



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE UN DISPOSITIVO DE FIBRA  
ÓPTICA MICRO-ESTRUCTURADA CON ELECTRODOS INTERNOS**

**Erick Estefen Reyes Vera**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias, Escuela de Física  
Medellín, Colombia  
2013

---

# ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE UN DISPOSITIVO DE FIBRA ÓPTICA MICRO-ESTRUCTURADA CON ELECTRODOS INTERNOS

**Erick Estefen Reyes Vera**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ciencias Física**

Director:

Ph.D. Pedro Ignacio Torres Trujillo

Línea de Investigación:

Fotonica

Grupo de Investigación:

Fotonica y Opto-electrónica

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Escuela de Física

Medellín, Colombia

2013

# Agradecimientos

Quisiera agradecer especialmente al profesor Pedro Torres, por su dedicación, consejos y empecinamiento puestos a prueba en el transcurso de esta maestría, por la formación recibida de su parte no solo desde el punto de vista profesional sino personal. A mi esposa Mayra León y mi hija Nicole por estar siempre a mi lado apoyándome en todo momento y darme unas sabias palabras en los momentos que lo necesite. A mi madre que con su amor y dedicación me sacó adelante y hoy más que nunca sé que sentirá orgullosa de su legado.

A mis amigos Hernán, Nelson Gómez, Rodrigo, Nelson Correa, Chucho, Esteban y todos los del laboratorio de Fotónica & Optoelectrónica, quienes siempre estuvieron dispuesto a colaborarme, con quienes más compartí y aprendí muchas cosas en la vida.

Al profesor Cristiano Cordeiro y la Universidad Estadual de Campinas por permitirme realizar una pasantía de investigación en sus instalaciones, prestarme los equipos y poner a mi disposición los recursos necesarios para llevar a cabo la fase experimental de este trabajo.

Y por último un agradecimiento especial a Colciencias por haber financiado durante dos años para poder dedicarme a mis estudios de maestría.

## Resumen

En el presente trabajo se analizó una fibra microestructurada con electrodos internos de indio y bismuto, evaluando de esta manera el comportamiento óptico de estos dispositivos totalmente integrados a fibra al emplear metales con coeficientes de expansión térmica diferentes. Se evidencio experimentalmente y teóricamente que existe un comportamiento óptico no lineal de las MOF empleando electrodos de indio y que dichas no linealidades para muestras de ~22 cm se dan a partir de temperaturas de 45 °C aplicadas sobre los electrodos. Se encontró a través de un protocolo de simulación que este comportamiento no lineal está fuertemente ligado a la rotación de los ejes de birrefringencia de la fibra al incrementar la temperatura aplicada con un sistema de calentamiento. Dichos resultados forman una base y punto de partida en el entendimiento del comportamiento multifísico de estas fibras, lo cual abre las puertas a el inicio de la fabricación de dispositivos empleando esta tecnología.

**Palabras clave:** Telecomunicaciones de fibra óptica, fotónica, birrefringencia.

## Abstract

This thesis analyzed a microstructured fiber with internal electrodes of indium and bismuth, thus evaluating the optical behavior of all fiber devices by using metals with different thermal expansion coefficients. It was noticed that there experimentally and theoretically non-linear optical behavior of the MOF using indium electrodes such nonlinearities to ~ 22 cm samples are given temperatures from 45 ° C applied to the electrodes. Found through a simulation that this protocol nonlinear behavior is strongly linked to the rotation of the birefringence axes of the fiber by increasing the temperature applied to a heating system. These results form a basis and starting point in understanding the multiphysics behavior of these fibers, which opens the door to the start of the fabrication of devices using this technology.

**Keywords:** Fiber optic telecommunication, Photonic, Birefringence.

# Contenido

Lista de figuras.....	IV
Lista de tablas .....	VI
1. Introducción .....	1
2. Marco Teórico.....	9
2.1 Birrefringencia.....	10
2.2 Teoría elástica de esfuerzos y deformaciones.....	14
2.3 Teoría elasto-óptica .....	16
2.4 Método de elementos finitos (FEM) .....	19
3. Montajes experimentales .....	22
3.1 Sistema de calentamiento .....	23
3.2 Caracterización de las muestras de fibra micro-estructurada con huecos laterales .....	25
3.3 Técnica de inserción de metales.....	28
3.4 Determinación de la posición relativa de los electrodos en el sistema de calentamiento.....	29
3.5 Medición de la Birrefringencia de Grupo.....	30
4. Análisis de resultados y discusión .....	35
4.1 Resultados experimentales.....	35
4.2 Análisis de resultados .....	44
4.2.1 Protocolo de simulación .....	44
4.2.2 Resultados de simulación y análisis.....	46
5. Conclusiones y perspectivas .....	59
Anexo A: Método interferométrico para la medición de birrefringencia de grupo ...	63
Bibliografía .....	66

# Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.1 Configuraciones típicas de fibras ópticas especiales. (a) Fibra óptica monomodo con agujeros paralelos al núcleo. (b) Fibra micro-estructurada con agujeros paralelos al núcleo.....	2
Figura 1.2 Resultados del análisis teórico-experimental de la MOF de interés con electrodos de Bi-Sn (Reyes-Vera, Gonzalez-Valencia, Botero-Cadavid, et al., 2010).....	6
Figura 2.1 Imágenes SEM: (a) MOF con los agujeros antes de la introducción de los electrodos; (b) imagen de la MOF después de introducir los electrodos.....	10
Figura 2.2 Secciones transversales de los principales tipos de fibras PM de alta birrefringencia, (a) IEC, (b) PANDA y (c) Bow-Tie. La figura también muestra los ejes rápidos y lentos de las fibras.....	12
Figura 2.3 Ilustración de cómo los ejes principales (ejes primados) de la fibra pueden estar rotados un ángulo $\alpha$ con respecto al sistema coordenado.....	18
Figura 2.4 Imagen de la fibra con electrodos internos discretizada.....	20
Figura 3.1 Circuito desarrollo para generar una señal de corriente pulsada para la alimentación de los Peltier.....	24
Figura 3.2 Curva de calibración del sistema de calentamiento.....	25
Figura 3.3 Fotografía de las muestras recubiertas con una película de oro.....	26
Figura 3.4 Imágenes SEM de las fibras micro-estructuradas con huecos, (a) MOFMOF A, (b) MOFMOF B, (c) MOFMOF C y (d) MOFMOF D.....	27
Figura 3.5 Sistema de inserción de electrodos internos dentro de una fibra con huecos (Michel Fokine, Lars-Erik Nilsson, Åsa Claesso, Walter Margulis, Leif Kjellberg, Pedro Torres, 2003b).....	28
Figura 3.6 (a) Esquemático del montaje empleado para determinar la posición de los electrodos; (b) evidencia fotográfica del montaje experimental y; (c) imagen obtenida de la MOF con electrodos internos .....	30
Figura 3.7 (a) Esquemático del montaje experimental empleado para la medición de la birrefringencia de grupo; (b) evidencia fotográfica del montaje experimental; (c) foto que muestra en detalle la ubicación de la fibra sobre los Peltier.....	32
Figura 3.8 Interferogramas obtenidos con el montaje experimental de la Figura 3.7.....	33
Figura 3.9 Corrimiento espectral cuando los electrodos son alterados térmicamente.....	34
Figura 0.3 Resultados de las MOF con huecos: (a) interferogramas obtenidos con el montaje de la Figura 3.5; (b) curvas de birrefringencia de grupo.....	36

Figura 0.4 (a) Espectros de transmisión. (b) Birrefringencia de grupo de la MOF con y sin metal a $T=22^{\circ}\text{C}$ .....	38
Figura 0.5 Distribución del campo eléctrico del modo fundamental para (a) $\lambda=980\text{ nm}$ y (b) $\lambda=1550\text{ nm}$ .....	38
Figura 0.6 Espectros de transmisión obtenidos a diferentes temperaturas para la MOF con: (a) electrodos de Bismuto, (b) electrodos de Indio. La línea roja muestra el corrimiento de los interferogramas con la temperatura.....	40
Figura 0.7 Corrimiento de la longitud de onda de los interferogramas para las MOF con electrodos de Indio y Bismuto.....	41
Figura 0.8 Gráficos de esfuerzos a lo largo de los ejes $x$ y $y$ para (a) MOF con electrodos a $T=45^{\circ}\text{C}$ ; (b) fibra convencional con electrodos a $T=45^{\circ}\text{C}$ .....	42
Figura 0.9 Birrefringencia de grupo vs longitud de onda: (a) MOF con electrodos de Bismuto; (b) MOF con electrodos de Indio.....	42
Figura 0.10 Birrefringencia de grupo vs temperatura a diferentes longitudes de onda: (a) MOF con electrodo de Bismuto; (b) MOF con electrodo de Indio.....	43
Figura 0.11 Esquema de cálculo para simular la respuesta óptica de la MOF con electrodos internos.....	44
Figura 0.12 Distribución de esfuerzos estimados con el esquema de cálculo desarrollado. (a) MOF con Bismuto; (b) MOF con indio.....	47
Figura 0.13 Valor promedio de los esfuerzos principales en el núcleo de la MOF con electrodos.....	53
Figura 0.14 Comportamiento de la birrefringencia de fase con la temperatura, obtenida con el método de elementos finitos.....	54
Figura 0.15 Predicción de la rotación de los ejes de birrefringencia con la temperatura en una MOF los electrodos internos. El signo negativo indica que la rotación es en sentido contrario a las manecillas del reloj.....	55
Figura 0.16 Curvas de birrefringencia de fase vs longitud de onda (a) MOF con Bismuto y (b) MOF con Indio.....	56
Figura 0.17 Curvas birrefringencia de grupo con la longitud de onda a diferentes temperaturas (a) MOF con Bismuto y (b) MOF con Indio.....	57
Figura 0.18 Comparación de resultados teóricos y experimentales de la sensibilidad con la temperatura de la birrefringencia de grupo. (a) MOF con Bismuto y (b) MOF con Indio.....	58
Figura A.19 Esquema de medición de la birrefringencia de grupo empleando la técnica interferométrica.....	63

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 3.1</b> Parámetros físicos de las fibras micro-estructuradas analizadas.....	27
<b>Tabla 3.2</b> Propiedades de los materiales (“www.matweb.com,” n.d.) .....	29
<b>Tabla 3.3</b> Longitud de las fibras micro-estructuradas analizadas.....	33
<b>Tabla 4.1</b> Birrefringencia de grupo de la mof con y sin metal para tres longitudes de onda representativas (t≈22°C).....	37



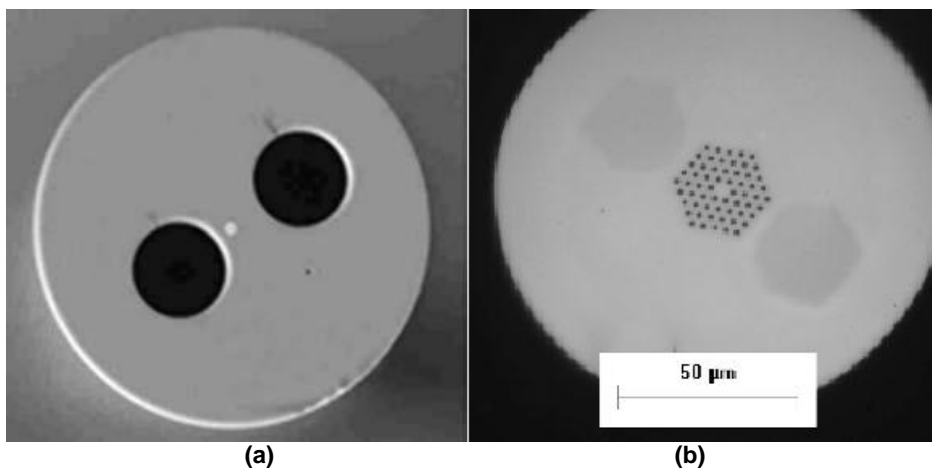
# 1. Introducción

El constante crecimiento de la capacidad de transmisión de información por medio de fibras ópticas es debido, principalmente, al desempeño cada vez mejorado de nuevos componentes ópticos. Innovaciones en este campo crean nuevas soluciones y brindan al usuario la oportunidad de estar cada vez más cerca de tecnologías más avanzadas que, actualmente, es muy común ver sistemas que hacen uso de componentes ópticos lado a lado con electrónicos de alta velocidad. Sin embargo, operaciones realizadas a nivel óptico son potencialmente más rápidas, y serán cada vez más exploradas, substituyendo con ventajas dispositivos electrónicos. Esto ha llevado a una transformación del mundo en los últimos años ligada a las tecnologías de la información y la telecomunicación (TIC).

Toda la información se transmite a través de redes de comunicaciones basadas, principalmente, en tecnologías fotónicas; y cada vez se hace más necesario buscar nuevas formas de satisfacer las necesidades de capacidad y fiabilidad de la transmisión de la información. Es por esta necesidad que surge la motivación de trabajar en estructuras monolíticas completamente a fibra óptica, sintonizables, compactas y precisas, aptas para ser usadas en aplicaciones variadas en telecomunicaciones, es decir, la integración de múltiples funcionalidades en una sola fibra. Entre las ventajas de un dispositivo completamente a fibra óptica están: empaquetado simplificado, la ausencia de pérdidas por empalmes de sub-componentes, la estabilidad ambiental en razón a que no se tienen involucrados elementos de la óptica de espacio libre, integración de operaciones en un mismo formato de fibra óptica. .

En consonancia con lo anterior en los últimos años, de forma simultánea al desarrollo de dispositivos basados en fibras ópticas convencionales, ha ido creciendo el interés en

trabajar con las llamadas fibras ópticas especiales. Estas fibras han sido desarrolladas con el fin de incorporar múltiples funciones, es decir, fibras multifuncionales, que hoy en día están siendo implementadas en un amplio rango de aplicaciones tales como amplificadores ópticos, láseres, sensores, conmutadores y filtros ópticos integrados ((Konorov, Zheltikov, & Scalora, 2005; H. W. Lee et al., 2011; Pfeiffer & Bulow, 1992; Sun, Member, Zyskind, & Srivastava, 1997; Zhang & Yang, 2004). Algunas de estas fibras ópticas especiales son las fibras micro-estructuradas, fibras con huecos y las fibras multinúcleo, entre otras (Ver Figura 1.1) (Birks, Knight, & Russell, 1997; Ritari et al., 2004; Saitoh, Sato, & Koshiba, 2003).



**Figura 1.20** Configuraciones típicas de fibras ópticas especiales. (a) Fibra óptica monomodo con agujeros paralelos al núcleo. (b) Fibra micro-estructurada con agujeros paralelos al núcleo.

Las fibras ópticas micro-estructuradas (MOF por su sigla en inglés) son típicamente fibras de sílice, a las cuales en su proceso de fabricación, se les genera un arreglo periódico de agujeros en la región del revestimiento, los cuales se extienden en la dirección axial de la fibra. La presencia de este patrón de agujeros modifica las condiciones de transmisión de la luz, lográndose, por ejemplo, confinar más la luz en la región central de la fibra (Birks et al., 1997; Eggleton, Kerbage, Westbrook, Windeler, & Hale, 2001; Issa et al., 2004; Ortigosa-Blanch et al., 2000). La investigación en el campo de las fibras micro-estructuradas ha sido acompañada por el desarrollo de dispositivos basados en la

inserción de varios materiales en los agujeros paralelos al núcleo de la fibra óptica. En la Figura 1.1(a) se puede apreciar la imagen de una fibra con agujeros, en la que se nota que tales agujeros son de un diámetro cercano a un cuarto del diámetro de la fibra misma (macro-agujeros), mientras que en la Figura 1.1(b) se presenta una fibra con una serie de pequeños agujeros (micro-agujeros) que conforman un patrón regular. En la búsqueda de la aplicación de estas fibras como dispositivos ópticos integrados, se han introducido algunos materiales dentro de los agujeros. Las primeras fibras con macro-agujeros fueron desarrolladas a principios de los 80 (Xie, Dabkiewicz, Ulrich, & Okamoto, 1986), con la idea de ser implementadas como sensores de presión para líquidos y gases cuando estos pasaban a través de los agujeros. Más tarde, en 1986, se obtuvieron las primeras fibras con electrodos internos al bombear una aleación líquida de indio/galio dentro de los agujeros, logrando electrodos con longitudes de hasta 30 m (Li, Luksun, Birch, Robin D. and Payne, 1986). Estas fibras fueron usadas para inducir modulación tipo Kerr y luego las usaron para controlar la polarización de la luz, para lo cual es necesario aplicar una diferencia de voltaje DC del orden de los kV (Li, Luksun, Birch, Robin D. and Payne, 1986). Más tarde, varios grupos de investigación (Fujiwara, Wong, & Fleming, 1995; Russel, Pannell, & Kazansky, 1994) realizaron la inserción de electrodos manualmente en los agujeros de las fibras; esta técnica, sin embargo, es poco efectiva pues a lo sumo se puede lograr insertar 10 cm de alambre dentro de la fibra, sin la garantía de que el electrodo llene completamente la sección transversal del macro-hueco.

La técnica para bombear un metal “líquido” en una fibra con macro-agujeros fue rediseñada en el 2002, y las fibras obtenidas fueron usadas en la construcción de interferómetros Mach Zehnder integrados a fibra (Fokine et al., 2002), controladores de polarización (Michel Fokine, Lars-Erik Nilsson, Åsa Claesso, Walter Margulis, Leif Kjellberg, Pedro Torres, 2003a), modulación del efecto Kerr (Kim, Moon, Paek, & Han, 2006; Li, Luksun, Birch, Robin D. and Payne, 1986), entre otros. Este método consiste de una cámara presurizada en la cual se encuentra la aleación metálica que se desea introducir dentro de la fibra. Uno de los extremos de la fibra se encuentra sumergido dentro de la aleación, mientras que el otro extremo se encuentra a temperatura y presión ambiente. La aleación metálica se calienta hasta su punto de fundición en un crisol

ubicado dentro de la cámara presurizada, luego de lo cual se aplica presión a la cámara para, así, obligar a la aleación metálica a subir a través de los agujeros laterales de la fibra como consecuencia de las diferencias de presiones (la aleación se mueve de presiones altas a presiones más bajas del exterior). Este proceso es demorado a causa de la capilaridad de los agujeros y la alta densidad de los materiales empleados. En esta tesis se usaron presiones entre 3 y 5 bares, pero en un trabajo reciente (S. H. Lee, Son, Kim, & Han, 2012) reportan que trabajaron con presiones de inserción de los electrodos en fibras convencionales con agujeros laterales un orden de magnitud mayor, encontrando que existen una fuerte dependencia entre la presión de inserción y la birrefringencia intrínseca generada en la fibra. Todo este proceso se lleva a cabo mientras la cámara presurizada se encuentra dentro de un horno, con el fin de calentar el metal por encima de su temperatura de fusión para garantizar que el metal este fundido y sea posible la inserción dentro de la fibra. A partir de esta técnica se produjeron importantes aplicaciones, quizás, la más destacada, el diseño de conmutadores por polarización totalmente integrados a fibra óptica. En el 2007 se reportó el análisis de un componente integrado a fibra, empleando fibras con electrodos internos cuya luz polarizada rotaba con un tiempo de subida de 10 ns (Knape & Margulis, 2007a): un pulso de corriente de corta duración calienta el electrodo interno, y su expansión conduce a una mayor birrefringencia y a la rotación de la polarización, convirtiendo al conmutador óptico en un polarizador activo. La principal limitación de este tipo de dispositivos es que su tiempo de enfriamiento es muy lento, ocasionando que la birrefringencia inducida perdure unos cuantos milisegundos y la conmutación no se apague rápidamente, es decir, no vuelve rápidamente a su estado inicial (Nilsson et al., 2007). Continuando en esta línea, y a través de la alteración del índice de refracción, lograron modular la respuesta espectral de una red de difracción de Bragg (FBG) grabada en el núcleo de la fibra en tiempos de nanosegundos (Knape & Margulis, 2007b; Yu, Margulis, Tarasenko, Knape, & Fonjallaz, 2007; Yu, Tarasenko, Margulis, & Fonjallaz, 2008), hecho que les permitió más tarde, aplicar esta tecnología en la construcción de un láser pulsado completamente a fibra óptica (Yu et al., 2007).

En el año 2010 reportaron el dispositivo de fibra óptica micro-estructurada con electrodos internos de interés en esta tesis, mostrando que es posible tener un control activo de la

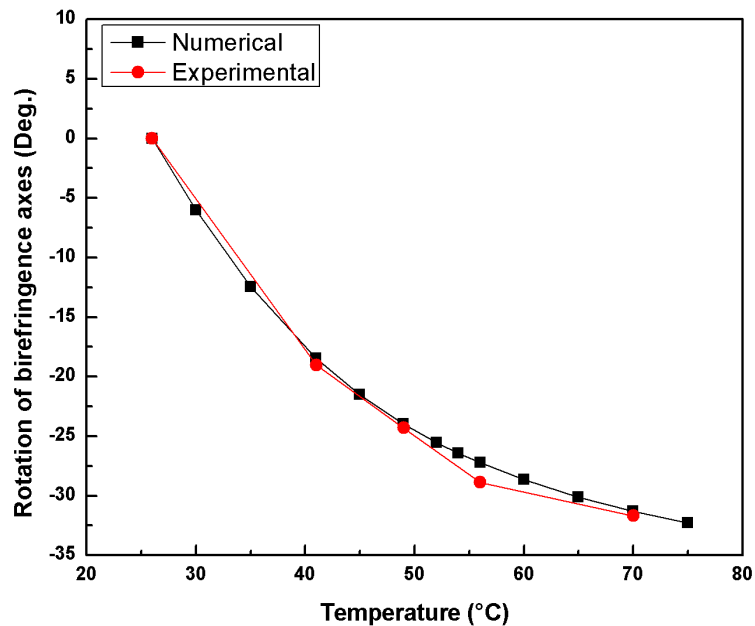
---

distribución espacial de índice de refracción cuando a uno de los electrodos se le hace pasar pulsos cortos de corriente eléctrica (Chesini et al., 2009; Chesini, Serrão, Franco, & Cordeiro, 2010). En estos trabajos se muestra, no de manera detallada, cómo al aplicar un pulso de corriente a uno de los electrodos se empieza a calentar debido al efecto Joule, expandiéndose rápidamente e induciendo esfuerzos termo-mecánicos en las regiones circundantes.

En (Chesini et al., 2010) y (Chesini et al., 2009) se realizaron, inicialmente, mediciones dinámicas donde el haz de luz que incide en esta fibra especial estaba linealmente polarizado y un analizador fijo es empleado para transformar los cambios de polarización en modulaciones de potencia óptica. Aquí, las variaciones en la potencia óptica a medida que se varía el valor de la corriente aplicada, indican que se está induciendo una birrefringencia en la fibra, la cual es proporcional al aumento de temperatura que se presenta en el electrodo a causa del efecto Joule. Además, los autores de este trabajo muestran mediciones experimentales empleando corrientes estacionarias (DC) de algunos segundos, demostrando cómo cuando esta corriente es conmutada, la birrefringencia es modificada y, por tanto, el estado de polarización del haz de luz que se propaga por la región central de este dispositivo.

De otra parte, en un par de reportes muy recientes (Kim et al., 2009; S. H. Lee, Kim, & Han, 2009; S. H. Lee et al., 2012; Moon et al., 2007), se muestra el análisis de una fibra monomodo estándar con electrodos internos, donde lo más importante de estos trabajos es que se emplean diferentes aleaciones, In, Sn, Bi y 80Au-20Sn, y a que la fibra es caracterizada mediante un interferómetro tipo Sagnac iluminado con una fuente de baja coherencia, encontrándose, por una parte, que el espaciamiento de los máximos (mínimos) del espectro de transmisión depende del tipo de aleación, lo cual hace pensar que la birrefringencia intrínseca de la fibra va a depender del tipo de muestra introducida en los huecos del dispositivo y, por otra parte, que para algunas aleaciones la posición espectral de los máximos (mínimos) tienen una dependencia no lineal con la temperatura, lo cual indica que hay interacción de la birrefringencia inducida por la inserción de los electrodos con la birrefringencia inducida por el calentamiento de los

electrodos, trayendo como consecuencia la rotación de los ejes principales de la fibra de acuerdo a experiencias previas del grupo de investigación. Vale mencionar que la mayor sensibilidad en estas medidas se alcanzó con el electrodo de Indio, es decir, que si se quisiera tener un dispositivo integrado con el menor consumo de energía para obtener cambios significativos, basta con llenar los agujeros de la fibra con este metal.



**Figura 1.21** Resultados del análisis teórico-experimental de la MOF de interés con electrodos de Bi-Sn (Reyes-Vera, Gonzalez-Valencia, Botero-Cadavid, et al., 2010).

En el 2010 se mostró un avance del análisis teórico-experimental de este dispositivo con electrodos de Bi-Sn, en el que se deja en evidencia la rotación de los ejes principales con la temperatura como se muestra en la Figura 1.2 (Reyes-Vera, Gonzalez-Valencia, & Torres, 2010a; Reyes-Vera, Gonzalez-Valencia, Botero-Cadavid, et al., 2010). Para ello, experimentalmente se empleó un polariscopio lineal y los resultados teóricos se obtuvieron con el método de elementos finitos. La buena concordancia de los resultados indica que se va por buen camino en comprender la física de la propagación de la luz en esta fibra especial.

Siguiendo en esa línea, mientras que en (Chesini et al., 2009, 2010) la fibra fue caracterizada electro-ópticamente aplicando una señal de corriente eléctrica a uno de los electrodos, en esta tesis de maestría se estudió teórica y experimentalmente la fibra de interés, calentando los dos electrodos con un Peltier, lo que nos permitió realizar un análisis detallado de su funcionamiento en régimen térmico estacionario con el fin de poder diseñar dispositivos opto-electrónicos totalmente integrados a fibra óptica que se puedan emplear en la industria de las telecomunicaciones.

Para ello, en el Capítulo 2 se muestran los aspectos básicos de las fibras ópticas. Por una parte, se muestra los diferentes tipos de birrefringencia analizadas en este trabajo, es decir, las birrefringencias de fase y de grupo y cómo se relacionan. De la mano de esta primera parte del capítulo, se hace referencia al efecto elasto-óptico como fenómeno que permite inducir cambios reversibles del índice de refracción del núcleo de la fibra, y que será empleado para alterar el comportamiento de la luz que se propaga por la misma. Se presenta el efecto de la aplicación de perturbaciones externas por medio de la expansión de los electrodos al ser calentados de manera externa; este hecho se traduce, por una parte, en la alteración del índice de refracción efectivo para los modos de propagación de la fibra y, por otra parte, al cambio debido a la rotación de los ejes principales de propagación en la fibra. Para culminar este capítulo, se describe la técnica de elementos finitos, técnica que es empleada posteriormente en el capítulo 4 para el análisis teórico de las fibras micro-estructuradas con electrodos internos en vista de la imposibilidad de resolver el problema de forma analítica.

En el capítulo 3 se describe de forma detallada cada uno de los montajes experimentales empleados para la caracterización óptica de las MOF con electrodos de Indio y Bismuto, empezando por el diseño del sistema de calentamiento, explicando el proceso de selección de las fibras, mostrando cómo se realizó el llenado de los macro-agujeros con dos metales de diferente coeficiente de expansión térmica y, por último, describiendo el proceso seguido para la medición experimental de la birrefringencia de grupo.

En el capítulo 4 se presenta el análisis óptico de las MOF con electrodos integrados de Indio y Bismuto, ilustrando los hallazgos experimentales a partir de los montajes descritos en el capítulo anterior. Seguidamente, se hace un análisis teórico detallado de todo el proceso de expansión de los electrodos al ser sometidos a cambios térmicos, observando cómo, efectivamente, este proceso induce cambios en la distribución de esfuerzos sobre toda la sección transversal de la fibra y, por consiguiente, en las birrefringencias de grupo y de fase de la fibra. Al culminar este capítulo se hace un análisis comparativo entre el modelo implementado con los resultados experimentales, mostrando un gran concordancia entre los resultados y, por tanto, una validación del modelo teórico para entender la multi-física de estos dispositivos.

Por último, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y perspectivas de esta tesis.



## 2. Marco Teórico

Como se mencionó en el capítulo anterior, a la fecha se conoce un estudio parcial de la MOF de interés en esta tesis, conectando uno de los electrodos a una fuente de pulsos de corriente eléctrica (Chesini et al., 2009, 2010). A diferencia del análisis anterior, aquí se estudia esta estructura con los dos electrodos activos con el ánimo de entender en detalle el mecanismo por el cual el dispositivo opera. Para ello, se realiza un análisis tanto teórica como experimentalmente de la birrefringencia inducida por la expansión de los electrodos dentro de la fibra a temperatura constante, es decir, no se trabaja en régimen dinámico como en el trabajo previo sino en régimen térmico estático, paso previo para el diseño de nuevas aplicaciones basadas en este dispositivo, que tiene como atractivo su fácil control a través de un circuito electrónico.

Este estudio detallado llevó al desarrollo de un esquema de análisis en la que se acopla la multi-física asociada a la cadena de fenómenos asociados a este problema. Es así que para el estudio de la expansión de los electrodos fue necesario solucionar un problema de termo/elasto-óptica acoplado con la fotónica de la propagación de la luz en guías de onda óptica estudiadas.

Como se puede observar en la figura 2.1, la estructura a analizar es, desde todo punto de vista, inhomogénea, en la que, además, se requiere solucionar un problema multi-físico bastante complejo para poder entender la física que hay detrás de esta fibra óptica activa. Es claro, entonces, que el abordaje no puede ser otro que el numérico, en la que será fundamental trabajar con versiones avanzadas del método de elementos finitos (Jin, 2002; Matthew Sadiku, 2001).

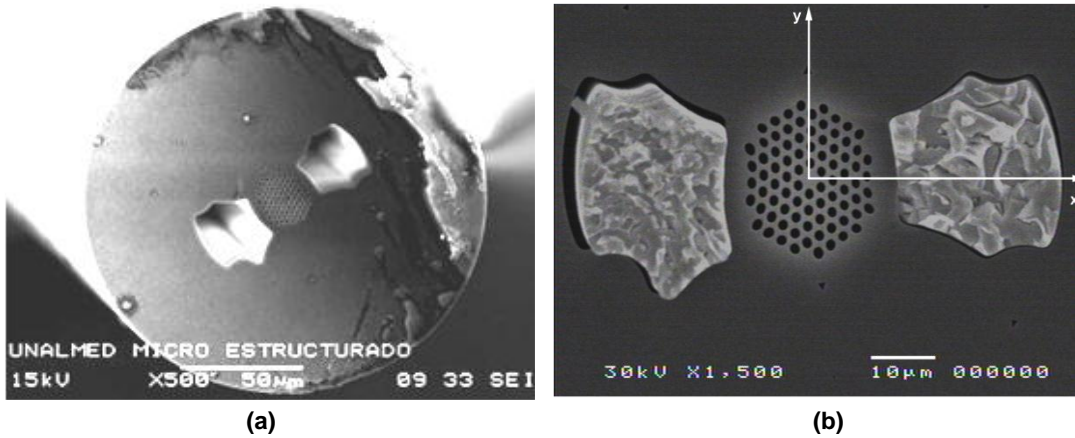


Figura 2.1 Imágenes SEM: (a) MOF con los agujeros antes de la introducción de los electrodos; (b) imagen de la MOF después de introducir los electrodos.

## 2.1 Birrefringencia

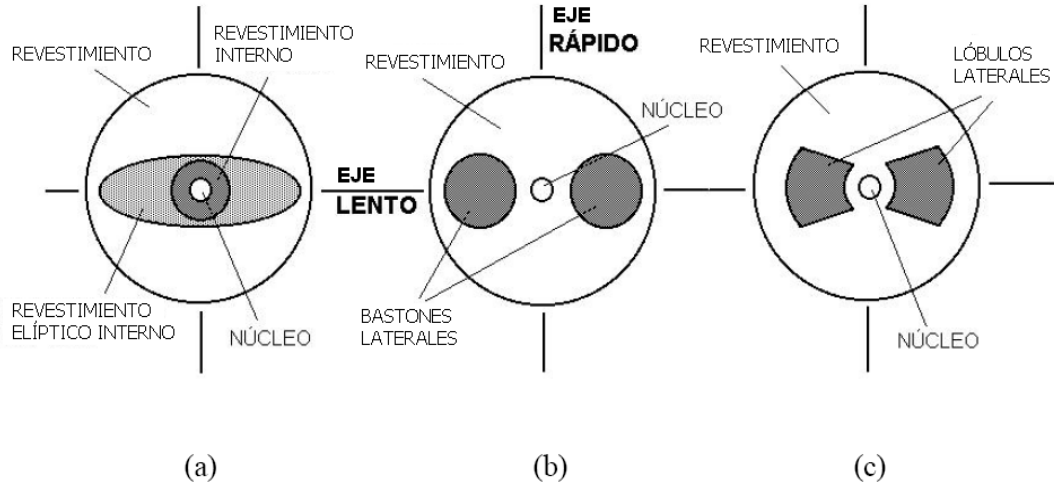
Durante el proceso de fabricación de las fibras ópticas es posible que se induzcan birrefringencia por asimetrías en el núcleo de la fibra y en el perfil geométrico, la cual es conocida como birrefringencia de forma o geométrica. En las fibras ópticas estándares para telecomunicaciones, la birrefringencia suele despreciarse debido a que sus valores son muy pequeños, del orden de  $10^{-6}$ , dado que la elipticidad del núcleo es muy baja, mientras que en las fibras analizadas en este trabajo pertenecen a lo que se conoce como fibras Hi-Bi (por su sigla en inglés High Birefringent) en las cuales la birrefringencia de forma es mayor a  $1 \times 10^{-4}$  (Ortigosa-Blanch et al., 2000), como consecuencia de las geometrías irregulares en las direcciones  $x$  y  $y$ , tal como se puede ver de la Figura 2.1. Eventualmente, con la expansión de los electrodos, la MOF de interés en esta tesis experimentará cambios en direcciones preferenciales de la distribución de esfuerzos, lo cual hace que la distribución del índice de refracción de la fibra cambie, también, de manera preferencial.

Volviendo al contexto general de las MOF, la birrefringencia de forma en estas fibras hace el modo de propagación fundamental “vea” dos índices de refracción efectivos

---

diferentes, cada uno asociado a los ejes de birrefringencia principales, los cuales, como se recordará, son ortogonales y no intercambian energía. Debido a eso, la luz en una MOF, en general, viaja a velocidades de fase y velocidades de grupo distintas de acuerdo a si el eje principal es rápido (índice de refracción menor) o lento (índice de refracción mayor). De hecho, la birrefringencia de forma en las MOF depende, principalmente, del periodo ( $\Lambda$ ), el diámetro y geometría de los agujeros ( $d$ ), y de la distribución de los agujeros sobre la sección transversal de la fibra (Ortigosa-Blanch et al., 2000; Song et al., 2007).

Además de la birrefringencia de forma, se puede generar una birrefringencia extrínseca sobre la fibra, ya sea a través de un campo eléctrico [efecto electro-óptico] (Fujiwara et al., 1995; Knape & Margulis, 2007b; Nilsson et al., 2007), un campo de esfuerzos [efecto elasto-óptico] (Carrara, Kim, & Shaw, 1986; Reyes-Vera, Gonzalez-Valencia, & Torres, 2010b; Zhu & Brown, 2003), etc. Todos estos métodos permiten alterar la velocidad de propagación de la luz a lo largo de los ejes principales e inducir una birrefringencia externa  $B_{\text{ext}}$ . Desde los años 80 se comercializan fibras ópticas especiales en las cuales el efecto de la birrefringencia no es producido por un agente perturbador externo, sino por elementos constitutivos dentro de la misma estructura de la fibra. Estas fibras son conocidas como fibras mantenedoras de la polarización de la luz (PM por su sigla en inglés). En ellas se induce una cierta tensión mecánica por medio de elementos generadores de estrés que modifican el estado de esfuerzos en el núcleo de la fibra. Dentro de estas fibras PM existen varios diseños comerciales ampliamente difundidos: IEC (Internal Elliptical Cladding), PANDA (Polarization maintaining and low Absorbing) y Bow-Tie. Como se puede ver en la Figura 2.2, estas fibras se diferencian en el estado de esfuerzos internos debido a la forma geométrica de los elementos generadores de estrés —fabricados de un material, generalmente de vidrio o polímero, de coeficiente de expansión térmico mayor al del material, vidrio o polímero, con que se fabrica la fibra— ubicados alrededor del núcleo de la fibra (Varnham, Payne, Barlow, & Birch, 1983).



**Figura 2.2 Secciones transversales de los principales tipos de fibras PM de alta birrefringencia, (a) IEC, (b) PANDA y (c) Bow-Tie. La figura también muestra los ejes rápidos y lentos de las fibras.**

De acuerdo con lo anterior, en la MOF de interés en esta tesis se aplica una perturbación externa como consecuencia de la expansión de los electrodos, con lo cual, la birrefringencia de fase  $B$  total tiene la forma general

$$B(\lambda) = B(\lambda)_{Forma} + B(\lambda)_{Ext} = \left[ n(\lambda)_{0,x} + \Delta n(\lambda)_x \right] - \left[ n(\lambda)_{0,y} + \Delta n(\lambda)_y \right], \quad (2.1)$$

donde  $n(\lambda)_{0,x}$  y  $n(\lambda)_{0,y}$  son los índices de refracción efectivos de la fibra sin perturbar en las direcciones  $x$  y  $y$ , respectivamente;  $\Delta n_x$  y  $\Delta n_y$  son los cambios correspondientes en el índice de refracción efectivo para las polarizaciones  $x$  y  $y$  como consecuencia de la fuerza externa aplicada. Nótese que estos índices de refracción, y por ende la birrefringencia, son magnitudes físicas dependientes de la longitud de onda.

Por otro lado, cuando una señal luminosa se propaga en una fibra óptica, lo que se tiene en la práctica es un grupo de ondas de distintas frecuencia viajando, de ahí que sea

importante recordar los conceptos de velocidad de fase  $v_p = \frac{c}{n(\lambda)} = \frac{\omega}{k}$  de la onda individual y la la velocidad de grupo del paquete de ondas  $v_g = \frac{c}{n(\lambda)_g} = \frac{d\omega}{dk}$ . Como se sabe, estas dos velocidades se relacionan a través de la ecuación (2.2), desde donde se puede ver que cuando el índice de refracción no depende de la longitud de onda, es decir, medios no dispersivos, la velocidades de grupo y fase son iguales.

$$v_g = v_p \left( 1 - \frac{k}{n(\lambda)} \frac{dn(\lambda)}{dk} \right) . \quad (2.2)$$

El tener un medio altamente birrefringente como la MOF con electrodos, no solo generara una diferencia en las velocidades de fase de las ondas propagadas, sino que, como se acaba de mencionar, una diferencia en la velocidad de grupo, induciendo, de esta manera, una birrefringencia de grupo  $G$  definida como (Morin, Kibler, Fatome, Finot, & Millot, 2010; Yue et al., 2006):

$$G(\lambda) = \left| n(\lambda)_{g,x} - n(\lambda)_{g,y} \right| = B(\lambda) - \lambda \frac{dB(\lambda)}{d\lambda} . \quad (2.3)$$

Sin duda alguna, la ecuación (2.3) muestra la fuerte relación existente entre las dos birrefringencias, de grupo y de fase; muestra claramente que al tener el comportamiento de la birrefringencia de fase  $B$  con la longitud de onda  $\lambda$  se puede determinar cómo es el comportamiento de la de grupo  $G$ . En este punto, la suposición de que  $B$  en fibras Hi-Bi depende con la longitud de onda de acuerdo a una ley de potencia empírica de la forma

$$B = \alpha \lambda^k , \quad (2.4)$$

donde  $\alpha$  y  $k$  son constante a determinar, está fuertemente sustentada en la literatura para MOF (Michie, Canning, Lyytikäinen, Aslund, & Digweed, 2004; Morin et al., 2010). Sustituyendo esta suposición en (2.3), se sigue que

$$G = \alpha(1 - k)\lambda^k \quad (2.5)$$

Como un resultado, las constantes  $\alpha$  y  $k$  se pueden determinar graficando  $G$  contra longitud de onda. Entonces, la birrefringencia de fase  $B$  se puede determinar de  $G$  usando

$$B = G/(1 - k) \quad (2.6)$$

La ecuación (2.6) muestra que  $B$  y  $G$  no solamente difieren en magnitud, sino que también para valores típicos de fibras Hi-Bi MOF, entre 2 y 3, tienen signo opuesto. (Zhao, Yang, Lu, Jin, & Demokan, 2004).

Ahora bien, una vez definida de manera práctica la relación entre  $B$  y  $G$ , solo resta estimar los valores de birrefringencias inducidas a través de un agente extrínseco, que en el caso de las MOF con electrodos internos se debe a la perturbación en el índice de refracción de la fibra inducida por efecto termo-elástico. Es por ello que a continuación se recuerdan tanto los fundamentos de la teoría elástica de esfuerzos y deformaciones como de la teoría elasto- óptica.

## **2.2 Teoría elástica de esfuerzos y deformaciones**

Existen varios modelos bajo los cuales se pueden evaluar las deformaciones generadas en un material al aplicarle una fuerza externa: En este trabajo se realiza un análisis desde el punto de vista elástico, es decir, se asume que los esfuerzos en un material se

deben solamente a cargas, o fuerzas externas aplicadas, y cuando el sistema de cargas es removido, el cuerpo recupera su forma original. Dicho comportamiento obedece a lo que comúnmente se conoce como la *ley de Hooke generalizada*, la cual se puede escribir en notación contraída como (J. M. Cabrera, F. Agulló-Lopez, 2000).

$$\sigma_i = c_{ij} \varepsilon_j, (i, j=1,2,\dots,6), \quad (2.7)$$

donde  $\sigma_i$  es el tensor de esfuerzos,  $\varepsilon_j$  es el tensor de deformaciones y  $c_{ij}$  son los coeficientes elásticos del medio. En (2.7) se aplica la convención de suma para sub-índices repetidos en un mismo término.

Partiendo de las relaciones mecánicas entre esfuerzo y deformación en coordenadas cartesianas, se puede demostrar que (Goodier, 1970).

$$\varepsilon_x = \frac{1}{Y} \left[ \sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \right], \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{Y} \left[ \sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z) \right], \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{Y} \left[ \sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y) \right]. \quad (2.10)$$

Bajo el modelo de deformaciones planas ( $\varepsilon_z = 0$ ), lo cual es válido cuando la fibra es deformada en la dirección transversal, es decir, en el plano  $xy$  (ver figura 2.1) (Goodier,

1970), se obtiene que  $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ , que al reemplazar en (2.8) y (2.9) se llega a que las deformaciones sobre la sección transversal están dadas por las siguientes expresiones.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{Y} \left[ \sigma_x (1 - \nu^2) - \sigma_y (\nu + \nu^2) \right], \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{Y} \left[ \sigma_y (1 - \nu^2) - \sigma_x (\nu + \nu^2) \right]. \quad (2.12)$$

## 2.3 Teoría elasto-óptica

Como se ha mencionado anteriormente, las propiedades ópticas de un material pueden ser alteradas de diversas formas, siendo las más comunes cuando se expone el medio a tensiones mecánicas o a la presencia de campos electromagnéticos. En particular, se puede lograr que un medio isotrópico (material que conserva las mismas propiedades sin importar la dirección) se convierta en un material birrefringente. Ahora, la respuesta óptica comprende tanto la parte real (dispersiva) de la permitividad dieléctrica, como la parte imaginaria (disipativa), que están conectadas por las relaciones de Kramers-Krönig (Lipson, 1981). Esto significa que cualquier agente externo, en nuestro caso tensiones mecánicas, va a inducir dos tipos de efectos: uno dispersivo que afectara la velocidad de propagación y, por tanto, el índice de refracción del material, y otro disipativo que modificara el espectro de absorción. En este trabajo solo se concentrará la atención en el estudio dispersivo, debido, principalmente, a que hay un interés particular en cómo es modulada la luz al variar la tensión mecánica aplicada.

Cuando un medio es sometido a esfuerzos mecánicos se deforma, modificando no solo su estructura local, sino además la energía de sus estados iónicos y electrónicos. Esto implica que se generen cambio en la respuesta óptica del material, es decir, en el tensor



indicatriz de índices  $N_{ij} \equiv [1/n^2]_{ij}$ . Se puede escribir, en notación estándar contraída, el cambio inducido en el índice de refracción por las deformaciones elásticas como (J. M. Cabrera, F. Agulló-Lopez, 2000):

$$\Delta \left( \frac{1}{n^2} \right)_i = p_{ij} \varepsilon_j \quad (i, j = 1, \dots, 6), \quad (2.13)$$

donde  $p_{ij}$  es el tensor elasto-óptico del medio. Para un material isotrópico como el vidrio, el tensor elasto-óptico tiene la forma (J. M. Cabrera, F. Agulló-Lopez, 2000)

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{pmatrix},$$

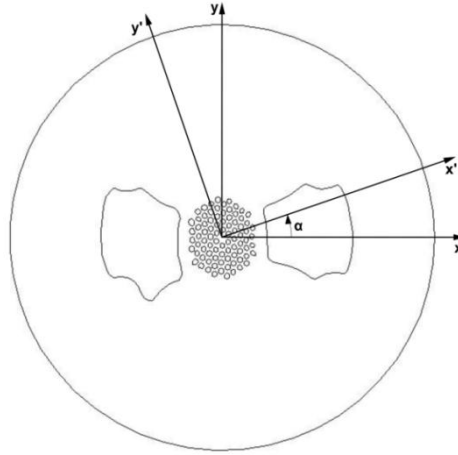
dónde  $p_{44} = (p_{11} - p_{12})/2$ . Para la sílice  $p_{11} = 0,121$  y  $p_{12} = 0,270$  (Gafsi & El-Sherif, 2000). De otro lado, dado que los cambios inducidos son pequeños, se puede admitir que  $\Delta \left( \frac{1}{n^2} \right)_i = -2\Delta n_i / n_i^3$ .

Debido a la anisotropía de la fuerza aplicada, los cambios en el índice de refracción a lo largo de los ejes principales de la fibra serán diferentes. Usando las expresiones para las deformaciones  $\varepsilon_i$  y los esfuerzos  $\sigma_i$  en aproximación de *deformación plana* ( $\varepsilon_z=0$ ), de (2.13) se pueden calcular los cambios inducidos en el índice de refracción de la fibra óptica de la siguiente manera:

$$\Delta n_{eff,x'} = -\frac{n_{eff,x'}^3}{2} \left[ \varepsilon_{x'} p_{11} + \varepsilon_{y'} p_{12} \right]. \quad (2.14)$$

$$\Delta n_{eff,y'} = -\frac{n_{eff,y'}^3}{2} \left[ \varepsilon_{y'} p_{11} + \varepsilon_{x'} p_{12} \right]. \quad (2.15)$$

Las ecuaciones (2.14) y (2.15) señalan que evaluando  $\varepsilon_x$  y  $\varepsilon_y$  en cada punto de la sección transversal de la fibra, se pueden estimar los cambios en el índice de refracción ( $\Delta n$ ) para cada polarización y, por ende, la nueva distribución de índice de refracción que tiene la fibra a lo largo de los ejes principales; ejes que, por demás, no necesariamente coinciden con los ejes originales del sistema como se indica en la Figura 2.3.



**Figura 2.3 Ilustración de cómo los ejes principales (ejes primados) de la fibra pueden estar rotados un ángulo  $\alpha$  con respecto al sistema coordenado.**

En este trabajo se emplea el método de elementos finitos para determinar la distribución de esfuerzos sobre la sección transversal de la fibra óptica micro-estructurada con electrodos internos. Esta técnica permite estimar las deformaciones  $\varepsilon_x$  y  $\varepsilon_y$  y la componente cortante de deformación  $\gamma_{xy}$  sobre los ejes coordenados (ver figura 2.1 (b)), mediante la división de toda la sección transversal en pequeños elementos. Con esta información se pueden estimar las deformaciones principales en la fibra óptica micro-

estructurada, empleando la teoría del círculo de Mohr's (Goodier, 1970) a través de la expresión:

$$\varepsilon_{x',y'} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (2.16)$$

Adicionalmente, la posición relativa de los nuevos ejes de birrefringencia de la fibra, dada por el ángulo  $\alpha$  como se muestra en la figura 2.3, se puede conocer mediante la relación (Cadavid, 2007; Carrara et al., 1986; Reyes-Vera, Gonzalez-Valencia, & Torres, 2010b; Reyes-Vera, Gonzalez-Valencia, Botero-Cadavid, et al., 2010):

$$\tan 2\alpha = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (2.17)$$

Vale decir que este último resultado es importante, pues la posición relativa de los ejes de propagación ópticos principales es idéntica a la dirección de las deformaciones principales; por tanto, la orientación de los ejes de propagación va a depender de la temperatura que se le aplique a los electrodos.

## 2.4 Método de elementos finitos (FEM)

En muchos problemas de la vida real, en los cuales un cuerpo está siendo sometido a cargas, efectos térmicos y, en general, a perturbaciones termo-elásticas, es imposible

obtener una solución completamente analítica para determinar de manera adecuada los estados de esfuerzos y deformaciones sobre la estructura, debido a la gran complejidad que estas presentan. Por esta razón, se hace necesaria la implementación de técnicas numéricas para poder predecir el comportamiento de un objeto cuando se somete al efecto de un agente externo. Una de las técnicas más empleadas para realizar este tipo de análisis es el método de elementos finitos (*Finite Element Method FEM*), el cual consiste en dividir la estructura de interés en múltiples geometrías más sencillas llamadas elementos.

Como se mencionó en la sección anterior, en esta tesis se emplea el FEM para estimar las deformaciones a lo largo de los ejes principales, ocasionadas por la expansión de los electrodos al ser calentados, para luego estimar los cambios en los índices de refracción efectivos sobre estos mismos ejes a través de las ecuaciones (2.14) y (2.15). Para ello se estiman los valores de las deformaciones promedio en la región del núcleo de la fibra (ver figura 2.4), tal y como se ha sido mostrado en diversos trabajos (Cadavid, 2007; Reyes-Vera, Gonzalez-Valencia, & Torres, 2010b; Reyes-Vera, Gonzalez-Valencia, Botero-Cadavid, et al., 2010; Torres, Botero-Cadavid, Vélez, Cordeiro, & de Matos, 2008; Zhu & Brown, 2003).

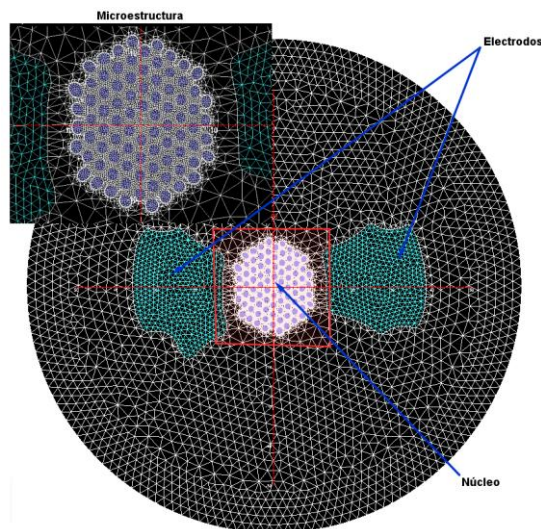


Figura 2.4 Imagen de la fibra con electrodos internos discretizada.

Además de realizar el análisis termo-elástico con el FEM, esta técnica numérica también ha sido ampliamente empleada por la comunidad científica para el análisis de la propagación característica de la luz (Reyes-Vera, Gonzalez-Valencia, & Torres, 2010a, 2010b; Reyes-Vera, Gonzalez-Valencia, Botero-Cadavid, et al., 2010; Torres et al., 2008) en guías de onda ópticas, en sus versiones escalar y vectorial de acuerdo al tipo de problema a solucionar. Mientras que en la primera se soluciona la ecuación de Helmholtz para una de las componentes del campo electromagnético (K. Kawano, 2001), con lo cual los efectos de polarización del campo electromagnético no son considerados, en la segunda se soluciona el caso vectorial completo de esta ecuación para las tres componentes del campo eléctrico, o magnético, siendo esta última versión más compleja y computacionalmente demandante, pero la más indicada cuando se desean analizar problemas en los que se involucran modos híbridos (Richard Black, 2010) y efectos de polarización de la luz (Jin, 2002). Una alternativa intermedia, en la cual la solución escalar es mejorada por un término de corrección que envuelve tanto la distribución de índice de refracción como la distribución del campo eléctrico, o magnético, calculado, fue recientemente demostrada en fibras micro-estructuradas por miembros de grupo de investigación (Aristizabal, Vélez, & Torres, 2006), dejando sentada una nueva técnica de cálculo para este tipo de fibras especiales.

### **3. Montajes experimentales**

Ya está claro que el interés en esta tesis de maestría es estudiar teórica y experimentalmente la propagación característica de la luz en fibras ópticas micro-estructurada con electrodos internos.

El punto clave es obtener evidencia experimental contundente de la evolución de la birrefringencia inducida por la expansión de los electrodos con la temperatura, de ahí que no se trabaje en régimen término dinámico sino en régimen térmico estático. Aquí, como se explica más adelante, la fibra se acomoda sobre un par de calentadores Peltier para transferir calor a la fibra, siendo esta aproximación mucho más simple y atractiva a los clásicos hornos de tubo, pues, estos últimos, al tener una longitud mucho mayor a la región de la fibra con electrodos, también inducen efectos termo-elástico en regiones de la fibra sin electrodos, lo que aumenta la complejidad del modelo experimental para extraer el valor de la birrefringencia de, apenas, la región con electrodos con la temperatura (Kim et al., 2009, 2006; S. H. Lee et al., 2009, 2012; Moon et al., 2007).

Consolidando la estrategia de simplificar el modelo experimental y, por ende, de garantizar la calidad de los resultados experimentales de la medida de la birrefringencia en la fibra micro-estructurada con electrodos interno, en esta tesis se prefirió usar óptica en volumen en lugar de empalmar los extremos de esta fibra especial a fibras ópticas estándares para desarrollar, como era de esperarse, un circuito de detección completamente a fibra óptica. Si bien ello aumentó la complejidad de la puesta a punto de esta fase experimental, se gana en el control del estado de polarización de luz.

Otro de los elementos importantes de esta tesis es que se investiga la influencia de los metales insertados en los huecos laterales sobre la sensibilidad de la birrefringencia de la fibra con la temperatura. Entender el efecto de los metales sobre las características ópticas de estas fibras especiales es muy importante para el diseño de dispositivos basados en esta tecnología. Como la expansión de los electrodos metálicos depende linealmente de los cambios térmicos, se busca una aleación con coeficiente de expansión alto. Para investigar esta dependencia, aquí se trabaja la fibra micro-estructurada con electrodos de Bismuto y de Indio, dos materiales que, como se especifica más adelante, tienen coeficientes de expansión térmica considerablemente diferentes.

A continuación se hace una descripción detallada de los montajes y protocolos realizados para llevar a cabo la caracterización experimental de las MOF con electrodos de Indio y Bismuto.

### **3.1 Sistema de calentamiento**

Uno de los principales inconvenientes de trabajar con temperatura es, sin duda alguna, la inercia que esta tiene, sobre todo cuando es generada a través de dispositivos electrónicos. Por esta razón se diseñó e implementó un circuito que permite tener una alimentación electrónica adecuada para el sistema de calentamiento el cual, como ya se comentó, se basa en dos Peltier conectados en serie. Una alimentación adecuada hace referencia a que el circuito de control permite suministra una corriente pulsada para garantizar estabilidad en la temperatura aplicada sobre los electrodos durante la medición. Para ello, se aprovechó las características del circuito integrado XR-2206 como generador de señal (sinusoidal, cuadrada, triangular), y que a la vez permite modular señales eléctricas. La frecuencia y amplitud de las señales de este circuito integrado pueden ajustarse a través de resistencias y capacitores convencionales. La señal electrónica generada pasa a una segunda etapa, consistente de una fuente de corriente ajustable —hecha con el amplificador operacional LM324—, diseñada de tal manera que no sobrepasa los límites de corriente permisibles para el Peltier. En las terminales de salida del circuito se conectaron en serie dos Peltier de referencia TEC1-1270 para

calentar una longitud total de 8 cm de la MOF con electrodos internos, como se muestra en la Figura 3.1.

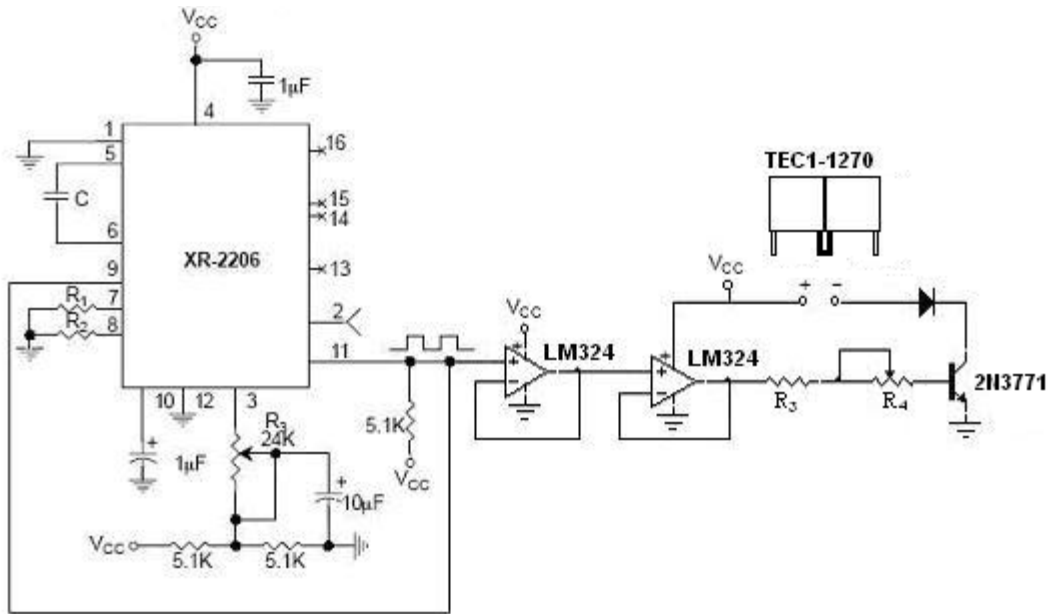


Figura 3.1 Circuito desarrollo para generar una señal de corriente pulsada para la alimentación de los Peltier.

Una vez que se confirmó el efectivo control térmico del sistema de calentamiento, se procedió a su calibración con el fin de establecer la curva característica. Para ello, los Peltier conectados en serie se acomodaron sobre una base metálica a la que previamente se le había aplicado una capa homogénea de una pasta térmica para ayudar a que el flujo térmico fuese más eficiente y, así, aumentar la vida útil de los Peltier. Aplicando diferentes voltajes entre las terminales de los Peltier y, junto con un termopar tipo K conectado a un multímetro calibrado, se registraron los valores de temperatura en tiempo real, garantizando, de esta manera, que las lecturas sean estables en el valor fijado. La Figura 3.2 muestra la curva de calibración del sistema de calentamiento con el voltaje aplicado, encontrándose una relación exponencial de la forma:

$$\Delta T = A_1 e^{-\frac{V}{t_1}} + A_2 e^{-\frac{V}{t_2}} + \Delta T_0 . \quad (3.1)$$



En esta expresión,  $A_1=94.69892$ ,  $t_1=-57.97374$ ,  $A_2=25.3221$ ,  $t_2=-17.42591$  y  $\Delta T_0=-119.89267$ .

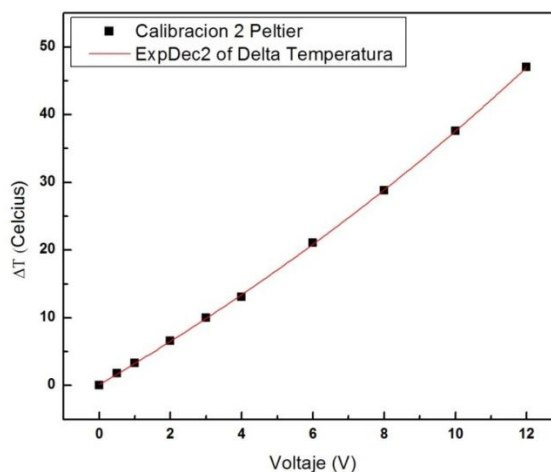


Figura 3.2 Curva de calibración del sistema de calentamiento.

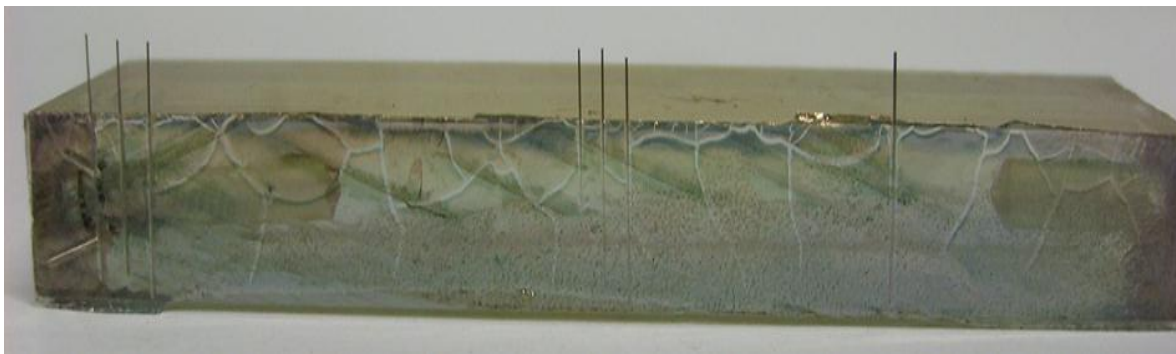
### 3.2 Caracterización de las muestras de fibra micro-estructurada con huecos laterales

Una vez diseñado el sistema de calentamiento, se hizo la elección de la fibra que se va a llenar con Indio y Bismuto. El primer paso antes de iniciar la caracterización, es conocer los parámetros estructurales (forma y distribución de los micro-huecos) de las fibras micro-estructuradas disponibles, pues, como se sabe, las propiedades ópticas de estas fibras especiales dependen directamente del periodo de la estructura (distancia entre los agujeros) y el diámetros de sus agujeros (Li et al., 2008; Song et al., 2007).

Para obtener imágenes SEM de buena calidad de la sección transversal de las fibras disponibles, se tomaron muestras de aproximadamente 1 cm de largo y se “clivaron” sus extremos para garantizar caras planas; ello facilita que se pueda depositar una película de oro homogénea cuando se introduce la muestra al *Sputtering* (Ver Figura 3.3). (Para obtener imágenes SEM de buena calidad, se debe evitar una deposición inhomogénea del material conductor, pues al interactuar el haz de electrones con la muestra produce

acumulación de cargas en las regiones donde no hay material conductor, impidiendo la correcta visualización de la muestra).

Una vez preparadas las muestras, se tomaron imágenes SEM de las fibras microestructuradas disponibles para esta tesis, ver Figura 3.4. Para su micro-caracterización, se empleó un programa CAD, en el que se aprovecharon tanto herramientas de dibujo como de escalado para elaborar dibujos muy precisos de sus secciones transversales. Como resultado se encontró que el diámetro externo de estas fibras es de  $170\ \mu\text{m}$  y una microestructura compuesta por cinco anillos de huecos, organizados de forma hexagonal. En la tabla 3.1 se hace un resumen los resultados obtenidos de la caracterización de las cuatro fibras disponibles. Como se puede ver, se obtuvieron valores del diámetro de los huecos,  $d$ , desde  $0.7\ \mu\text{m}$  hasta  $1.17\ \mu\text{m}$ , y de periodicidad,  $\Lambda$ , desde  $1.95\ \mu\text{m}$  hasta  $2.75\ \mu\text{m}$ . Las estructuras etiquetadas como MOF-A y MOF-B tienen electrodos más grandes y que además se encuentran más cercanos a la región del núcleo, mientras que las otras dos estructuras, etiquetadas como MOF-C y MOF-D, el tamaño de los electrodos es menor y están más alejados del núcleo; nótese que el núcleo de las fibras MOF-A y MOF-B es elíptico, mientras que las MOF-C y MOF-D se puede considerar circular. Vale decir que el cuidado de este proceso es fundamental dado que estos modelos de las secciones transversales de las fibras se emplean en el análisis foto-elástico para lograr entender la física de estas fibras especiales.



**Figura 3.3** Fotografía de las muestras recubiertas con una película de oro

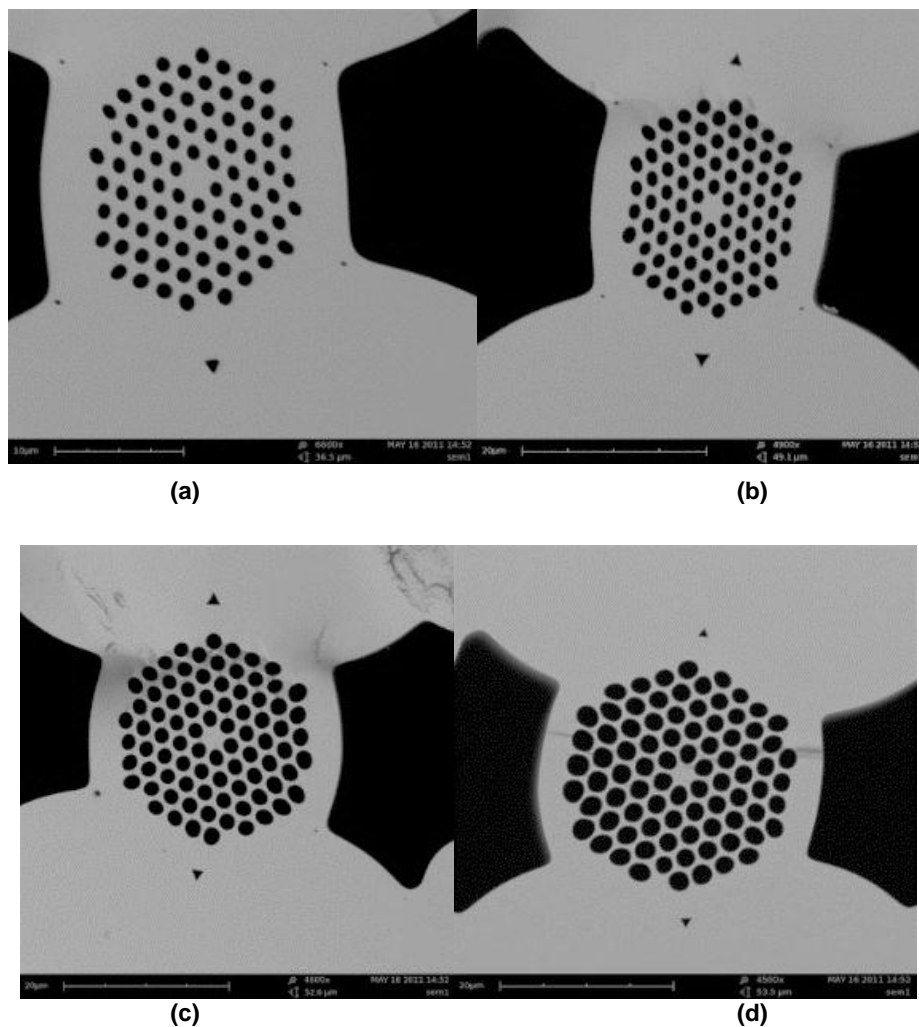


Figura 3.4 Imágenes SEM de las fibras micro-estructuradas con huecos, (a) MOFMOF A, (b) MOFMOF B, (c) MOFMOF C y (d) MOFMOF D.

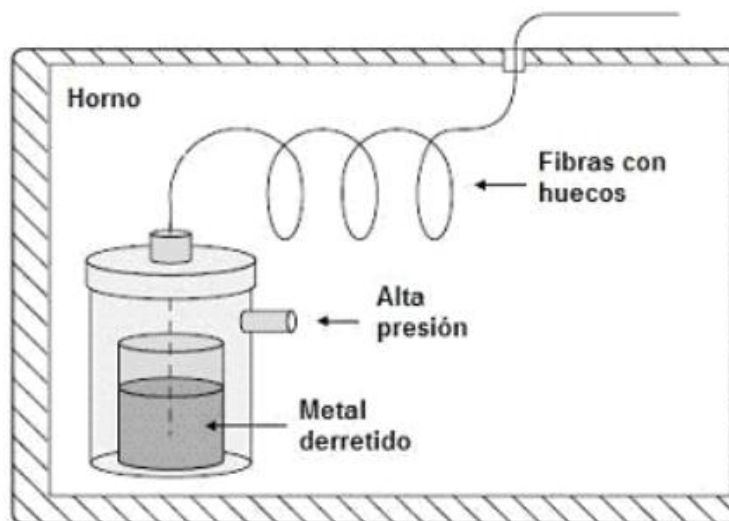
Tabla 3.1 Parámetros físicos de las fibras micro-estructuradas analizadas.

Parámetro	MOFMOF A	MOFMOF B	MOFMOF C	MOFMOF D
<b>Diámetro promedio (d) [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	0.703	0.892	1.050	1.167
<b>Periodo promedio (<math>\Lambda</math>) [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	1.952	2.098	2.400	2.751
<b>Fracción de llenado (d/<math>\Lambda</math>)</b>	0.361	0.425	0.438	0.424
<b>Ancho promedio de los electrodos [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	28.5	24.88	22.34	20.93
<b>Dimensiones del núcleo [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	$r_{\min}=1.13$ $r_{\max}=1.61$	$r_{\min}=1.24$ $r_{\max}=1.51$	$r_{\min}=1.34$ $r_{\max}=1.36$	$r_{\min}=1.39$ $r_{\max}=1.39$
<b>Separación promedio de los huecos con respecto al núcleo [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	11.94	12.88	15.05	16.22

### 3.3 Técnica de inserción de metales

Para llevar a cabo la técnica de bombeo de metales al interior de los agujeros laterales de las MOF, se aprovechó una pasantía de investigación a la Universidad Estadual de Campinas – Brasil. Allí se empleó un montaje similar al ilustrado en la Figura 3.5, descrito previamente en la introducción.

Por limitaciones del equipo empleado en el laboratorio, se realizó el llenado de las MOF a una presión de 5 bares. En el caso del llenado con Bismuto se realizó un calentamiento del metal al interior del horno hasta alcanzar una temperatura cercana a los 300 °C, temperatura que, como se puede ver en la Tabla 3.2, está por encima de la temperatura de fusión del metal; para el caso del llenado de la MOF con Indio, solo fue necesario realizar un calentamiento cercano a los 200 °C. El tiempo que duraba este proceso de llenado era alrededor de 4 horas, puesto que estos metales son bastante densos, y para garantizar unos electrodos continuos a lo largo de las muestras analizadas, se prefería que este proceso fuera lento para evitar burbujas de aire.



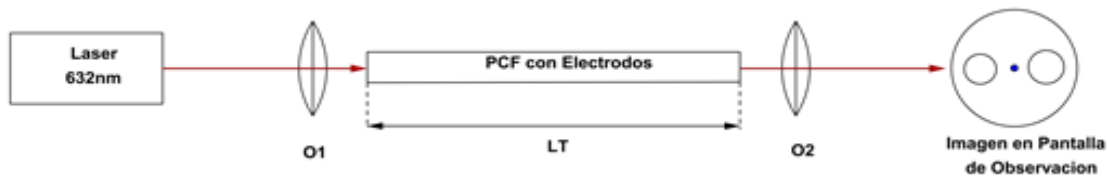
**Figura 3.5 Sistema de inserción de electrodos internos dentro de una fibra con huecos** (Michel Fokine, Lars-Erik Nilsson, Åsa Claesso, Walter Margulis, Leif Kjellberg, Pedro Torres, 2003b).

Tabla 3.2. Propiedades de los materiales ("www.matweb.com," n.d.)

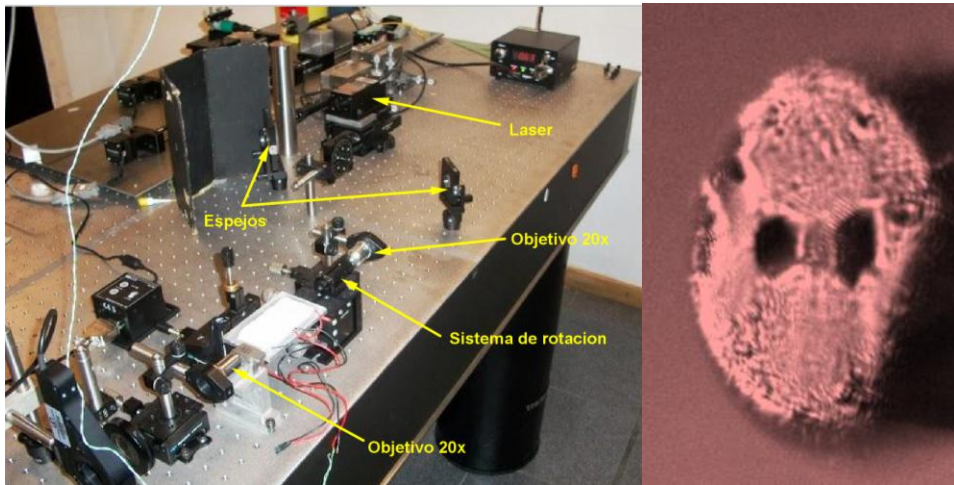
Propiedad	Sílice	Indio	Bismuto
Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	2200	7300	9780
Módulo de Young [GPa]	69	12,74	34
Relación de Poisson	0,17	0,4478	0,33
Coeficiente de Expansión Térmica [1/K]	0,5x10 <sup>-6</sup>	32,1x10 <sup>-6</sup>	13,2x10 <sup>-6</sup>
Conductividad Térmica [W/m °K]	1,5	81,4	7,97
Capacidad Calórica [J/Kg °K]	700	234	124
Temperatura de Fusión [°C]	1400	156,6	270
Temperatura de llenado [°C]	N/A	200	300

### 3.4 Determinación de la posición relativa de los electrodos en el sistema de calentamiento

Debido al sistema de calentamiento elegido en esta tesis, es de vital importancia garantizar que los dos electrodos internos de la fibra se encuentren a la misma distancia de la superficie de los Peltier, de esta manera se asegura que no se tiene un gradiente térmico en los electrodos y, por ende, una mejor aproximación de las condiciones experimentales a la hora realizar el modelo teórico. Para ello, se desarrolló el montaje ilustrado en la Figura 3.6, en la que la luz visible de un láser de HeNe ( $\lambda=632.8$  nm) ilumina toda la sección transversal de la MOF a través de un objetivo de microscopio 20X (O1 en el esquema); la intención es hacer que esta luz láser viaje por todo el revestimiento de la fibra MOF para poder hacer una imagen. La lente O2 magnifica la imagen formada sobre una pantalla de observación, de manera que fácilmente se puede conocer la posición exacta de los electrodos con respecto al sistema de calentamiento. Cabe resaltar que a pesar de la simplicidad de este montaje, se logran obtener imágenes de buena calidad, para lo cual es importante la limpieza de las muestras y un buen *clivador* para tener las caras de las fibras totalmente planas. Vale decir que la MOF está asegurada por una montura rotante para corregir la posición de los electrodos con un error de 5°.



(a)



(b)

Figura 3.6 (a) Esquemático del montaje empleado para determinar la posición de los electrodos; (b) evidencia fotográfica del montaje experimental y; c) imagen obtenida de la MOF con electrodos internos.

### 3.5 Medición de la Birrefringencia de Grupo

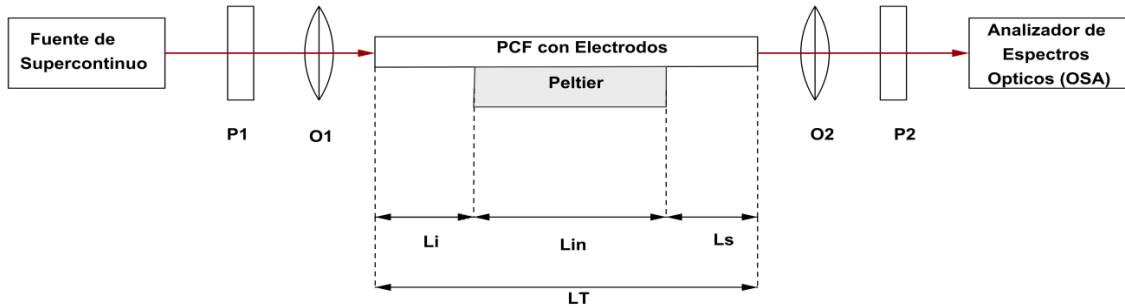
Para la medición de la birrefringencia de grupo se implementó un interferómetro de baja coherencia con dos polarizadores cruzados (ver Anexo A para su fundamentación teórica). Para ello, como se puede ver en la Figura 3.7, se empleó una fuente de luz supercontinua de fibra óptica que ofrece una densidad espectral mayor a las fuentes de luz blanca estándar en un rango espectral amplio (800 nm-1700 nm) —fundamental, ya que, como se explicó, se usa óptica en volumen con lo cual se pierde mucha luz dado el tamaño del orden de  $1 \mu\text{m}$  de la región central de la MOF—. La luz emitida por esta fuente de luz especial se dirige al primer polarizador, P1, ubicado a  $45^\circ$  con respecto a los ejes de birrefringencia de las fibras analizadas; ello permite iluminar los dos caminos ópticos de la fibra, i.e., sus ejes rápido y lento, con la misma cantidad de luz o, en

---

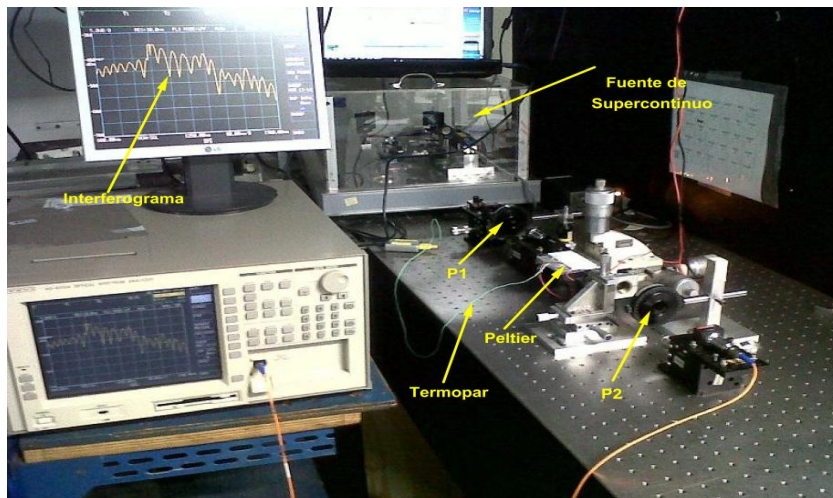
términos más precisos, los modos fundamentales de propagación asociados a los ejes de birrefringencia de la fibra tienen igual cantidad de energía. En el extremo de salida de la fibra se tendrán dos señales óptica con una diferencia de fase por cuenta de las velocidades de grupo en cada uno de los ejes de la fibra ( $n_g = c/v_g$ ). La segunda lente objetiva de 60x se encarga de recoger toda la luz a la salida de la fibra y hacerla pasar por un segundo polarizador con eje de transmisión a  $-45^\circ$  (perpendicular al polarizador de la entrada), de esta manera se hacen interferir los dos modos de propagación fundamentales, generando en el espectro de transmisión un patrón típico de máximos (interferencia constructiva) y mínimos (interferencia destructiva). Vale decir que el contraste del interferograma depende fuertemente de la correcta ubicación de los dos polarizadores, siendo uno de los puntos más críticos de este montaje, pues en caso de no iluminar correctamente los dos ejes de la fibra, el interferogramas no tendrá el contraste necesario para poder hacer una buena medida de la birrefringencia de grupo. En ese sentido, los polarizadores empleados en este montaje tienen una relación de extinción de 10000:1 en el rango espectral analizado. Como se muestra en la evidencia fotográfica del montaje en la figura 3.7 (b), el espectro de transmisión se mide con un analizador de espectros ópticos (ANDO, AQ-6315A), en donde se puede observar que los interferogramas obtenidos tiene un buen contraste. La Figura 3.7(c) muestra en detalle cómo se ubicada la MOF con electrodos internos sobre los Peltier. Se puede evidenciar que apenas la longitud central de la fibra (8 cm) está en contacto con los Peltier (Lin) y, por ende, su birrefringencia será alterada por los cambios térmicos. Las zonas de los extremos de la fibra, etiquetadas como Li y Ls en el esquema de la figura 3.7(a), no están en contacto con los Peltier y, por lo tanto, su birrefringencia se mantiene inalterada. En la Tabla 3.3 relaciona las longitudes de cada sección de las fibras analizadas para cada caso

Cabe resaltar que parte del trabajo experimental consistió en darle un buen uso y manejo a las muestras, pues debían ser tratadas con ciertos cuidados especiales, ya que por ser fibras micro-estructuradas fabricadas en laboratorios de investigación, no poseen una capa de acrilato que les da una mayor resistencia mecánica, lo que las hace muy frágiles. Además, como se ha dicho anteriormente, es importante garantizar la limpieza para poder obtener resultados de calidad.

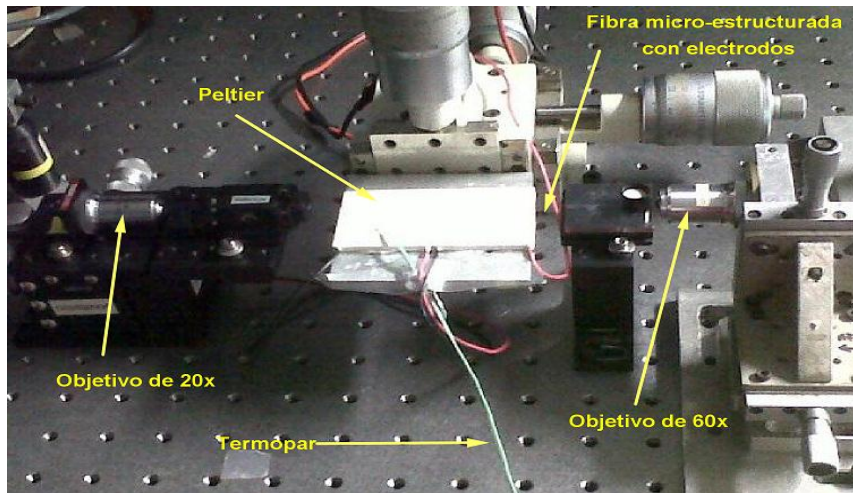




(a)



(b)



(c)

Figura 3.7 (a) Esquemático del montaje experimental empleado para la medición de la birrefringencia de grupo; (b) evidencia fotográfica del montaje experimental; (c) foto que muestra en detalle la ubicación de la fibra sobre los Peltier.



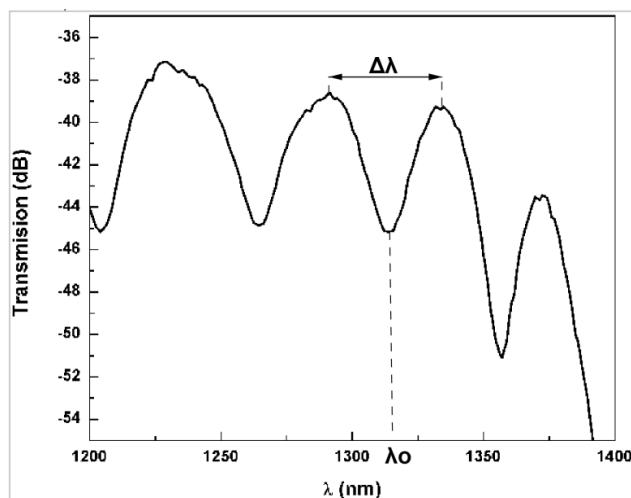
En la Figura 3.8 se ilustra, a manera de ejemplo, uno de los interferogramas obtenidos en este trabajo. De aquí es posible obtener la birrefringencia de grupo empleando la ecuación (3.2), para lo cual se realiza un ajuste Gaussiano a los máximos y mínimos del interferograma para, así, definir muy bien, dado las pequeñas modulaciones por el ruido de la señal,  $\Delta\lambda$  y  $\lambda_0$ .

$$G = \frac{\lambda_0^2}{L_T \cdot \Delta\lambda}. \quad (3.2)$$

En la ecuación (3.2),  $L_T$  es la longitud total de fibra analizada [ver Fig. 3.7(a)].

**Tabla 3.3 Longitud de las fibras micro-estructuradas analizadas.**

Fibra Analizada	$L_i$ [cm]	$L_{in}$ [cm]	$L_s$ [cm]	$L_{Total}$ [cm]
Fibra sin metal	-	-	-	22.7
Fibra con In	6.40	8.00	7.85	22.25
Fibra con Bi	7.90	8.00	6.35	20.4



**Figura 3.8 Interferogramas obtenidos con el montaje experimental de la Figura 3.7**

El procedimiento cuando la fibra micro-estructurada es sometida a cambios térmicos es más complejo, dado que ahora es necesario conocer cuál es el cambio de birrefringencia de grupo de la sección que se calienta (los 8 cm de Peltier). Como se ilustra en la Figura 3.9, al calentarse la sección central de la fibra se genera un corrimiento en los interferogramas hacia la izquierda; sin embargo, como ya quedó claro, la ecuación (3.2)

da cuenta de la birrefringencia total de la fibra la cual, como se sabe de la Figura 3.7(a) y la Tabla 3.3, tiene dos secciones que no tiene contacto con los Peltier. Por esta razón, se hace necesario construir un modelo para analizar el comportamiento de la birrefringencia de grupo de, apenas, la sección central de la fibra sujeta a efectos térmicos. Siguiendo de cerca el modelo de Kim (Kim et al., 2009) y de la ecuación (3.2), se puede decir que el producto de la birrefringencia de grupo,  $G$ , y la longitud total de la fibra  $L_T$  ( $GL_T = \lambda^2 / \Delta\lambda$ ), es el resultado de las tres secciones [ver figura 3.7(a)], de tal manera que

$$\frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = G_{\text{temp}} L_{\text{in}} + G_o L_o, \quad L_o = L_1 + L_s. \quad (3.3)$$

Aquí,  $G_{\text{temp}} L_{\text{in}}$  y  $G_o L_o$  son el producto para las regiones dentro y fuera del sistema de calentamiento, respectivamente. Por lo tanto, la birrefringencia de grupo debida únicamente a la región expuesta a cambios térmicos está dada por:

$$G_{\text{temp}} = \frac{\lambda^2}{L_{\text{in}} \Delta\lambda} - G_o \frac{L_o}{L_{\text{in}}}, \quad (3.4)$$

donde  $G_o$  se obtiene de la medida de la birrefringencia de grupo cuando los Peltier están apagados, es decir, es la birrefringencia de grupo intrínseca inducida por el proceso de inserción de los electrodos.

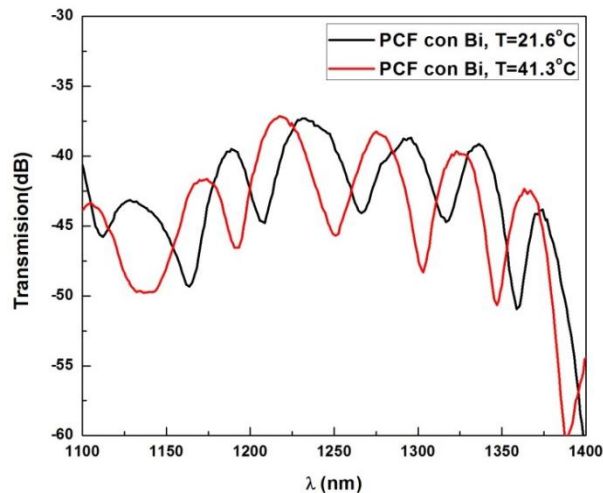


Figura 3.9 Corrimiento espectral cuando los electrodos son alterados térmicamente

## 4. Análisis de resultados y discusión

En este capítulo se presentan, de una parte, los resultados experimentales obtenidos a partir de los montajes diseñados en el capítulo anterior y, de otra parte, se explica el esquema de análisis desarrollado de la multi-física del problema usando el método de elementos finitos, soportado por la teoría elasto-óptica (capítulo 2). Ello permite hacer una comparación entre los resultados teóricos y experimentales obtenidos en la caracterización óptica de las MOF con electrodos internos y la influencia del coeficiente de expansión térmica en estos parámetros

### 4.1 Resultados experimentales

El primer paso en esta fase experimental es elegir a cuál de las MOF que se tiene a disposición se le hará el proceso de inserción del electrodo. Para ello, se tomaron muestras de 22,7 cm de longitud de las cuatro MOF y se les midió la birrefringencia de grupo en un rango espectral de 800 nm a 1700 nm con el objetivo de determinar la fibra que posee menor birrefringencia de grupo antes del proceso de llenado con Indio y Bismuto. Estas mediciones se llevaron a cabo a temperatura ambiente del laboratorio,  $\approx 22^\circ\text{C}$ .

En la Figura 4.1(a) se observan los interferogramas obtenidos para cada una de las MOF analizadas. Se observa que los patrones de interferencia de la MOF-A y de la MOF-B tienen un periodo menor a las de la MOF-C y MOF-D, traduciéndose en una mayor birrefringencia (ver ecuación (3.2)). Vale decir que en todos estos espectros existen dos picos de potencia a las longitudes de onda de 1060 nm y 1400 nm, aproximadamente, los

cuales son propios de la fuente de supercontinuo empleada para esta caracterización. Al observar las imágenes SEM de la Figura 3.4, es evidente que las distribuciones de los huecos de la micro-estructura para las diferentes configuraciones analizadas en este trabajo son similares, apenas difieren, en sus parámetros físicos ( $d$  y  $\Lambda$ ), ver tabla 3.1, por lo que al confrontar estos resultados con las curvas de birrefringencia de grupo de la Figura 4.1(b), se comprueba lo observado por otros investigadores (Li et al., 2008; Tsuchida, Saitoh, & Koshiba, 2005; Yue et al., 2006) en cuanto a que la birrefringencia geométrica y otros parámetros ópticos de las fibras micro-estructuradas dependen fuertemente de dichos parámetros físicos. Al hacer un paralelo entre la tabla 3.1 y la Figura 4.1(b), era claro esperar un comportamiento similar entre la MOF-C y la MOF-D las cuales, por un lado, tienen unos macro-huecos laterales de menor tamaño y más cercanos al núcleo de la MOF y, por otro lado, la forma muy circular de sus núcleos, a diferencia de las configuraciones MOF-A y MOF-B que presentan una forma elíptica y, por ende, una birrefringencia más alta. Basado en el análisis anterior, la fibra elegida es la MOF-C.

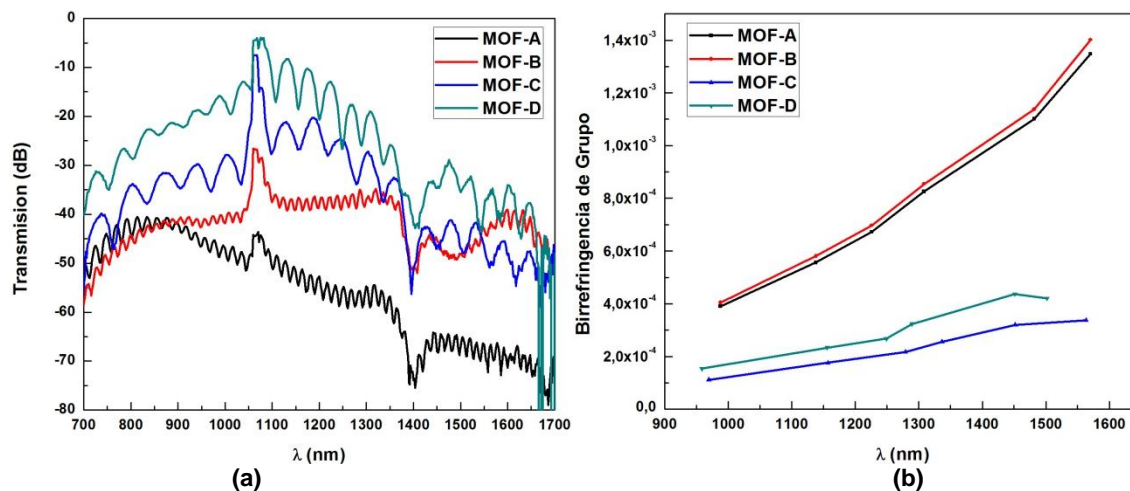


Figura 4.1 Resultados de las MOF con huecos: (a) interferogramas obtenidos con el montaje de la Figura 3.5; (b) curvas de birrefringencia de grupo.

El siguiente paso, como ya se explicó, es proceder con el proceso de inserción de electrodos de Bismuto e Indio usando el montaje de la Figura 3.7 bajo las condiciones descritas para cada caso y realizar, nuevamente, la medición de la birrefringencia de grupo a temperatura ambiente y, así, evidenciar los efectos del proceso de inserción del metal. En la Figura 4.2(a) se muestran los resultados de la birrefringencia de grupo

intrínseca,  $G_0$ , de la región de los Peltier para las fibras llenas de metal y la fibra sin electrodos. Vale recordar que para el modelo desarrollado en la sección 3.3 es de vital importancia obtener la birrefringencia aportada solo por esta sección, puesto que todos los resultados que se presentan a continuación solo se tiene en cuenta la región alterada por cambios térmicos. De la Figura 4.2(a) se ve claramente que insertar un metal en los huecos laterales de la MOF disminuye el periodo de los interferogramas (aumento del número de máximos y mínimos en un intervalo de longitudes de onda), lo cual se traduce en un cambio en la birrefringencia de grupo inicial. Este comportamiento se debe a la diferencia de los coeficientes de expansión térmica entre la sílice pura con que se fabricó la fibra y los metales infiltrados en los huecos laterales (ver tabla 3.1), los cuales, una vez se enfrían, modifican la distribución de esfuerzos internos de la MOF, dejándola con una birrefringencia remanente. Como quedó establecido de los fundamentos teóricos, a partir de los interferogramas de la Figura 4.2(a) se pueden generar las curvas de  $G$  a través la ecuación (3.2); en la Figura 4.2 (b) se muestran las curvas correspondientes para las tres condiciones analizadas, observándose que  $G$  aumenta con la longitud de onda; la explicación para ello se puede encontrar en la Figura 4.3, en la que se puede ver que a una longitud de onda larga hay mayor interacción de la luz con la microestructura de la fibra, siendo de esta manera más afectadas por la expansión de los electrodos, mientras que a una longitud de onda corta la luz está bien confinada debido a la micro-estructura y, por tanto, las alteraciones debidas a las deformaciones son menores. Para evidenciar esto último, en la tabla 4.1 se muestran los valores de birrefringencia de grupo para las tres muestras analizadas a 980 nm, 1310 nm y 1550 nm, las cuales son las longitudes de onda más representativas en telecomunicaciones.

**Tabla 4.1 Birrefringencia de grupo de la MOF con y sin metal para tres longitudes de onda representativas ( $T \approx 22^\circ\text{C}$ ).**

Fibra	980 nm	1310 nm	1550 nm
MOF sin metal	$7.40 \times 10^{-5}$	$1.45 \times 10^{-4}$	$2.26 \times 10^{-4}$
MOF con Bismuto	$1.08 \times 10^{-4}$	$2.11 \times 10^{-4}$	$2.95 \times 10^{-4}$
MOF con Indio	$1.26 \times 10^{-4}$	$2.45 \times 10^{-4}$	$3.57 \times 10^{-4}$

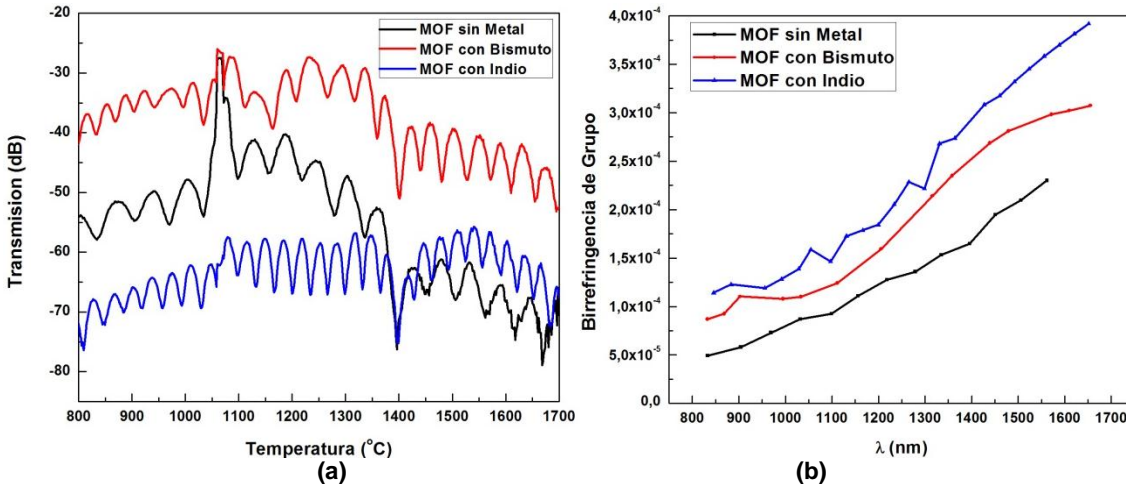


Figura 4.2 (a) Espectros de transmisión. (b) Birrefringencia de grupo de la MOF con y sin metal a  $T=22^{\circ}\text{C}$ .

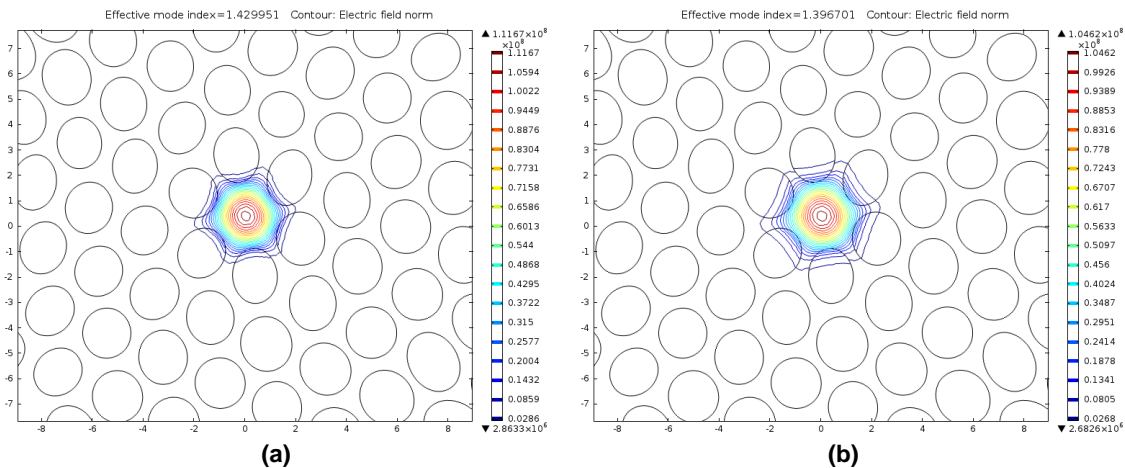


Figura 4.3 Distribución del campo eléctrico del modo fundamental para (a)  $\lambda=980$  nm y (b)  $\lambda=1550$  nm.

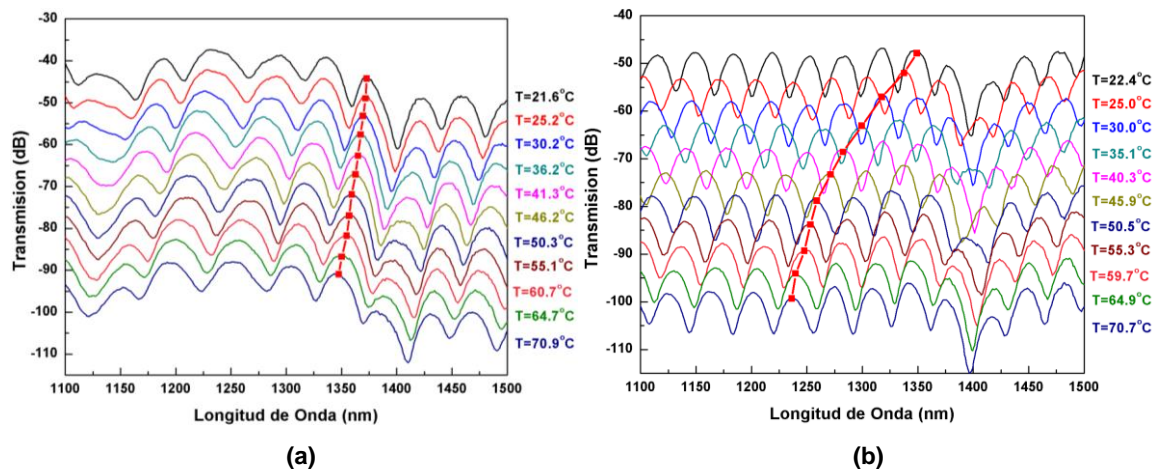
Continuando con la caracterización de las MOF con electrodos, se evaluó la sensibilidad térmica a través de un análisis de los interferogramas obtenidos en el analizador de espectros a diferentes temperaturas siguiendo el procedimiento anterior. Debido a que en esta etapa el estudio se focaliza en el comportamiento térmico, es esencial tener ciertas precauciones al momento de realizar la medición y la implementación de todos los montajes descritos en el capítulo anterior; seguido de esto, se ubicó de forma correcta la MOF con electrodos con ayuda del montaje de la Figura 3.6 para posicionar los dos electrodos al mismo nivel de altura de la superficie de los Peltier. Una vez el sistema de calentamiento alcanza cierta temperatura —monitoreada en tiempo real con el termopar

tipo K— se esperaba cerca de 15 minutos para garantizar que la fibra estuviera en estado estable, es decir, los esfuerzos y deformaciones inducidas por la expansión de los electrodos se mantuvieran estáticos durante la medición y, una vez observado este protocolo, se registraron los espectros presentados en la Figura 4.4, los cuales comprenden un rango experimental en el infrarrojo cercano de interés para la tecnología de las telecomunicaciones ópticas, i.e., entre 800 nm a 1700 nm.

Por simplicidad, y en procura de una mejor visualización, las Figuras 4.4(a) y 4.4(b) apenas muestran los resultados para las MOF con electrodos de Bismuto e Indio, respectivamente, en el rango de longitudes de onda de 1100 nm a 1500 nm. Se observa cómo al incrementar la temperatura aplicada en los electrodos las franjas de interferencia presentan un corrimiento progresivo hacia longitudes de onda más cortas, indicando que la birrefringencia disminuye al incrementar la temperatura. Este comportamiento concuerda con reportes previos en fibras convencionales con electrodos internos fabricadas bajo condiciones de presión de infiltración de los metales próximas a las usadas en esta tesis (Kim et al., 2009; S. H. Lee et al., 2009; Moon et al., 2007); aquí es oportuno informar que en un reporte reciente de estos mismos autores (S. H. Lee et al., 2012) se concluye que a medida que se aumenta la presión de infiltración del metal, específicamente Indio, disminuye la birrefringencia de la fibra, dando paso a que a temperaturas mayores a 60 °C (45 bar) se genera una saturación en el corrimiento de los interferogramas; incluso, en un trabajo anterior con electrodos de Indio a temperaturas mayores a 120 °C (D. H. Kim & Kang, 2004) se reporta que los espectros comienzan a moverse hacia longitudes más altas, es decir, se genera el comportamiento opuesto al presentado a bajas temperaturas. Por las condiciones alcanzadas en esta tesis, 5 bares de presión y una temperatura máxima de trabajo de 70 °C, no es posible evidenciar el corrimiento espectral hacia longitudes más altas por parte de los interferogramas.

Para evidenciar la influencia del coeficiente de expansión térmica de los metales en la respuesta óptica de la MOF, en la Figura 4.5 se grafica el corrimiento espectral de los interferogramas de la Figura 4.4. Como se puede observar, en el caso de la MOF con electrodos de Bismuto el corrimiento espectral es linealmente decreciente, con una tasa de -0.93 nm/K, la cual es ~5 veces mayor al valor de sensibilidad recientemente

reportada para una fibra convencional con electrodos internos (Lee et al., 2009). Por otro lado, para el caso de la MOF con electrodos de Indio, su región lineal comprende el rango de temperaturas de 22 °C a 45 °C, decreciendo a una tasa de -3.68 nm/K, la cual es ~4 veces mayor al caso de la MOF con electrodos de Bismuto y 3/5 de la sensibilidad reportada para la fibra convencional con electrodos de Indio; se observa también que para valores de temperatura mayores a 45°C, el corrimiento de la longitud de onda del pico analizado en el interferograma presenta un comportamiento no lineal, el cual, como se demostrará más adelante, se asocia a la rotación que sufren los ejes de birrefringencia de la fibra por efecto de los esfuerzos inducidos por la expansión de los electrodos. Este resultado sin antecedentes en la literatura mundial, permite explicar el comportamiento anómalo de la birrefringencia con la temperatura en este tipo de fibras.

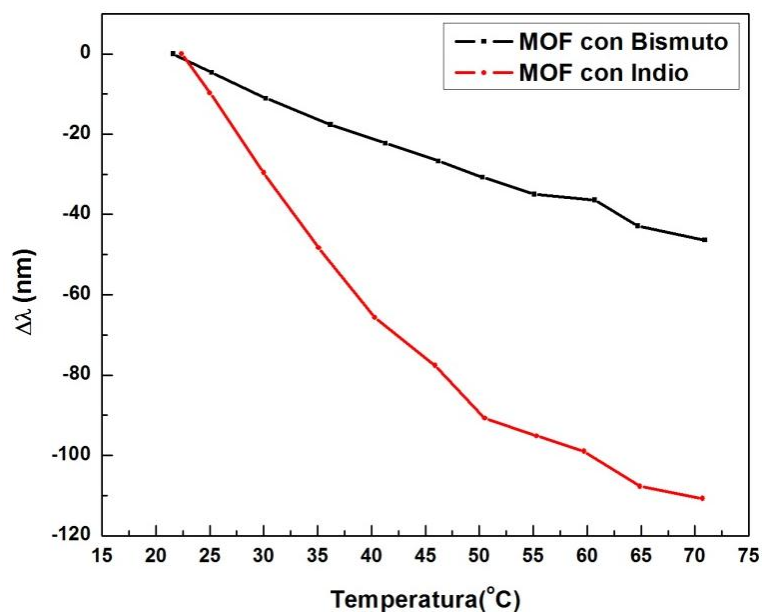


**Figura 4.4** Espectros de transmisión obtenidos a diferentes temperaturas para la MOF con: (a) electrodos de Bismuto, (b) electrodos de Indio. La línea roja muestra el corrimiento de los interferogramas con la temperatura.

Para poder explicar la alta sensibilidad térmica de la MOF estudiada en esta tesis frente a los resultados reportados en fibras convencionales con electrodos, situación que *a priori* no se esperaba ya que la micro-estructura de la MOF apantalla los esfuerzos inducidos por la expansión de los electrodos en la región central de la fibra, en la Figura 4.6 se comparan las distribuciones de esfuerzos a lo largo de los ejes  $x$  y  $y$  en la MOF analizada con la distribución de esfuerzos en una fibra convencional con los mismos tipos de electrodos. Las regiones señaladas con flechas blancas focalizan los esfuerzos generados en ciertas direcciones, observándose unas líneas de esfuerzos diagonales



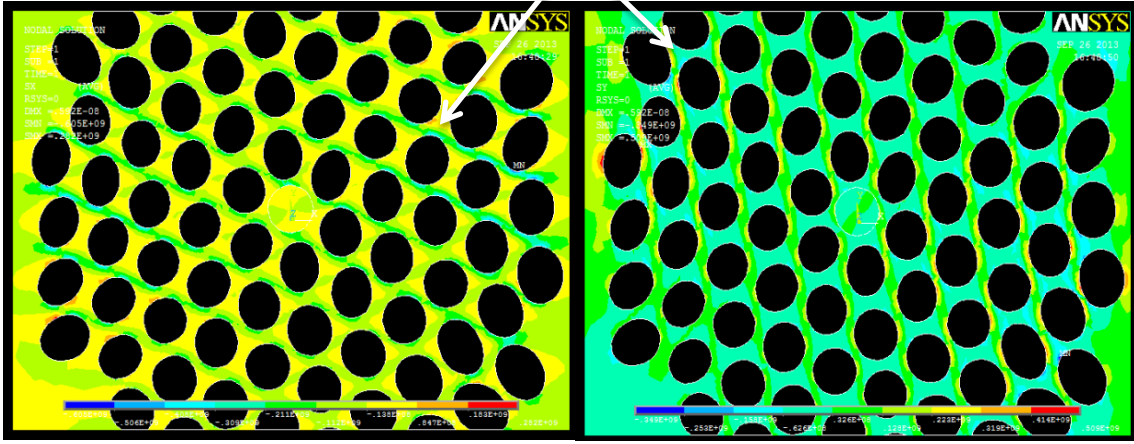
dictadas por la distribución de los huecos que alcanzan la región central de la fibra y, por tanto, una sensibilidad térmica mayor a la esperada. A diferencia del caso anterior, en la fibra convencional las magnitudes de los esfuerzos sobre el núcleo son homogéneos (basado en el mapa de colores), lo que hace pensar que los esfuerzos generados por la expansión de los electrodos se distribuyen en un área mayor y, por consiguiente, de acuerdo al proceso de infiltración del metal, la sensibilidad térmica reportada en esta fibras.



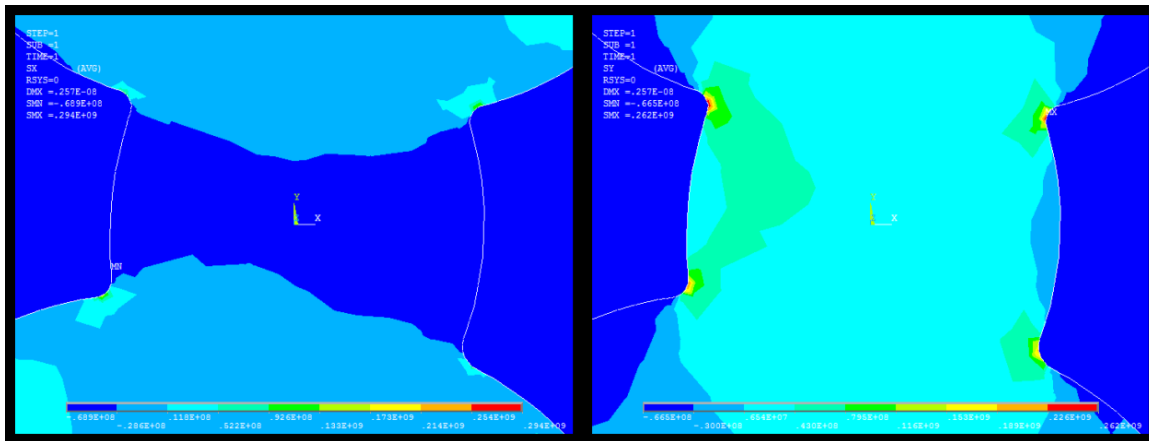
**Figura 4.5** Corrimiento de la longitud de onda de los interferogramas para las MOF con electrodos de Indio y Bismuto.

De otro lado, usando las ecuaciones (3.2) a (3.4) se determinó la birrefringencia de grupo de la región de la MOF sujeta a efectos térmicos. Para ello, los máximos y mínimos de los interferogramas registrados con el OSA se ajustaron con funciones Gaussianas con miras a definir de forma precisa las  $\lambda_0$  y los  $\Delta\lambda$  (ver Figura 3.8). En la figura 4.7 se presentan las curvas de birrefringencia de grupo obtenidas para diferentes condiciones térmicas.

Regiones canalizadoras de esfuerzos

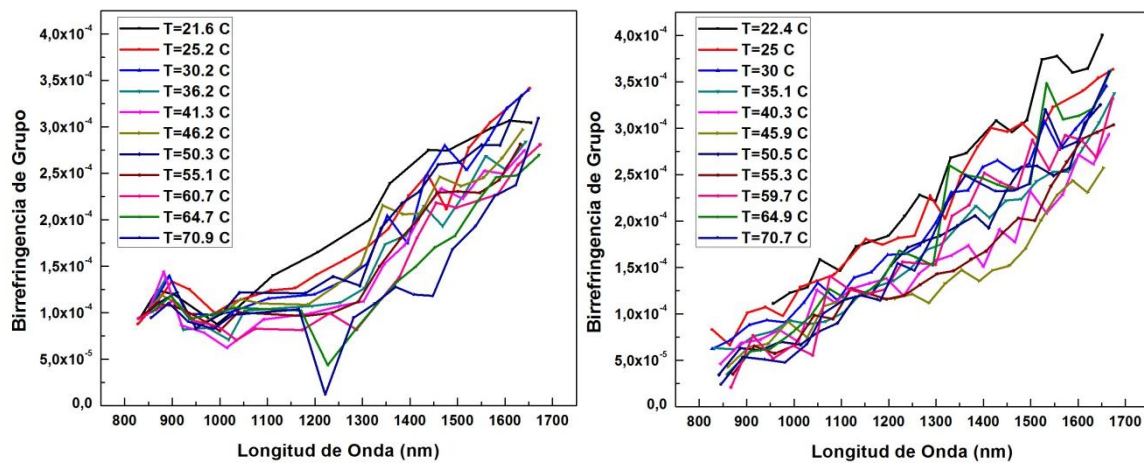


(a)



(b)

Figura 4.6 Gráficos de esfuerzos a lo largo de los ejes x y y para (a) MOF con electrodos a T=45 °C; (b) fibra convencional con electrodos a T=45 °C.



(a)

(b)

Figura 4.7 Birrefringencia de grupo vs longitud de onda: (a) MOF con electrodos de Bismuto; (b) MOF con electrodos de Indio.

Dada la abrumadora cantidad de resultados que ofrece la Figura 4.7, se escogieron tres longitudes de onda representativas,  $\lambda=980$  nm,  $\lambda=1310$  nm y  $\lambda=1550$  nm, para entender el comportamiento de la birrefringencia de grupo. En la Figura 4.8(a) se observa el caso de la MOF con electrodos de Bismuto, de la que se puede decir que, en general, la birrefringencia de la fibra decrece a medida que aumenta la temperatura; este comportamiento difiere para  $\lambda=980$  nm debido a que a esta longitud de onda, como ya se explicó, el campo electromagnético está bien confinado por la microestructura de la MOF y es menos afectado por la expansión de los electrodos, manteniéndose el valor de la birrefringencia casi constante.

Por otro lado, en la Figura 4.8(b) se muestran los resultados de la MOF con electrodos de Indio. Se confirma, nuevamente, el comportamiento anómalo para temperaturas mayor a  $45^{\circ}\text{C}$ . Validando el análisis para el corrimiento espectral de los interferogramas de la Figura 4.5. Este comportamiento, como ya se señaló, se le atribuye al reajuste de la distribución de esfuerzos en la fibra, generando, entre otras, la rotación de los ejes de birrefringencia como lo hemos evidenciado en trabajos previos (Reyes-Vera, Gonzalez-Valencia, & Torres, 2010a; Reyes-Vera, Gonzalez-Valencia, Botero-Cadavid, et al., 2010).

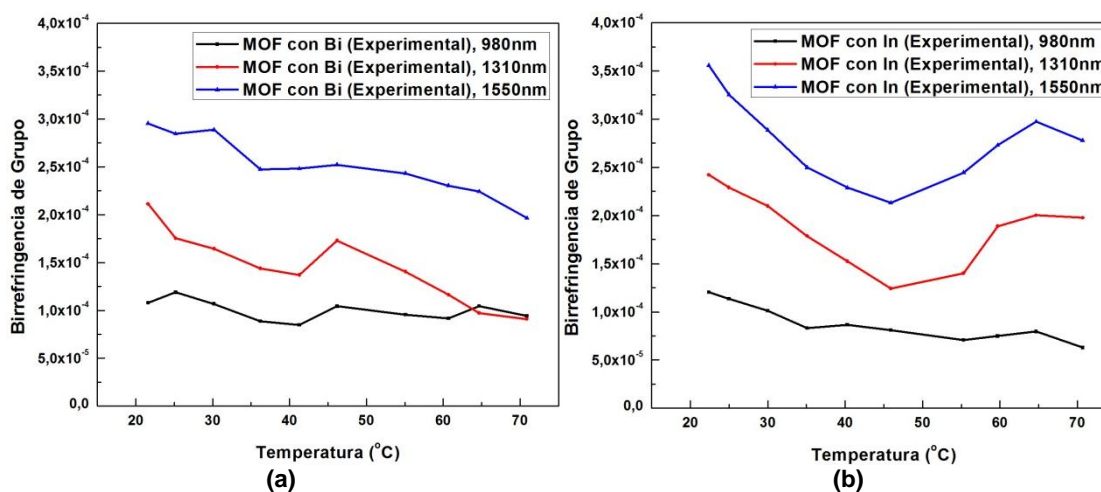


Figura 4.8 Birrefringencia de grupo vs temperatura a diferentes longitudes de onda: (a) MOF con electrodo de Bismuto; (b) MOF con electrodo de Indio.

## 4.2 Análisis de resultados

### 4.2.1 Protocolo de simulación

Con el fin de entender la física y lograr explicar de manera satisfactoria los resultados experimentales de la sección anterior, se desarrolló un esquema de cálculo de la multi-física del problema basado en el método de elementos finitos (FEM). En la Figura 4.9 se ilustra el diagrama de bloques que describe, paso a paso, el proceso de cálculo desarrollado para simular la respuesta óptica de la fibra.

Previo a la implementación de este esquema de simulación, es fundamental estimar los esfuerzos intrínsecos generados en el proceso de infiltración de los electrodos, pues, a fin de cuentas este proceso conlleva un reajuste de la distribución de esfuerzos como consecuencia de la diferencia de coeficientes de expansión térmicos de la sílice y el metal. Para ello, mediante un proceso iterativo se logra establecer, para cada metal, una distribución de esfuerzos remanentes que actúan sobre la región del núcleo de la fibra para pasar, aproximadamente, de la birrefringencia de grupo inicial de las fibras sin electrodos a la birrefringencia de grupo de la MOF con electrodos de Indio y Bismuto para las longitudes de onda indicadas en la Tabla 4.1. Vale decir que este proceso fue muy dispendioso, por ser inédito, para lo cual se procedió de manera análoga a como se hace con el FEM para estimar los esfuerzos residuales en fibras PANDA para estimar la birrefringencia inicial (Cadavid, 2007).

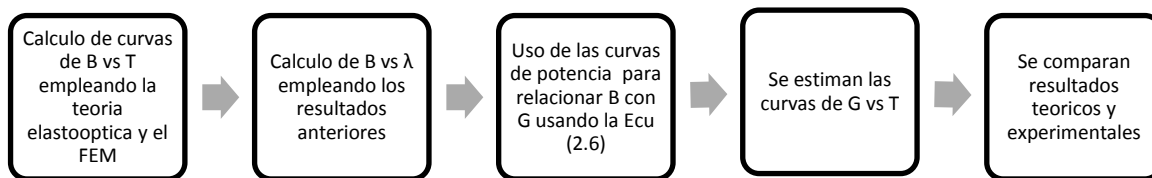


Figura 4.9 Esquema de cálculo para simular la respuesta óptica de la MOF con electrodos internos.

---

Por considerarlo de interés para el lector, a continuación se hace una breve descripción de las etapas del esquema de cálculo de la Figura 4.9:

**Fase 1:** Empleando el FEM se modela el comportamiento físico de la MOF con electrodos internos cuando es sometida a cambios térmicos; para ello, en las simulaciones se “calientan” los electrodos de 25 °C a 70 °C en pasos de 2,5 °C, buscando establecer el comportamiento de la birrefringencia de fase y la rotación de los ejes de birrefringencia. Para ello, se toma un promedio de los valores de deformación a lo largo de los ejes principales en la región del núcleo de la fibra y, así, calcular los cambios inducidos en el índice de refracción efectivo del modo fundamental con las ecuaciones (2.14) – (2.15) y, con ello, la birrefringencia de fase  $B$ , ecuación 2.1. En esta fase se obtiene, también, el ángulo de rotación de los ejes de birrefringencia de la fibra, ecuación (2.17).

**Fase 2:** Obtenidas las curvas de  $B$  vs  $T$  en la fase anterior, se realiza el mismo procedimiento a diferentes longitudes de onda y se construyen las curvas de  $B$  vs  $\lambda$ , ajustando la ley de potencia de la ecuación (2.4)

**Fase 3:** A partir de los parámetros arrojados por la ley de potencias, con la ecuación (2.6) se construyen las curvas de  $G$  vs  $\lambda$  para las diferentes temperaturas analizadas.

**Fase 4:** Se obtienen las curvas de  $G$  vs  $T$  para las longitudes de onda representativas: 980 nm, 1310 nm y 1550 nm.

**Fase 5:** Se confrontan los resultados obtenidos en las fases 3 y 4 con los datos experimentales para verificar la validez de los resultados.

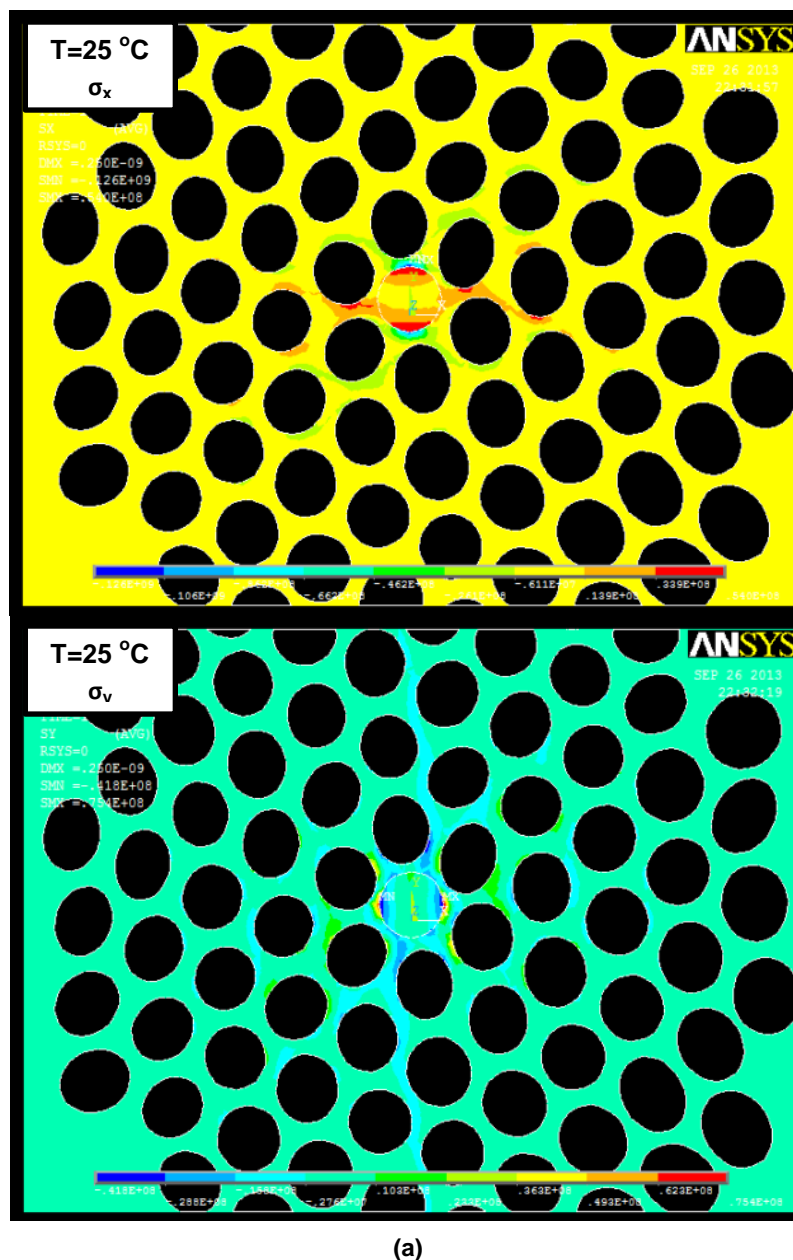
## 4.2.2 Resultados de simulación y análisis

Aplicando el esquema de cálculo anterior, se analizó la MOF con electrodos de Bismuto e Indio con miras a entender la física, i.e., la evolución y comportamiento de la birrefringencia de fase, grupo y rotación de ejes, en este tipo de fibras cuando se someten a efectos térmicos, con miras al diseño de nuevos dispositivos basados en esta tecnología cuando se conecten los electrodos a una señal de corriente (efecto Joule).

En la Figura 4.10 se muestran los cambios en la distribución de los esfuerzos en los ejes originales  $x'$  y  $y'$  a medida que se aumenta la temperatura. En primera instancia se muestra la distribución de esfuerzos estimada a través del proceso iterativo implementado para simular el proceso de llenado de los agujeros laterales con las dos aleaciones como se explicó en la sección anterior (25°C).

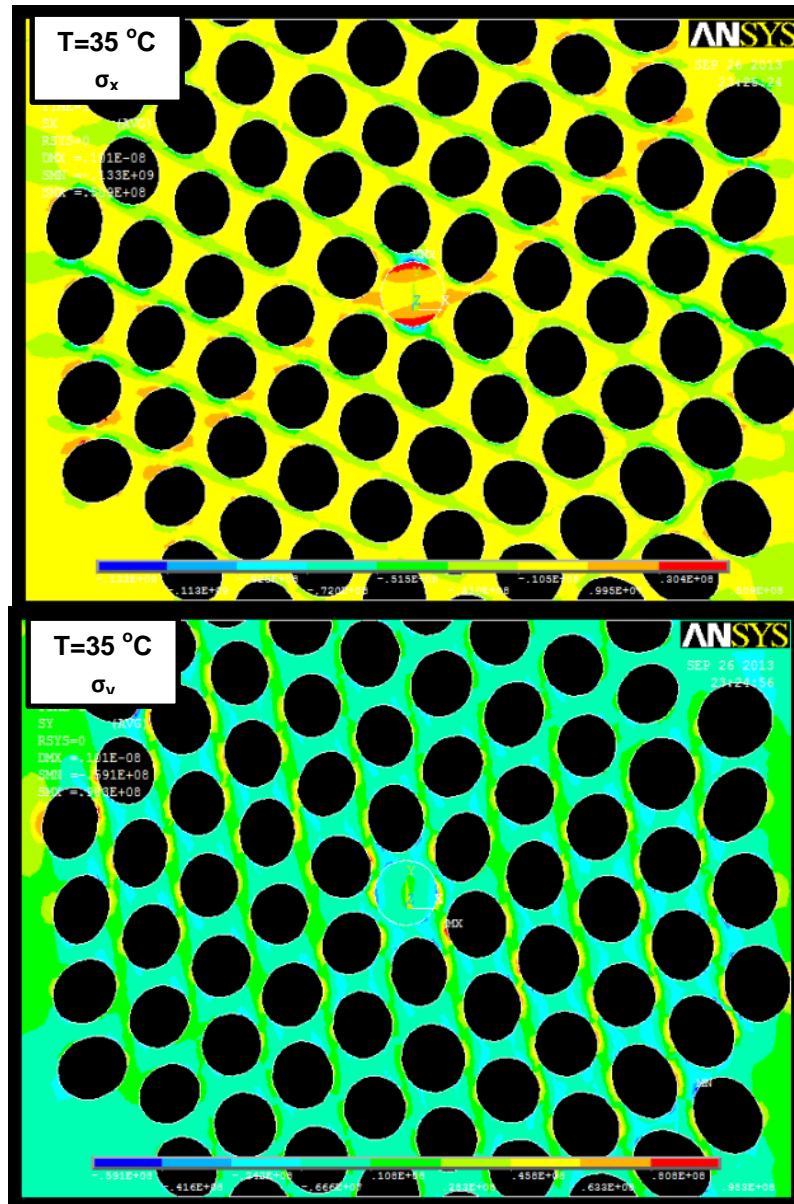
Analizando estos resultados se puede observar que los esfuerzos inducidos en el proceso de infiltración de los metales son altos; como una consecuencia, los valores de la birrefringencia intrínseca son relativamente altos como se ha observado en fibras estándar con electrodos internos cuando el proceso de infiltración se realiza a bajas presiones (S. H. Lee et al., 2012). Con el aumento de la temperatura se empieza a notar el efecto de la expansión de los electrodos a través de las líneas de esfuerzos diagonales dictadas por la distribución de los huecos como se discutió anteriormente (ver Figura 4.6), los cuales alcanzan el núcleo y modifican los esfuerzos residuales del proceso de infiltración de los electrodos, modulando, por su vez, la respuesta óptica de la MOF. Para ver este hecho con más detalle, en la Figura 4.11 se grafica el valor promedio de los esfuerzos en el núcleo de la fibra a lo largo de los ejes principales, donde se ve claramente que en el caso de la MOF con electrodos de Bismuto, los esfuerzos siempre son a tracción (positivos) pero tiene un comportamiento opuesto con la temperatura, i.e.,  $\sigma_x$  ( $\sigma_y$ ) disminuye (aumenta) linealmente con la temperatura con una tasa de  $-3 \times 10^5 \text{ Pa/}^\circ\text{C}$  ( $1.5 \times 10^5 \text{ Pa/}^\circ\text{C}$ ) y sin alcanzar un punto de cruce en el rango de temperaturas analizado; ello quiere decir que se debe esperar un comportamiento decreciente de la birrefringencia de fase ( $B$ ) con la temperatura. En el caso de la MOF con electrodos de Indio se mantiene la dependencia lineal de  $\sigma_x$  ( $\sigma_y$ ) con la temperatura a una tasa de --

$1.6 \times 10^6 \text{ Pa}/^\circ\text{C}$  ( $1.23 \times 10^6 \text{ Pa}/^\circ\text{C}$ ), la cual es aproximadamente 5 veces mayor al caso del Bismuto, pero esta vez cambian, rápidamente, de atracción (compresión) a compresión (tracción) para temperaturas mayores a  $45^\circ\text{C}$ , aproximadamente, y alcanzado un punto de cruce; ello implica que  $B$  inicialmente disminuye hasta alcanzar un valor mínimo a una temperatura cercana a  $45^\circ\text{C}$  para luego comenzar a crecer con la temperatura.



(a)

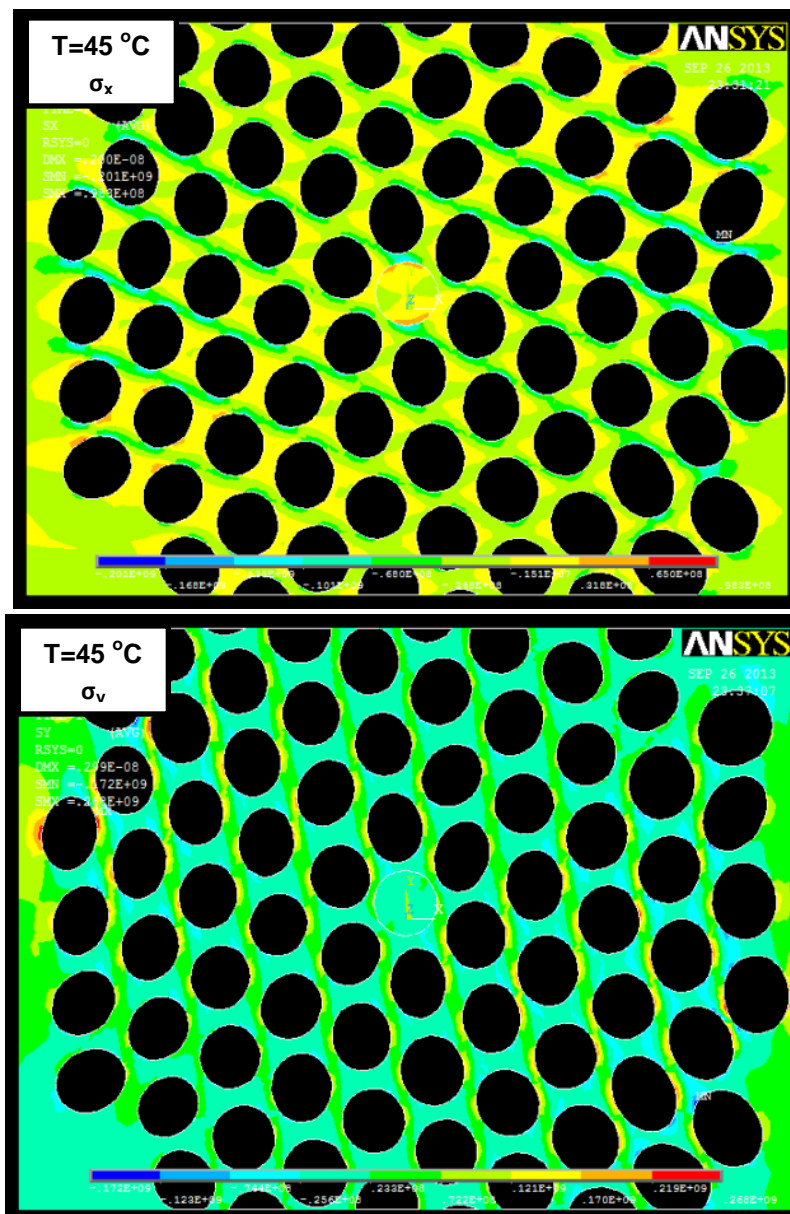
Figura 4.10 Distribución de esfuerzos estimados con el esquema de cálculo desarrollado. (a) MOF con Bismuto; (b) MOF con indio.



(a)

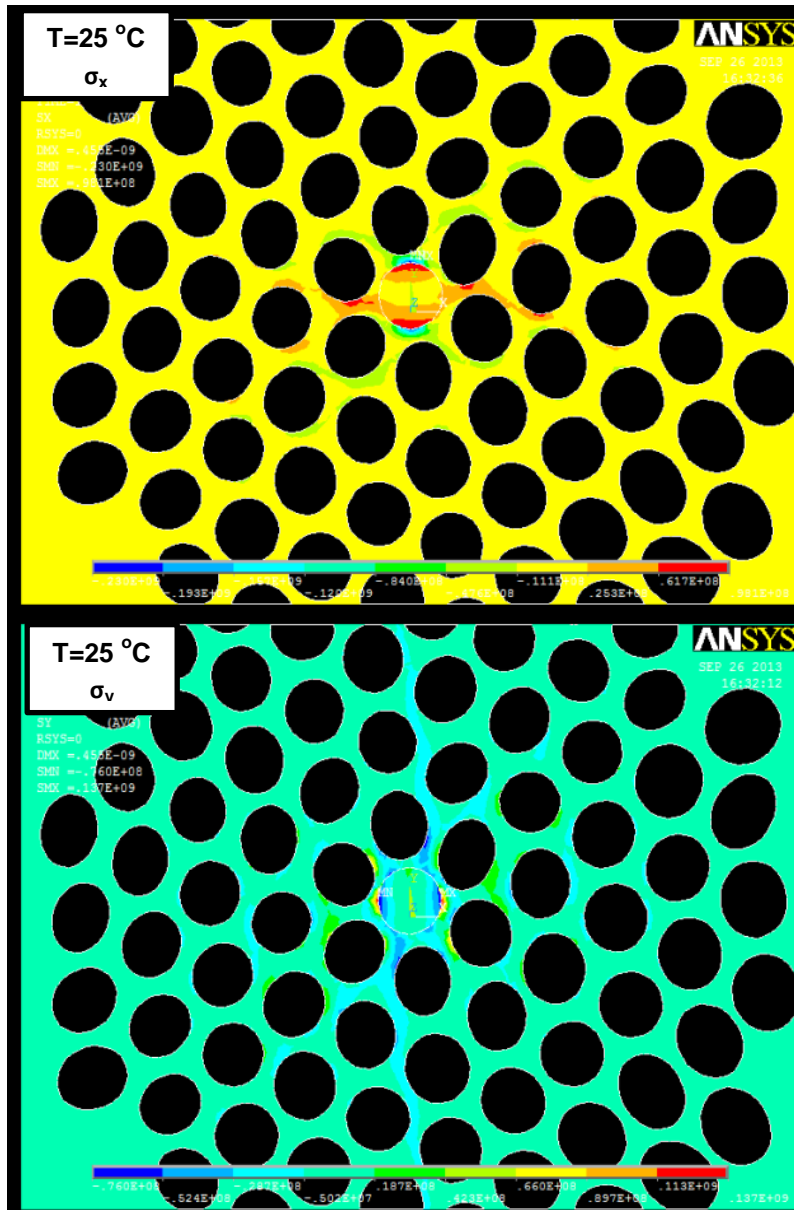
Figura 4.10 Continuación ....





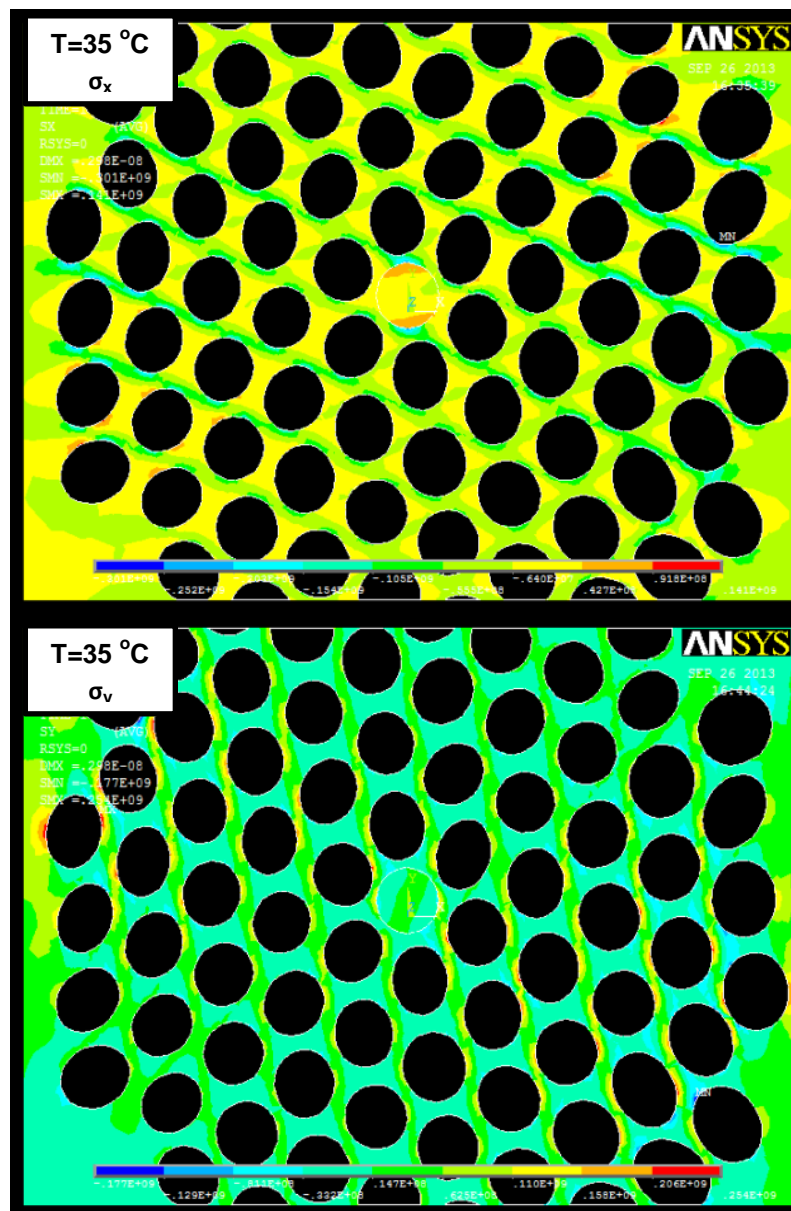
(a)

Figura 4.10 Continuación ....



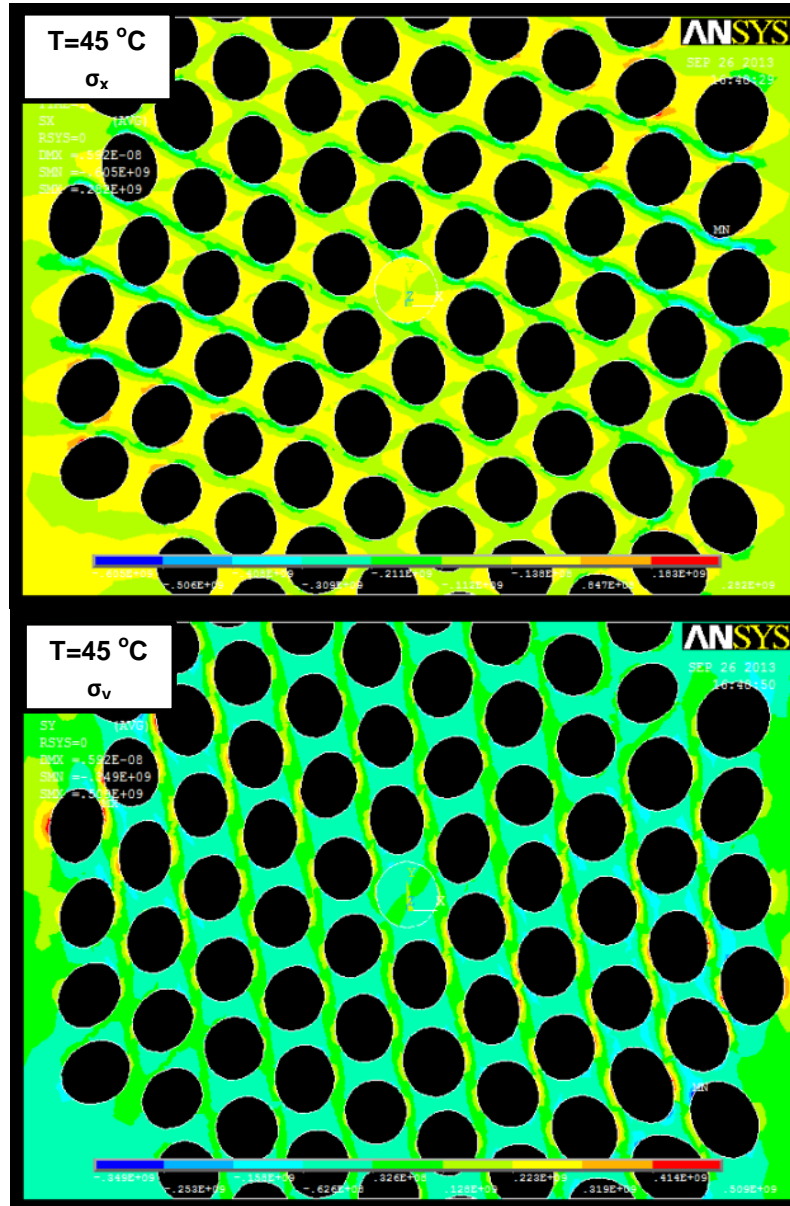
(b)

Figura 4.10 Continuación....



(b)

Figura 4.10 Continuación ....



(b)

Figura 4.10 Continuación ....

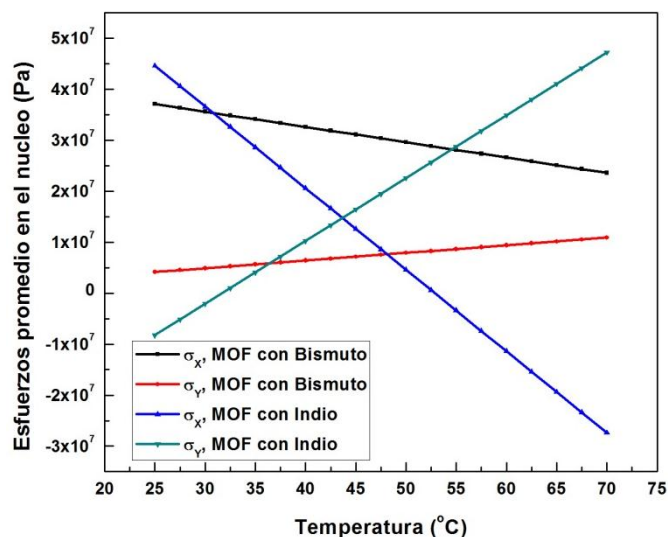


Figura 4.11 Valor promedio de los esfuerzos principales en el núcleo de la MOF con electrodos.

Indudablemente, la diferencia tan marcada en los resultados de la MOF con electrodos de Bismuto e Indio está relacionada con el coeficiente de expansión térmica de estos metales, pues el Indio tiene un coeficiente de expansión térmica casi 4 veces mayor al del Bismuto, por tanto, para generar una mayor expansión de los electrodos se requiera menor calentamiento. A raíz de este hecho, para lograr el punto de cruce de los esfuerzos y, por lo tanto, una condición de mínimo en  $B$ , en la MOF con electrodos de Bismuto sería necesario operar en un régimen térmico mucho mayor.

Continuando con el estudio de esta fibra especial, en la Figura 4.12 se presentan los resultados de simulación de la birrefringencia de fase en el mismo rango de temperaturas para cinco longitudes de onda: 980 nm, 1100 nm, 1310 nm, 1450 nm y 1550 nm. En concordancia con el análisis anterior, se puede ver que la  $B$  en la MOF con electrodos de Bismuto decrece de forma exponencial con la temperatura, alcanzando un comportamiento asintótico, lo que es un indicativo de que los esfuerzos principales en el núcleo de la fibra se están aproximando paulatinamente con la temperatura. Claramente, se puede ver que la sensibilidad de  $B$  con la temperatura depende de la longitud de onda, siendo el cambio más fuerte para  $\lambda \geq 1310$  nm en razón a que, como ya se explicó, el campo electromagnético está menos confinado en la región central de la fibra y, por lo tanto, es más afectado por el campo de esfuerzos inducido por la expansión de los electrodos. En el caso de la MOF con electrodos de Indio se confirma que el

comportamiento predicho se cumple para  $\lambda \geq 1310$  nm, i.e.,  $B$  inicialmente disminuye con la temperatura hasta que alcanza un valor mínimo cercano a la región de 45°C a 50°C para luego aumentar; en el caso de  $\lambda=980$  nm y  $\lambda=1100$  nm,  $B$  decrece lentamente en todo el rango térmico, lo que es un indicativo del paulatino efecto del campo de esfuerzo inducido por la expansión de los electrodos y, de paso, un claro indicativo del rango espectral dónde puede tener aplicación esta tecnología.

Comparando las curvas de  $B$  para los dos metales, la sensibilidad térmica de la MOF en la región de bajas temperatura es menor en el caso de los electrodos de Indio que con electrodos de Bismuto, lo cual es un resultado que, a primera vista, no parece lógico ya que el coeficiente de expansión térmica del Indio es mayor al del Bismuto. Este hecho, sin embargo, se puede entender de las ecuaciones (2.14) y (2.15) de la teoría elasto-óptica del capítulo 2, para la cual el  $\Delta n_{eff}$  es mayor cuando los dos esfuerzos que actúan sobre el núcleo de la fibra están a tracción -como es el caso de la MOF con electrodos de Bismuto-, que cuando uno de ellos está a tracción y el otro está a compresión como en el caso de la MOF con electrodos de Indio. Posiblemente este hecho ayude a explicar los resultados experimentales, sin razón aparente alguna, recientemente reportados por [Lee et al., 2012] que muestran que la birrefringencia residual en fibras estándar con electrodos internos de Indio disminuye con el aumento de la presión de infiltración.

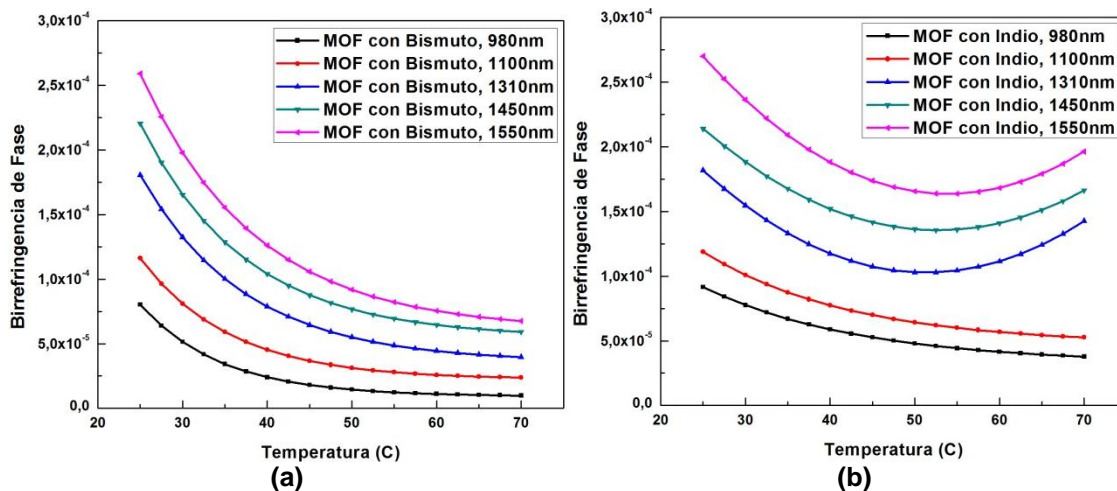
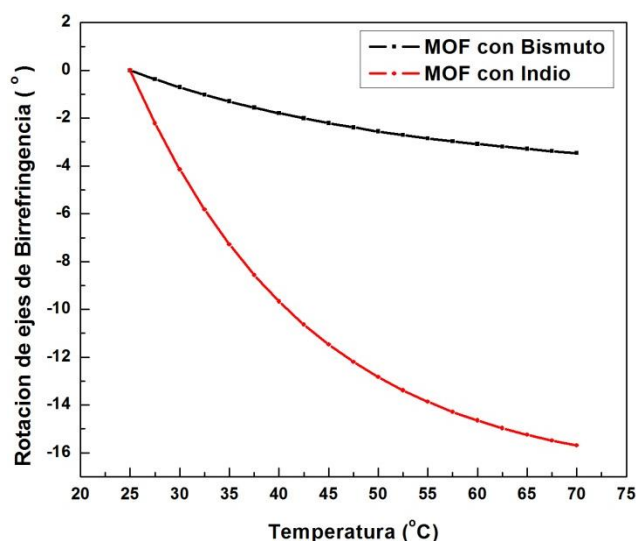


Figura 4.12 Comportamiento de la birrefringencia de fase con la temperatura, obtenida con el método de elementos finitos.

Uno de los resultados más significativos del esquema de análisis desarrollado es la confirmación de la dependencia de la rotación de los ejes de birrefringencia con el tipo de metal infiltrado en la MOF, como se evidencia en la Figura 4.13, y su correlación con  $B$ . Como se puede ver para el caso de la MOF con electrodos de Indio, inicialmente los ejes de birrefringencia de la fibra rotan linealmente con la temperatura, alcanzando un régimen no lineal a partir de  $\approx 32,5^\circ\text{C}$  y logrando un ángulo de rotación máximo de  $16^\circ$  a  $T=70^\circ\text{C}$ . A diferencia del caso anterior, en la MOF con electrodos de Bismuto los ejes de birrefringencia rotan muy lentamente, apenas alcanzan una rotación máxima de  $2^\circ$  para todo el rango térmico de análisis. En el régimen lineal, se encuentra que la rotación de los ejes de birrefringencia para el caso de los electrodos de Indio es aproximadamente 3 veces mayor a la rotación en la MOF con Bismuto. Cuando se observa la correlación de estos resultados con las curvas experimentales de los corrimientos de los interferogramas de la Figura 4.5, lleva a pensar que las respuestas lineal y anómala en  $B$  están asociada a la rotación de los ejes de birrefringencia, producto de someter un material a cambios estructurales a través de un agente externo (expansión de los electrodos), lo cual también permitiría explicar el comportamiento obtenido por otros autores en sus resultados experimentales, resultados que, por además, no han sido explicados satisfactoriamente. (S. H. Lee et al., 2012).



**Figura 4.13** Predicción de la rotación de los ejes de birrefringencia con la temperatura en una MOF los electrodos internos. El signo negativo indica que la rotación es en sentido contrario a las manecillas del reloj.



Después de los resultados anteriores, la siguiente fase del esquema de cálculo es levantar las curvas de  $B$  vs  $\lambda$  para el intervalo de temperaturas analizado. La Figura 4.14 presenta los resultados obtenidos. De aquí, aplicando la ley de potencias -ecuación 2.4- en la fase 2, se puede establecer la birrefringencia de grupo ( $G$ ) -ecuación 2.6- en la fase 3. Para el caso de la MOF con electrodos de Indio se obtuvieron valores de  $k$  entre 2.1858 hasta 2.9073, mientras que para la MOF con electrodos de Bismuto desde 1.9256 hasta 4.7978. Claramente, para el caso de la MOF con Indio se tiene una menor dispersión en los valores de la potencia  $k$  que en los de la MOF con Bismuto, indicando una mayor uniformidad en la fibra con electrodos de Indio. Ello se puede explicar por la tendencia de estas curvas a solaparse como resultado de que  $\Delta n_{eff}$ , como ya se explicó, cambia menos al caso de la MOF con electrodos de Indio.

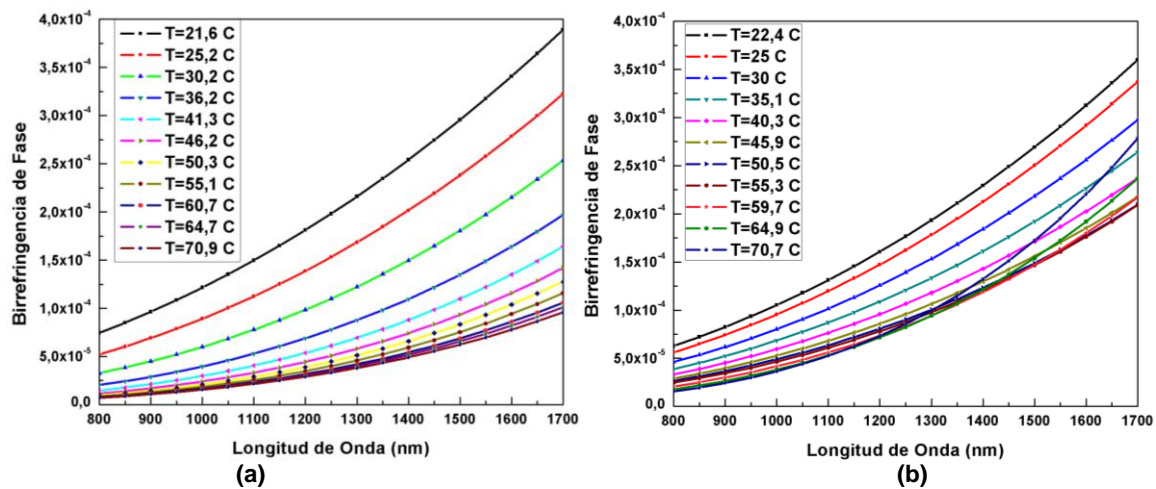
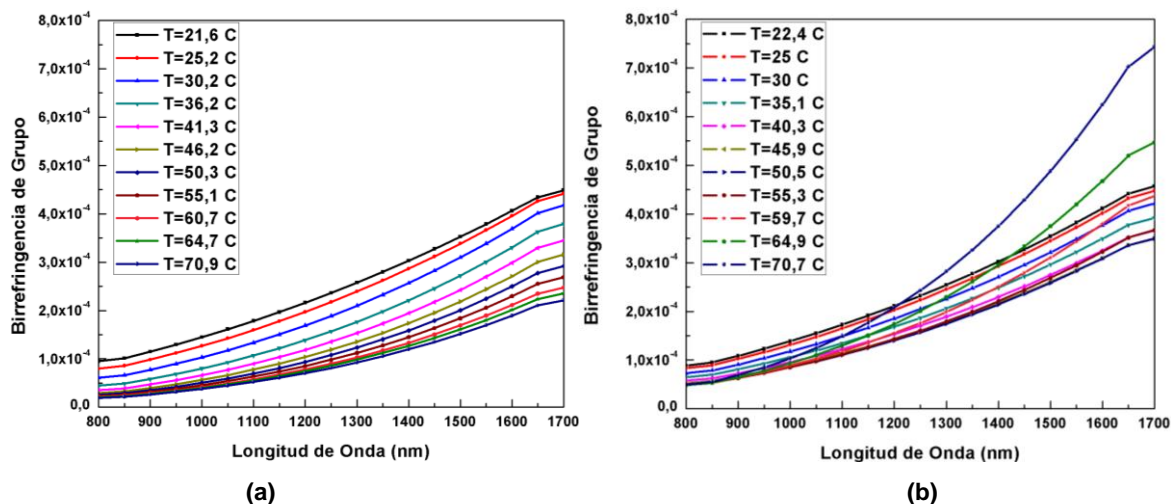


Figura 4.14 Curvas de birrefringencia de fase vs longitud de onda (a) MOF con Bismuto y (b) MOF con Indio.

Siguiendo la fase 3 del esquema de cálculo se generan las curvas de  $G$  vs  $\lambda$  para el intervalo de temperaturas analizado. Los resultados de este paso intermedio se muestran en la Figura 4.15.





**Figura 4.15** Curvas birrefringencia de grupo con la longitud de onda a diferentes temperaturas (a) MOF con Bismuto y (b) MOF con Indio.

Finalmente, en la fase 4 se levantan las curvas de  $G$  vs  $T$  para las longitudes de onda de interés y, con ello, en la fase 5, corroborar la valides del esquema de cálculo, comparando las curvas teóricas con las experimentales de la Figura 4.8. La Figura 4.16 da cuenta de esta valoración, en la que se puede observar que en ambos casos se logra, en general, reproducir el comportamiento encontrado experimentalmente. Las oscilaciones de los resultados experimentales se atribuyen a variaciones en los diámetros de los electrodos a lo largo de la fibra. El máximo corrimiento relativo entre los resultado teóricos y experimentales es del orden de  $7,5 \times 10^{-5}$ , susceptible de mejorar, pero que permite afirmar que el modelo de caracterización y análisis de dispositivos fotonicos basados en MOF con electrodos integrados es correcto, constituyéndose en un aporte al conocimiento mundial, pues, si bien se pueden encontrar trabajos experimentales de fibras con electrodos (Chesini et al., 2009, 2010; S. H. Lee et al., 2009; Moon et al., 2007), ninguno de sus autores ha podido explicar de forma satisfactoria la física de esta fibra especial, desde la influencia del proceso de infiltración de los electrodos en la birrefringencia residual de la fibra, pasando por la dependencia con la longitud de onda, hasta explicar la sensibilidad con la temperatura de  $B$  y  $G$ , clave a la hora de diseñar dispositivos basados en esta nueva tecnología cuando se conecte este tipos de fibras especiales a un circuito electrónico de corriente para su control.

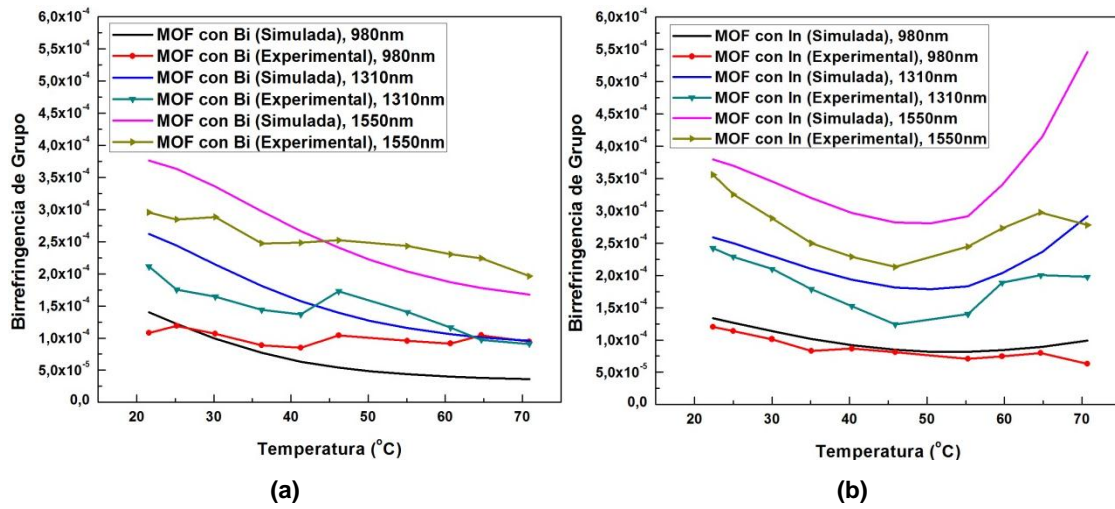


Figura 4.16 Comparación de resultados teóricos y experimentales de la sensibilidad con la temperatura de la birrefringencia de grupo. (a) MOF con Bismuto y (b) MOF con Indio.

## 5. Conclusiones y perspectivas

Las fibras ópticas con electrodos integrados son una tecnología prometedora para controlar activamente la propagación de una señal de luz que viaja por el núcleo de una fibra. Estos dispositivos son baratos, potencialmente simples, introducen pocas pérdidas y son robustos a la hora de integrarlos con otros componentes a fibra a través de empalmes por fusión.

En esta Tesis de Maestría se estudió teórica y experimentalmente una fibra óptica microestructurada con electrodos integrados reportada recientemente, la cual será, seguramente, la base de la próxima generación de fibras especiales. Para lograrlo se atravesaron varias etapas, entre ellas, se ha fortalecido el análisis de situaciones reales con las herramientas computacionales, en particular las simulaciones bajo el método de elementos finitos. Se ha demostrado que si bien los resultados arrojados por las simulaciones indican que la metodología propuesta es adecuada para analizar el comportamiento de las fibras ópticas ante la aplicación de temperatura sobre los electrodos. Cuando se simulan sistemas reales siempre es necesario considerar todas las posibles fuentes generadoras de esfuerzos para lograr resultados que se ajusten al comportamiento real del sistema, de ahí que fue necesario la creación de un protocolo de simulación y la aplicación previa de unos esfuerzos intrínsecos sobre el núcleo de la MOF. Por otra parte, se pudo realizar la caracterización experimental de este tipo de fibras, ganando experiencia en el diseño de los montajes necesarios para poder realizar una caracterización óptica de las MOF con electrodos. Adicionalmente, la verificación experimental de los resultados obtenidos en las simulaciones permite corroborar que durante el proceso de llenado con metales se inducen altas birrefringencias intrínsecas en la MOF, lo que a la postre es la razón de que se presente una rotación en los ejes de

birrefringencia. A pesar de todo, se puede considerar que, contando con suficiente información, es posible replicar los resultados experimentales con las simulaciones usando el protocolo de simulación desarrollado.

Puede afirmarse, a partir de la revisión bibliográfica en la primera etapa del trabajo, que el interés en el tipo de fibras ópticas analizadas en este trabajo se ha ido incrementando en los últimos años debido a las grandes necesidades en el mercado en materia tanto de sensores como en el área de telecomunicaciones, sobre todo a la hora de tener un mayor control en el estado de polarización de la luz y la posibilidad de construir conmutadores ópticos fabricados totalmente a fibra óptica; principalmente, porque estas fibras denominadas por algunos investigadores como fibras ópticas *multifuncionales* pueden ejecutar diversas tareas a la vez. Entonces, sin duda alguna, se podría decir que con esta tesis se ha contribuido a esta promisoriosa tecnología, brindando luces al entendimiento, incluso, de resultados previos presentados en otros trabajos (Kim, Moon, Paek, & Han, 2006; Lee, Kim, & Han, 2009; Lee, Son, Kim, & Han, 2012).

Un segundo efecto observado en la modelación teórica fue evidenciar el efecto de la microestructura de la fibra, pues, si bien en un principio puede funcionar como un elemento de apantallamiento de los esfuerzos, se pudo comprobar cómo las regiones circundantes a los agujeros se comportan como regiones canalizadoras de esfuerzos, generando de esta forma una mayor anisotropía y, por ende, una birrefringencia inducida mucho mayor que la presentada en el caso de fibras convencionales con electrodos (Kim et al., 2009).

Los resultados encontrados en este trabajo constituyen una base en el diseño y la fabricación de estos dispositivos fotónicos totalmente integrados a fibra óptica. Para aplicaciones en telecomunicaciones es recomendable emplear electrodos de Indio, pues estos requieren de un menor gasto energético para lograr resultados significativos sobre la luz que se propaga por el núcleo de la fibra.

Las perspectivas de ese trabajo apuntan, principalmente, a seguir trabajando en la parte experimental. Primero, en lograr la construcción de un dispositivo totalmente a fibra que permita controlar el estado de polarización de la luz, esto pensando en aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones donde tendría gran acogida, ya que este no solo serviría para controlar la polarización, sino que haciendo algunas modificaciones se podría modular la potencia óptica de una señal de luz electrónicamente. Dicho dispositivo, por ser totalmente a fibra, brindaría la posibilidad de ser integrado a los sistemas tradicionales con mayor facilidad, siendo apenas de algunos cm de longitud. Por otro lado, se espera poder analizar fenómenos ópticos no lineales en estas fibras, lo cual sería un trabajo altamente novedoso, pues permitiría alterar activamente la respuesta y comportamiento de la luz que viaja a través de ella.

Otra posibilidad sin lugar a duda sería implementar estas fibras como sensores ópticos, ya que como todos los sensores a fibra óptica ofrecen amplias ventajas sobre los sensores electrónicos tradicionales. Otra aplicación de interés es implementar estas fibras para la generación de un sistema Q-switching totalmente integrado a fibra, donde bastaría con grabar una red de Bragg en el núcleo de la fibra.



## Anexo A: Método interferométrico para la medición de birrefringencia de grupo

La Figura A.1 muestra el esquema de medición de la birrefringencia de grupo empleando el método interferométrico. En este diagrama se observa cómo la luz emitida por la fuente de supercontinuo es polarizada empleando un primer polarizador  $P_1$ , incidiendo de esta manera en la fibra a analizar, donde el ángulo de polarización de la luz a la entrada es  $\theta_1$ , excitando, de esta manera, los modos ortogonales  $E_x$  y  $E_y$ , los cuales se propagan con constantes de propagación  $\beta_x$  y  $\beta_y$ , respectivamente. Luego de propagarse en el núcleo de la fibra durante una longitud  $L_T$ , la luz pasa por un segundo polarizador  $P_2$  orientado con un ángulo  $\theta_2$  antes de llegar al detector.

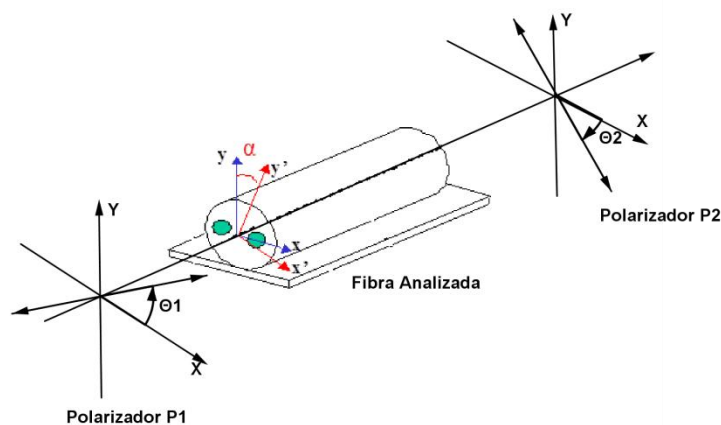


Figura A.1 Esquema de medición de la birrefringencia de grupo empleando la técnica interferométrica.

A la entrada de la fibra ( $z=0$ ) se tienen las siguientes componentes para el campo eléctrico:

$$\vec{E}_{1x}(z) = \vec{E}_0 \cos \theta_1. \quad (\text{A.1})$$

$$\vec{E}_{1y}(z) = \vec{E}_0 \sen \theta_1. \quad (\text{A.2})$$

Las amplitudes de los dos modos de propagación en el extremo de salida de la fibra ( $z=L_T$ ) están dadas por:

$$\vec{E}_{2x}(z) = \vec{E}_0 \cos \theta_1 e^{i\beta_x L_T}. \quad (\text{A.3})$$

$$\vec{E}_{2y}(z) = \vec{E}_0 \sen \theta_1 e^{i\beta_y L_T}. \quad (\text{A.4})$$

Dado que el eje de transmisión del segundo polarizador está orientado un ángulo  $\theta_2$ , la intensidad de la señal en un detector módulo cuadrado es de la forma

$$I = I_0(\cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sen^2 \theta_1 \sen^2 \theta_2) + 2I_0 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sen \theta_1 \sen \theta_2 \cos(\Delta\varphi). \quad (\text{A.5})$$

donde  $\Delta\varphi = (\beta_x - \beta_y)L_T = 2\pi L_T B/\lambda$  es la diferencia de fase entre los dos modos que se propagan a través de los ejes de birrefringencia y  $B$  es la birrefringencia de fase de la fibra. Aquí se puede ver claramente que la visibilidad del patrón de interferencia está dada por:

$$V = \frac{\cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sen^2 \theta_1 \sen^2 \theta_2 - 2\cos \theta_1 \cos \theta_2 \sen \theta_1 \sen \theta_2}{\cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sen^2 \theta_1 \sen^2 \theta_2 + 2\cos \theta_1 \cos \theta_2 \sen \theta_1 \sen \theta_2} \quad (\text{A.6})$$



de donde se tiene que la máxima visibilidad en los interferogramas,  $V=1$ , se logra cuando  $\theta_1 = -\theta_2 = 45^\circ$ , es decir, cuando los dos polarizadores se encuentran cruzados, excitando en igual proporción los dos modos de propagación ortogonales. Por lo tanto, la expresión (A.5) se reduce a:

$$I = \frac{1}{2}I_0 + \frac{1}{2}I_0 \cos\left(\frac{2\pi L_T B}{\lambda}\right). \quad (\text{A.7})$$

De esta última expresión se puede ver que la intensidad en el sistema de detección variara con la birrefringencia y la longitud de onda. Por tanto, se puede conocer la birrefringencia a través de la relación de la intensidad con la longitud de onda. Derivando el término de fase de la ecuación (A.7) con respecto a la longitud de onda, y tomando un cambio de fase total igual a  $2\pi$ , se llega a que

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda} = 2\pi L_T \frac{d}{d\lambda}(B/\lambda) \Rightarrow \frac{2\pi}{\Delta\lambda} = 2\pi L_T \frac{\left(\lambda \frac{dB}{d\lambda} - B\right)}{\lambda^2}, \quad (\text{A.8}) \quad \text{con lo cual}$$

$$G = \left(\lambda \frac{dB}{d\lambda} - B\right) = \frac{\lambda_0^2}{L_T \cdot \Delta\lambda}, \quad (\text{A.9})$$

estableciéndose, de esta manera, la relación experimental entre la birrefringencia de grupo con la longitud de onda central y el periodo de ondulación espectral del capítulo 3.

## Bibliografía

- Aristizabal, V. H., Vélez, F. J., & Torres, P. (2006). Analysis of photonic crystal fibers: Scalar solution and polarization correction. *Optics Express*, *14*(24), 11848. doi:10.1364/OE.14.011848
- Birks, T. a, Knight, J. C., & Russell, P. S. (1997). Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Optics letters*, *22*(13), 961–3. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18185719>
- Cadavid, J. F. B. (2007). *EFFECTOS Y APLICACIONES DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- Carrara, S. L., Kim, B. Y., & Shaw, H. J. (1986). Elasto-optic alignment of birefringent axes in polarization-holding optical fiber. *Optics letters*, *11*(7), 470–2. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19730667>
- Chesini, G., Cordeiro, C. M. B., de Matos, C. J. S., Fokine, M., Carvalho, I. C. S., & Knight, J. C. (2009). All-fiber devices based on photonic crystal fibers with integrated electrodes. *Optics express*, *17*(3), 1660–5. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19188996>
- Chesini, G., Serrão, V. a, Franco, M. a R., & Cordeiro, C. M. B. (2010). Analysis and optimization of an all-fiber device based on photonic crystal fiber with integrated electrodes. *Optics express*, *18*(3), 2842–8. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20174113>
- Eggleton, B., Kerbage, C., Westbrook, P., Windeler, R., & Hale, a. (2001). Microstructured optical fiber devices. *Optics express*, *9*(13), 698–713. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19424310>
- F. T. S. Yu, D. Y. (2002). *Fiber Optic Sensors*. (M. Dekker, Ed.).
- Fokine, M., Nilsson, L. E., Claesson, A., Berlemont, D., Kjellberg, L., Krummenacher, L., & Margulis, W. (2002). Integrated fiber Mach-Zehnder interferometer for electro-optic switching. *Optics letters*, *27*(18), 1643–5. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18026528>
- Fujiwara, T., Wong, D., & Fleming, S. (1995). Large electrooptic modulation in a thermally-poled germanosilicate fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, *7*(10), 1177–1179. doi:10.1109/68.466582

- Gafsi, R., & El-Sherif, M. a. (2000). Analysis of Induced-Birefringence Effects on Fiber Bragg Gratings. *Optical Fiber Technology*, 6(3), 299–323. doi:10.1006/ofte.2000.0333
- Gåsvik, K. (2002). *Optical metrology*. (J. W. & Sons, Ed.) (Third.).
- Goodier, S. P. T. J. N. (1970). *Theory of Elasticity*. (McGraw-Hill, Ed.). New York.
- Issa, N. a, van Eijkelenborg, M. a, Fellow, M., Cox, F., Henry, G., & Large, M. C. J. (2004). Fabrication and study of microstructured optical fibers with elliptical holes. *Optics letters*, 29(12), 1336–8. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15233427>
- J. M. Cabrera, F. Agulló-Lopez, y F. J. L. (2000). *Óptica electromagnética. Vol. II: Materiales y aplicaciones*. Addison-Wesley/Universidad Autónoma de Madrid.
- Jin, J. (2002). *Jin, Jianming - The Finite Element Method in Electromagnetics* (Second.).
- K. Kawano, T. K. (2001). *Introduction to optical waveguide analysis*. (Jhon Wiley & Sons, Ed.). New York.
- Kim, B. H., Lee, S. H., Lin, A., Lee, C.-L., Lee, J., & Han, W.-T. (2009). Large temperature sensitivity of Sagnac loop interferometer based on the birefringent holey fiber filled with metal indium. *Optics express*, 17(3), 1789–94. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19189009>
- Kim, B. H., Moon, S., Paek, U.-C., & Han, W.-T. (2006). All fiber polarimetric modulation using an electro-optic fiber with internal Pb-Sn electrodes. *Optics express*, 14(23), 11234–41. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19529537>
- Knape, H., & Margulis, W. (2007a). All-fiber polarization switch. *Optics Letters*, 32(6), 614. doi:10.1364/OL.32.000614
- Knape, H., & Margulis, W. (2007b). All-fiber polarization switch. *Optics letters*, 32(6), 614–6. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17308578>
- Konorov, S., Zheltikov, A., & Scalora, M. (2005). Photonic-crystal fiber as a multifunctional optical sensor and sample collector. *Optics express*, 13(9), 3454–9. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19495248>
- Lee, H. W., Schmidt, M. a, Uebel, P., Tyagi, H., Joly, N. Y., Scharrer, M., & Russell, P. S. J. (2011). Optofluidic refractive-index sensor in step-index fiber with parallel hollow micro-channel. *Optics express*, 19(9), 8200–7. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21643070>

- Lee, S. H., Kim, B. H., & Han, W.-T. (2009). Effect of filler metals on the temperature sensitivity of side-hole fiber. *Optics Express*, 17(12), 9712–9717. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19506620>
- Lee, S. H., Son, D. H., Kim, B. H., & Han, W. (2012). Effect of infiltration pressure on the birefringent properties of a side-hole fiber filled with indium. *Optics Letters*, 37(12), 2322–2324. doi:10.1364/OL.37.002322
- Li, S., Li, Y., Zhao, Y., Zhou, G., Han, Y., & Hou, L. (2008). Correlation between the birefringence and the structural parameter in photonic crystal fiber. *Optics & Laser Technology*, 40(4), 663–667. doi:10.1016/j.optlastec.2007.09.012
- Li, Luksun, Birch, Robin D. and Payne, D. N. (1986). An All Fibre Electro-Optic Kerr Modulator.pdf. London.
- Lipson, S. G. L. and H. (1981). *Optical Physics*. (C. U. Press, Ed.). New York.
- Matthew Sadiku. (2001). *Numerical Techniques in Electromagnetics* (Second.).
- Michel Fokine, Lars-Erik Nilsson, Åsa Claesso, Walter Margulis, Leif Kjellberg, Pedro Torres, and H. A. (2003a). Refractive index control method in an optical fiber, with refractive index of fiber core altered by thermally expanding electrodes arranged along core.
- Michel Fokine, Lars-Erik Nilsson, Åsa Claesso, Walter Margulis, Leif Kjellberg, Pedro Torres, and H. A. (2003b). Refractive index control method in an optical fiber, with refractive index of fiber core altered by thermally expanding electrodes arranged along core.
- Michie, A., Canning, J., Lyytikäinen, K., Aslund, M., & Digweed, J. (2004). Temperature independent highly birefringent photonic crystal fibre. *Optics express*, 12(21), 5160–5. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19484072>
- Moon, D. S., Kim, B. H., Lin, A., Sun, G., Han, Y.-G., Han, W.-T., & Chung, Y. (2007). The temperature sensitivity of Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining side-hole fiber. *Optics express*, 15(13), 7962–7. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19547123>
- Morin, P., Kibler, B., Fatome, J., Finot, C., & Millot, G. (2010). Group modal birefringence inversion in a highly birefringent nonlinear photonic crystal fibre at telecommunication wavelengths, 7, 525–526.
- Nilsson, L.-E., Yu, Z., Tarasenko, O., Knape, H., Fonjallaz, P.-Y., & Margulis, W. (2007). High-Speed Switching in Fibres with Electrodes. In *2007 9th International Conference on Transparent Optical Networks* (pp. 232–233). IEEE. doi:10.1109/ICTON.2007.4296076

- Ortigosa-Blanch, a, Knight, J. C., Wadsworth, W. J., Arriaga, J., Mangan, B. J., Birks, T. a, & Russell, P. S. (2000). Highly birefringent photonic crystal fibers. *Optics letters*, 25(18), 1325–7. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18066205>
- Pfeiffer, T., & Bulow, H. (1992). Analytical gain equation for erbium-doped fiber amplifiers including mode field profiles and dopant distribution. *IEEE Photonics Technology Letters*, 4(5), 449–451. doi:10.1109/68.136482
- Reyes-Vera, E., Gonzalez-Valencia, E., Botero-Cadavid, J. F., Torres, P., Chesini, G., & Cordeiro, C. M. (2010). Induced Birefringence Analysis in an All-fiber Device Based on Photonic Crystal Fiber With Integrated Electrodes. In *Latin America Optics and Photonics Conference* (Vol. 1, p. ThF2). Washington, D.C.: OSA. doi:10.1364/LAOP.2010.ThF2
- Reyes-Vera, E., Gonzalez-Valencia, E., & Torres, P. (2010a). Understanding the birefringence effects in an all-fiber device based on photonic crystal fibers with integrated electrodes. *Photonics Letters of Poland*, 2(4), 168–170. doi:10.4302/plp.2010.4.09
- Reyes-Vera, E., Gonzalez-Valencia, E., & Torres, P. (2010b). Transverse stress response of FBGs in large-mode-area micro-structured Panda-type fibers. In J. Hernández-Cordero, I. Torres-Gómez, & A. Méndez (Eds.), *Proc. SPIE* (p. 78391G–78391G–4). doi:10.1117/12.867093
- Richard Black, L. G. (2010). *Optical waveguide modes*. (McGraw-Hill, Ed.). New York.
- Ritari, T., Tuominen, J., Ludvigsen, H., Petersen, J., Sørensen, T., Hansen, T., & Simonsen, H. (2004). Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers. *Optics express*, 12(17), 4080–7. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19483949>
- Russel, P. S. J., Pannell, C. N., & Kazansky, P. G. (1994). Optical fibre electrets: observation of electro-acousto-optic transduction. *Electronics Letters*, 30(17), 1436–1437. doi:10.1049/el:19940962
- Saitoh, K., Sato, Y., & Koshiha, M. (2003). Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber couplers. *Optics express*, 11(24), 3188–95. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19471444>
- Song, W., Zhao, Y., Bao, Y., Li, S., Zhang, Z., & Xu, T. (2007). Numerical Simulation and Analysis on Mode Property of Photonic Crystal Fiber with High Birefringence by Fast Multipole Method. *PIERS Online*, 3(6), 836–841. doi:10.2529/PIERS060910211527
- Sun, Y., Member, S., Zyskind, J. L., & Srivastava, A. K. (1997). Average Inversion Level , Modeling , and Physics of Erbium-Doped Fiber Amplifiers, 3(4), 991–1007.

- Torres, P., Botero-Cadavid, J. F., Vélez, F. J., Cordeiro, C. M. B., & de Matos, C. J. S. (2008). Spectral Response of FBG Written in Specialty Single-Mode Fibers. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1055, pp. 65–68). AIP. doi:10.1063/1.3002545
- Tsuchida, Y., Saitoh, K., & Koshiba, M. (2005). Design and characterization of single-mode holey fibers with low bending losses. *Optics express*, *13*(12), 4770–9. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19495395>
- Varnham, M., Payne, D., Barlow, A., & Birch, R. (1983). Analytic solution for the birefringence produced by thermal stress in polarization-maintaining optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, *1*(2), 332–339. doi:10.1109/JLT.1983.1072123
- [www.matweb.com](http://www.matweb.com). (n.d.).
- Xie, H. M., Dabkiewicz, P., Ulrich, R., & Okamoto, K. (1986). Side-hole fiber for fiber-optic pressure sensing. *Optics Letters*, *11*(5), 333. doi:10.1364/OL.11.000333
- Yu, Z., Margulis, W., Tarasenko, O., Knape, H., & Fonjallaz, P.-Y. (2007). Nanosecond switching of fiber Bragg gratings. *Optics express*, *15*(22), 14948–53. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19550774>
- Yu, Z., Tarasenko, O., Margulis, W., & Fonjallaz, P.-Y. (2008). Birefringence switching of Bragg gratings in fibers with internal electrodes. *Optics express*, *16*(11), 8229–35. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18545534>
- Yue, Y., Kai, G., Wang, Z., Li, Y., Zhang, C., Lu, Y., ... Dong, X. (2006). Phase and group modal birefringence of an index-guiding photonic crystal fibre with helical air holes. *Optics Communications*, *268*(1), 46–50. doi:10.1016/j.optcom.2006.07.003
- Zhang, L., & Yang, C. (2004). A Novel Polarization Splitter Based on the Photonic Crystal Fiber With Nonidentical Dual Cores. *IEEE Photonics Technology Letters*, *16*(7), 1670–1672. doi:10.1109/LPT.2004.828850
- Zhao, C.-L., Yang, X., Lu, C., Jin, W., & Demokan, M. S. (2004). Temperature-Insensitive Interferometer Using a Highly Birefringent Photonic Crystal Fiber Loop Mirror. *IEEE Photonics Technology Letters*, *16*(11), 2535–2537. doi:10.1109/LPT.2004.835646
- Zhu, Z., & Brown, T. G. (2003). Stress-induced birefringence in microstructured optical fibers. *Optics letters*, *28*(23), 2306–8. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14680164>