

Tesis defendida por

Jorge Arturo Rodríguez García

y aprobada por el siguiente comité

Dra. Diana Tentori Santa Cruz

Director del Comité

Dr. Victor Ruíz Cortes

Miembro del Comité

Dr. Serguei Stepanov

Miembro del Comité

Dra. Beatriz Cordero Esquivel

Miembro del Comité

Dr. Pedro Negrete Regagnon

Coordinador del programa de
Posgrado en Óptica

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de la Dirección de Estudios de Posgrado

18 de Febrero del 2013

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA



Programa de Posgrado en Ciencias
en Óptica con orientación en Optoelectrónica

Cancelación del efecto de la birrefringencia residual en un multiplexor de bombeo
980/1550 *nm* de fibra óptica

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Jorge Arturo Rodríguez García

Ensenada, Baja California, México

2013

Resumen de la tesis de Jorge Arturo Rodríguez García, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Óptica con orientación en Optoelectrónica. Ensenada, Baja California, Febrero del 2013.

Cancelación del efecto de la birrefringencia residual en un multiplexor de bombeo
980/1550 *nm* de fibra óptica

Resumen aprobado por:

Dra. Diana Tentori Santa Cruz

Director de Tesis

Las fibras reales presentan varias perturbaciones internas, como elipticidad del núcleo y tensión interna que modifican la propagación de los modos de polarización ortogonales (Smith, 1979). Ya que la anisotropía residual se introduce durante el proceso de manufactura, los modos de polarización pueden variar a lo largo de la fibra óptica. Sin embargo, para distancias cortas, las propiedades de la polarización de las fibras ópticas monomodales pueden ser consideradas como uniformes (Lacroix S., 1984). La presencia de esta anisotropía óptica reduce el desempeño de los dispositivos de fibra óptica en los que el estado de polarización de la luz es importante, como son los amplificadores de fibra óptica que mantienen la polarización (PMFA), los láseres de fibra óptica (FLs); también los sistemas de comunicación con multiplexado de polarización donde es necesaria la fidelidad en la propagación de la información y la estabilidad del pulso [(Marciante J. R., 2006); (Feng Xinhuan, 2006); (Matsura Takaaki, 2002)]. En esta investigación se usan dos bobinas helicoidales en el brazo de entrada de la señal para reducir el efecto de la birrefringencia y mantener el estado de polarización de la luz (SOP). Se usan también dos bobinas helicoidales en el brazo del bombeo para cancelar el efecto de la birrefringencia residual también en este rango espectral. Se propone que las bobinas helicoidales inducen un efecto de birrefringencia dominante y éste permite igualar el estado de polarización de la luz de la señal en los puertos de entrada y salida en un multiplexor por división de longitud de onda (WDM).

Palabras Clave: **Birrefringencia, WDM.**

Abstract of the thesis presented by Jorge Arturo Rodríguez García, in partial fulfillment of the requirements of the degree of Master in Sciences in Optics with orientation in Optoelectronics. Ensenada, Baja California, February 2013.

Residual birefringence cancelation in an optical fiber pump multiplexer
(980nm/1550nm)

Abstract approved by:

Dra. Diana Tentori Santa Cruz

Director de Tesis

Real fibers present various internal perturbations, such as core ellipticity and internal stress that cause characteristic differences of the propagation constants of the orthogonal polarization modes (Smith, 1979). Since residual anisotropy is introduced during the manufacturing process, polarization modes can vary along the fiber length. Nevertheless, for short distances, the polarization properties of single-mode fibers can be considered as uniform (Lacroix S., 1984). The presence of this optic anisotropy reduces the performance of optic fiber devices in which it is required to control the polarization state of the light, such as polarization maintaining fiber amplifiers (PMFA), fiber lasers (FLs), as well as polarization multiplexed communication systems where it is needed fidelity in the information propagation and pulse stability [(Marciante J. R., 2006); (Feng Xinhuan, 2006); (Matsura Takaaki, 2002)]. In this research two helical coils were prepared for the signal and the pump fiber arms, to reduce the birefringence effect and maintain the signal and pump state of polarization (SOP). We propose that helical windings induce a dominant birefringence and used them to equalize the state of polarization of the signal at the WDM input and output ports.

Keywords: **Birrefringence, WDM.**

*A mi Madre, a mi Padre y a
mis Hermanos.*

Agradecimientos

A mi director de tesis Dra. Diana Tentori por su paciencia, por su conocimiento, por aceptarme como alumno y tenerme la confianza para dejarme ser responsable de mi trabajo.

A los miembros del comité de tesis, Dr. Victor Ruíz Cortes, Dr. Serguei Stepanov, Dra. Beatriz Cordero Esquivel por aceptar ser parte de mi comité y brindarme ayuda en cada momento que la necesité.

A Miguel Farfán por ayudarme en todo lo que necesité y transmitirme sus conocimientos técnicos para el trabajo y cuidado de las fibras y equipo óptico.

A mi familia, que me hizo sentir que nunca estuve solo, apoyándome en todo lo que necesitaba.

A mis amigos y compañeros que me ayudaron y alentaron a continuar hacia adelante.

Al personal académico y técnico que compartió su conocimiento para mi crecimiento educativo.

Al personal administrativo de óptica y del Centro de Educación Científica y de Educación Superior de Ensenada por ayudarme en los procesos y darme tutoría de como hacer los procesos administrativos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por proveer el costo de mi manutención durante este periodo.

A todos ellos:

Muchas Gracias.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de Tablas	x
1. Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Efecto de la birrefringencia residual	2
1.2.1 Enlaces de comunicación	2
1.2.2 Dispositivos de fibra láser	4
1.2.3 Control de la birrefringencia	5
1.3 Control de la birrefringencia en un multiplexor de bombeo	6
1.3.1 Hipótesis	7
1.3.2 Objetivo general	7
1.3.3 Objetivos específicos	7
1.4 Relevancia del tema	8
2. Polarización	9
2.1 Introducción	9
2.2 Tipos de polarización	10
2.2.1 Polarización lineal	10
2.2.2 Polarización circular	10
2.2.3 Polarización elíptica	11
2.3 Grado de polarización	11
2.4 Matriz de Mueller de un bobinado helicoidal de fibra óptica	12
2.5 Esfera de Poincaré	13
2.6 Vectores de Stokes	14
3. Anisotropía Óptica	18
3.1 Birrefringencia	18
3.2 Medida de la birrefringencia	20
3.2.1 Técnica de polarizadores cruzados	21
3.2.2 Métodos de modulación	23
3.2.3 Analizador rotante	23

4.	Desarrollo experimental	26
4.1	WDM	26
4.2	Elaboración de bobinas	27
4.3	Marco de referencia para el brazo de entrada $1550nm$	28
4.4	Implementación del arreglo óptico para $1550nm$	28
4.5	Resultados obtenidos para el brazo entrada	34
4.6	Implementación del arreglo óptico para brazo de bombeo $980nm$	35
4.7	Marco de referencia para brazo de bombeo $980nm$	36
4.8	Resultados obtenidos para el brazo de bombeo $980nm$	37
5.	Control de la temperatura	39
5.1	Introducción	39
5.2	Sistema de control de la temperatura	39
5.2.1	Controlador de acción proporcional (P)	39
5.2.2	Controlador de acción integral (I)	40
5.2.3	Controlador de acción proporcional e integral (PI)	41
5.2.4	Controlador de acción proporcional y derivativa (PD)	41
5.2.5	Controlador de acción PID	42
5.3	Dependencia de la temperatura	42
5.4	Desarrollo experimental para el brazo de entrada para longitudes de onda de $1520 nm - 1570 nm$	43
5.5	Desarrollo experimental para el brazo de bombeo $980 nm$	45
6.	EDFA	49
6.1	Sistema de 4 niveles	49
6.2	Desarrollo experimental EDFA	52
7.	Conclusiones	57
	Referencias bibliográficas	59
	Apéndice A. Equipo usado	61

Lista de figuras

Figura		Página
1	Esfera de Poincaré	14
2	Esfera de Poincaré en la que se representa un estado de polarización S en coordenadas cartesianas mediante los parámetros de Stokes (S_1, S_2, S_3) y en coordenadas esféricas por medio de los ángulos azimutales (α) y de elipticidad (ϵ)	16
3	Corte transversal del núcleo de una fibra óptica con geometría elíptica la cual presenta birrefringencia.	19
4	Se muestra como el efecto de birrefringencia afecta a un pulso óptico cuando se propaga por una fibra óptica.	20
5	Muestra (M) entre polarizador (P) y analizador (A) ortogonales. Los ejes de la indicatriz óptica se denotan como n' y n''	22
6	Componentes ópticos del dispositivo que mide la birrefringencia en función de una variable continua	24
7	Esquema básico de un WDM, dos brazos de entrada ($I1, I2$), dos brazos de salida ($O1, O2$)	27
8	Arreglo óptico para anulación del efecto de la birrefringencia	29
9	Arreglo óptico para generar el marco de referencia	30
10	Arreglo óptico para generar el marco de referencia con montura mecánica rotacional con un polarizador	31
11	Estado de polarización de entrada al brazo de bombeo ($980nm$).	36
12	Estado de polarización lineal obtenido a la salida del polarizador ($980nm$).	37
13	Estado de polarización circular obtenido a la salida del WDM con doble bobinado en el brazo de bombeo ($980nm$).	37
14	Estado de polarización lineal obtenido a la salida del WDM con doble bobinado en el brazo de bombeo ($980nm$).	38
15	Evolución del SOP a la salida del WDM con doble bobinado en el brazo de $980nm$, al variar 360° el ángulo azimutal del eje del polarizador lineal de entrada.	38
16	Controlador de temperatura 89000-00	43

Figura		Página
17	Cápsula térmica	44
18	Cambios debidos a la temperatura, en la evolución del SOP a la salida del WDM con doble bobinado en el brazo de 980 <i>nm</i> . Estos cambios se obtuvieron al variar 360° el ángulo azimutal del eje del polarizador lineal de entrada.	46
19	Sistema de 4 Niveles	51
20	Sistema de 3 Niveles	52
21	SOP linalmente polarizado en la señal de salida del WDM para 1550 <i>nm</i>	54
22	SOP linalmente polarizado en la en la señal de salida del WDM para 980 <i>nm</i>	54
23	Evolución del SOP a la salida de EDFA con un WDM doble bobinado en los brazos de entrada (1550 <i>nm</i> , 980 <i>nm</i>). Estos cambios se obtuvieron al variar 360° el ángulo azimutal del eje del polarizador lineal de entrada.	55
24	Anulación del efecto de la birrefringencia con un EDFA y un WDM . .	56

Lista de Tablas

Tabla		Página
1	Vectores de Stokes para los principales estados de polarización	17
2	Verificación del SOP que se introducirá al WDM (Lineal)	32
3	Estados de polarización circular. Se muestran las imágenes del estado de polarización circular que se logra por medio del movimiento del doble bobinado que se elaboró.	33
4	Valores máximos en grados del ángulo azimutal	34
5	Barrido de 360 grados, rango de $1520nm$ a $1570nm$ (obtenidos una vez reintegrado el polarizador al arreglo óptico).	35
6	Verificación del SOP que se introducirá al WDM (Lineal)	47
7	Valores máximos para el cambio en el ángulo de elipticidad cuando el doble bobinado cambia de temperatura ambiente a 40 C	48
8	Valores máximos para el cambio en el ángulo de elipticidad del SOP de bombeo, cuando el doble bobinado cambia de temperatura ambiente (20 C) a 40 C	48

Capítulo 1

Introducción

Las propiedades del vidrio de sílice (alta resistencia al ataque químico, baja absorción y alta resistencia eléctrica), aunadas a las de las guías ópticas (transmisión eficiente de luz, flexibilidad, dimensiones transversales reducidas), permiten que las fibras ópticas se apliquen de manera eficaz en diversos campos de la tecnología. La luz que se propaga a través de la fibra se usa:

- Como portadora de información en enlaces de comunicación y sensores remotos de fibra óptica.
- Como portadora de luz en sistemas para aplicaciones médicas y en un gran número de dispositivos.

Existen sensores en los que la fibra misma opera como transductor, y en la caso de fibras dopadas con tierras raras, el efecto de emisión estimulada permite la amplificación de señales y la construcción de fuentes de luz coherente e incoherente.

1.1 Planteamiento del problema

Un problema propio de las fibras ópticas que limita sus aplicaciones es, que ya sea por efectos de:

- Estiramiento, curvatura, torsión.
- Por la concentración de impurezas.

- Por defectos en la simetría de la guía de onda.

la luz cambia su forma de propagación. El estudio de los cambios observados indica que la fibra adquiere birrefringencia. La birrefringencia puede generarse durante el proceso de manufactura de la fibra (birrefringencia residual) o una vez fabricada, como resultado de campos externos, generalmente deformaciones mecánicas producidas durante la manufactura de dispositivos y sistemas de fibra óptica (birrefringencia inducida). La presencia de anisotropía óptica deteriora el desempeño de dispositivos de fibra en los cuales se requiere controlar el estado de polarización de la luz, como los sensores polarimétricos, amplificadores de señales polarizadas (PMFA, polarization maintaining fiber amplifier) y láseres de fibra óptica; así como de los sistemas de comunicación, en los que se necesita fidelidad en la propagación de la información y estabilidad en los pulsos.

1.2 Efecto de la birrefringencia residual

A continuación se mencionan algunas aplicaciones en las que la presencia de la birrefringencia residual deteriora el desempeño de los sistemas o de los dispositivos que con ellas se construyen.

1.2.1 Enlaces de comunicación

En la actualidad, gran parte de la transmisión de información se realiza por medio de fibra óptica debido a su alta velocidad, capacidad de transmisión, inmunidad a interferencia electromagnética en el rango de las radiofrecuencias y bajo costo por bitio; ya que en una sola fibra pueden manejarse en forma simultánea varios canales de información. El incremento en la capacidad del enlace de comunicación puede lograrse aumentando

el número de canales, mediante el uso de la tecnología de multiplexado espectral en longitud de onda (WDM). Sin embargo, el número de canales simultáneos que pueden enviarse a través de una sola fibra óptica, se ve limitado para un espaciamiento entre canales menor de 20 GHz, por la presencia de efectos no lineales (Hinz Stephan, 2001). Estos producen un cruzamiento de señales que puede entorpecer o incluso hacer que sea imposible recuperar la información que se maneja. La alternativa, manteniendo un número reducido de canales (espaciamiento de 25 GHz o mayor), es incrementar la velocidad de bitios. En este caso la barrera se encuentra a una velocidad de 40 Gbit/s y el fenómeno físico responsable es la dispersión de modos de polarización (Ishikawa Fujitsu G., 1998).

Al incrementar la capacidad de los sistemas de comunicación óptica, lo que se busca es disminuir el costo de transmisión por bitio. Este costo se reduce cuando los enlaces WDM comparten la misma fibra y los mismos amplificadores ópticos. Otro esfuerzo más en esta dirección consiste en usar formatos de modulación avanzados que operan con una reducción en la tasa de símbolos. El uso de estos formatos de modulación provee al enlace de mayor tolerancia a la dispersión cromática y de modos de polarización.

Para corregir el deterioro producido por la presencia de la birrefringencia residual se han propuesto diversas alternativas para disminuir este efecto en fibras estándar de telecomunicaciones. Uno de ellos propone el uso de una fibra torcida al fabricarla (spun fiber). Se suponía que su birrefringencia ultrabaja eliminaría los efectos no deseados producidos por la birrefringencia residual, pero esta fibra resultó muy sensible a los campos externos (Treviño F., 2005b). Otro método plantea la introducción de una birrefringencia circular grande, obtenida aplicando una torsión "en frío" a la fibra, que se suponía limitaría en alguna medida el efecto de la birrefringencia lineal (Kuzin E.A., 2001). Sin embargo, recientemente se demostró que la birrefringencia in-

ducida por torsión no es circular, el efecto es más complejo (Tentori D., 2012); además la birrefringencia inducida por torsión muestra una fuerte dependencia con la temperatura (Thierry Chartier, 2001). Por otra parte, para que la birrefringencia inducida por torsión sea la anisotropía dominante, la torsión requerida es tan grande que la fibra a menudo alcanza su límite de fractura (Eickhoff W., 1981).

1.2.2 Dispositivos de fibra láser

Debido a la birrefringencia residual, las cavidades de los láseres de fibra óptica (EFL) operan en dos modos de polarización. Y cada uno de estos tiene una longitud de onda ligeramente distinta. Por lo general, este es un efecto no deseado; se espera que los láseres operen a una sola longitud de onda y con un estado de polarización único.

Sin embargo, la existencia de dos modos de polarización ha permitido el desarrollo de sensores polarimétricos en los que los cambios en la birrefringencia de la cavidad láser, inducidos por perturbaciones externas, se usan para cuantificar la fuerza del campo externo que las produce.

Otro caso en el que la birrefringencia de una fibra láser monomodo es importante es la construcción de amplificadores de fibra óptica. Los EDFAs (amplificadores de fibra dopada con erbio) se usan ampliamente en los enlaces de comunicación por larga distancia para regenerar la señal. Debido a que su ganancia depende del estado de polarización de la señal, para evitar el deterioro que esto produce en la información que se transmite, antes de cada EDFA se usa un despolarizador.

Se han realizado también varios estudios sobre los efectos que tiene la polarización de la luz en las fibras ópticas dopadas con erbio, proponiéndose soluciones basadas en distintas ideas. Por ejemplo, para optimizar la operación de láseres multilínea de fibra óptica (EFLs), se ha usado el efecto no lineal de rotación de la polarización (NPR). La

NPR genera una pérdida espectral que depende de la intensidad de la señal, actuando como ecualizador. Haciendo uso de este efecto se ha demostrado que es posible generar oscilaciones estables en un EFL, con una potencia espectral de salida uniforme y un espaciamiento estable y preciso entre las longitudes de onda, que cumple con el estándar ITU (International Telecommunication Union) (Liu X., 2009). Cabe señalar que estos láseres multilínea tienen un gran potencial en la aplicación del multiplexado por división de longitud de onda (DWDM) en los sistemas de comunicación; además, se usan en sensores ópticos y en general, en instrumentación óptica.

Como resultado de los estudios realizados en CICESE, sabemos que es posible cancelar, para longitudes de onda específicas, el efecto de la birrefringencia residual de una fibra dopada con erbio usando un doble bobinado helicoidal (Treviño F., 2005a).

1.2.3 Control de la birrefringencia

Recientemente se utilizó con éxito un doble bobinado helicoidal para controlar el efecto de la birrefringencia en un aislador óptico, donde las bobinas se construyeron con fibra estándar (Tentori D., 2009).

Tomando en cuenta que todas las fibras monomodo poseen una birrefringencia residual generada durante el proceso de fabricación, y que dispositivos tales como los amplificadores, láseres y sensores de fibra óptica se construyen con componentes elaboradas con fibras ópticas distintas, se propone corregir por separado, para cada componente, el efecto de la birrefringencia en un sistema de fibra óptica.

1.3 Control de la birrefringencia en un multiplexor de bombeo

Los multiplexores de bombeo (WDM) son dispositivos de fibra óptica que forman parte de la arquitectura de amplificadores y láseres de fibra. Son acopladores 2×1 en los que la señal que se amplifica se acopla al haz de bombeo, de forma tal que a la salida del multiplexor viajan ambas a través de la misma fibra. Debido a que las fibras ópticas monomodo exhiben una birrefringencia residual, los dispositivos que con ellas se construyen muestran un desempeño dependiente de la polarización. En este proyecto se propone determinar bajo qué condiciones el uso de bobinados helicoidales dobles permite cancelar el efecto de la birrefringencia de un multiplexor de bombeo construido con fibras monomodo, sobre las señales de entrada en la banda de bombeo (980 *nm*) y en la banda de amplificación (1530 - 1560 *nm*).

Cabe señalar que existen diferencias importantes entre el aislador óptico y el multiplexor de bombeo. El aislador óptico es un dispositivo de polarización que tiene sólo un puerto de entrada y uno de salida, y que salvo por las colas de fibra óptica, no modifica el estado de polarización de la señal. Por su parte, en un multiplexor de bombeo (WDM), el acoplamiento por fusión usado para combinar el haz de bombeo y el de la señal, no preserva el estado de polarización. Además, el WDM trabaja simultáneamente con señales de dos longitudes de onda diferentes, las cuales evolucionan de manera distinta a lo largo de la fibra monomodo.

Como se ha mencionado, una alternativa para controlar el efecto de la birrefringencia sobre el estado de polarización de las señales de un sistema de fibra óptica consiste en cancelar su efecto de manera independiente en cada componente de dicho sistema. Adoptando este punto de vista y con la finalidad de avanzar en la construcción de un PMFA construido con fibra monomodo, en esta tesis se trabajó en la investigación

experimental de los mecanismos involucrados en la cancelación del efecto de birrefringencia mediante el uso de bobinados helicoidales en un multiplexor de bombeo.

1.3.1 Hipótesis

La birrefringencia inducida por el bobinado helicoidal es la dominante.

1.3.2 Objetivo general

Estudiar bajo qué condiciones el uso de bobinados helicoidales dobles permite cancelar el efecto de la birrefringencia sobre las señales de entrada en la banda:

- De bombeo (980 *nm*).
- De amplificación (1530 - 1560 *nm*).

1.3.3 Objetivos específicos

1. Desarrollo de una metodología para el manejo de colas de fibra óptica monomodo, para controlar el efecto de la birrefringencia en el estado de polarización del haz de salida, para la señal de bombeo (980 *nm*).
2. Desarrollo de una metodología para el manejo de colas de fibra óptica monomodo, para controlar el efecto de la birrefringencia en el estado de polarización de la señal de salida, de una señal en la banda C de amplificación (1530-1560 *nm*).
3. Determinar el rango espectral de operación del WDM con control de birrefringencia.
4. Determinar el intervalo de temperaturas en el que opera el WDM con control de birrefringencia.

5. Prueba de verificación de su funcionamiento en un amplificador de fibra dopada con erbio que opera con señales polarizadas.

1.4 Relevancia del tema

Tomando en cuenta que debido a la birrefringencia existen dos modos independientes de propagación, una alternativa propuesta recientemente para incrementar la capacidad de los enlaces de comunicación por fibra es el uso del multiplexado por división de polarización, habiéndose demostrado que se puede duplicar o triplicar su capacidad (Hirooka T., 2011). En sistemas PDM (multiplexado por división de polarización) que operan con dos estados de polarización se transmiten dos señales a la misma longitud de onda usando estados de polarización óptica (SOP) ortogonales. En el receptor, los canales de polarización son demultiplexados en el divisor de haz y detectados independientemente.

El poder construir amplificadores capaces de operar con señales polarizadas (PMFA) permitiría no solo la construcción de enlaces en los que sería posible la operación remota de sensores polarimétricos, sino que posiblemente permitiría integrar el multiplexado en polarización a los enlaces de larga distancia.

Capítulo 2

Polarización

2.1 Introducción

Hoy en día se acepta que una onda luminosa es una superposición de varias ondas. Así mismo, también se le puede considerar como una superposición de dos ondas luminosas armónicas, perpendiculares, de igual vector de propagación y frecuencia (monocromáticas). Según la teoría electromagnética de Maxwell, la luz es una onda electromagnética caracterizada por los vectores \vec{E} (intensidad del campo eléctrico) y \vec{B} (inducción magnética), que vibran perpendicularmente entre sí y a la vez a la dirección de propagación de la energía luminosa. Para nuestro desarrollo enfoquémonos en el vector \vec{E} , considerando que en este tipo de ondas, la función $\vec{E} = (\vec{r}, t)$ varía sinusoidalmente con el tiempo perpendicularmente a la dirección de propagación (eje z), podemos decir entonces que:

$$\vec{E}_x(z, t) = \vec{E}_{0x} e^{i\phi}, \quad (1)$$

donde $\phi = \vec{k} \cdot \vec{z} - \omega t$

Podemos expresar los vectores que constituyen el campo eléctrico como:

$$\vec{E}_x(z, t) = \vec{E}_{0x} e^{i(k \cdot z - \omega t)} \hat{i}, \quad (2)$$

$$\vec{E}_y(z, t) = \vec{E}_{0y} e^{i(k \cdot z - \omega t + \Delta\phi)} \hat{j}, \quad (3)$$

Si sumamos estos dos vectores tenemos:

$$\vec{E}_x(z, t) = \left[\hat{i} E_{0x} e^{i\phi_x} + \hat{j} E_{0y} e^{i\phi_y} \right], \quad (4)$$

donde ϕ_x y ϕ_y son las fases respectivas de cada onda. Si reescribimos la ecuación anterior también se puede expresar como:

$$\vec{E}(z, t) = E_{0x} \left[\hat{i} + \hat{j} \frac{E_{0y}}{E_{0x}} e^{i\Delta\phi} \right] e^{i(\vec{k}z - \omega t)}, \quad (5)$$

Se acepta que E_{0x} y E_{0y} son componentes de \vec{E} , desfasadas $\Delta\phi$. Se puede decir que la onda E esta polarizada sí $\Delta\phi = (\phi_x - \phi_y)$ permanece contante en el tiempo.

2.2 Tipos de polarización

Existen varias formas para describir el estado de polarización de la luz, basadas en como se propaga la misma. Estas variaciones en la propagación hacen que la proyección de la punta del vector \vec{E} genere una figura específica sobre el plano xy y dependiendo de esa figura se nombra al estado de polarización de la luz.

2.2.1 Polarización lineal

Se dice que una onda está linealmente polarizada si en cualquier punto del espacio, el vector del campo eléctrico oscila arriba y abajo a lo largo de una línea recta. Eso quiere decir que las dos componentes del campo \vec{E} (E_{0x} y E_{0y}) están en fase (diferencia de fase $\Delta\phi = 2m\pi$ donde m es cero o cualquier numero entero).

2.2.2 Polarización circular

Se dice que una onda está polarizada circularmente cuando el vector \vec{E} mantiene su módulo fijo, mientras que su dirección gira en el espacio con una frecuencia angular ω constante. La variación de \vec{E} puede representarse mediante un vector de módulo constante que gira alrededor del eje z con velocidad angular ω constante; las componentes

E_{0x} y E_{0y} del vector del campo eléctrico oscilan con la misma amplitud y tienen una diferencia de fase de $\pi/2 - 2m\pi$ donde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm \infty$.

2.2.3 Polarización elíptica

Por lo que a la descripción matemática se refiere, tanto la luz polarizada linealmente como circularmente se puede considerar como caso especial de la luz elípticamente polarizada. Una onda polarizada elípticamente es similar a una onda polarizada circularmente salvo que, las componentes E_{0x} y E_{0y} del vector del campo eléctrico tienen amplitudes y fases diferentes. En este caso la punta del vector \vec{E} describe una elipse cuya orientación con respecto al eje x se describe mediante el ángulo de elipticidad E ($-\frac{\pi}{2} \leq E \leq \frac{\pi}{2}$).

2.3 Grado de polarización

Entre la luz natural (no polarizada) y la luz totalmente polarizada existen, lógicamente, grados intermedios, es decir, existe luz parcialmente polarizada. Esta puede visualizarse como la suma de una luz totalmente polarizada y luz natural. Dependiendo de la proporción de esta mezcla, la luz resultante tendrá un grado de polarización mayor o menor. El grado de polarización se define como:

$$V = \frac{I_p}{I_p + I_n}, \quad (6)$$

Siendo I_p la intensidad de la componente de la luz polarizada e I_n la intensidad de la componente de la luz no polarizada. Cabe mencionar que V no puede ser mayor a uno ni menor a 0 ($0 \leq V \leq 1$).

2.4 Matriz de Mueller de un bobinado helicoidal de fibra óptica

Al usar esta un bobinado helicoidal, la deformación introducida es uniforme a lo largo de la fibra. (Ross, 1984). La birrefringencia residual de la fibra óptica [Treviño et.al., 2005; Tentori et.al., 2007] se modifica de la siguiente manera:

- La curvatura induce una birrefringencia lineal adicional [Ulrich et. al., 1980].
- La torsión genera un efecto geométrico [Tentori et al., 2009], un efecto fotoelástico [Tentori et al., 2012] y una rotación topológica del marco de referencia [Tentori et al., 2001]. La rotación topológica se traduce en la rotación de la esfera de Poincaré.

La matriz de birrefringencia de una fibra óptica embobinada helicoidalmente tiene la forma:

$$\mathbf{M}_{BH} = \mathbf{M}(kL) * \mathbf{M}_f, \quad (7)$$

donde:

$$\mathbf{M}(kL) = \begin{bmatrix} \cos 2kL & \sin 2kL & 0 \\ -\sin 2kL & \cos 2kL & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

En la cual $k = \beta + b\tau$, donde $\beta = 2\pi(1 \cos \epsilon)/l$, (ϵ es el ángulo complementario al ángulo de paso de la hélice y l es la longitud de cada espira [Tentori et al., 2001]) es una constante asociada a la rotación topológica; b es una constante; τ es la torsión de la fibra y L su longitud;

$$\mathbf{M}_{(BH)} = \begin{bmatrix} 1 - 2 \cos^2 2\sigma \sin^2 \delta & -\cos \sigma \sin 2\delta & -\sin 2\sigma \sin^2 \delta \\ \cos \sigma \sin 2\delta & \cos 2\delta & \sin \sigma \sin 2\delta \\ -\sin 2\sigma \sin^2 \delta & -\sin \sigma \sin 2\delta & 1 - 2 \sin^2 \sigma \sin^2 \delta \end{bmatrix} \quad (9)$$

con $\sigma = \pi/2 - 2\epsilon$, donde ϵ es el ángulo de elipticidad de la anisotropía elíptica de la fibra [Kliger et. al., 1990]; δ es el ángulo de retardo entre eigenmodos de polarización

$$\delta = \delta_0 + c\tau, \quad (10)$$

donde δ_0 es el retardo en ausencia de torsión (debido a la birrefringencia del retardador elíptico); c es una constante. Cuando el bobinado se realiza de forma tal que la separación entre espiras consecutivas es mínima, $\tau \approx 0$, por lo que $k \approx 0$, $\mathbf{M}(kL) \approx I$ (matriz identidad) y $\mathbf{M}_f \approx \mathbf{M}_e$, que corresponde a la matriz de un retardador elíptico.

2.5 Esfera de Poincaré

Es una superficie esférica de radio unitario en donde cada punto representa un estado de polarización distinto (Shurcliff, 1964). Cualquier problema que involucre el efecto de un retardador sobre un haz de luz polarizada puede resolverse "mapeándolo" sobre esta esfera-doble (figura 1). Los polos norte y sur corresponden a la polarización derecha e izquierda respectivamente. Cada punto sobre el ecuador representa un estado de polarización lineal.

Cada punto corresponde a una dirección de vibración distinta. El punto H ubicado sobre el ecuador representa luz linealmente polarizada en dirección horizontal. La latitud y la longitud se definen a partir de este punto. El punto V, diametralmente opuesto al punto H, representa a la luz linealmente polarizada en dirección vertical. Dos puntos cualesquiera, diametralmente opuestos, representan un par ortogonal de estados de polarización. La esfera de Poincaré es una herramienta muy adecuada para tratar con retardadores, proporciona un método sencillo para determinar el efecto de cualquier retardador sobre cualquier haz de luz monocromática completamente polarizada.

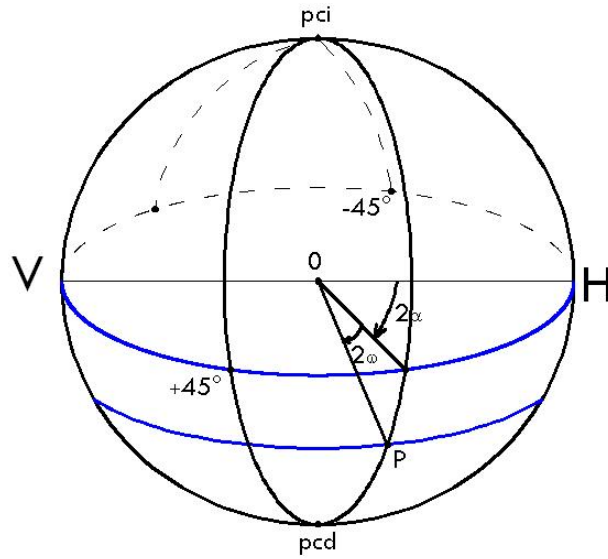


Figura 1. Esfera de Poincaré

2.6 Vectores de Stokes

En la óptica de polarización clásica se describe al estado de polarización de la luz considerando que se trabaja con una onda plana. Cuando la onda de luz está completamente polarizada, esta descripción puede realizarse usando vectores de Jones o la representación trigonométrica. Esta última se basa en el uso de la trayectoria descrita por la punta del vector de campo eléctrico sobre un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda plana. En el caso más general, la curva descrita es una elipse. Esta se define en términos del ángulo de elipticidad y del ángulo azimutal del eje mayor de la elipse con respecto al eje x del sistema de referencia. Cuando la onda de luz está completa o parcialmente polarizada, se representa usando vectores de Stokes, $S = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^t$, donde t indica trasposición. El vector de Stokes se crea a partir de las componentes del campo eléctrico (E_{0x} y E_{0y}) de la señal y del desfase ϕ , entre dichas componentes

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2, \quad (11)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2, \quad (12)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \theta, \quad (13)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \theta, \quad (14)$$

donde, S_0 representa la intensidad total de la luz, la cual está normalizada ($S_0 = I = 1$); S_1 representa la tendencia hacia una polarización lineal horizontal ($S_1 = 1$), vertical ($S_1 = -1$); S_2 representa la tendencia hacia una polarización lineal a 45° ; S_3 representa la tendencia hacia polarizaciones circulares derechas o izquierdas [Kliger et al., 1990]. Para representar el estado de polarización de la luz en la esfera de Poincaré mediante los parámetros de Stokes (S_0, S_1, S_2, S_3), los tres últimos elementos se toman como coordenadas cartesianas; mientras que S_0 representa el radio de la esfera. Se trabaja con una esfera unitaria. Una forma alternativa de representar un estado de polarización en la esfera de Poincaré es mediante los parámetros de la elipse de polarización, específicamente, el ángulo azimutal y el de elipticidad; usando coordenadas esféricas y ángulos dobles:

$$\tan(2\alpha) = \frac{S_2}{S_1}, \quad (15)$$

$$\sin(2\epsilon) = \frac{S_3}{S_0}, \quad (16)$$

Los parámetros de Stokes pueden relacionarse también con el ángulo de elipticidad (ϵ) y el ángulo azimutal (α) (figura 2) usando las siguientes ecuaciones:

$$S_1 = \cos(2\epsilon) \cos(2\alpha), \quad (17)$$

$$S_2 = \cos(2\epsilon) \sin(2\alpha), \quad (18)$$

$$S_3 = \sin(2\epsilon), \quad (19)$$

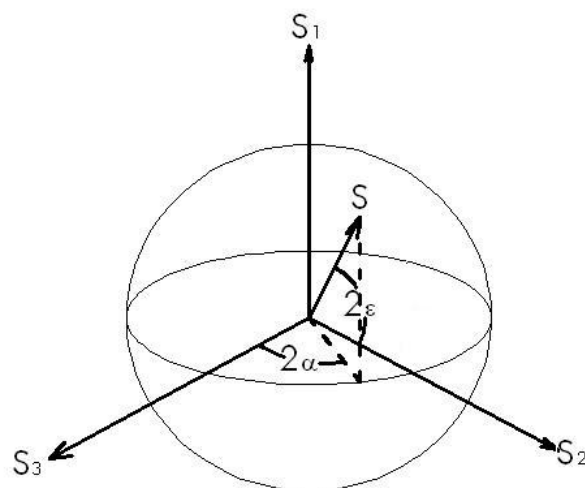


Figura 2. Esfera de Poincaré en la que se representa un estado de polarización S en coordenadas cartesianas mediante los parámetros de Stokes (S_1 , S_2 , S_3) y en coordenadas esféricas por medio de los ángulos azimutales (α) y de elipticidad (ϵ)

Tabla 1. Vectores de Stokes para los principales estados de polarización

Polarización de la luz	Vector de Stokes
Luz no polarizada	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Polarización horizontal	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Polarización vertical	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Polarización lineal a $+45^\circ$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Polarización lineal a -45°	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Polarización circular derecha	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
Polarización circular izquierda	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$

Capítulo 3

Anisotropía Óptica

En los medios anisótropos sus propiedades físicas dependen de la dirección a lo largo de la cual se miden en el medio. De esta forma, la respuesta de los medios cristalinos anisótropos (anisotropía óptica natural) a la luz que se propaga en su interior depende de la dirección del campo eléctrico, es decir, de su polarización. Por otra parte, un medio isótropo se puede convertir en anisótropo por medio de ciertos agentes externos (campos eléctricos, magnéticos, etc) que modifiquen su permitividad dieléctrica, y por tanto sus propiedades ópticas de manera direccional. De manera análoga, en un medio previamente anisótropo, su anisotropía se verá modificada en alguna medida por el agente externo (anisotropía óptica inducida).

En este capítulo se presenta la definición de conceptos asociados al efecto de la birrefringencia y algunos métodos de medición de dicho efecto. Además se explicará la importancia de disminuir o corregir este efecto de la birrefringencia.

3.1 Birrefringencia

En las fibras, ya sea por efectos de estiramiento, curvatura, torsión, por la concentración de impurezas, o bien, por defectos en la simetría de la guía de onda, la luz cambia su forma de propagación; Esto a causa de que el cambio en la estructura hace que se presente un cambio molecular en el material (anisotropía) y este cambio produce una pérdida en la simetría del índice de refracción. Por lo tanto tendremos que el índice de refracción variará dependiendo de las imperfecciones en la simetría del núcleo de la

fibra óptica. Como consecuencia tenemos un índice de refracción máximo (n_{max}) por donde la luz se propaga de una manera más lenta, por lo cual se le conoce como el eje lento y un índice de refracción mínimo (n_{min}) por donde la luz se propaga de forma más rápida, por lo que se le conoce como eje rápido. En la figura 3 se muestra el corte transversal del núcleo de una fibra óptica en la cual se ilustra lo explicado.

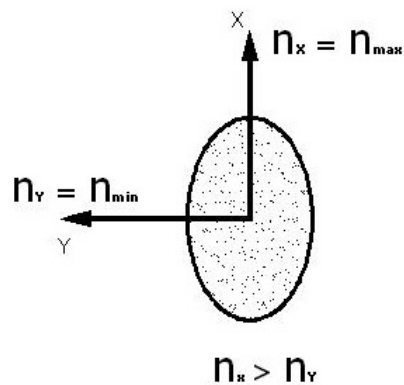


Figura 3. Corte transversal del núcleo de una fibra óptica con geometría elíptica la cual presenta birrefringencia.

El gran problema con el efecto de la birrefringencia es que induce un retardo en los modos de polarización al que le llamaremos $\Delta\tau$, el cual se puede ser visto como un desfase entre los diferentes caminos ópticos por donde se propaga la luz. Como consecuencia de este fenómeno podemos tener a la salida de la fibra óptica un ensanchamiento (incluso hasta la pérdida de la señal). Esto a causa de que la señal óptica se descompone en dos pulsos que viajan independientemente a distintas velocidades. En la figura 4 se ilustra este comportamiento.

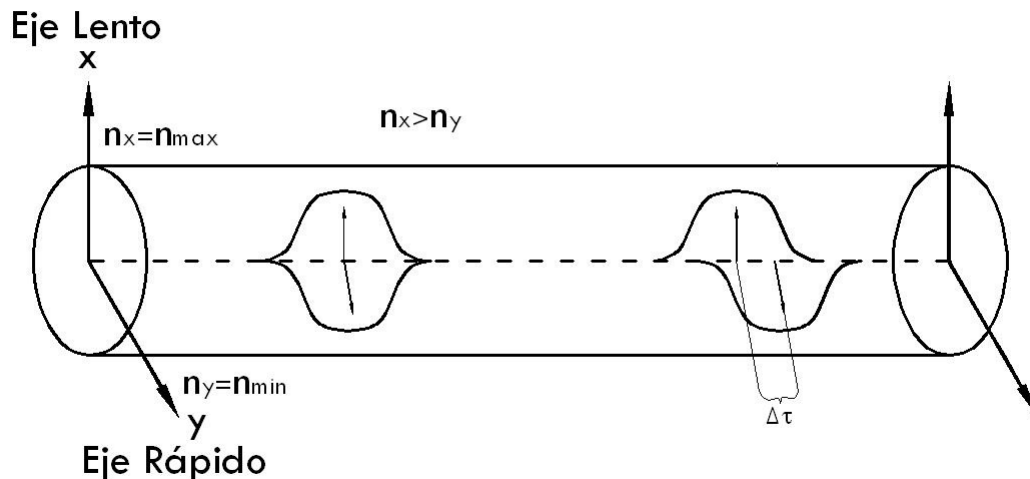


Figura 4. Se muestra como el efecto de birrefringencia afecta a un pulso óptico cuando se propaga por una fibra óptica.

3.2 Medida de la birrefringencia

La birrefringencia ha sido ampliamente estudiada desde su descubrimiento en el siglo XVII, siendo su medida una práctica habitual en la actualidad. La medida de la actividad óptica en medios que no exhiben birrefringencia lineal carece de dificultad y se puede realizar con un polarímetro convencional. El estudio de la actividad óptica de cristales en direcciones diferentes a los ejes ópticos presenta una gran dificultad debido principalmente a que la birrefringencia lineal es típicamente tres órdenes de magnitud más grande que la birrefringencia circular. Además, los efectos de dicroísmo lineal, imperfecciones de los cristales, rugosidades de la superficie, errores instrumentales, anchura de banda finita y divergencia del haz, dificultan enormemente la determinación de la actividad óptica. De este modo, no es hasta aproximadamente 100 años después de su aparición cuando aparece el primer método de medida eficaz [(Arago, 1811), (Biot, 1812), (Bruhat G., 1935), (Applequist, 1987)]. La interacción entre la luz y el medio material birrefringente puede describirse de diferente forma (Moxon J.R.L., 1991):

1. Reflexión o Elipsometría de Superficie: cuando la luz se refleja en la interfase

entre dos medios ópticamente diferentes, el estado de polarización cambia debido a la diferencia de los coeficientes de reflexión o transmisión para las dos ondas linealmente polarizadas paralela y perpendicular al plano de incidencia.

2. Transmisión o Polarimetría: aquí el estado de polarización cambia continuamente cuando la luz progresa a través de un medio que exhibe anisotropía óptica.
3. Elipsometría por Esparcimiento: ésta tiene lugar cuando la luz atraviesa un medio con índices de refracción espacialmente inhomogéneos causados por la presencia de centros de esparcimiento ("scattering").

3.2.1 Técnica de polarizadores cruzados

El método más extendido para medir la birrefringencia es la técnica de los polarizadores cruzados (Azzam R.M.A., 1989). El dispositivo consiste en dos polarizadores montados a ambos lados de la muestra, tal como se dispone en la figura 5. Los ejes de transmisión de los polarizadores forman un ángulo de 90° uno respecto del otro. La técnica es la base de los polariscopios más sencillos, desarrollados para el análisis fotoelástico, y de los microscopios de polarización más simples. Al polarizador más próximo a la fuente de luz se le denomina polarizador mientras que al más próximo al observador (o al detector en su caso) se le denomina analizador.

Suponiendo que los polarizadores son perfectos y que están perfectamente en posición de cruzados, el sistema no permitiría el paso de la luz a través del mismo a no ser que la muestra cambie el estado de polarización de la luz. La expresión de la intensidad para una muestra birrefringente colocada entre polarizadores cruzados puede obtenerse usando las matrices de Jones, siendo:

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin^2(\theta_0 - \alpha), \quad (20)$$

donde I_0 es la intensidad de la fuente luminosa (ignorando la absorción de la muestra), δ es la diferencia de fase, $(\theta_0 - \alpha)$ es el ángulo entre la inclinación de la indicatriz (θ_0) en la muestra y la orientación del polarizador (α).

Habitualmente se utiliza una fuente de luz blanca para inspección visual, θ_0 se obtiene rotando la muestra hasta que $I = 0$, donde $\alpha = \theta_0 \pm 90^\circ$. Para obtener la máxima intensidad de luz, se rota la muestra de forma que $(\theta_0 - \alpha) = 45^\circ$. Puesto que α depende de la longitud de onda, también lo hará la intensidad I . La dependencia con la longitud de onda significa que, para algunas longitudes de onda, habrá una interferencia negativa entre los dos modos propios de la luz transmitida, ($\sin^2 \frac{\delta}{2} = 0$). Por tanto, bajo luz blanca, una muestra birrefringente generalmente aparecerá coloreada entre polarizadores cruzados debido a que algunas longitudes de onda no estarán presentes en la luz transmitida por la muestra. El color de la luz transmitida puede relacionarse directamente con la birrefringencia, si tanto ésta como la intensidad de la luz I_0 pueden considerarse constantes en el espectro visible (Harley R.T., 1975).

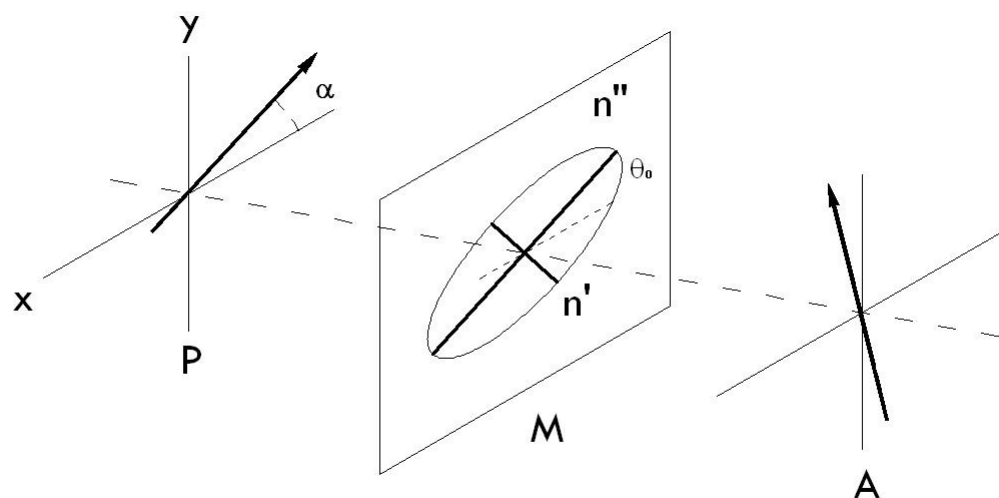


Figura 5. Muestra (M) entre polarizador (P) y analizador (A) ortogonales. Los ejes de la indicatriz óptica se denotan como n' y n''

Aunque este método es rápido, presenta diversos inconvenientes:

- En muestras no homogéneas puede resultar complicado encontrar los ángulos θ_0 de todos los elementos de la muestra.
- Hay una ambigüedad en la determinación de θ_0 , puesto que la intensidad de la señal no cambia si el cristal se rota 90° .
- El color visto depende del contenido espectral de la fuente de luz.
- En general, sólo se puede esperar que la birrefringencia permanezca constante en todo el espectro visible.

3.2.2 Métodos de modulación

Usando dispositivos electrónicos tales como fotomultiplicadores o cámaras CCD, es posible determinar la birrefringencia a través del análisis del cambio en intensidad para los diferentes caminos ópticos de la luz. Tales sistemas automatizados son más sensibles a cambios en la birrefringencia que la inspección visual (Courstens, 1972). Un cambio en el camino óptico de la luz puede conseguirse variando la orientación o el desfase de los diferentes elementos ópticos del sistema.

3.2.3 Analizador rotante

Este método (Chudakov V.S., 1972) se utilizó para medir rotación magneto-óptica y es conveniente para observar cambios relativos en la birrefringencia en función de una variable continua (temperatura, posición de la muestra, etc.). Los componentes ópticos de este dispositivo son (figura 6): (a) un polarizador inicial; (b) una lámina de cuarto de onda colocada a 45° respecto del polarizador, produciendo luz circularmente polarizada

incidente sobre la muestra; (c) la muestra, con orientación θ_0 o y diferencia de fase δ ;
 (d) un analizador, rotando a una frecuencia angular ω .

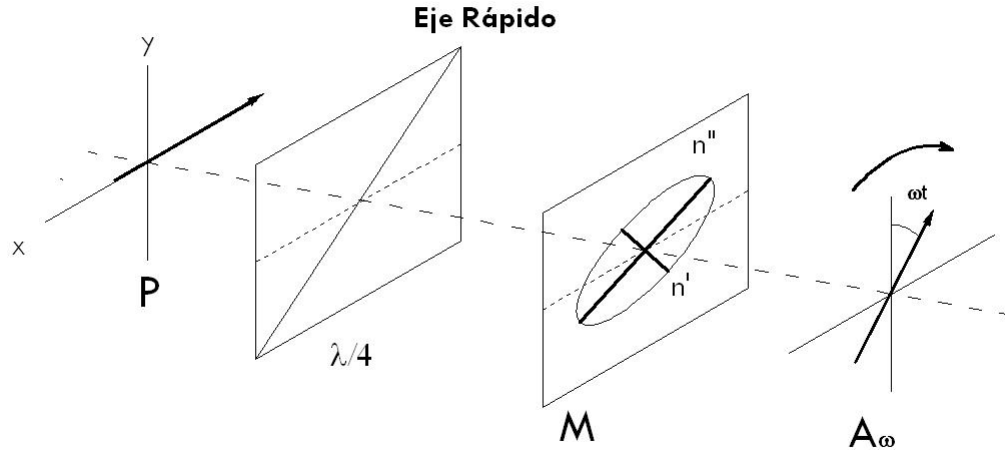


Figura 6. Componentes ópticos del dispositivo que mide la birrefringencia en función de una variable continua

En estas condiciones la intensidad de luz que pasa a través del analizador toma la forma

$$I = (I_0/2)[1 + \sin 2(\omega t - \theta_0) \sin \delta], \quad (21)$$

resultando en una señal alterna de frecuencia 2ω , fase $2\theta_0$ que da una medida de la rotación de la indicatriz óptica, y amplitud proporcional a $\sin \delta$.

Este dispositivo tiene dos modos de operación:

- Si el valor inicial de $\delta = 0$ ó $\delta m = m\pi$ la señal será lineal y el sistema da una medida directa de la diferencia de camino óptico. Este modo de operación es útil en aquellos casos donde el cambio en la birrefringencia es pequeño. Para satisfacer el requerimiento de que $\delta \approx m\pi$ se puede insertar un compensador en el camino óptico. La técnica no depende directamente de la intensidad de la luz y debe de ser calibrada para obtener una escala absoluta.

- Si el cambio en el retardo óptico es grande ($L\Delta n \gg \lambda$), la salida del instrumento será periódica, obteniéndose el cambio en el retardo óptico por las posiciones de los máximos y mínimos de la señal.

Capítulo 4

Desarrollo experimental

El objetivo principal de la investigación es anular el efecto de la birrefringencia, durante el proceso de transmisión de información estar seguro que el estado de polarización (SOP) no se vea modificado por el multiplexor de bombeo. En este capítulo se desarrollará y explicará la metodología que fue utilizada para el análisis de las medidas y pruebas elaboradas, es importante explicar los métodos experimentales que se siguieron para poder lograr el funcionamiento del sistema.

4.1 WDM

El multiplexor de bombeo (WDM) es un dispositivo que forma parte de la arquitectura de los amplificadores y láseres de fibra óptica. Básicamente este dispositivo se logra empalmando un tramo corto de dos fibras ópticas para que se mezclen las dos señales (dividiendo la potencia de las señales) y se propaguen por un mismo medio. Son acopladores 2×1 en los que la señal que va a ser amplificada se acopla al haz de bombeo, de forma tal que a la salida viajan ambas a través de la misma fibra. Tanto en un láser de fibra, como en un amplificador, el WDM se empalma a la entrada de la fibra láser. A manera de ejemplo, en la Figura 7 se muestra el esquema básico de un WDM.

En la actualidad algunos de estos dispositivos se construyen con fibras birrefringentes (PM, panda) para usarse en: 1) amplificadores de fibra óptica que preservan el estado

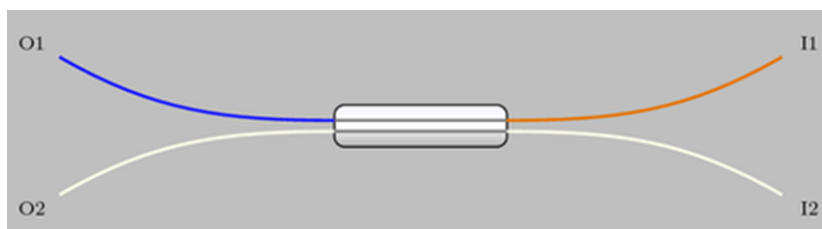


Figura 7. Esquema básico de un WDM, dos brazos de entrada ($I1, I2$), dos brazos de salida ($O1, O2$)

de polarización (PMFA), 2) láseres de fibra óptica con un ancho de línea muy angosto y de alta estabilidad: espectral, en polarización y en potencia, 3) sistemas coherentes de láseres de fibra óptica; 4) multiplexado denso de señales. Sin embargo, como ocurre con todos los dispositivos de fibra birrefringente, para que operen eficientemente es necesario trabajar con señales linealmente polarizadas y alinear el estado de polarización lineal de la señal que entra a cada fibra con el eje lento (o rápido) de birrefringencia (Tentori D., 2001).

4.2 Elaboración de bobinas

El primer paso es la elaboración de dos bobinas helicoidales en el brazo de entrada y de bomba del WDM. La importancia de la perfecta elaboración de estas bobinas determina la precisión con la que el efecto de la birrefringencia residual es disminuida. Estas bobinas deben de tener una simetría casi perfecta entre ellas; para tener el menor grado de imperfecciones simétricas es recomendable que a los tramos de fibra se les aplique una liberación de esfuerzos antes de empezar el bobinado. Al momento de elaborar las bobinas se debe de tener cuidado de que ningún tramo de la fibra se doble o tuerza y que se tengan el mismo número de vueltas de fibra óptica en cada una. Esto para que el camino óptico de la señal sea el mismo. Por último es importante que el sentido del enrollado de la fibra en cada bobina sea opuesto, cuidando que la bobina

siga siendo móvil (un grado de libertad) y la fibra no sufra ninguna ruptura si se varía la orientación de la bobina alrededor de un eje de giro.

4.3 Marco de referencia para el brazo de entrada 1550nm

El marco de referencia nos ayuda a medir de manera correcta el estado de polarización de una señal, el cual buscamos que se mantenga mientras se propague por la fibra. En este caso para realizar esta tarea se hace uso de un analizador de polarización (Agilent 8509C (1470nm - 1640nm)). Para poder crear un marco de referencia adecuado lo primero que se necesita es buscar el estado de polarización de la señal dentro de la esfera de Poincaré, para después situarla en uno de los polos (estado de polarización circular). Una vez logrado esto y persiguiendo la mayor exactitud posible, se le dan tres coordenadas al analizador para que este las ubique sobre el ecuador de la esfera (estados de polarización lineales); con estas tres marcas el analizador genera los puntos de referencia para producir el marco de referencia a la longitud de onda de la señal estudiada. Los puntos de referencia están separados por 60 grados cada uno para así cubrir un barrido de 180 grados en total. Cabe mencionar que el marco de referencia se debe de ajustar para cada longitud de onda deseada y para cada valor de potencia deseado.

4.4 Implementación del arreglo óptico para 1550nm

El objetivo de la investigación es anular el efecto de la birrefringencia, cuando se transmite información. Estar seguro que el estado de polarización (SOP) a la entrada y salida del dispositivo son iguales. En el desarrollo de la investigación se logró anular el efecto de la birrefringencia. Para lograr esto fue necesario hacer un doble bobinado

en la punta de entrada en el WDM, teniendo mucho cuidado al hacer estas bobinas ya que:

- Se necesita que la fibra óptica no presente torsiones a la hora de hacer el bobinado
- Se necesita que el sentido en la rotación de la fibra sea contrario en ambas bobinas.
- Los pedazos de fibra óptica del brazo de entrada que no estén embobinados deben de quedar completamente rectos.
- Se debe de alguna manera evitar que se mueva la fibra óptica una vez colocada.

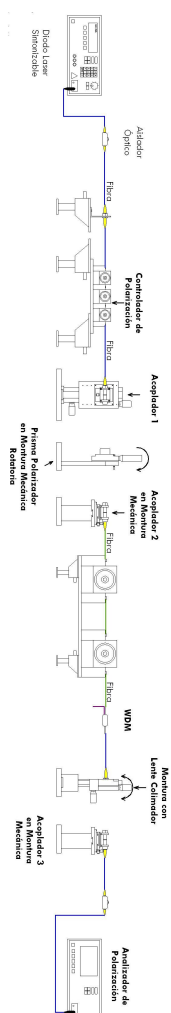


Figura 8. Arreglo óptico para anulación del efecto de la birrefringencia

Teniendo estas consideraciones en cuenta, el procedimiento a seguir, haciendo uso del arreglo óptico de la figura 8, es:

El primer paso es crear, en el analizador de polarización, un marco de referencia para la señal de salida del diodo sintonizable. Para hacer esto es importante remover los demás componentes del arreglo óptico dejándolo de la siguiente manera (figura 9), se puede apreciar como el WDM, la montura mecánica de rotación, y el acoplador 3 fueron removidos temporalmente del arreglo.

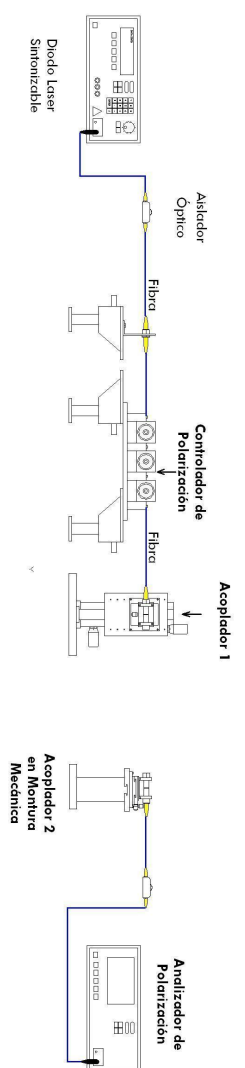


Figura 9. Arreglo óptico para generar el marco de referencia

Manipulando los controladores de polarización se consigue que el estado de polarización a la entrada del polarizador lineal que definirá el SOP de la señal que entrará al WDM sea circular; ya sea derecho o izquierdo. Una vez obtenido dicho estado de polarización, se agrega el polarizador (figura 10) para garantizar que el SOP de entrada al WDM sea lineal, se muestra también en la tabla 2.

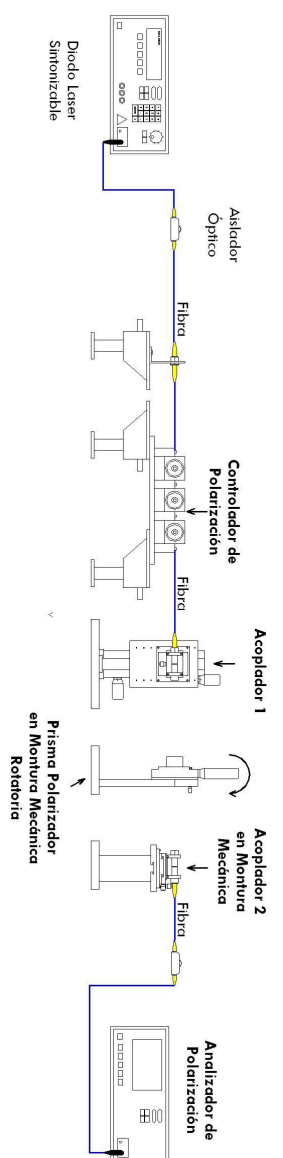
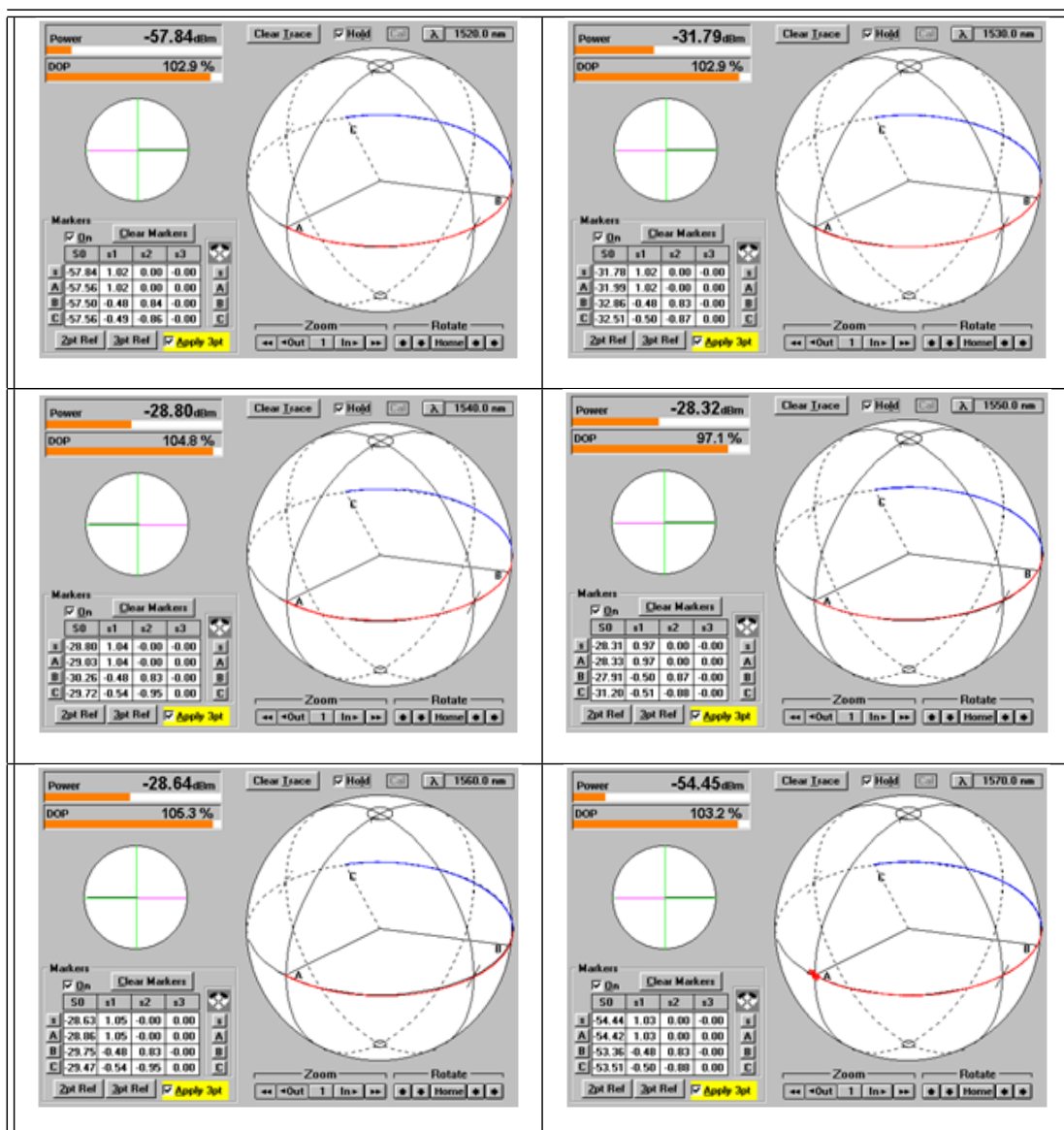


Figura 10. Arreglo óptico para generar el marco de referencia con montura mecánica rotacional con un polarizador

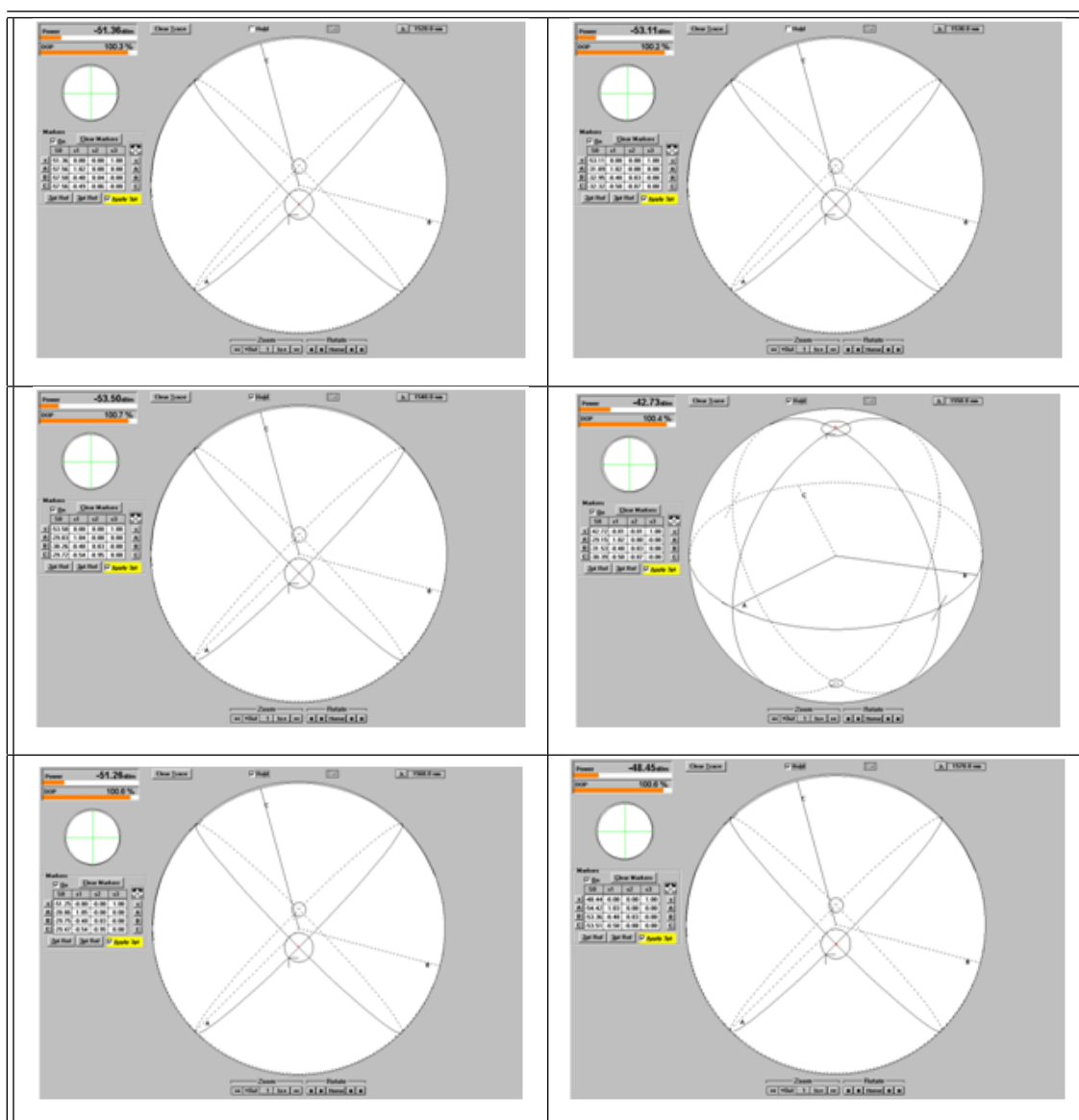
Tabla 2. Verificación del SOP que se introducirá al WDM (Lineal)



Una vez hecha la verificación de que el estado de polarización de entrada es lineal, se agrega el WDM, con el doble bobinado en el brazo de entrada y se extrae el polarizador. Bajo estas condiciones, el SOP que se inyecta al WDM es circular (derecho o izquierdo). A continuación, modificando la orientación relativa de las bobinas del doble bobinado

(tabla 3) se hace que el estado de polarización a la salida del WDM coincida con el SOP circular de entrada.

Tabla 3. Estados de polarización circular. Se muestran las imágenes del estado de polarización circular que se logra por medio del movimiento del doble bobinado que se elaboró.



Cuando el estado de polarización a la salida del WDM coincide con el SOP circular de entrada (tabla 3), agregamos el polarizador y evaluamos si se retiene a la salida un

estado de polarización lineal.

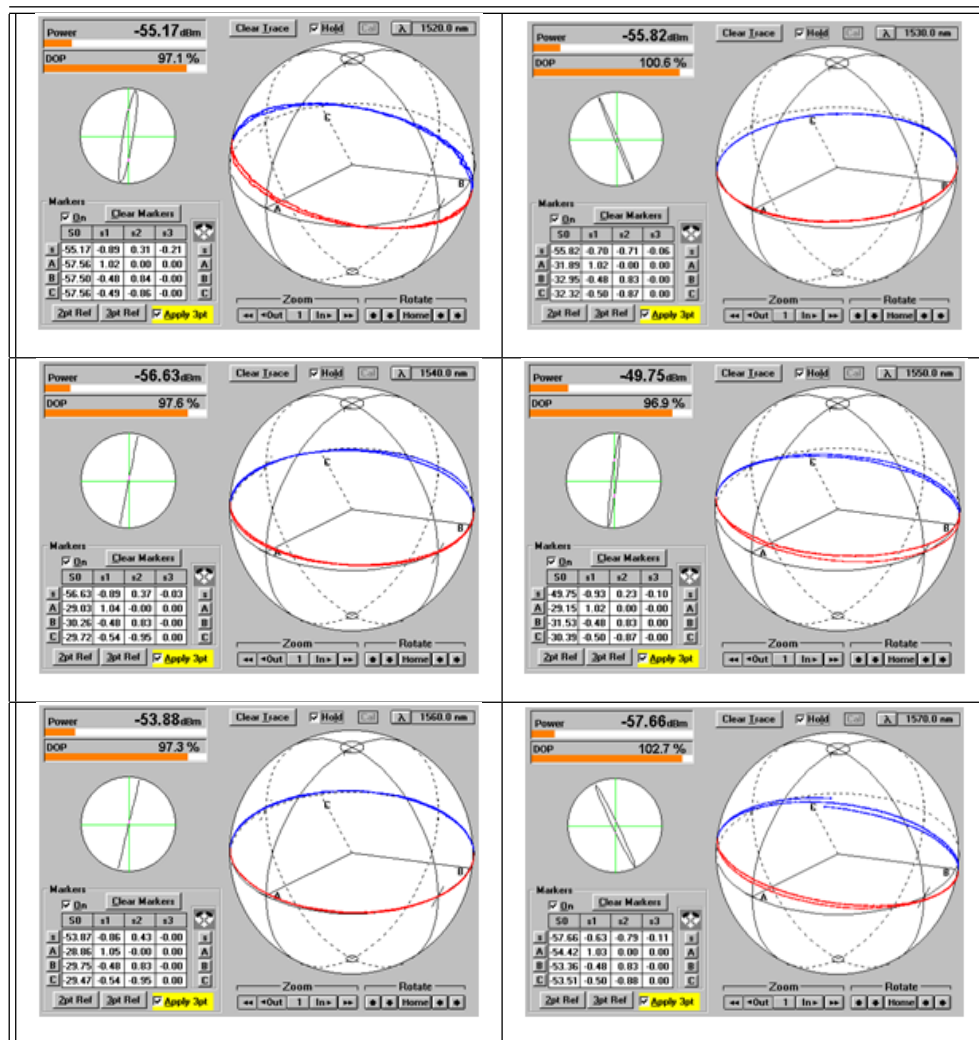
4.5 Resultados obtenidos para el brazo entrada

Una vez logrado que el estado de polarización a la salida del WDM coincida con el SOP circular de entrada (tabla 3), agregamos el polarizador y evaluamos si se retiene a la salida un estado de polarización lineal. Al rotar 360° el ángulo azimutal del polarizador se observó que el estado de polarización lineal se mantiene sólo para $1560nm$ (tabla 5). La variación máxima obtenida para cada longitud de onda se presenta en la tabla 4. De acuerdo con ella, para una tolerancia en el ángulo de elipticidad de 6° grados, la banda espectral en la que esta corrección funciona va de $1520nm$ a $1570nm$.

Tabla 4. Valores máximos en grados del ángulo azimutal

Longitud de onda en nm	Ángulo de elipticidad máximo en grados
1520	5.46°
1530	1.98°
1540	2.08°
1550	4.39°
1560	1.02°
1570	4.53°

Tabla 5. Barrido de 360 grados, rango de 1520nm a 1570nm (obtenidos una vez reintegrado el polarizador al arreglo óptico).



4.6 Implementación del arreglo óptico para brazo de bombeo 980nm

Para la anular el efecto de la birrefringencia en el brazo de la fibra óptica de entrada del WDM, para el brazo de bombeo (980nm), se siguió el mismo procedimiento. Sin embargo, el arreglo polarimétrico usado para el brazo de la señal no funciona para 980nm porque esta longitud de onda se encuentra fuera de la banda espectral de operación

del analizador de polarización que se utilizó para el brazo de entrada. Por esta razón fue necesario construir otro arreglo polarimétrico.

4.7 Marco de referencia para brazo de bombeo $980nm$

Para generar el estado de polarización circular de entrada se trabajó de nuevo sin el polarizador lineal a la entrada, haciendo que el haz de luz colimada viajara de la salida a la cabeza detectora del analizador de polarización para señales de 980 nm . Los resultados obtenidos al manipular el controlador de polarización para producir el SOP circular deseado se muestran en la figura 11.

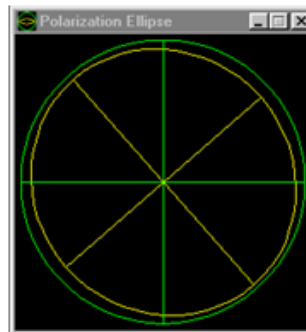


Figura 11. Estado de polarización de entrada al brazo de bombeo ($980nm$).

Después de lograr el estado de polarización circular a la entrada se introduce el polarizador para generar un estado de polarización de entrada lineal (figura 12).

Retirando el polarizador lineal y usando la señal de 980 nm circularmente polarizada (figura 11) se introdujo dicha señal al brazo de bombeo del WDM, para posteriormente por medio de la variación en la orientación relativa de las bobinas del doble bobinado lograr la obtención de una salida del WDM con un estado de polarización circular como se muestra en la figura 13.

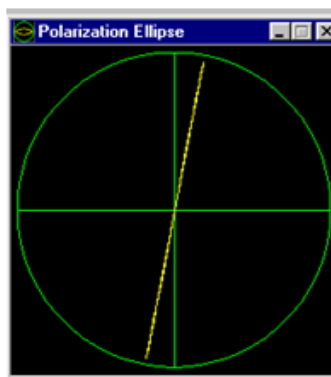


Figura 12. Estado de polarización lineal obtenido a la salida del polarizador ($980nm$).

4.8 Resultados obtenidos para el brazo de bombeo $980nm$

Una vez que se logró un SOP a la salida del WDM como el que se muestra en la figura 13 (SOP circular) se procedió a agregar nuevamente el polarizador lineal a la entrada del WDM, para ver la respuesta que se obtiene a la salida del WDM con doble bobinado en el brazo de bombeo, la cual se muestra en la figura 14, donde se puede apreciar que el SOP de salida es lineal.

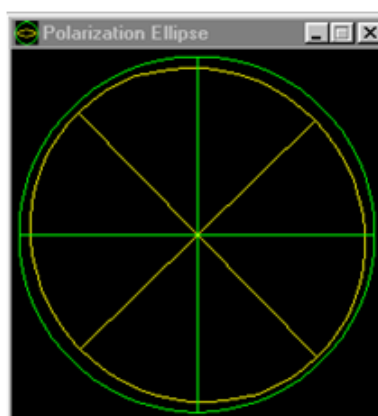


Figura 13. Estado de polarización circular obtenido a la salida del WDM con doble bobinado en el brazo de bombeo ($980nm$).

Variando el ángulo azimutal del polarizador lineal de entrada se encontró que se obtiene

una cancelación apreciable del efecto de la birrefringencia del WDM para el brazo de bombeo. La trayectoria resultante del barrido del ángulo azimutal del SOP lineal de entrada se muestra en la figura 15 . El cambio en el ángulo de elipticidad fue de 1.72 grados.

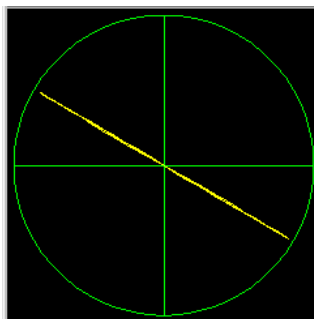


Figura 14. Estado de polarización lineal obtenido a la salida del WDM con doble bobinado en el brazo de bombeo (980nm).

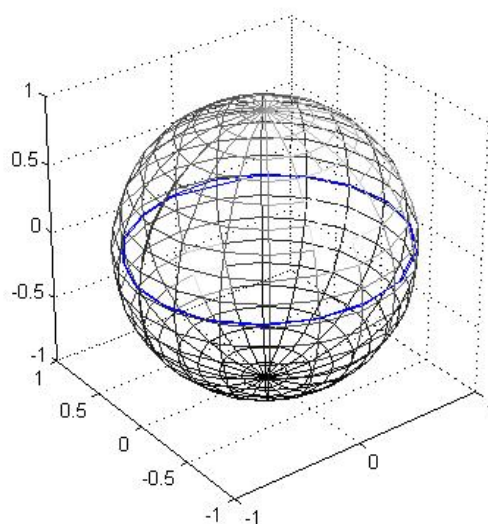


Figura 15. Evolución del SOP a la salida del WDM con doble bobinado en el brazo de 980nm, al variar 360° el ángulo azimutal del eje del polarizador lineal de entrada.

Capítulo 5

Control de la temperatura

5.1 Introducción

Existen diferentes factores que pueden llegar a afectar el estado de polarización de la fibra óptica (SOP), entre los cuales domina la condición de la fibra óptica:

- Si está totalmente estirada o tiene secciones que presentan algún tipo de doblez.
- Si la fibra óptica en alguna parte se encuentra presionada.
- El acoplamiento en los conectores.

Una pequeña variación produce un cambio en la forma en cómo se transmite la información. Además de esto, es importante la influencia de los campos externos. En esta sección se estudia experimentalmente la influencia de la temperatura.

5.2 Sistema de control de la temperatura

5.2.1 Controlador de acción proporcional (P)

En este regulador la señal de accionamiento es proporcional a la señal de error del sistema. Si la señal de error es grande, el valor de la variable regulada es grande y si la señal de error del sistema es pequeña, el valor de la variable regulada es pequeña. Es el más simple de todos los tipos de control y consiste simplemente en amplificar la señal de error antes de aplicarla a la planta o proceso. La función de transferencia de este tipo de control se reduce a una variable real, que determinará el nivel de amplificación

del elemento de control.

Teóricamente, en este tipo de controlador, si la señal de error es cero, la salida del controlador también será cero. La respuesta, en teoría es instantánea, con lo cual el tiempo no interviene en el control. Sin embargo, en la práctica, esto no es así, de forma que, si la variación de la señal de entrada es muy rápida, el controlador no puede seguir dicha variación y seguirá una trayectoria exponencial hasta alcanzar la salida deseada. El mayor defecto que tiene este tipo de control es que si la ganancia proporcional es demasiado elevada, el controlador provoca grandes cambios en el elemento actuador frente a ligeras desviaciones de la variable regulada. Si la ganancia proporcional es demasiado pequeña, la respuesta del controlador será demasiado débil y produciría una regulación no satisfactoria.

5.2.2 Controlador de acción integral (I)

En un controlador integral, la señal de salida del mismo varía en función de la desviación y del tiempo en que se mantiene la misma, o dicho de otra manera, el valor de la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error. Esto implica que mientras que en la señal proporcional no influya el tiempo, la salida únicamente varía en función de las modificaciones de la señal de error. En este tipo de control la acción varía según la desviación de la salida y el tiempo durante el que esta desviación se mantiene. El problema principal del controlador integral radica en que la respuesta inicial es muy lenta, y hasta pasado un tiempo, el controlador no empieza a ser efectivo. Sin embargo elimina el error remanente que tenía el controlador proporcional.

5.2.3 Controlador de acción proporcional e integral (PI)

En la práctica no existen controladores que tengan sólo acción integral sino que llevan combinada una acción proporcional. Estas dos acciones se complementan. La primera en actuar es la acción proporcional (instantáneamente) mientras que la integral actúa durante un intervalo de tiempo. Así y por medio de la acción integral se elimina la desviación remanente (proporcional).

5.2.4 Controlador de acción proporcional y derivativa (PD)

Esta acción, al igual que la integral, no se emplea sola, sino que va unida a la acción proporcional (PD). Al incorporar a un controlador proporcional las características de un controlador derivativo, se mejora sustancialmente la velocidad de respuesta del sistema; consta de una menor precisión en la salida (durante el intervalo de tiempo en que el control derivativo esté funcionando).

En este tipo de controladores, debemos tener en cuenta que la derivada de una constante es cero y, por tanto, en estos casos, el control derivativo no ejerce ningún efecto, siendo únicamente útil en los casos en los que la señal de error varía en el tiempo de forma continua. Por tanto, el análisis de este controlador ante una señal de error de tipo escalón no tiene sentido y, por ello, se ha representado la salida del controlador en función de una señal de entrada en forma de rampa unitaria.

El controlador PD se utiliza poco, debido a que no puede compensar completamente las desviaciones remanentes del sistema y si la componente D es un poco grande, lleva rápidamente a la inestabilidad del bucle de regulación.

5.2.5 Controlador de acción PID

Aprovecha las características de los tres reguladores anteriores, de forma, que si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral y, si la señal de error varía rápidamente, predomina la acción derivativa. Si la maniobra es lenta, la acción derivativa no tendrá apenas efecto. Si la maniobra requiere mayor velocidad de actuación, la acción de control derivativo adquirirá mayor importancia, aumentando la velocidad de respuesta inicial del sistema y posteriormente actuará la acción proporcional y finalmente la integral. En el caso de una maniobra muy brusca, el control derivativo tomará máxima relevancia, quedando casi sin efecto la acción proporcional e integral, lo que provocará muy poca precisión en la maniobra. Tiene la ventaja de tener una respuesta más rápida y una inmediata compensación de la señal de error en el caso de cambios o perturbaciones. Tiene como desventaja que el bucle de regulación es más propenso a oscilar y los ajustes son más difíciles de realizar.

5.3 Dependencia de la temperatura

Para el control de la temperatura, se utilizó un control de temperatura 89000-00 (figura 16), con el cual se logró hacer un sistema de control automático para mantener la temperatura estable adentro de una cápsula la cual está fabricada de metal para la mejor transferencia de calor. Sobre esta cápsula se enrolló una resistencia por donde fluiría la corriente eléctrica y esto produce el aumento de la temperatura. Esta resistencia fue colocada intentando que quedara lo más uniforme posible sobre la cápsula.

El sistema de control utilizado para mantener una temperatura estable, fue por un control PID para los cuales se encontraron los valores de forma práctica ya que no se tenía la información suficiente para usar la ecuación de repuesta al impulso.

La forma en que se logró el incremento de la temperatura deseada fue variando los valores de la banda proporcional del sistema de control, hasta que el controlador empezara a calentar de una forma conveniente para el control de la temperatura. Cabe mencionar que los valores del tiempo de integración y de la velocidad de derivación se ponen en cero. Una vez encontrado este valor para la banda proporcional, se procede a ponerla en la mitad y hacer un ajuste de los otros valores, teniendo en cuenta que el tiempo de integración es el tiempo que tarda el sistema en aumentar o disminuir un paso y la velocidad de derivación se usa para manejar el "overshoot".

Un parámetro importante es la histéresis del sistema ya que esta es la que nos asegura que los valores de la temperatura no sean ni muy altos ni muy bajos, y así mantener la temperatura dentro de un rango estable.



Figura 16. Controlador de temperatura 89000-00

5.4 Desarrollo experimental para el brazo de entrada para longitudes de onda de 1520 *nm* - 1570 *nm*

Para el análisis experimental de la influencia de campos externos como la temperatura, el doble bobinado del brazo de entrada del WDM se introduce en una cápsula cuya temperatura interna puede controlarse (figura 17).

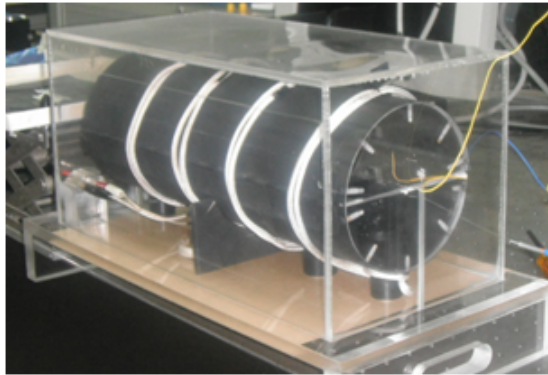


Figura 17. Cápsula térmica

Se hicieron incrementos de temperatura de aproximadamente 5 grados centígrados, desde la temperatura ambiente (aproximadamente 20 grados centígrados) a 40 grados. Se verificó que la temperatura a la que se realizó cada medida fuera estable.

Para cada temperatura se procedió a hacer barridos de 2 grados de 0 a 360° para cada una de las longitudes de onda de trabajo (1520nm a 1570nm cada 10nm), y se observó como la temperatura afecta al estado de polarización de la fibra óptica.

A continuación se presentan en la tabla 6 los barridos obtenidos al variar la temperatura. En cada gráfica están desplegados los barridos para las diferentes temperaturas, usando la siguiente codificación:

- Color azul: 20 grados centígrados
- Color rojo: 25 grados centígrados
- Color verde: 30 grados centígrados
- Color amarillo: 35 grados centígrados
- Color morado: 40 grados centígrados

Podemos observar claramente como para todas las longitudes de onda hay un cambio significativo al variar la temperatura. Del barrido a temperatura ambiente (barrido azul) a la temperatura más alta 40 grados centígrados (barrido morado) el cambio experimentado es muy alto. Los valores máximos para el cambio en el ángulo de elipticidad se presentan en la tabla 7, donde podemos observar que las perturbaciones que presenta el estado de polarización de las señales son bastante grandes y ya no es posible asegurar que el estado de polarización de la señal de entrada se preserve.

5.5 Desarrollo experimental para el brazo de bombeo 980 nm

Para evaluar la relevancia de un cambio en la temperatura, se introdujo el brazo de bombeo con el doble bobinado a la cápsula con control de temperatura y por medio de un controlador de temperatura se varió la temperatura en un rango de 20 grados a 40 grados centígrados, con incrementos de 5 grados centígrados. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 18.

Como podemos observar, también para el brazo de bombeo (980 nm) el estado de polarización de salida varió, aunque el cambio no fue tan severo comparado con el que se presentó para el brazo de entrada de la señal (1550 nm). En la tabla 8 se muestran los cambios máximos en el ángulo de elipticidad, debidos a la temperatura.

Con base en estos resultados se recomienda trabajar con temperaturas estables preferentemente bajas de 20 grados a 30 grados, pero se mantiene la estabilidad hasta 40 grados.

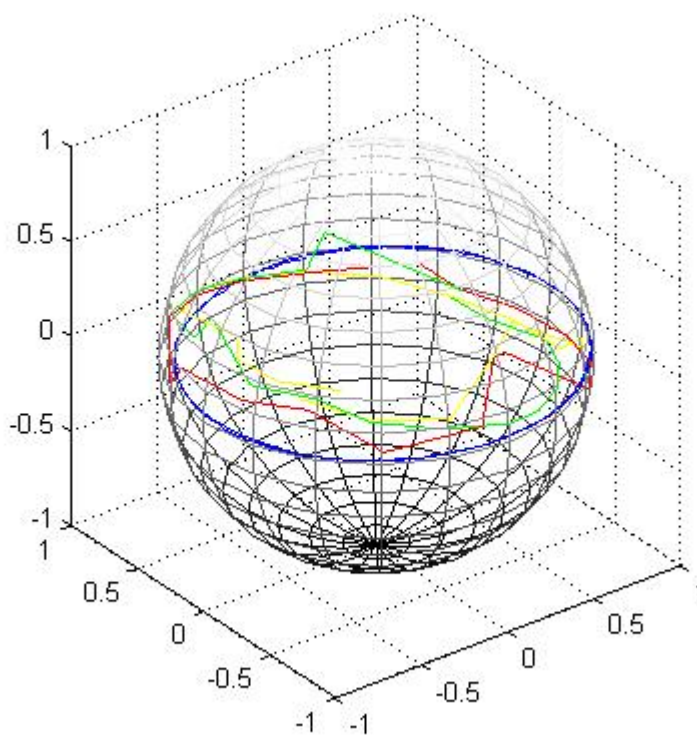


Figura 18. Cambios debidos a la temperatura, en la evolución del SOP a la salida del WDM con doble bobinado en el brazo de 980 nm . Estos cambios se obtuvieron al variar 360° el ángulo azimutal del eje del polarizador lineal de entrada.

Tabla 6. Verificación del SOP que se introducirá al WDM (Lineal)

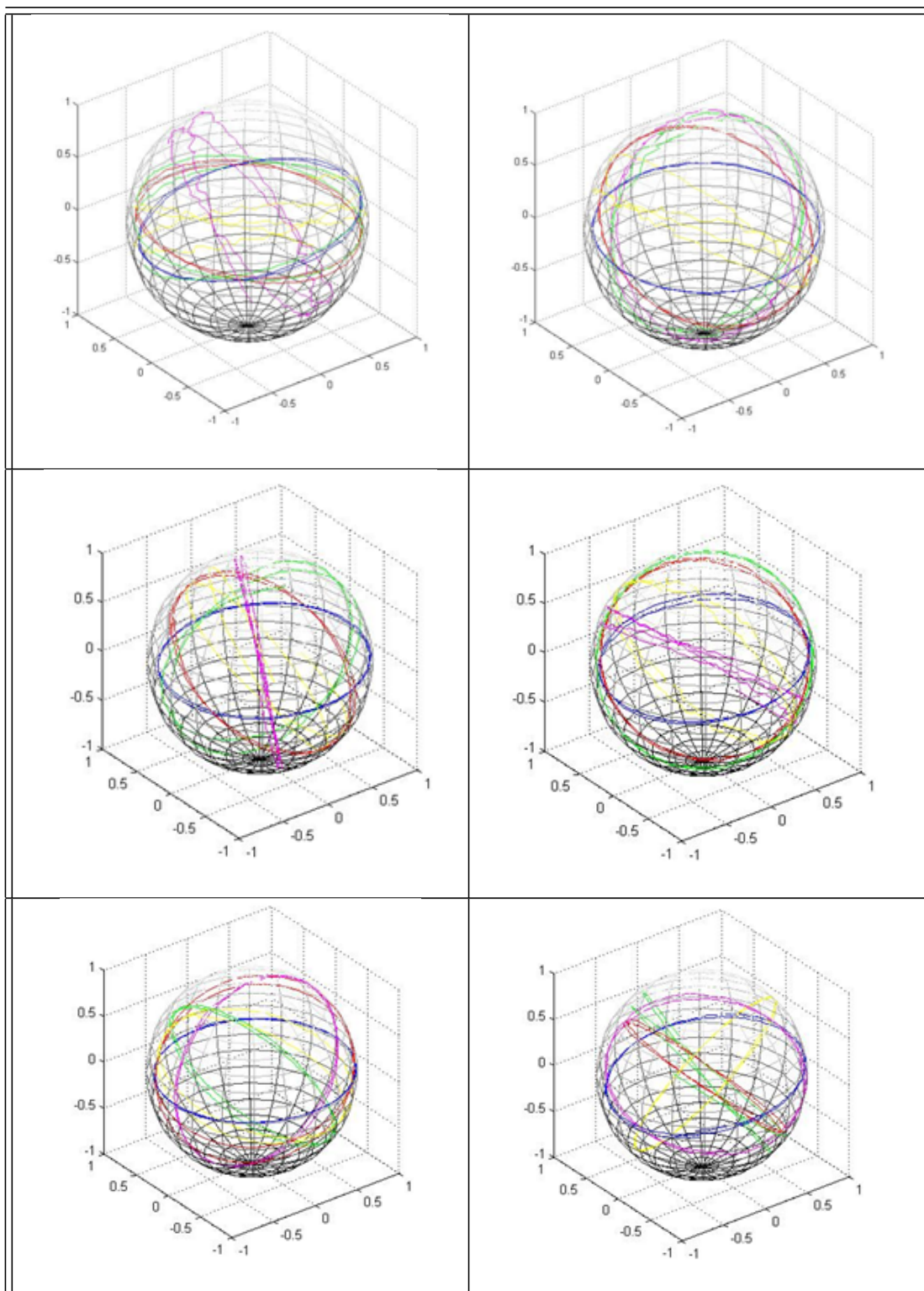


Tabla 7. Valores máximos para el cambio en el ángulo de elipticidad cuando el doble bobinado cambia de temperatura ambiente a 40 C

Longitud de onda en <i>nm</i>	Máximo cambio en el ángulo de elipticidad en grados
1520	23.4
1530	33.3
1540	32.5
1550	106.4
1560	111.7
1570	121.2

Tabla 8. Valores máximos para el cambio en el ángulo de elipticidad del SOP de bombeo, cuando el doble bobinado cambia de temperatura ambiente (20 C) a 40 C

Temperatura en grados C	Máximo cambio en el ángulo de elipticidad en grados
20	1.7
25	25.7
30	26.5
35	115.1
40	110.6

Capítulo 6

EDFA

6.1 Sistema de 4 niveles

Un sistema de comunicación es aquel que transmite información de un lugar a otro, separado por algunos kilómetros o por distancias transoceánicas. En el caso de los sistemas de comunicación óptica, donde la transmisión de la luz se realiza a través de fibras ópticas, la señal portadora sufre una atenuación de su potencia debido a las pérdidas intrínsecas del material con que es fabricada la fibra óptica. Esta señal portadora va atenuándose hasta el punto de quedar por debajo del límite de recepción al transmitirse a grandes distancias, necesitando de esta forma ser amplificada. Hoy en día, gracias al desarrollo de las fibras ópticas y de los láseres de diodo, la reducción de las pérdidas en las fibras patrón para telecomunicaciones se han minimizado a 0.2 dB/km en la región de $1.55\mu m$. Permitiendo así, un espaciamiento mucho mayor entre los amplificadores ópticos. En la actualidad, la amplificación óptica ha sido perfeccionada por los grandes avances en la fabricación de fibras ópticas con diferentes dopajes y concentraciones de iones de tierras raras como Er^{3+} , Tm^{3+} , Yb^{3+} . La fibra dopada con erbio (Er^{3+}) ha atraído una gran atención tanto en el campo de sensores como en el de telecomunicaciones debido a sus excelentes características de amplificación óptica y a su amplia banda espectral de operación. Existen diferentes tipos de fenómenos que se pueden dar en un sistema de amplificación por dopantes, la comprensión de dichos procesos es importante para entender el funcionamiento del amplificador de fibra óptica dopado con erbio (EDFA).

Supongamos que tenemos un sistema de cuatro niveles energéticos figura 19. En dichos niveles se encuentran distribuidos todos los iones del dopante. Estos iones pueden cambiar de nivel energético; dependiendo de cómo se dé esta transición se produce un fenómeno el cual puede servir para emitir un fotón, emitir fluorescencia o simplemente acumular energía. Si la transición se da entre un nivel energético E1 y gana energía de tal forma que le permita pasar a un nivel energético superior, se tiene un efecto de absorción. Si la transición se da entre un nivel energético E3 y decae a un nivel energético E2 este produce un fotón, que pueden dirigirse en cualquier dirección y tener cualquier tipo de polarización a este efecto se le conoce como emisión espontánea. Dicha emisión no se considera como amplificación sino de forma contraria, se le considera como un fenómeno que produce ruido. Si el electrón se encuentra en un nivel E3 y por la interacción con un fotón decae a un nivel energético E2 se producirá un par de fotones, los cuales tendrán una dirección y polarización iguales a las del fotón incidente. Este fenómeno se conoce como emisión estimulada. Dichos procesos de emisión (espontánea, estimulada) solo se pueden producir cuando se encuentran más iones en un nivel superior (E3) que en un nivel inferior (E2) y a esto se le conoce como inversión de población. Las demás transiciones entre niveles de un estado superior a uno inferior producen una liberación de energía pero esta liberación no se da emitiendo un fotón, se produce una liberación de calor por medio de una vibración que comúnmente se le llama fonón.

Un caso particular de amplificador de fibra óptica es el que tiene como tierra rara (dopante) al erbio. En dichos amplificadores (EDFA) la inversión de población se produce con gran facilidad, ya que hace uso de campos de luz que están confinados en un núcleo de dimensiones muy pequeñas. Las intensidades de luz alcanzadas son por tanto altas y la inversión de población se alcanza con potencias de bombeo relativamente ba-

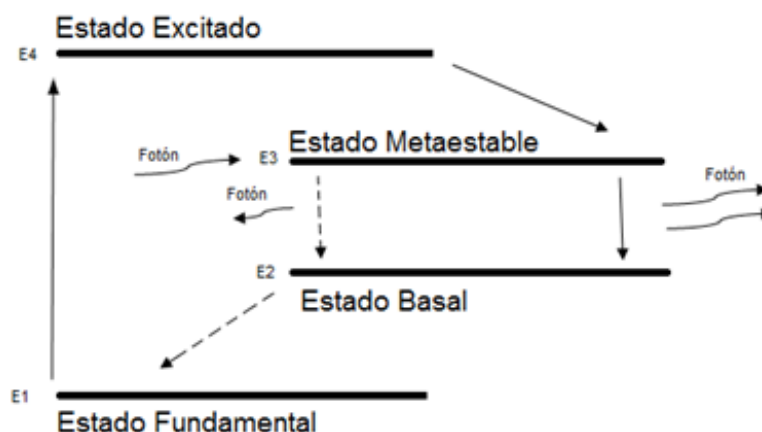


Figura 19. Sistema de 4 Niveles

jas. Trabajan con un bombeo de $980nm$ ó $1480nm$ (comúnmente se usa más la primera longitud de onda). La forma más sencilla de explicar su funcionamiento, es por medio de un sistema de tres niveles (figura 20) ; en el cual tendremos un estado fundamental N1, un estado metaestable N3 y un estado basal N2. El haz de bombeo excita a los iones de erbio del estado fundamental de tal manera que al ganar energía producen un salto de nivel y se genera una transición del nivel N1 al nivel N3 por absorción. En dicho nivel N3 el tiempo que dura en producirse una caída por pérdida de energía es aproximadamente de 10 nano-segundos. Una vez que se tienen más iones excitados en un estado N3 que en N2 se alcanza una inversión de población, la cual permite la amplificación de la señal por emisión estimulada. La razón por la cual se necesita que se produzca una inversión de población, es que al existir más iones con poca cantidad de energía, es baja la probabilidad de que los fotones de la señal sean absorbidos por un electrón que se encuentre en el estado fundamental o basal. De la misma forma, no por inducir un mayor número de fotones tendremos mayor amplificación, ya que la ganancia se satura.

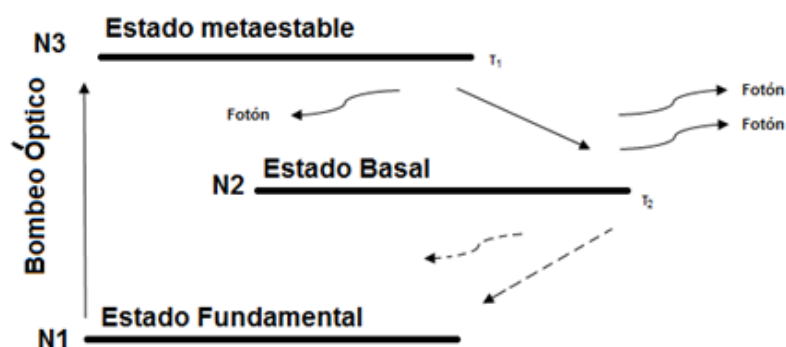


Figura 20. Sistema de 3 Niveles

6.2 Desarrollo experimental EDFA

Inicialmente se supone que la polarización de una señal no influirá en la amplificación; en otras palabras que es invariante ante la polarización, pero se ha demostrado experimentalmente [Mazurcyk y Zyskind, 1994] que un EDFA con señal saturada presenta el fenómeno de fusión de agujeros de polarización. Para poder explicar este fenómeno se tomó en cuenta que una forma de describir los efectos del uso de luz polarizada en un EDFA es comparando el desempeño de ganancia obtenido para señales con longitudes de onda iguales, o casi iguales, pero con estados de polarización ortogonales. Una de las señales usada tenía una potencia muy alta (saturada) y la otra era una señal de potencia baja (no saturada). Teniendo en cuenta que el vidrio de sílice tiene en cada región del núcleo de la fibra el mismo número de iones alineados, ya que se ha supuesto que el vidrio de sílice es un material amorfo, para dos señales con polarizaciones ortogonales se puede considerar que cada una de las señales tendrá acceso al mismo número de iones. Por tanto, si una señal es pequeña opera con ganancia alta y la otra satura la ganancia.

A pesar de que las poblaciones de iones a las que tienen acceso son iguales, sus ganancias van a ser distintas. La señal de mayor potencia tiene una ganancia menor a la señal de pequeña potencia. A este efecto se le conoce como fusión de agujeros de polarización [Greer et. al., 1993], [Mazurczyk y Zyskind, 1994], [Becker et. al., 1999]. Resumiendo, este efecto favorece que exista una ganancia mayor para la emisión espontánea que para la señal, lo cual se traduce en un incremento en la figura ruido. En un EDFA se tienen dos señales de la misma longitud de onda, la señal que se desea amplificar (la que se amplifica por emisión estimulada) y el ruido (que es de banda amplia, pero parte de él comparte la longitud de onda de la señal). Como la señal tiene un estado de polarización definido y en la práctica es una señal de ganancia saturada, mientras que el ruido (emisión espontánea) es no polarizado y parte de él se amplifica en el régimen de señal pequeña, se da el efecto de fusión de agujeros de polarización, Este efecto provoca que se degrade el desempeño de amplificación de los EDFAs, ya que limita la capacidad de información de las líneas de larga distancia basadas en fibra óptica.

Los estudios realizados en CICESE indican que la birrefringencia residual de las fibras dopadas con erbio no es azarosa (Treviño et. al., 2005), y que al usar bobinados helicoidales es posible inducir una birrefringencia controlada. Con el fin de estudiar la amplificación de señales polarizadas en un EDFA se construye un amplificador en el que sea posible modificar el SOP de la señal y/o del bombeo sin necesidad de alterar su estructura. El arreglo se muestra en la figura 24.

En la figura 24 podemos observar que tanto el brazo de bombeo como el brazo de la señal están siendo utilizados con sus respectivas señales linealmente polarizadas. A este arreglo óptico se le incorporó un EDFA con bobinado helicoidal y un filtro para la longitud de onda de 1550nm. Con dicho arreglo se procedió a establecer marcos de

referencia para las longitudes de onda 1550nm y 980nm, primeramente sin el WDM, EDFA, aislador óptico, después se aseguró un SOP lineal para cada una de las longitudes de onda (1550 nm, 980 nm) como se muestran en las figuras 21 y 22 a la salida del WDM.

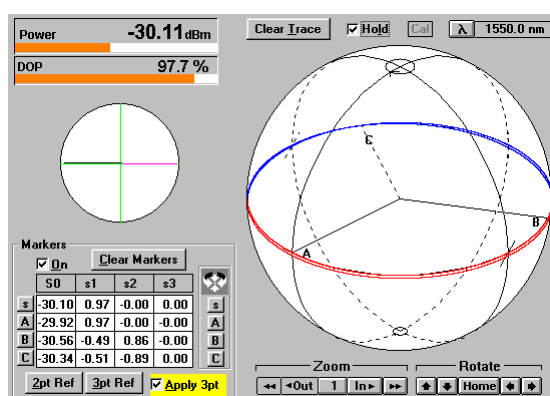


Figura 21. SOP linealmente polarizado en la señal de salida del WDM para 1550nm

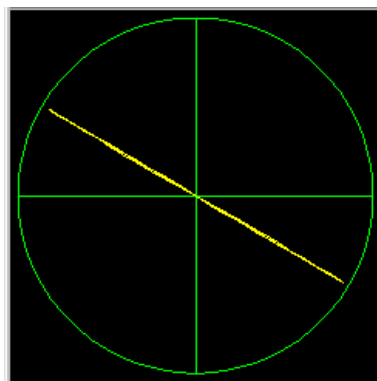


Figura 22. SOP linealmente polarizado en la en la señal de salida del WDM para 980nm

Una vez que aseguramos el SOP lineal a la salida de nuestro WDM procedemos a introducir nuevamente el EDFA y el aislador óptico y asegurando nuevamente por medio de un reajuste en la orientación de las bobinas del EDFA para obtener un SOP circular (derecha o izquierda) a la salida. Una vez asegurado el SOP circular se procede a elaborar un barrido de 360 grados del ángulo acimutal por medio de un polarizador

en una montura mecánica rotatoria para variar automáticamente la orientación de su eje de polarización. El barrido del ángulo acimutal se muestra en la figura 23 donde podemos ver como el ángulo máximo de elipticidad es de 3.78°

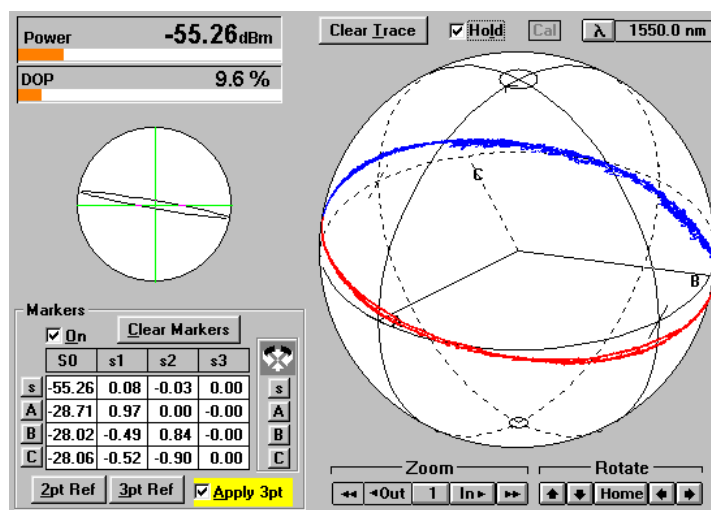


Figura 23. Evolución del SOP a la salida de EDFA con un WDM doble bobinado en los brazos de entrada (1550 nm , 980 nm). Estos cambios se obtuvieron al variar 360° el ángulo azimutal del eje del polarizador lineal de entrada.

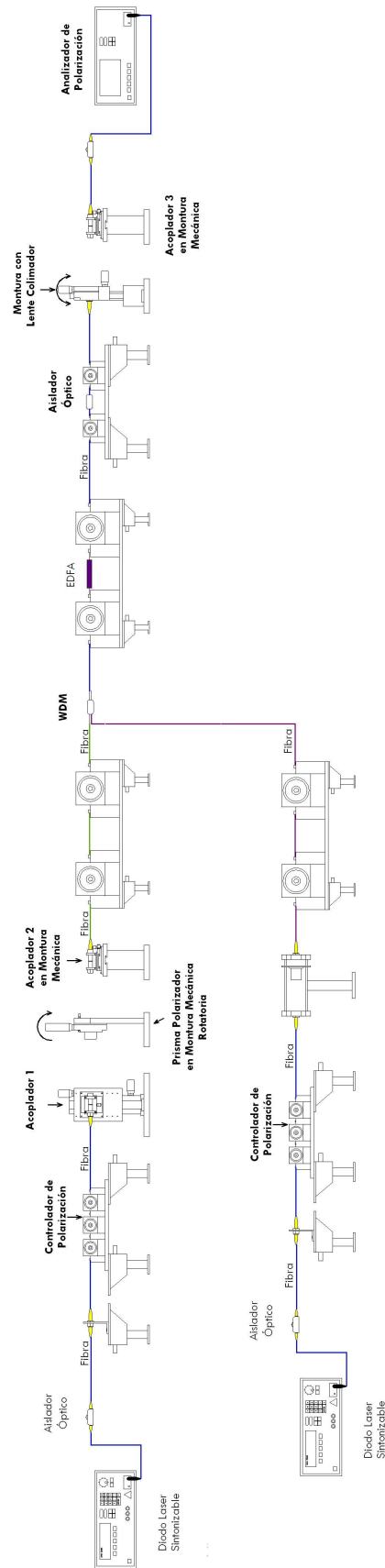


Figura 24. Anulación del efecto de la birrefringencia con un EDFA y un WDM

Capítulo 7

Conclusiones

En lo que respecta a la investigación de este trabajo, enfocándome en los objetivos y los experimentos realizados se llega a las siguientes conclusiones:

1. La birrefringencia residual de la fibra utilizada se ve modificada por la torsión inducida por el bobinado helicoidal.
2. La birrefringencia residual de la fibra puede ser controlada por medio de bobinados helicoidales sin tener pérdidas en la potencia con la que la señal se propaga.
3. Se determinaron las condiciones para que el uso de bobinados helicoidales dobles permite cancelar el efecto de la birrefringencia de un multiplexor construido con fibras monomodo, sobre las señales de entrada en la banda de bombeo ($980nm$) y en la banda de amplificación ($1530nm - 1560nm$).
4. Se desarrolló una metodología para el manejo de colas de fibra óptica monomodo, para controlar el efecto de la birrefringencia en el estado de polarización del haz de salida, para la señal de bombeo ($980nm$).
5. Se desarrolló una metodología para el manejo de colas de fibra óptica monomodo, para controlar el efecto de la birrefringencia en el estado de polarización de la señal de salida, de una señal en la banda C de amplificación ($1530nm - 1560nm$).
6. Se determinó el rango espectral de operación del WDM con control de birrefringencia. Este control fue más eficiente cerca de la longitud de onda de $1550nm$.

aunque de igual manera se logró minimizar el efecto de birrefringencia para longitudes de onda lejanas ($1520nm$, $1525nm$, $1570nm$).

7. La temperatura es un factor que induce cambios importantes en el desempeño de polarización del WDM modificado. Para cada temperatura el sistema debe ser recalibrado si se desea aminorar el efecto de la birrefringencia y poder mantener a la salida de la fibra un estado de polarización igual al de entrada.
8. Se comprobó que es posible controlar la birrefringencia por medio de bobinados helicoidales y es posible mantener un SOP lineal después de ser amplificada por medio de un EDFA.

Referencias bibliográficas

- Appelquist, J. (1987). Optical activity: Biot's bequest. *Am. Sci.*, 75: 58–68.
- Arago, F. (1811). *Memoires de la Classe des Sciences Mathematiques et Physiques*. Institut Imperial de France., París. 93-134.
- Azzam R.M.A., B. N. (1989). *Ellipsometry and Polarized Light*. Elsevier Science, Amsterdam. 558.
- Biot, J. B. (1812). *Memoires de la Classe des Sciences Mathematiques et Physiques*. Institut Imperial de France., París. 372.
- Bruhat G., G. P. (1935). Magneto-optic rotation in birefringent media? application of the Poincaré sphere. *Physique Radium.*, 6: 12–26.
- Chudakov V.S., Grechushnikov B.N., P. G. (1972). Crystallography. *Sov. Phys.*, 16: 813–816.
- Courtens, E. (1972). Interface-induced phenomena in polarization response of ferroelectric thin films. *Phys. Rev., Lett* 29: 1380–1383.
- Eickhoff W., Yen Y., U. R. (1981). Wavelength dependence of birefringence in single-mode fiber. *Appl. Opt.*, 20: 3428–3435.
- Feng Xinhuan, T. H.-Y. (2006). Stable and uniform multiwavelength erbium doped fiber laser using nonlinear polarization rotation. *Optics Express.*, 14(18): 8205–8210.
- Harley R.T., M. R. (1975). Solid state. phys. *J.Phys.*, 8: 451–455.
- Hinz Stephan, Sandel David, W. F. (2001). Polarization multiplexed 2x20gbit/s rz transmission using interference detection. *Optical Society of America.*, 31: 40–48.
- Hirooka T., Hirano T., T. Y. P. G. N. M. (2011). Pmd-induced crosstalk in ultrahigh-speed polarization-multiplexed optical transmission in the presence of pdl. *Lightwave Technology*, 29: 2963– 2970.
- Ishikawa Fujitsu G., O. K. (1998). Automatic polarization-mode dispersion compensation in 40-gbit/s transmission. *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, 2: 86–88.
- Kuzin E.A., Estudillo Ayala J.M., I. E. B. (2001). Measurements of beat length in short low-birefringence fibers. *Opt. Lett.*, 26: 1134–1136.
- Lacroix S., Parent M., B. J. (1984). Mesure de la birrefringence lineaire des fibres optiques monomodes par une methode thermique. *Appl. Opt.*, 23: 2649–2653.

- Liu X., Zhan L., S. Q. (2009). Multiwavelength erbium-doped fiber laser based on non-linear polarization rotation assisted by four-wave-mixing. *Optics Communications*, 282: 2913–2916.
- Marciante J. R., Z. J. D. (2006). High-gain, polarization-preserving, yb doped fiber amplifier for low duty cycle pulse amplification. *Communications and photonics conference and exhibition.*, 45: 6798–6804.
- Matsura Takaaki, Nakamura Takuhiro, N. K. (2002). Polarization maintaining optical device with low polarization crosstalk and high stability for temperatures. *Fukuyura Technical Review.*, 31: 65–68.
- Moxon J.R.L., R. A. (1991). The simultaneous measurement of optical activity and circular dichroism in birefringent linearly dichroic crystal sections. *J.Phys.*, 2: 6807–6836.
- Ross (1984). The rotation of the polarization in low birefringence monomode optical fibres due to geometric effects. *Optical and Quantum Electronics*, 16(6): 455–461.
- Shurcliff, S. (1964). *Polarized light*. Commission on College Physics, New Jersey. 71-76.
- Smith, A. (1979). Automated birefringence measurement system. *J. Phys.*, 12: 927–930.
- Tentori D., A. Garcia Weidner, C. A. D. (2012). Birefringence matrix for a twisted single-mode fiber: photoelastic and geometrical contributions. *Optical Fiber Technology*, 18: 3428–3435.
- Tentori D., Ayala C., L. E. T. F. G. W. A. (2009). Birefringence matrix for a twisted single-mode fiber: geometric contribution. *Optics Communications*, 282: 830–834.
- Tentori D., Ayala C., T. F. M. F. S. H. (2001). Birefringence evaluation of helically wound optical fibers. *Journal of Modern Optics*, 48(11): 1767–1780.
- Thierry Chartier, Ammar Hideur, C. z. F. S. G. M. S. (2001). Measurement of the elliptical birefringence of single-mode optical fibers. *Appl. Opt.*, 40: 5343–5353.
- Treviño F., Tentori D., A. D. C. M. J. F. (2005a). Birefringence assessment of single-mode optical fibers. *Optics Express*, 13: 2556–2563.
- Treviño F., Tentori D., A. D. C. M. J. F. (2005b). Birefringence assessment of single-mode optical fibers. *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, 13: 2556–2563.

Apéndice A

Equipo usado

- Mesa óptica
- Diodo láser sintonizable en la banda de $1550nm$ (Agilent 8509C ($1470nm - 1640nm$))
- Analizador de espectro óptico Advantest Q8384 ($700 - 1700nm$)
- Polarímetro ThorLabs PA460 ($900 - 1100nm$)
- Analizador de polarización Agilent 8509C ($1470 - 1640nm$)
- Arreglo polarimétrico automatizado.
- Calentador eléctrico DigiSense 89000-00 (calentador de cordón flexible de NiCr, 2 termopares y controlador de temperatura)
- Detector ILX (visible-NIR) para potencia media
- Diodo láser de $980nm$ con base y fuente de control
- Láser de He-Ne ($10mW$) para alineación
- Prisma polarizador
- Multiplexor WDM $980/1550nm$
- Aislador óptico para $1550nm$
- Componentes ópticos y mecánicos diversos

- Microscopio portátil para fibra óptica
- Pulidora para fibra óptica (conectores tipo FC/PC)
- Herramientas para preparación de conectores (FC/PC)

Software

- Matlab R2010a de la compañía Mathworks.