LMB's obtenidas con el arreglo mostrado en la Figura 3.5 (Resolución: 5 [MHz] / div, -30 [dBm] / div, centro 33 [MHz]) para 2 posiciones diferentes de los controladores de polarización.

CAPÍTULO 4 Señales heterodinas de polarización.

Los espectros obtenidos con este arreglo se muestran en la Figura 4.15, en donde se pueden distinguir tanto la señal generada por el abatimiento de las frecuencias longitudinales de oscilación (LMB), como las señales heterodinas de polarización (PMB).

Posteriormente se empalmó el FFP TF (Figura 3.5) para analizar la sintonización del láser en modo de operación unidireccional y se obtuvieron los espectros mostrados en la Figura 4.16.

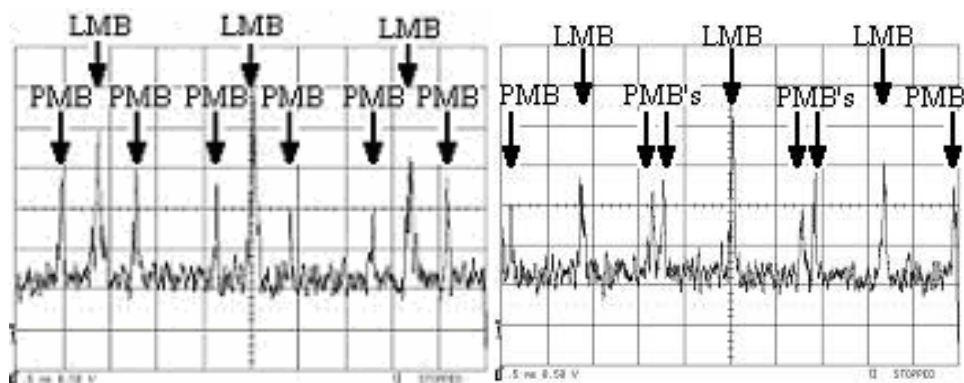


Figura 4.16. Señales heterodinas de polarización (PMB) y LMB's obtenidas con el arreglo mostrado en la Figura 3.5 (Resolución: 5 [MHz] / div, -30 [dBm] / div, centro 33 [MHz]).

En la figura anterior, al igual que en los casos anteriores la longitud de onda se ajustó con el FFP TF. Puede verse que el ancho de línea de las señales heterodinas, no es igual (Figura 4.17). El ancho de línea de las señales heterodinas se muestra en la Figura 4.17 (a) es de 400 [kHz], mientras que para la Figura 4.17 (b) es de 600 [kHz].

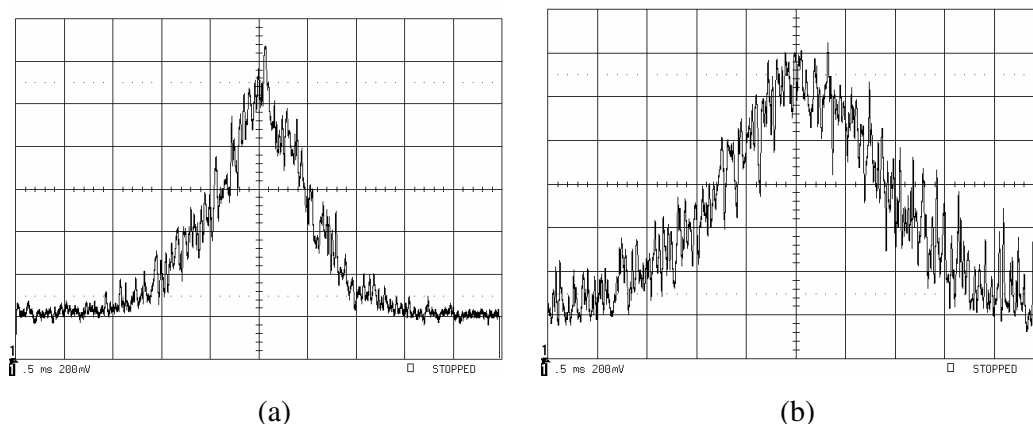


Figura 4.17. Ancho de línea de señales heterodinas: a) operación unidireccional y bidireccional sin FFP TF (200 [kHz]/div), b) operación unidireccional con FFP TF (200 [kHz]/div).

CAPÍTULO 4 Señales heterodinas de polarización.

Si calculamos la frecuencia de resonancia teórica f_{LMB} para una longitud total dentro del anillo que es de 11 metros, obtenemos una frecuencia de $18.68[MHz]$, considerando $n=1.46$, $L=11$ (longitud total del anillo), y c es la velocidad de la luz en el vacío.

La frecuencia de resonancia experimental es de $(16.5[MHz])$. El porcentaje de error entre la frecuencia de oscilación teórica y práctica es de: 8.83% .

En este arreglo experimental fue posible obtener una relación lineal entre cambios de longitud de onda obtenidos a partir de las variaciones en voltaje del FFP TF y cambios de las señales heterodinas PMB's (Figura 4.18). Se tomó como referencia una señal PMB ubicada originalmente en $29[MHz]$ y al realizar cambios en la longitud de onda dentro del rango de sintonización (mencionado en el capítulo anterior) mediante el FFP TF se observó un desplazamiento en las señales PMB's, sin embargo cabe señalar que al igual que en el arreglo bidireccional, tanto las frecuencias PMB's como LMB's solo aparecían dentro del rango de sintonización comprendido entre las longitudes de onda $1517-1562[nm]$ (rango de sintonización de $45[nm]$ para este arreglo experimental), y a medida que la longitud de onda se va aproximando a las longitudes de onda ubicadas en los extremos del rango de sintonización, la amplitud de las señales PMB's va disminuyendo gradualmente hasta atenuarse por completo.

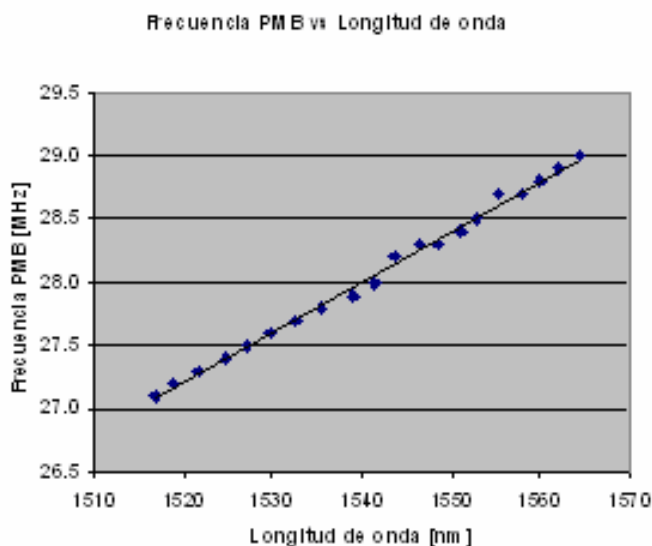


Figura 4.18. Comportamiento de las frecuencias PMB's respecto a la longitud de onda (arreglo unidireccional con filtro sintonizable).

CAPÍTULO 4 Señales heterodinas de polarización.

En cuanto al análisis de radiofrecuencia del arreglo experimental mostrado en la Figura 3.8 (Resonador en anillo en modo bidireccional y con FFP TF), las señales PMB's pueden ser modificadas en frecuencia, en función de la posición de los controladores de polarización pero son bastante inestables (Figura 4.19).

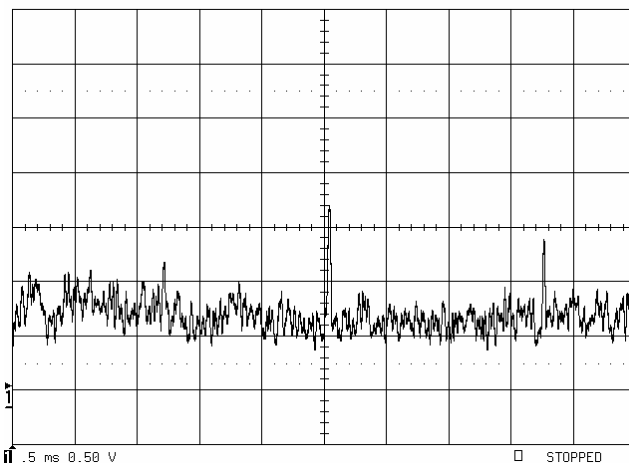


Figura 4.19. Señales heterodinas de polarización (PMB) obtenidas con el arreglo mostrado en la Figura 3.8 (Resolución: 5 [MHz] / div, -30 [dBm] / div, centro 39 [MHz]).

En este arreglo experimental no fue posible obtener una relación entre longitudes de onda y frecuencias PMB's, ya que al realizar cambios en longitud de onda en el FFP TF no se observó un desplazamiento en las señales PMB's. Cabe señalar que las frecuencias PMB's solo se observaban dentro del rango de sintonización reportado en el capítulo anterior (4 [nm]) y a medida que la longitud de onda se va aproximando a las longitudes de onda de los extremos del rango de sintonización, la amplitud de las señales PMB's va disminuyendo gradualmente hasta atenuarse completamente.

Se ha reportado anteriormente el comportamiento de la relación que hay entre las frecuencias PMB's η [MHz] y los cambios generados en longitud de onda λ [nm] para un resonador de Fabry-Perot [7] (Figura 4.20). En este reporte se muestra una clara diferencia con este trabajo, en el cual se tiene una tendencia lineal comprendida dentro del rango de sintonización del arreglo experimental unidireccional, los cambios en la posición de las señales heterodinas de polarización con respecto a los desplazamientos en longitud de onda son del orden de [kHz], y el rango de sintonización no es suficiente como para recorrer la máxima separación y acercamiento que puede existir entre las señales PMB con respecto a las señales LMB. En el resonador de Fabry-Perot se tiene una tendencia en la que se pueden obtener los valores máximos de desplazamiento de las señales PMB con respecto a su correspondiente señal LMB.

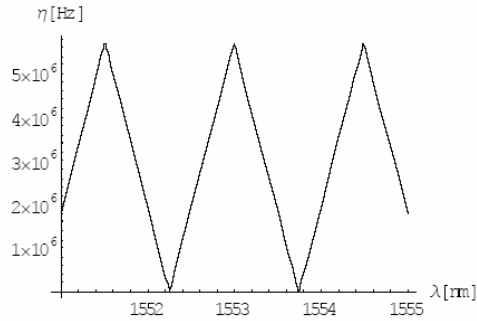


Figura 4.20. Comportamiento de las señales PMB en función de la longitud de onda para un resonador de Fabry-Perot con birrefringencia híbrida [7].

El comportamiento observado de las señales PMB en función de la longitud de onda tiene implicaciones importantes para la elección de un resonador en particular para una aplicación específica. Es evidente que las señales PMB obtenidas con un resonador de Fabry-Perot son más sensibles a los cambios en la longitud de onda, que las señales obtenidas con un resonador de anillo. El desarrollo de sensores basados en medir cambios en longitud de onda a través de las frecuencias PMB, debería entonces centrarse en el uso de resonadores de Fabry-Perot. Por otro lado, la baja sensibilidad de las señales PMB obtenidas con resonadores en anillo, podría ser útil para detectar cambios en la birrefringencia y minimizar la sensibilidad del arreglo a las fluctuaciones en longitud de onda. En el siguiente capítulo se presentarán las conclusiones de todo el trabajo realizado y veremos propuestas de como utilizar los efectos reportados para medir cambios en índice de refracción.

Capítulo 5

Conclusiones.

Al igual que en los resonadores de Fabry-Perot, la birrefringencia de los resonadores en anillo determina las propiedades de polarización de las fibras láser que utilizan esta configuración. En este trabajo presentamos los efectos de combinar fibras de alta y baja birrefringencia en el resonador de anillo. Los resultados experimentales muestran que además de que es posible obtener longitudes de onda múltiples, los arreglos propuestos presentan sensibilidad variable a los cambios de birrefringencia en la fibra utilizada en el anillo. Se observaron casos extremos en los cuales las señales PMB's permanecieron invariantes al ajustar un controlador de polarización dentro del resonador, o bien no fue posible generar señales PMB's. Se demostró también que para ciertas longitudes de fibras, pueden registrarse cambios en la birrefringencia del resonador mediante el monitoreo de las señales PMB's. Evidentemente, la birrefringencia promedio del resonador determina el régimen de operación que puede obtenerse, aunque deben considerarse también los efectos birrefringentes de los dispositivos utilizados en el arreglo.

El modo de operación del resonador en anillo afecta también las propiedades de polarización. La operación unidireccional provee un espectro de emisión más angosto y estable. Asimismo, las señales de radiofrecuencia son estables y mantienen una relación lineal con la longitud de onda de la fibra láser. Los resultados mostrados sugieren que el desarrollo de sensores polarimétricos basados en fibras láser en configuración de anillo debe considerar la operación unidireccional del láser. Adicionalmente, debe asegurarse que la birrefringencia del resonador sea lo suficientemente estable como para generar señales PMB adecuadas, y en caso de utilizar fibras Hi-Bi en el resonador, debe estimarse una longitud apropiada para poder observar cambios en la birrefringencia. El análisis teórico de este tipo de arreglos deberá proporcionar información más detallada sobre todos estos efectos.

En este trabajo, además de mostrar efectos interesantes para ampliar el entendimiento en la física de los sistemas láser en configuración de anillo, hay varias aplicaciones que pueden beneficiarse con los resultados anteriores. El desarrollo de

sistemas láser sintonizables, por ejemplo, es de gran interés en campos tales como las comunicaciones con fibra óptica y sistemas de espectroscopia. El encontrar una relación consistente y reproducible entre la longitud de onda de la fibra láser y las frecuencias de las señales PMB, abre la posibilidad de medir la longitud de onda sin que se requiera el uso de un analizador de espectros ópticos. Evidentemente, la simplificación de los sistemas desarrollados a partir de estos principios sería considerable.

Como hemos visto, el cambio en frecuencia de las señales PMB se presenta también debido a cambios en la birrefringencia del resonador. El desarrollo de sensores para monitoreo de cambios en índice de refracción utilizando estos arreglos, podría contemplar entonces el exponer parte de la cavidad a los cambios de índice que se desean medir. Esto puede lograrse exponiendo parte del haz al espacio libre mediante colimadores, o bien utilizando configuraciones de sensores de onda evanescente [13]. Esta configuración podría utilizarse para analizar cambios en índice de refracción en líquidos, o bien, para detectar gases cuyos espectros de absorción coincidan con la región espectral de operación de la fibra láser.

Referencias y Bibliografía

- [1] J: F. Digonnet, *Rare-Earth-Doped fiber Lasers and Amplifiers*, (Marcel Dekker, Inc, New York, 2001).
- [2] G. Driggers Ronald, *Encyclopedia of Optical Engineering*, Ed. Marcel Dekker, Adelphi Maryland, 1999.
- [3] Saleh Bahaa, *Fundamentals of Photonics*, Ed Wiley, New York, 1991.
- [4] Liber A. Sosa-Martínez, “Conmutación de polarización en fibras ópticas láser con aplicaciones en sistemas de medición ópticos”, Tesis de Licenciatura, UNAM – Facultad de Ingeniería, 2003.
- [5] Hernández-Cordero J, “Polarization effects in a high-birefringence elliptical fiber laser with a Bragg grating in a low-birefringence fiber”, *Applied Optics*, Vol. 39, No. 6, Febrero 2000, pp. 972-977.
- [6] Paul Urquhart, “Review of rare earth doped fibre lasers and amplifiers”, *IEEE PROCEEDINGS*, Vol. 135, Pt. J, No.6, Diciembre 1998, pp. 385-405.
- [7] Andrea Rosales-García, Iván Cruz-Torres and Juan Hernández-Cordero, “Fiber laser with hybrid birefringence resonators”, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, No. 10, Octubre 2006.
- [8] B. Lamouroux; B. Prade, and A. Orszag, “Polarization effect in optical-fiber ring resonators”, *Optics Letters*, Vol.7, No.8, Agosto 1982, pp.391-393.
- [9] G. Das, J. W. Y. Lit, “Ring resonator for multiwavelength fiber laser using a Sagnac loop filter,” *Optical Engineering*, Vol. 42 No 8 (2003), pp. 2257-2262.
- [10] H.K. Kim and S.K. Kim, “Polarimetric fiber laser sensors”, *Optics Letters*, Vol. 18, No.4, Febrero 15, 1993, pp.317-319.
- [11] 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. 17, No. 14, Agosto 2006.
- [12] Hecht, E. *Óptica*, Ed. Addison Wesley Iberoamericana, España, 2000.
- [13] Prasad, P. N. *Introduction to Biophotonics*, Ed. Wiley Interscience, EEUU, 2003.