

**CENTRO DE INVESTIGACIONES  
EN ÓPTICA, A.C.**

“Versión definitiva. Incluye cambios sugeridos por revisores de tesis”

## **REJILLAS ENGROSADAS EN FIBRA ÓPTICA**

Como Requisito Para Obtener el Grado de:  
DOCTOR EN CIENCIAS (ÓPTICA)

Presenta:

M. I. Ruth Ivonne Mata Chávez.

Asesor:

Dr. ALEJANDRO MARTÍNEZ RIOS

Co-Asesor:

Dr. JULIÁN MOISÉS ESTUDILLO AYALA

---

---

León Guanajuato, México 2008.

## PREFACIO

Actualmente en el departamento de Fibras Ópticas del Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., se realiza investigación continua en las áreas más importantes de las fibras ópticas. Dentro de las áreas de investigación se encuentra el estudio y desarrollo de dispositivos ópticos y sensores. Tal es el caso de los filtros espectrales en fibra óptica.

Los filtros de fibra óptica desarrollados en el departamento se basan en métodos de fabricación por arco eléctrico, inducción mecánica, adelgazamiento de la fibra y próximamente con luz láser (UV).

En este trabajo de tesis, se utiliza el método de arco eléctrico y una fibra monomodo especial de 4 capas mejor conocida como de dispersión desplazada. Lo interesante del trabajo, es que se utiliza una técnica que solamente se había reportado para mejorar la calidad del empalme entre dos fibras con diferente tamaño de diámetro. Al aplicar la técnica en la región de empalme, disminuyen las pérdidas por inserción conforme se engrosa gradualmente el empalme.

La técnica conocida como *engrosado* no ha sido utilizada hasta ahora para fabricar rejillas o dispositivos de fibra ya que no encontramos información en la literatura sobre el tema. Solamente se menciona en libros de empalme por fusión de fibras como una estrategia para disminuir las pérdidas en los empalmes como lo mencionamos anteriormente.

Los filtros de rechazo de banda obtenidos con esta técnica presentan buenas características de filtrado y las bandas de atenuación muestran un ancho de banda más grande de lo que se acostumbra observar en otro tipo de filtros fabricados con otros métodos y técnicas. Se logró obtener un dispositivo interferométrico tipo Mach- Zehnder el cual, de forma similar a los filtros, se caracterizó con varios parámetros ambientales, como temperatura y tensión, entre otros, para estudiar su comportamiento, pensando en aplicaciones de sensado en trabajos posteriores.

De los estudios realizados en este trabajo de tesis, se observó que el filtro de rechazo de banda tiene una gran posibilidad de implementarse como un sensor de alta temperatura ya que en experimentos preliminares se observaron cambios arriba de 200 °C. Esto nos ha motivado a seguir desarrollando la técnica con la prioridad de optimizar el método de fabricación, así como aplicarlo en diferentes tipos de fibra óptica, en donde por supuesto, será necesario, cambiar los procesos de fabricación que se mencionan en este trabajo ya que las fibras tienen estructuras internas diferentes.

Cabe mencionar que, debido a que esta investigación, apenas empieza, falta mucho por hacer en la cuestión experimental pero más importante aun, es necesario un desarrollo teórico completo que explique lo que está sucediendo con la luz en la región de la rejilla engrosada para poder eficientar los procesos de fabricación con cualquier tipo de fibra.

Estamos convencidos, que en el futuro, este trabajo de tesis contribuirá al desarrollo de dispositivos de fibra óptica, así como sensores de fibra para la industria. Principalmente deseamos que surja del lector el

interés por contribuir con un granito de arena en la búsqueda de nuevas formas de crear tecnología mexicana.

# AGRADECIMIENTOS



*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).* Por apoyar mis estudios de Doctorado por medio de la Beca número 171178.



*Al Centro de Investigaciones en Óptica (CIO).* Por abrirme las puertas para realizar estudios e investigación para obtener el grado de Doctor en Ciencias (Óptica).

***Por su apoyo, orientación e interés a:***

*mi Asesor de Tesis: Dr. Alejandro Martínez Rios.*

**Con todo respeto a:**

Dr. Ismael Torres Gómez.

Dr. David Monzón Hernández.

Dr. Julián M. Estudillo Ayala.

*A los Doctores que compartieron sus conocimientos en un salón de clases.*

**¡Gracias por todo!**

Guille

Laura

**¡Por buenos compañeros y amigos!**

Doreen, Dalia, Samuel, Mario, Rigo, Luis Adán, Luis (Pibi), Mariana Alfaro, Memo Cárdenas y los buenos compañeros del CIO.

**A la personita que me ha esperado el tiempo necesario que me llevo terminar este proyecto de vida:**

*Sandra Vianey.*

**Y a la señora que me dio la vida y cariño:**

*Doña Martha Elva.*

# ÍNDICE

---

	<b>Página</b>
<b>1. ANTECEDENTES</b>	
1.1 Introducción	2
1.2 Antecedentes	4
1.3 Motivación	9
1.4 Organización de la tesis	10
1.5 Referencias	11
<b>2. FUNDAMENTOS TEORICOS</b>	
2.1 Introducción	15
2.2 Análisis teórico para fibras de 4 capas	16
2.3 Solución de la ecuación de onda en la región del anillo.	26
2.3.1 Solución de la ecuación de onda en el núcleo central.	26
2.3.2 Solución de la ecuación de onda en las capas interiores.	27
2.3.3 Solución de la ecuación de onda en la última capa.	28
2.4 Aplicando condiciones de frontera.	29
2.5 Solución de la ecuación de onda en la región del núcleo.	31
2.6 Conclusiones.	33
2.7 Referencias.	34

### 3. LA REJILLA ENGROSADA COMO FILTRO

3.1 Introducción	37
3.2 El proceso de empalme y engrosado de la fibra	39
3.3 Esquema experimental	41
3.4 Método de fabricación	43
3.5 Características de los filtros	46
3.6 Conclusiones	53
3.7 Referencias	54

### 4. REJILLAS ENGROSADAS EN SERIE

4.1 Introducción	57
4.2 Principio de operación	58
4.3 Características de la rejilla RPL para el interferómetro	61
4.4 Interferómetro Mach-Zehnder	63
4.5 Respuesta a la temperatura y tensión	67
4.6 Conclusiones	70
4.7 Referencias	71



5. APLICACIONES	
5.1 La RPL engrosada como sensor de temperatura	73
5.2 La RPL engrosada como sensor de índice de refracción	79
5.3 Conclusiones	85
5.4 Referencias	86
6. CONCLUSIONES	
6.1 Resumen General	89
6.2 Conclusión	92
6.3 Trabajo futuro	93

## Índice de figuras.

		Pág.
Fig. 2.1	Representación de una fibra de 4 capas con diferentes índices de refracción $n_i$ donde $i=1,2,3,4$ .	17
Fig. 2.2	Perfil de índice de una fibra de cuatro capas idealizada, la sección transversal y la forma del campo idealizado que se propaga en la fibra.	19
Fig. 2.3	Estructura de la fibra en dos regiones. Región 1 (núcleo en anillo). Región 2 (núcleo central).	25
Fig. 2.4	Índices efectivos de los modos en el núcleo y núcleo en anillo de una fibra DSF.	32
Fig. 3.1	Pasos básicos para el engrosamiento de la fibra óptica.	40
Fig. 3.2	Esquema experimental usado en la fabricación de las rejillas de periodo largo.	41
Fig. 3.3	Evolución del espectro de transmisión normalizado en función de la longitud de onda para un filtro de rechazo de banda con respecto al número de puntos en donde el proceso de ensanchamiento es aplicado.	44
Fig. 3.4	Evolución del espectro de transmisión en función de la longitud de onda para un filtro de rechazo de banda con respecto al número de puntos en donde el proceso de <i>engrosado</i> es aplicado	45
Fig. 3.5	Cambios con la temperatura en el espectro de transmisión del filtro de fibra. La gráfica adjunta muestra el desplazamiento de longitud de onda central de la abertura de atenuación como función de la temperatura.	46
Fig. 3.6	Espectro de transmisión de un filtro de fibra a diferentes radios de curvatura de la fibra alrededor de la rejilla.	48
Fig. 3.7	Espectro de transmisión del filtro de rechazo de banda. La foto adjunta muestra las secciones engrosadas de la fibra.	49
Fig. 3.8	Variación del diámetro de la fibra DSF en las secciones engrosadas.	50
Fig. 3.9	Espectro de transmisión experimental y teórico.	51
Fig. 4.1	Dos rejillas RPL con engrosado funcionando como un interferómetro Mach-Zehnder. $\Lambda$ es el periodo y $L$ es la separación de las rejillas.	59
Fig. 4.2	Esquema experimental utilizado para engrosar la fibra de dispersión desplazada en el cual se utiliza una fuente de luz blanca en el rango de longitud de onda de 400-1700nm y un analizador de espectros FITEL S175.	61

	<b>Pág.</b>
Fig. 4.3	Espectro de transmisión de una RPL engrosada con arco y centrada aproximadamente a 1250 nm. 62
Fig. 4.4	Espectro de transmisión de un interferómetro de fibra engrosada observado en un rango de 1000-1500 nm. 63
Fig. 4.5	Estructura de un estrechamiento del diámetro al 50% de la fibra DSF entre dos RPLs con engrosamiento. 64
Fig. 4.6	Espectro del interferómetro de la fibra entre las rejillas con una longitud de estrechamiento de 5 mm. 64
Fig. 4.7	Cálculos teóricos y experimentales de la separación entre las franjas de atenuación del interferómetro. 65
Fig. 4.8	Ancho de banda espectral de las bandas de atenuación del interferómetro en función de la separación de las rejillas. 66
Fig. 4.9	Desplazamiento de las bandas de atenuación de un interferómetro de periodo variable. Las pruebas de temperatura se realizaron en el rango de 100-180 °C. 67
Fig. 4.10	Respuesta a la tensión de las bandas de atenuación en el rango de 1258-1478 nm entre 1.4 y 2.9 pm/με. 69
Fig. 5.1	Esquema experimental usado para la caracterización de las rejillas engrosadas 73
Fig. 5.2	Espectro de transmisión de la rejilla engrosada a 1550 nm 74
Fig. 5.3	Desplazamiento de la banda de atenuación en un rango de 36 nm 75
Fig. 5.4	Espectro de transmisión en potencia de la rejilla a 1524 nm y temperatura 76
Fig. 5.5	Esquema experimental del sensor de temperatura 76
Fig. 5.6	Cambios ascendentes de la potencia con el aumento de temperatura 77
Fig. 5.7	Aumento en la medición en voltaje con la temperatura. 77
Fig. 5.8	Arreglo experimental utilizado para el sensado de índice de refracción circundante. 79
Fig. 5.9	Mediciones del índice con estrechamiento del diámetro de la fibra al 50%. 80
Fig. 5.10	Mediciones de índice con estrechamiento de diámetro de 30 μm. 81

## Índice de tablas.

---

	<b>Tabla</b>	<b>Pág.</b>
T 2.1	Las 4 ecuaciones de Maxwell usadas para el análisis de guía de onda.	16

## Índice de fotografías.

---

F 2.1	Fotografía de la sección transversal de la fibra de dispersión desplazada donde se observa el núcleo central y el núcleo en anillo.	18
F 3.1	RPL formada con 6 puntos engrosados separados periódicamente a 150 $\mu\text{m}$	45



## Capítulo 1

La popularidad de las rejillas de periodo largo (RPL) en fibras ópticas se deriva en gran parte de lo fácil y económico que resulta fabricarlas en comparación con las rejillas de Bragg. La longitud del periodo, que se encuentra entre 100 y 1000 micras, ha permitido que se fabriquen con máscaras de amplitud y con exposición directa punto-a-punto con luz UV, técnicas similares a las utilizadas para fabricar rejillas de Bragg. El periodo relativamente grande de las RPL ha permitido el uso de otras técnicas de fabricación en las que se produce un cambio en las dimensiones exteriores de la fibra óptica, por ejemplo, las que utilizan descargas de arco eléctrico mediante el uso de una máquina de empalmes de fusión de fibras ópticas.

En este capítulo se revisan los antecedentes de fabricación de las RPL con arco eléctrico, se discuten las motivaciones que nos han llevado a desarrollar este trabajo y se hace una breve descripción del contenido de la tesis.

---

### ***ANTECEDENTES***

#### *1.1 Introducción*

#### *1.2 Antecedentes*

#### *1.3 Motivación*

#### *1.4 Organización de la tesis*

#### *1.5 Referencias*

## 1.1 Introducción

Una rejilla de periodo largo (RPL) se basa en la modulación periódica de las propiedades de la fibra óptica. Esto se puede conseguir mediante el cambio permanente del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, iluminando con luz ultravioleta (típicamente en el rango de longitud de onda de 242 nm a 248 nm) el núcleo en una fibra fotosensible, como aquellas que contienen dióxido de germanio [1,2] o por la deformación física de la fibra producida por presión mecánica con un elemento corrugado.

Las RPL son dispositivos que se pueden fabricar con técnicas relativamente simples, son dispositivos intrínsecos de fibra y debido a su naturaleza dieléctrica son inmunes a la interferencia electromagnética [3-6]. También se ha encontrado que tienen bajos niveles de reflexión de  $< -80\text{dB}$  así como bajas pérdidas por inserción de  $< 0.2\text{ dB}$ ; además de ser relativamente insensibles a los efectos de polarización cuando se graban en fibra estándar [7].

Las aplicaciones y características que tienen estos dispositivos han motivado a la investigación continua desde su aparición. Esto ha llevado a explorar diferentes métodos para alterar el índice de refracción del núcleo y los cuales se pueden encontrar en la literatura. Las RPL, en general, pueden grabarse en una fibra óptica usando luz ultravioleta [8, 9, 10, 11], por irradiación con láser de  $\text{CO}_2$  a  $10.6\ \mu\text{m}$  [12,13], irradiación con pulsos de femto-segundos en el infrarojo a  $800\text{ nm}$  [14], implante de iones [15], difusión de contaminantes hacia el núcleo de la fibra y el grabado de rejillas por arco eléctrico [16,17].

También se han reportado métodos, en donde se deforma la fibra para fabricar rejillas. En uno de ellos, se hacen cortes periódicos del revestimiento sobre la región de la RPL con un láser de  $\text{CO}_2$  y se temple la fibra en la misma región de los cortes con arco eléctrico. La tensión superficial del vidrio derretido transforma la corrugación en el revestimiento en una deformación tipo senoidal del núcleo de la fibra [18]. En otro método utilizan la corrosión con químicos en el revestimiento dando como resultado una superficie con estructura corrugada. Lo interesante de las RPL es que el acoplamiento se lleva a cabo entre el modo fundamental y los modos del revestimiento de una fibra óptica cuando se satisface la condición de amarre de fase. Por esto, el dispositivo actúa efectivamente como

una RPL con una fuerza de acoplamiento sintonizable [19-20]. Además, se han reportado micro dispositivos en fibra SMF28 (Single Mode Fiber-28), donde incluyen una RPL. Para esto calientan la fibra con una flama oscilante y a la vez la estiran hasta reducir su tamaño a 15 $\mu$ m. Para obtener una RPL, simplemente hacen micro- estrechamientos con el láser de CO<sub>2</sub> a lo largo de la fibra reducida [21].

La técnica de arco eléctrico con la cual también se deforma la fibra óptica es uno de los métodos más simples para fabricar las RPL utilizando una máquina de empalme por fusión comercial. No es necesario que las fibras sean fotosensibles y puede implementarse casi en cualquier tipo de fibra ya que es principalmente el calentado del vidrio (silicio) lo que establece la modulación en la fibra [22,23]. Los antecedentes que describen la evolución del método del arco eléctrico se mencionan en la siguiente sección, siendo de suma importancia para el seguimiento de esta investigación en cuanto a la contribución de información y conocimientos.



## 1.2 Antecedentes

Una breve descripción del proceso de fabricación de las rejillas de periodo largo con arco eléctrico destacará lo simple que resulta ser el método. La capa exterior de polímero de la fibra óptica se retira antes de fijarla a un sistema de traslación. Este es controlado por un motor que permite que la fibra alineada se desplace entre los electrodos de una máquina de empalme por fusión. El desplazamiento de la fibra se lleva a cabo en intervalos predeterminados y este movimiento establece el periodo de la rejilla [24]. Una descarga de arco eléctrico se aplica a la fibra entre los electrodos. La potencia de arco eléctrico así como el tiempo de exposición se define por el usuario [25]. La escritura punto-a-punto de la rejilla ocurre al desplazar la fibra después de cada descarga aplicada y la fuerza de acoplamiento en la rejilla aumenta al nivel deseado al repetir el proceso completo un número de veces.

En algunos arreglos experimentales se requiere aplicar una tensión constante a lo largo de la fibra, (i. e. tensión axial), agregando un objeto con peso en uno de los extremos [23-24], mientras que en otros casos no se aplica tensión o es mínima. El efecto de la tensión es ocasionar estrechamiento periódico (i.e. adelgazar el diámetro de la fibra) en donde se han aplicado descargas eléctricas. Se ha observado que el agregar tensión a la fibra beneficia porque solo se necesitan pocas descargas para obtener una banda de atenuación con mucha profundidad sin que aumenten considerablemente las pérdidas por inserción [25].

En los métodos propuestos para fabricar RPL con arco eléctrico se muestra que la relajación de esfuerzos residuales internos es un mecanismo que contribuye a la formación de la rejilla, excepto para el caso en donde se inducen micro curvaturas en la fibra al aplicar esfuerzos perpendiculares a su eje con arco eléctrico [26]. Las descargas aplicadas en los diferentes puntos de la fibra, causan variaciones rápidas de temperatura en estos lugares. Esto sirve para templar localmente la fibra y cambia las distribuciones de los esfuerzos residuales que facilitan el acoplamiento de modos. El proceso de enfriamiento local ó templado, en fibras expuestas a más de de 1000 °C/seg por descarga de arco, puede modificar localmente la densidad, la viscosidad y el índice de refracción en el vidrio, además del esparcimiento Rayleigh, contribuyendo también al acoplamiento de modos [27].

Las características espectrales de las RPL fabricadas con este método de arco eléctrico, dependen solo de la longitud y periodo de la rejilla, por lo cual son casi predecibles las propiedades de acoplamiento modal. Las rejillas son menos sensibles a las fluctuaciones de temperatura en el rango de (30-160 °C) en comparación con las que se graban con luz (UV). Esto se comprueba por el pequeño desplazamiento espectral (58,59 y 70 pm/°C) de las bandas de atenuación de las longitudes de onda resonantes observadas durante la caracterización a la temperatura en algunos trabajos [24]. Manteniendo la temperatura por debajo del punto de esfuerzo de la fibra (es decir, el punto en el cual los esfuerzos residuales se templan y donde comienza la relajación de esfuerzos), las características espectrales son lineales. La resistencia de la fibra a la temperatura depende de los compuestos químicos del material. Se encontró que las RPL grabadas en fibra dopada con germanio pueden trabajar a temperaturas por encima de los 800 °C, mientras que la fibra estándar para telecomunicaciones resistió hasta 1100 °C [23-24]. Al templar la rejilla a 1100 °C se puede obtener una mejor estabilidad a la temperatura permitiendo después reproducir espectros a 1190 °C [23]. Además, se han hecho estimaciones de la temperatura en rejillas de fibra durante su fabricación con arco basándose en la radiación de cuerpo negro ya que existe una relación intrínseca entre las propiedades y los mecanismos de formación de las rejillas al exponerse al arco eléctrico. Se utiliza la ley de radiación de cuerpo negro de Planck para determinar la temperatura en una pequeña muestra de fibra. Esto se logró al ajustar la radiación emitida por la fibra óptica al espectro de emisión teórico de la radiación de cuerpo negro. Para esto, se calentó la fibra con una descarga eléctrica y se detectó la transmisión con un espectrómetro Cronin. Se obtuvo una temperatura promedio de 1365 °C para la región de fibra expuesta a una corriente eléctrica de 9 mA. Sin embargo, al suponer un perfil de temperatura más real se calculó un pico de temperatura de  $1400 \pm 50$  °C. Los cálculos son afectados en gran manera por el comportamiento térmico y la dependencia en longitud de onda de dos parámetros físicos como son el índice y la emisividad [28].

Con los métodos de descarga de arco eléctrico que hasta ahora se conocen se continúan fabricando RPLs y explotando sus características para diversas aplicaciones. De la literatura sabemos que se utilizó por primera vez una fibra de doble núcleo concéntrico para aprovechar el particular perfil de índice que la caracterizaba [29]. Se obtuvieron filtros con longitudes de onda más corta que la longitud de onda intrínseca de amarre de fase cuyas características de pérdidas por inserción es menor a 0.5 dB. Para este caso se

hicieron caracterizaciones térmicas cuyos resultados mostraron una sensibilidad a la temperatura de  $58 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  lo cual es más bajo que el observado en fibras monomodo dopadas con  $\text{GeO}_2$  ( $70 \text{ pm} / ^\circ\text{C}$ ).

Por otro lado, se han hecho investigaciones por medio de espectroscopía Raman y espectroscopía de luminiscencia del mecanismo de grabado de RPLs en fibra estándar monomodo SMF28 con arco eléctrico. Se encontraron cambios en la estructura de la fibra expuesta a descargas de arco eléctrico y las mediciones mostraron una reducción en la intensidad Raman en un rango de  $200\text{-}700 \text{ cm}^{-1}$  lo que indica un aumento en la densidad o en la temperatura ficticia (i.e., temperatura en la cual el vidrio estaría en equilibrio térmico). Se llegó a la conclusión de que el cambio de índice de refracción tanto del núcleo como del revestimiento es el resultado de una deformación geométrica y un aumento en la densidad (i.e. una reducción o compactado) de la estructura de vidrio [30].

También se han realizado estudios sobre la influencia de la radiación gamma en las propiedades de las rejillas fabricadas con la técnica de arco eléctrico. El experimento mostró que después de varias dosis de radiación a  $0.5 \text{ MGy}$ , ( $1\text{Gy}$  es la absorción de un joule de radiación de energía por un kilogramo de materia), el espectro de transmisión de las rejillas en dos fibras diferentes permaneció casi sin cambio. Las fibras Oxford y Acreo que se utilizaron contenían un núcleo de silicio puro. La sensibilidad a la temperatura y tensión de las rejillas en fibra Oxford no se afectó con la radiación gamma. Los resultados sugieren que fibras con núcleo de silicio puro pueden utilizarse en ambientes de radiación ionizada [31].

Se ha probado de manera analítica la posibilidad de sensado de las RPL fabricadas con arco eléctrico en fibras de cristal fotónico. Los parámetros ambientales incluidos en este estudio son temperatura, tensión e índice de refracción externo [32]. Los cálculos demostraron que los modos resonantes del revestimiento son modos cuasi- $LP_{0m}$  que se propagan principalmente a través del cristal fotónico. La RPL en esta fibra muestra una sensibilidad muy débil a la temperatura debido a que el efecto es un pequeño desplazamiento hacia el color rojo de  $2 \pm 1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  que es causado por el efecto termo óptico. Además se encontró que la rejilla es sensible a la tensión y al índice de refracción externo. Este comportamiento es interesante porque es una solución al problema de *sensibilidad cruzada* de los sensores de fibra, la cual se refiere a la respuesta errada y

simultánea de dos o más fenómenos ambientales como temperatura y tensión. El resultado para la sensibilidad al índice de refracción externo fue exagerado pero la sensibilidad calculada para la tensión (0.28 nm/mε) resultó de acuerdo al resultado experimental. El modelo es bastante exacto para estudiar fenómenos ó eventos con cambios que desplacen la longitud de onda a pocos nanómetros [33].

En el 2007 se demostró que bajo ciertas condiciones es posible fabricar en una fibra co-dopada con B/Ge una RPL inducida con arco eléctrico cuyo espectro muestre varias resonancias dobles. Las dobles resonancias se forman por distintos mecanismos y son causadas por el acoplamiento a modos del revestimiento de diferentes simetrías. Estas tienen comportamientos distintos a altas temperaturas ya que el conjunto de resonancias que se producen por perturbaciones simétricas desaparecen durante el templado a una temperatura de 800 °C en 30 minutos, mientras que el otro conjunto producido por un mecanismo antisimétrico puede tolerar temperaturas por encima de 1000 °C. Las rejillas con estos conjuntos duales de resonancias pueden ser útiles para el desarrollo de sensores que midan simultáneamente dos parámetros físicos en los cuales las resonancias podrían responder de forma diferente a los cambios de los diferentes parámetros [34].

En otra investigación se estudió el origen de perturbaciones antisimétricas en RPL inducidas con arco eléctrico que acoplan el modo del núcleo a modos antisimétricos  $LP_{li}$  del revestimiento. Se demostró que esta perturbación es causada por el gradiente de temperatura en la fibra óptica, el cual es inducido a su vez, por el gradiente de temperatura en la descarga de arco, lo cual resulta en un gradiente de viscosidad y una asimetría correspondiente de la deformación de la fibra. El efecto de micro deformación el cual consiste de un desplazamiento periódico del núcleo es lo suficientemente fuerte para producir rejillas con fuerzas de acoplamiento tan grandes. La reproducibilidad del proceso de la inscripción de la rejilla para el caso de acoplamiento a modos antisimétricos del revestimiento es más alta cuando la fibra se coloca en una región con un gradiente de temperatura más alto [35].

En este trabajo se demuestra una RPL inducida con arco eléctrico utilizando la técnica del *engrosado* de la fibra. El engrosado del diámetro de la fibra es una técnica especial utilizada durante el empalme por fusión de fibras ópticas que sirve para mejorar la calidad del empalme. Las pérdidas por empalme se deben, generalmente, a que las fibras tienen perfiles de índice diferente o diámetros muy diferentes entre ellas. Muchas máquinas de empalme por fusión pueden engrosar la fibra al acercar los extremos colocados en los sujetadores mientras la fibra se calienta [36]. La región engrosada de una fibra debe ser lo suficientemente gradual para prevenir que la energía se acople a los modos de radiación que se pierden o a los modos de fuga del revestimiento, lo cual se ha observado al obtener con esta técnica rejillas de periodo largo cuya descripción se da en el capítulo 3 de este trabajo de tesis.

### 1.3 Motivación

El motivo principal de esta investigación fue emplear una técnica de empalme conocida como *engrosado de fibra* para novedosamente fabricar rejillas de periodo largo con descargas de arco eléctrico. Los puntos principales de este trabajo doctoral son los siguientes:

- Desarrollar experimentalmente un proceso de fabricación de RPL punto-por-punto engrosando periódicamente una sección de la fibra.
- Demostrar que los dispositivos obtenidos con *fibra óptica engrosada* pueden ser aplicados como filtros en longitud de onda.
- Demostrar que los dispositivos pueden ser utilizados en aplicaciones de sensado estudiando su comportamiento a diferentes parámetros ambientales.
- Desarrollar un entendimiento teórico sobre RPLs fabricadas con arco eléctrico.
- Desarrollar un entendimiento de la respuesta de filtrado de la rejilla en fibra de dispersión desplazada DSF.
- Estudiar y caracterizar el comportamiento en transmisión de dos RPL fabricadas a una distancia  $d$ .
- Reportar los resultados en dos revistas indexadas con arbitraje riguroso.

## 1.4 Organización de la tesis

Esta tesis se enfoca en la investigación y desarrollo de un nuevo método para fabricar RPL con arco eléctrico en fibra óptica de dispersión desplazada así como investigar sus características como filtros y la construcción de interferómetros obtenidos a partir de ellas. Para poder hacer esto es necesario entender el principio de operación de las RPLs e investigar los avances que se han logrado con la técnica de arco eléctrico y otros métodos de fabricación.

En el capítulo 2 se revisan brevemente los fundamentos teóricos para el análisis de fibras de cuatro capas con la finalidad de obtener gráficamente los modos que se propagan por la fibra ya que son estos los que se acoplan conforme evoluciona la fabricación de la rejilla y en respuesta se obtienen funciones de filtrado.

El capítulo 3 describe el método y proceso de fabricación de una rejilla de periodo largo con *ensanchamiento* así como las características de los filtros obtenidos y su comportamiento a diversos parámetros ambientales como temperatura, tensión y curvatura cuyos resultados darán la pauta a desarrollar sensores de fibra.

En el capítulo 4 se describe el principio de operación de un interferómetro Mach-Zehnder obtenido al fabricar dos rejillas engrosadas y sus características espectrales. Se analiza teóricamente el desplazamiento observado de las bandas de atenuación provocado por las diferentes perturbaciones ambientales a las cuales fue objeto de estudio.

En el capítulo 5 se muestran algunos experimentos que se probaron con las rejillas RPL de fibra ensanchada buscando principalmente aplicaciones de sensado y filtrado.

Finalmente en el capítulo 6 se muestran las conclusiones del trabajo realizado en esta tesis y se proponen trabajos a futuro.

## 1.5 Referencias

- [1] Vengsarkar, A.N., Lamaire, P.J., Judkins, J.B., Bhatia, V., Erdogan, T. and Sipe, J.E. *Journal of Lightwave Technology* 1996 **14**(1): pp.58-56.
- [2] James, S.W. and Tatam, R.P. *Measurement Science and Technology* 2003. **14**(5): pp. R49-R61.
- [3] Lee, B. *Optical Fiber Technology* 2003. **9** : pp.57-59.
- [4] Bhatia, V. and Vengsarkar, A.M. *Optics Letters* 1996. **21**(9): pp. 692-694.
- [5] Shu, X., Zhang, L., and Bennion, I. *Journal of Lightwave Technology* 2002. **20**(2): pp. 255-266.
- [6] Khaliq, S., James, S.W. and Tatam, R.P. *Optics Letters* 2001. **26**(16): pp. 1224-1226.
- [7] Xu, M.G., Maaskant, R., Ohn, M.M. and Alavie, A.T. *Electronics Letters* 1997. **33**(22): pp. 1893-1894.
- [8] Bhatia, V., and Vengsarkar, A.M. *Optics Letters* 1996. **21**(9): pp. 692-694.
- [9] Chen, K., Herman, P.R., Tam, R., and Zhang, J. *Electronics Letters* 2000. **36**: pp. 2000-2001.
- [10] Guan, B., Tam, H., Ho, S., Liu, S., and Dong, X. *Photonics Technology Letters* 2000, *IEEE*. **12**(6): pp. 642-644.
- [11] Blows, J., and Tang, D. *Electronics Letters* 2000. **36**(22): pp. 1837-1839.
- [12] Davis, D., Gaylord, T., Glytsis, E., Kosinski, S., Mettler, S., and Vengsarkar, A. *Electronics Letters* 1998. **34**: pp. 302-303.



- [13] Drozin, L., Fonjallaz, P., and Stensland, L. Electronics Letters 2000. **36**: pp. 742-743.
- [14] Kondo, Y., Nouchi, K., Mitsuyo, T., Watanabe, M., Kazansky, P., and Hirao, K. Optics Letters 1999. **24**(10): pp. 646-648.
- [15] Fujumaki, M., Ohki, Y., Brebner, J.L., and Roorda, S. Optics Letters 2000. **25**(2) : pp. 88-90.
- [16] Dianov, E., Karpov, V., Grekov, M., Golant, K., Vasiliev, S., Medvekov, O., and Khrapko, R. Integrated Optics and Optical fibre communications. **2**. pp. 53-56.
- [17] Dianov, E., Karpov, V., Kurkov, A., and Grekov, M. 24<sup>th</sup> ECOC. Vol. **1-3**. pp. 395-396.
- [18] Poole, C.D., Presby, H.M. and Meester, J. P. Electronics letters 1994. **30**(17): pp. 1437-1438.
- [19] Wang, L.A., Lin, C.Y. and Chen, G.W. Measurement Science and Technology 2001. **12**(7): pp. 793-799.
- [20] Lin, C.Y., Chen, G. W. and Wang, L.A. Journal of Lightwave Technology 2001. **19**(8): pp. 1212-1220.
- [21] Kakarantzas, G., Dimmick, T.E., Birks, T.A., Le Roux, R. and Russell, P. St. J. Optics Letters 2001. **26**(15): pp. 1137-1139.
- [22] Palai, P., Satyanarayan, M.N., Das, M., Thyagarajan, K. and Pal, B. P. Optics Communications 2001. **193**: pp. 181-185.
- [23] Rego, G. Okhotnikov, O., Dianov, E., and Sulimov, V. Journal of Lightwave Technology 2001. **19**(19): pp. 1547-1579.
- [24] Humbert, G., and Malki A. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics 2001. **4**(2): pp. 194-198.

- [25] Frazão, O., Rego, G., Lima, M., Teixeira, A., Araújo, F.M., André, P., Da Rocha, J.F. and Salgado, H.M. (2001). <http://www.ee.ucl.ac.uk/lcs/prog01/LCs041.pdf>.
- [26] Humbert, G., and Malki A. Optics Communications 2001. **208**: pp. 329-335.
- [27] Hwang, I.K., Yun, S. H., and Kim, B. Y. Optics Letters 1999. **24**(18): pp. 1263-1265.
- [28] Rego, G., Marques, P. V. S., Santos, J.L., Salgado, H.M. Optics Communications 2006. **159**: pp. 620-625.
- [29] Humbert, G., Abdelrafik, M., Février, S., Roy, P., Auguste, J.L., Bondy, J.M. Optics Communications 2003. **225**: pp. 47-53.
- [30] Abdelrafik, M., Humbert, G., Ouerdane, Y., Boukhenter, A., and Boudrioua, A. Applied Optics 2003. **42**(19): pp. 3776-3779.
- [31] Rego, G., Fernandez-Fernandez, A., Gusarov, A., Brichard, B., Berghmans, F., Santos, J.L., and Salgado, H.M. Applied Optics 2005. **44**(29): pp. 6258-6263.
- [32] Kakarantzas, G., Birks, T., and Russell, P. Optics Letters 2002. **27**(12): pp. 1013-1015.
- [33] Petrovic, J.S., Dobb, H., Mezentsev, V., Kalli, K., Webb, D., Bennion, I. Journal of Lightwave technology 2007. **25**(5): pp. 1306-1312.
- [34] Rego, Gaspar., and Ivanov, Oleg. Optical Letters 2007. **32**(20): pp. 2984-2886.
- [35] Ivanov, O.V., Rego, G. Optics Express 2007. **15**(21): pp. 13936-13941.
- [36] Yablon, A.D. Springer series in optical sciences. 2005.



## Capítulo 2

Las rejillas de periodo largo (RPL) permiten la transferencia de energía entre los modos del núcleo y recubrimiento de una fibra óptica. Esto se logra al perturbar la fase de un modo de manera que se ajuste o amarre a la fase de otro, esto se conoce como “condición de ajuste de fase”. El primer paso para realizar el análisis de amarre de fase es calcular los índices de refracción efectivos del modo fundamental del núcleo así como los del revestimiento a una longitud de onda específica. En este capítulo revisaremos brevemente los fundamentos teóricos, dirigiéndolos completamente al análisis de fibras de cuatro capas o triple revestimiento, que consiste en un núcleo central rodeado por un segundo núcleo en anillo, para finalmente obtener los índices efectivos modales tanto del núcleo como del núcleo en anillo. Los resultados nos darán una idea de la cantidad y el tipo de modos guiados que existen en la fibra de dispersión desplazada utilizada para este trabajo.

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

---

#### 2.1 Introducción

#### 2.2 Análisis teórico para fibras de 4 capas

#### 2.3 Solución de la ecuación de onda en la región del núcleo en anillo.

##### 2.3.1 Solución en el núcleo central.

##### 2.3.2 Solución en las 2 capas interiores de la fibra.

##### 2.3.3 Solución en la última capa de la fibra.

#### 2.4 Aplicando condiciones de frontera.

#### 2.5 Solución de la ecuación de onda en el núcleo.

#### 2.6 Conclusiones.

#### 2.7 Referencias

## 2.1 Introducción

Las fibras ópticas con estructura de triple revestimiento son conocidas como fibras de dispersión desplazada, de dispersión aplanada o como compensadoras de la dispersión dependiendo de los detalles de la estructura en particular. Basándose en los requerimientos del diseño, se determina el perfil de índice refractivo, lo que conlleva a modificar las características de dispersión en la fibra. Las fibras de dispersión desplazada por lo general ofrecen una muy pequeña dispersión a una longitud de onda de  $\lambda = 1.55\mu m$ . Esta longitud de onda corresponde a la longitud de onda de mínima atenuación de las fibras ópticas de silicio. Por esto, las fibras de dispersión desplazada ocasionan mucho menos distorsión y atenuación de la señal que las fibras monomodo ordinarias.

Para este trabajo, utilizamos una fibra de dispersión desplazada, y hacemos notar, que sólo nos interesa su estructura de cuatro capas, mas no sus características de dispersión. La estructura la podemos considerar como de triple-revestimiento, doble núcleo concéntrico, como una estructura en W ó una fibra multicapas, con el objetivo de obtener las características de los campos modales que se propagan en la fibra. Utilizaremos la teoría de guiado débil para este propósito e idealizaremos el perfil del índice como una estructura con capas en escalón ya que los resultados por este método producen una buena aproximación. Como cualquier otro fenómeno electromagnético, nuestro análisis parte de las ecuaciones de Maxwell en el sistema MKS.

2.2 Análisis teórico para fibras de cuatro capas

Las ecuaciones de Maxwell son un conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales vectoriales que describen completamente los fenómenos electromagnéticos. De forma general, estas ecuaciones, relacionan el campo eléctrico, el campo magnético y sus respectivas fuentes materiales como corriente eléctrica, polarización eléctrica y polarización magnética. Ya que la luz es una forma de radiación electromagnética, el análisis de la propagación de la luz en fibras ópticas, por ser nuestro caso, parte de estas cuatro ecuaciones, lo que nos llevará a la ecuación de onda. En la siguiente tabla se muestran las ecuaciones de Maxwell:

Tabla 2.1 Las 4 ecuaciones de Maxwell usadas para el análisis de guía de onda.

	En el vacío	Caso general
Ley de Gauss	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$
Ley de Gauss para el campo magnético	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Ley de Faraday	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Ley de Ampère	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

Antes de comenzar el análisis debemos hacer algunas suposiciones para simplificar los cálculos. La estructura cilíndrica dieléctrica de cuatro capas que analizaremos es la que se muestra en la Figura 2.1. Suponemos que idealmente todas las capas son lineales, isotrópicas, homogéneas, no magnéticas, sin pérdidas y sin no-linealidades. Al decir que las capas son lineales, significa que la fibra esta libre de perturbaciones como curvaturas o torsión, las cuales causan asimetrías en el perfil del índice de la fibra. Si consideramos que las capas no tienen pérdidas, lo cual es real ya que la mayoría de las fibras actuales tienen pérdidas de hasta 0.2 dB/km [1], significa que las constantes de propagación modal son reales.

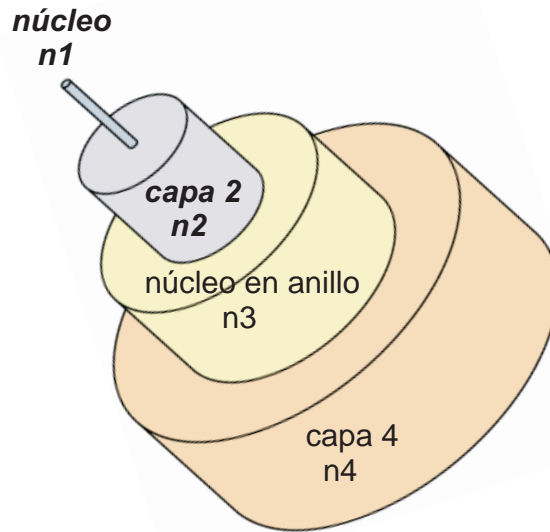


Fig. 2.1. Representación de una fibra de 4 capas con diferentes índices de refracción  $n_i$  donde  $i = 1,2,3,4$ .

Las no-linealidades en fibras ópticas surgen por la respuesta que tiene el material a campos electromagnéticos intensos. Aparecen principalmente en fibras monomodo debido a que la potencia modal se encuentra altamente confinada en el núcleo y por ende, un gran campo se enfoca en una pequeña área. Sin embargo, los efectos de la no-linealidad son relativamente débiles cuando se utilizan fuentes de baja potencia y la fuente utilizada para fabricar y caracterizar las rejillas para este trabajo es de baja potencia, por lo cual despreciamos su efecto.

Finalmente la dependencia de los campos con respecto al tiempo y la distancia  $z$  que se representa con el factor  $e^{j(\omega t - \beta z)}$ , puede descartarse, donde  $\beta$  es la constante de propagación modal para un modo específico. Esta constante caracteriza un modo porque su valor determina de éste la distribución del campo y la intensidad, la velocidad de grupo y la dispersión, el índice de refracción efectivo, el factor de fase de un modo guiado y el factor de atenuación del modo. En realidad es un parámetro clave cuyo valor varía considerablemente entre los diferentes modos guiados debido dos factores: la estructura de la guía de onda y la longitud de onda de la luz [2].

En la Figura 2.2 se muestra esquemáticamente el perfil del índice de refracción de la fibra de dispersión desplazada, abajo del perfil se muestran los anillos de la fibra resaltando el núcleo y el núcleo en anillo que lo rodea. En la parte inferior se muestra un esquema de cómo se distribuye el campo por las cuatro capas de la fibra. En general, la figura da una idea de cómo se confina el campo en las diferentes capas. Por el tipo de estructura, se sabe que gran parte del campo queda confinado en el núcleo central y en el núcleo en anillo que lo rodea [3], entonces el acoplamiento de la luz se lleva a cabo principalmente entre estas dos capas. La segunda y cuarta capa contiene luz que corresponde al campo evanescente el cual no afecta el guiado del resto de la estructura pero debe tomarse en cuenta durante el análisis. En fotografía (F 2.1) mostrada a continuación se observa la sección transversal de la fibra de dispersión desplazada que se utilizó para este trabajo. Claramente se observa el núcleo central y el núcleo en anillo por donde se propaga la luz y que las dimensiones de estos son pequeñas en comparación con el revestimiento exterior que es de  $125\ \mu\text{m}$ .



F 2.1. Fotografía de la sección transversal de la fibra de dispersión desplazada donde se observa el núcleo central y el núcleo en anillo.

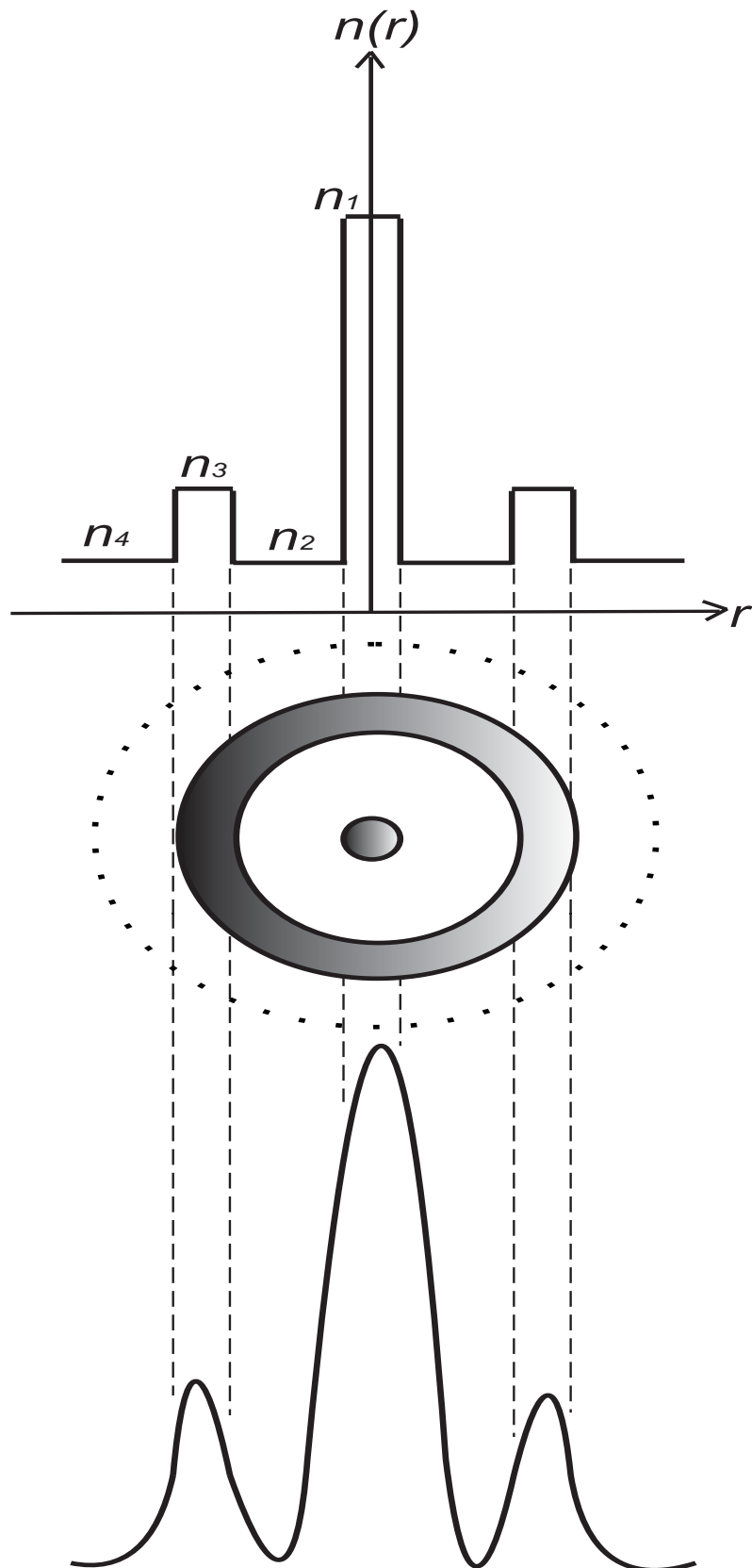


Figura 2.2. Perfil de índice de una fibra de cuatro capas idealizada, la sección transversal y la forma del campo idealizado que se propaga en la fibra.



Para describir los campos en las capas es importante considerar dos parámetros fundamentales, como la permeabilidad magnética  $\mu$  y la permisividad eléctrica  $\varepsilon$  las cuales ya están implícitas en las ecuaciones de Maxwell. Debido a que la guía de onda es dieléctrica, la permeabilidad magnética es constante en las capas. Entonces el material de cada capa queda caracterizado exclusivamente por la constante dieléctrica  $\varepsilon$ , la cual esta definida como  $\varepsilon_i = n_i^2 \varepsilon_0$ , donde  $i$  es el número de capas (es decir, 1-4),  $n_i$  es el índice de refracción y  $\varepsilon_0 (= 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{Nm}^2)$  la constante dieléctrica en el vacío [4].

Al utilizar las ecuaciones de Maxwell simplificadas se obtienen las soluciones de los campos electromagnéticos para las capas de la fibra. No obstante, son ecuaciones acopladas en donde es necesario eliminar el campo  $\vec{E}$  ó el campo  $\vec{H}$ . Las ecuaciones resultantes se conocen como ecuaciones de onda escalar las cuales son validas para cada capa individual de la fibra [5].

$$\nabla_i^2 \psi + (k_0^2 n_i^2 - \beta^2) \psi = 0. \quad (2.1)$$

Donde  $\psi$  representa una componente transversal cartesiana de los campos eléctrico  $E$  ó el magnético  $H$ ,  $\nabla_i^2$  es el operador Laplaciano transversal,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  es el número de onda en el espacio libre y  $n$  es el índice efectivo del medio en el cual se investigan los campos electromagnéticos.

A partir de la ecuación de onda, se determinan las soluciones de los campos modales para lo cual nos enfocamos solamente en los modos guiados y aplicamos las condiciones de guiado débil para simplificar las soluciones. La condición de guiado débil implica que la diferencia del índice de refracción entre dos capas consecutivas es muy pequeña [6,7]. Es decir que  $\Delta_i = |(n_{i+1} - n_i)/n_i| \ll 1$  e  $i = 1,2,3$  para fibras de triple revestimiento.

Ya que la fibra es circular y además suponemos que es recta, podemos utilizar el sistema de coordenadas cilíndricas. La ventaja de utilizar la simetría cilíndrica implica que las soluciones son separables en cada una de las variables dentro de cada región de la fibra. El operador Laplaciano  $\nabla_i^2$  en el sistema de coordenadas cilíndricas queda de la siguiente

manera  $\Delta_t^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}$  [8]. Sustituyendo el operador en la ecuación de onda obtenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + (k_0^2 n_i^2 - \beta^2) \psi = 0. \quad (2.2)$$

Se trata de una ecuación diferencial parcial de segundo orden la cual se puede resolver por el método de separación de variables en donde  $\psi(r, \varphi) = R(r)\Phi(\varphi)$  y para simplificar hacemos que  $q^2 = k_0^2 n_i^2 - \beta^2$ . Sustituyendo la función  $\psi$  y  $q^2$  en la ecuación 2.2 tenemos:

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} [R(\psi)\Phi(\varphi)] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [R(\psi)\Phi(\varphi)] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} [R(\psi)\Phi(\varphi)] + q^2 [R(\psi)\Phi(\varphi)] = 0. \quad (2.3)$$

Haciendo un poco de algebra y separando variables se tiene:

$$\Phi(\varphi) \left[ \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} R(r) \right] + R(r) \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \Phi(\varphi) + q^2 \Phi(\varphi) \right] = 0. \quad (2.4)$$

Re- ordenando los términos de acuerdo a la variable que corresponde:

$$\frac{r^2}{R(r)} \left[ \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right] + \frac{1}{\Phi(\varphi)} \left[ \frac{\partial^2 \Phi(\varphi)}{\partial \varphi^2} + q^2 r^2 \Phi(\varphi) \right] = 0. \quad (2.5)$$

Y finalmente reacomodando el segundo término de la expresión llegamos a:

$$\frac{r^2}{R(r)} \left[ \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right] + \frac{1}{\Phi(\varphi)} \frac{\partial^2 \Phi(\varphi)}{\partial \varphi^2} + q^2 r^2 = 0. \quad (2.6)$$

Es importante observar como ahora la parte izquierda de la ecuación (2.6) esta en función de  $R(r)$  solamente y la parte derecha de la ecuación (2.6) esta en función sólo de  $\Phi(\varphi)$ . Ya que la ecuación (2.6) debe satisfacerse para todos los valores de  $R(r)$  y  $\Phi(\varphi)$ , se puede concluir que cada lado de la ecuación (2.6) debe ser igual a una constante. El signo

de esta constante puede ser ambiguo pero para este caso usaremos “ $\pm v^2$ ”. Entonces la ecuación nos quedará de la siguiente manera:

$$\frac{r^2}{R(r)} \left[ \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right] + \frac{1}{\Phi(\varphi)} \frac{\partial^2 \Phi(\varphi)}{\partial \varphi^2} + q^2 r^2 = \pm v^2. \quad (2.7)$$

Separando términos tenemos las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{1}{\Phi(\varphi)} \frac{\partial^2 \Phi(\varphi)}{\partial \varphi^2} = -v^2. \quad (2.8)$$

$$\frac{r^2}{R(r)} \left[ \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right] + q^2 r^2 = v^2. \quad (2.9)$$

Haciendo un poco de algebra con la ecuación (2.9) llegamos a una forma conocida de la ecuación:

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + (q^2 r^2 - v^2) R = 0. \quad (2.10)$$

$$\frac{d^2 R}{dr} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \frac{(q^2 r^2 - v^2) R}{r^2} = 0. \quad (2.11)$$

$$\frac{d^2 R}{dr} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left( q^2 - \frac{v^2}{r^2} \right) R = 0. \quad (2.12)$$

Acomodado la ecuación (2.8) vemos que se trata de una ecuación diferencial especial del

tipo  $\frac{d^2 y}{dx^2} = Y$  que se presenta frecuentemente como:

$$\frac{d^2 \Phi(\varphi)}{d\varphi^2} + \Phi(\varphi) v^2 = 0. \quad (2.13)$$

Para resolverla, se escribe la ecuación de la siguiente forma:  $dy' = Ydx$  [9].

$$\frac{d\Phi'}{d\varphi} = \frac{d^2\Phi}{d\varphi^2} = -\nu^2\Phi. \quad (2.14)$$

Multiplicando ambos miembros por  $\Phi'd\varphi$  y también por  $\Phi'$  tenemos:

$$\Phi'd\Phi' = -\nu^2\Phi d\Phi. \quad (2.15)$$

Integrando:

$$1/2\Phi'^2 = 1/2\nu^2\Phi^2 + C. \quad (2.16)$$

$$\Phi' = \sqrt{2C - \nu^2\Phi^2}, \quad (2.17)$$

Pero por ser  $y'dx = dy$ , entonces sustituimos:

$$\frac{d\Phi}{d\varphi} = \sqrt{2C - \nu^2\Phi^2} \quad (2.18)$$

Por simplicidad hacemos  $2C=C_1$  y tomando el signo positivo del radical. Separando las variables resulta:

$$\frac{d\Phi}{\sqrt{C_1 - \nu^2\Phi^2}} = d\varphi. \quad (2.19)$$

Integrando (2.19):

$$\frac{1}{\nu} \arcsen \frac{\nu\Phi}{\sqrt{C_1}} = \varphi + C_2, \text{ o sea } \arcsen \frac{\nu\Phi}{\sqrt{C_1}} = \nu\varphi + \nu C_2.$$

Esto es lo mismo que decir 
$$\frac{\nu\Phi}{\sqrt{C_1}} = \text{sen}(\nu\varphi + \nu C_2). \quad (2.19)$$

De la identidad trigonométrica  $\text{sen}(x + y) = \text{sen}x \cos y + \cos x \text{sen}y$ , tenemos:

$$\frac{\nu\Phi}{\sqrt{C_1}} = \text{sen}\nu\varphi \cos\nu C_2 + \cos\nu\varphi \text{sen}\nu C_2. \quad (2.20)$$

Despejando obtenemos:

$$\Phi = \frac{\sqrt{C_1}}{\nu} \cos\nu C_2 \text{sen}\nu\varphi + \frac{\sqrt{C_1}}{\nu} \text{sen}\nu C_2 \cos\nu\varphi. \quad (2.21)$$

Una solución todavía más general para este tipo de ecuación diferencial es [10]:

$$\Phi = A_1 \text{sen} \nu \varphi + B_1 \text{cos} \nu \varphi. \quad (2.22)$$

en donde  $A_1$  y  $B_1$  son coeficientes constantes.

Cada término de  $\text{cos} \nu \varphi$  y  $\text{sen} \nu \varphi$ , así como su combinación lineal mostrada en la ecuación (2.22), son parte de las soluciones del campo. Estos términos representan modos degenerados separados en donde la constante  $\nu$  es un parámetro que define el orden del modo LP acimutal y además influye en la periodicidad del campo. Debido a que la simetría cilíndrica de la fibra sugiere que las soluciones del campo son periódicas en  $\varphi$ , es decir  $\psi(r, \varphi + 2\pi) = \psi(\varphi, r)$ , y para que esto se cumpla, el valor de  $\nu$  debe ser un número entero [11].

La ecuación (2.12) es una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden, conocida como ecuación diferencial Bessel cuyas soluciones se obtienen en términos de funciones Bessel de orden  $\nu$ . Para determinar correctamente la solución de la ecuación diferencial Bessel en cada capa de la fibra, debemos asignar condiciones a  $\beta$  para que exista el guiado de los modos. Esto quiere decir que el tipo exacto de funciones Bessel quedará determinado por la distribución modal de los campos EM en las diferentes regiones de la estructura. Estas ecuaciones diferenciales se pueden resolver por medio de un método matemático que se le atribuye al Alemán Ferdinand George Frobenius (1849-1917). La serie de Frobenius (también conocida como serie general de Laurent) es la siguiente:

$$y(x) = x^r \sum_{n=0}^{\infty} c_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} c_n x^{n+r}. \quad (2.23)$$

Las soluciones básicas para fibras de dos o tres capas ya existen en la literatura. Por lo cual continuamos con el desarrollo del capítulo basándonos, en parte, en esos resultados [2, 4, 7, 12].

El perfil del índice en la figura 2.3 puede describirse de la siguiente manera:  $n_2 \leq n_4 < n_3 < n_1$ . Los índices están delimitados entre las siguientes regiones radiales y forman las capas de la fibra, es decir: la capa central esta delimitada como,  $(0 \leq r \leq r_1)$ . La segunda capa ó primer revestimiento interior esta delimitada por  $(r_1 \leq r \leq r_2)$ . En la tercera capa ó segundo revestimiento  $(r_2 \leq r \leq r_3)$  y finalmente en la capa exterior que se describe como  $r > r_3$ . Estas descripciones ayudaran a determinar las soluciones de los campos modales en las diferentes capas de la fibra óptica. La figura, en realidad muestra un esquema idealizado del perfil del índice de la fibra con la que se trabajó en el laboratorio. Se ha supuesto que tiene cambios del índice en escalón entre las diferentes capas y debido a la forma de la estructura, el índice de refracción de la segunda capa es igual al índice de refracción de la cuarta capa ( $n_2 = n_4$ ). Para este caso, la estructura de la fibra se divide en dos regiones como se muestra en la figura.

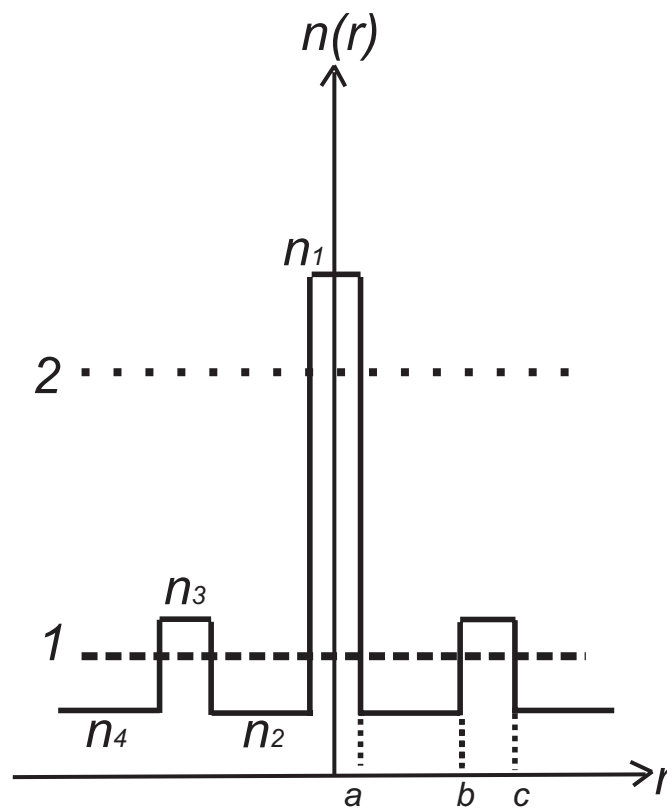


Fig. 2.3. Estructura de la fibra en dos regiones. Región 1 (núcleo en anillo). Región 2 (núcleo central).

El objetivo de dividir la estructura es hacer el cálculo del índice efectivo para las regiones donde hay guiado de luz, que son el núcleo central y el núcleo en anillo [13]. De cada región, (1 y 2), se puede obtener la ecuación característica partiendo de la matriz de coeficientes de  $6 \times 6$  que se obtiene al aplicar la aproximación LP e igualar el determinante a cero. Este procedimiento se muestra en las siguientes secciones.

### 2.3 Solución de la ecuación de onda en la región del núcleo en anillo.

En cada región se necesitan las combinaciones adecuadas de funciones Bessel y funciones Bessel modificadas. Estas combinaciones van a depender del rango en el que se ubica el índice efectivo modal el cual está dado por  $n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}$ . Comenzamos analizando la parte de la estructura del núcleo en anillo en donde se supone que el índice efectivo se encuentra en el rango de  $n_4 < n_{eff} < n_3$ , es decir, la región 1 mostrada en la Figura 2.3.

#### 2.3.1 Solución de la ecuación de onda en el núcleo central.

Para que se cumpla la condición de guiado en la región del núcleo, el valor de la constante de propagación  $\beta$  debe estar delimitado entre los valores de índice de refracción  $n_1$  y  $n_2$ , es decir,  $n_2 \leq \beta \leq n_1$ . De acuerdo a esta condición y a que existen modos guiados en el núcleo tenemos que  $q^2 = k_0^2 n_i^2 - \beta^2 > 0$  [14]. Si  $q_1 = \sqrt{q^2}$ , entonces la solución de la ecuación diferencial Bessel para el núcleo queda determinada de la siguiente forma:

$$R(r) = A_2 J_\nu(q_1 r) + B_2 Y_\nu(q_1 r). \quad (2.24)$$

en donde,  $J_\nu$  y  $Y_\nu$  son las funciones Bessel de primera y segunda clase,  $A_2$  y  $B_2$  son coeficientes de amplitud constantes. Para este análisis, debemos de considerar el comportamiento de los campos en las inmediaciones del eje del núcleo, es decir, cuando  $r \rightarrow 0$ . Por medio de las gráficas de las funciones Bessel y de acuerdo a su forma (INDICE A), observamos que la función  $Y_\nu$  es indefinida cuando  $r = 0$ , por lo cual debe descartarse de la solución. Por esta razón, la solución para el campo modal en el núcleo se describe con la siguiente ecuación:

$$R_1(r) = AJ_\nu(q_1 r). \quad (2.25)$$

### 2.3.2 Solución de la ecuación de onda en las capas interiores de la fibra.

De la Figura 2.3 observamos que en la segunda capa ( $r_1 \leq r \leq r_2$ ) no hay modos guiados y que solamente aparece el campo evanescente. Por esto tenemos que el parámetro modal es  $q^2 = k_0^2 n_i^2 - \beta^2 < 0$ . Si  $q_2 = \sqrt{q^2}$ , entonces la solución de la ecuación diferencial Bessel para la segunda capa queda determinada con funciones modificadas de Bessel de primera y segunda clase de la siguiente forma:

$$R_2(r) = B(I_\nu|q_2|r) + CK_\nu(|q_2|r). \quad (2.26)$$

En la tercera capa ( $r_2 \leq r \leq r_3$ ), que es el núcleo en anillo que rodea el núcleo central, existe guiado de modos. Sin embargo, si se cumple que la constante de propagación se encuentra en el siguiente rango  $k_0 n_3 < \beta < k_0 n_1$ , entonces los campos involucran las funciones  $I_\nu$  y  $K_\nu$ , mientras que para valores de la constante en el siguiente rango  $k_0 n_4 < \beta < k_0 n_3$ , los campos se expresan en términos de funciones Bessel  $J_\nu$  y  $Y_\nu$ . Sabemos que hay luz confinada en la tercera capa, esto indica que  $k_0 n_4 < \beta < k_0 n_3$  y por lo tanto el parámetro modal es  $q^2 = k_0^2 n_i^2 - \beta^2 > 0$ . Si  $q_3 = \sqrt{q^2}$ , entonces la solución de la ecuación diferencial Bessel para el núcleo en anillo queda determinada de la siguiente forma:

$$R_3(r) = DJ_\nu(q_3 r) + EY_\nu(q_3 r). \quad (2.27)$$



### 2.3.3 Solución de la ecuación de onda en la última capa.

En la capa del revestimiento exterior donde  $r \geq r_3$ , el campo debe decaer exponencialmente en la dirección radial. En este caso  $q^2 = k_0^2 n_i^2 - \beta^2 < 0$ , donde  $q_4 = \sqrt{q^2}$ , entonces la solución a la ecuación diferencial Bessel es  $R_4(r) = A_3(I_\nu(q_2|r) + B_3K_\nu(q_2|r))$ . Como la señal propagada queda confinada en la primera y tercera capa, entonces los campos en la segunda y cuarta capa han de ser rápidamente decrecientes o evanescentes. La única función de Bessel que presenta dicho comportamiento es la función  $K_\nu(x)$ . Por esta razón  $A_3 = 0$ , debido a que la función  $I_\nu(x)$  es creciente con  $x$ . Por lo cual, la forma del campo en el revestimiento exterior se determina con la siguiente ecuación:

$$R_4(r) \approx FK_\nu(q_4|r). \quad (2.28)$$

Para facilitar la descripción de los campos modales se utilizan parámetros modales adimensionales con  $u_i$  para los núcleos y  $w_i$  para las capas consideradas como revestimientos.

$$\begin{aligned} u_1 = q_1 &= \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2} & w_1 = q_2 &= \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_2^2} \\ u_2 = q_3 &= \sqrt{k_0^2 n_3^2 - \beta^2} & w_2 = q_4 &= \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_4^2} \\ & & w_3 = q_5 &= \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_3^2} \end{aligned}$$

Particularmente las ecuaciones de campo para cada capa de la fibra óptica en la región 1 quedan de la siguiente manera:

$$\psi(r, \varphi) = \begin{cases} \psi_1(r, \varphi) = AJ_\nu(q_1 r)\Phi(\varphi), & 0 \leq r \leq r_1 \\ \psi_2(r, \varphi) = [B(I_\nu(q_2|r) + CK_\nu(q_2|r))]\Phi(\varphi), & r_1 \leq r \leq r_2 \\ \psi_3(r, \varphi) = [DJ_\nu(q_3 r) + EY_\nu(q_3 r)]\Phi(\varphi), & r_2 \leq r \leq r_3 \\ \psi_4(r, \varphi) = FK_\nu(q_4|r)\Phi(\varphi), & r \geq r_3 \end{cases}. \quad (2.29)$$

en donde  $A, B, C, D, E$  y  $F$  son coeficientes de amplitud constantes y  $\Phi(\varphi)$  es la ecuación (2.22).

### 2.4 Aplicando condiciones de frontera.

En guías de onda dieléctricas, las condiciones de frontera se utilizan para establecer la continuidad de las componentes tangenciales del campo en las diferentes interfaces de la estructura. En fibras de guiado débil, el análisis de onda escalar se simplifica bastante al aproximar las condiciones exactas de frontera a la continuidad de  $\psi(r, \varphi)$  y  $\partial\psi(r, \varphi)/\partial r$ . Esta aproximación reduce el número de condiciones de frontera para fibras ópticas de triple revestimiento de doce a un conjunto de seis ecuaciones homogéneas. Estas aproximaciones son muy exactas para fibras ópticas de guiado débil.

Primero se obtiene de (2.29) la derivada  $\partial\psi(r, \varphi)/\partial r$  de cada región como se muestra a continuación:

$$\frac{\partial\psi(r, \varphi)}{\partial r} = \begin{cases} \frac{\partial\psi_1(r, \varphi)}{\partial r} = AJ'_v(q_1 r)\Phi(\varphi) & 0 \leq r \leq r_1 \\ \frac{\partial\psi_2(r, \varphi)}{\partial r} = [BI_v(q_2 r) + CK_v(q_2 r)]q_2\Phi(\varphi) & r_1 \leq r \leq r_2 \\ \frac{\partial\psi_3(r, \varphi)}{\partial r} = [DJ_v(q_3 r) + EY_v(q_3 r)]q_3\Phi(\varphi) & r_2 \leq r \leq r_3 \\ \frac{\partial\psi_4(r, \varphi)}{\partial r} = FK_v(q_4 r)\Phi(\varphi) & r \geq r_3 \end{cases} \quad (2.30)$$

El siguiente paso es aplicar las condiciones de frontera en diferentes interfaces, es decir, en a)  $r = r_1 = a$ , b)  $r = r_2 = b$  y c)  $r = r_3 = c$ . Con esto se asegura que las componentes tangenciales del campo pasen de forma continua a través de la frontera y se ajusten a las diferentes interfaces a analizar [4,14].

$$a) \quad \psi_1(r_1, \varphi) = \psi_2(r_1, \varphi) \quad \text{y} \quad \left. \frac{\partial\psi_1(r, \varphi)}{\partial r} \right|_{r=r_1} = \left. \frac{\partial\psi_2(r, \varphi)}{\partial r} \right|_{r=r_1}.$$

cuyo resultado es:

$$AJ_v(q_1 a) = BI_v(q_2 a) + CK_v(q_2 a) \quad (2.31)$$

$$Aq_1 J'_v(q_1 a) = [BI'_v(q_2 a) + CK'_v(q_2 a)]q_2. \quad (2.32)$$

$$b) \quad \psi_2(r_2, \varphi) = \psi_3(r_2, \varphi) \quad \text{y} \quad \left. \frac{\partial \psi_2(r, \varphi)}{\partial r} \right|_{r=r_2} = \left. \frac{\partial \psi_3(r, \varphi)}{\partial r} \right|_{r=r_2} .$$

cuyo resultado es:

$$BI_v(q_2b) + CK_v(q_2b) = DJ_v(q_3b) + EY_v(q_3b) \quad (2.33)$$

$$[BI'_v(q_2b) + CK'_v(q_2b)]q_2 = [DJ'_v(q_3b) + EY'_v(q_3b)]q_3 . \quad (2.34)$$

$$c) \quad \psi_3(r_3, \varphi) = \psi_4(r_3, \varphi) \quad \text{y} \quad \left. \frac{\partial \psi_3(r, \varphi)}{\partial r} \right|_{r=r_3} = \left. \frac{\partial \psi_4(r, \varphi)}{\partial r} \right|_{r=r_3} .$$

cuyo resultado es:

$$DJ_v(q_3c) + EY_v(q_3c) = FK_v(q_4c) \quad (2.35)$$

$$[DJ'_v(q_3c) + EY'_v(q_3c)]q_3 = Fq_4K'_v(q_4c) . \quad (2.36)$$

Las 6 ecuaciones anteriores de (2.31) a (2.34) se escriben de forma matricial [15,16,17]:

$$[a_{ij}] \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{bmatrix} = 0; \quad \text{en donde } i = 1,2,\dots,6 \text{ y } j = 1,2,\dots,6 \quad (2.37)$$

en donde  $[a_{ij}]$  es una matriz de  $6 \times 6$  que queda representada de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} J_v(u_1a) & -I_v(w_1a) & -K_v(w_1a) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_v(w_1b) & K_v(w_1b) & -J_v(u_2b) & -Y_v(u_2b) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_v(u_2c) & Y_v(u_2c) & -K_v(w_2c) \\ u_1J'_v(u_1a) & -w_1I'_v(w_1a) & -w_1K'_v(w_1a) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_1I'_v(w_1b) & w_1K'_v(w_1b) & -u_2J'_v(u_2b) & -u_2Y'_v(u_2b) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u_2J'_v(u_2c) & u_2Y'_v(u_2c) & -w_2K'_v(w_2c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{bmatrix} = 0 \tag{2.38}$$

La conocida relación de dispersión también llamada ecuación característica ó ecuación de eigen-valores queda determinada por el determinante de esta matriz. Es necesario que las ecuaciones (2.31) a (2.36) tengan soluciones no triviales por lo cual el determinante de coeficientes debe desaparecer. De la condición  $[a_{ij}] = 0$ , se determina la constante de propagación  $\beta$  u otras características modales como el índice efectivo  $n_{eff}$ , inclusive los modos en la fibra.

### 2.5 Solución de la ecuación de onda en la región del núcleo.

En la Figura 2.3 se muestra la región 2 que comprende solo la parte del núcleo y en donde el índice efectivo se encuentra en el rango ( $n_3 < n_e < n_1$ ). Para hacer el análisis de esta región se sigue el mismo procedimiento de la sección 2.2. La única diferencia es que no vamos a considerar propagación de señal en la capa 3. Por lo cual, se consideró que en esta región solo existe campo evanescente o una mínima señal y  $q^2 < 0$ . Con esto, el campo en la tercera capa y por la forma de las funciones Bessel, queda descrito de la siguiente forma:

$$\psi_3(r, \varphi) = I_v(q_5r) + K_v(q_5r) \tag{2.39}$$

donde  $w_3 = q_5 = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_3^2}$ .

La matriz de coeficientes queda determinada de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} J_v(u_1a) & -I_v(w_1a) & -K_v(w_1a) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_v(w_1b) & K_v(w_1b) & -I_v(w_3b) & -K_v(w_3b) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_v(w_3c) & K_v(w_3c) & -K_v(w_2c) \\ u_1J'_v(u_1a) & -w_1I'_v(w_1a) & -w_1K'_v(w_1a) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_1I'_v(w_1b) & w_1K'_v(w_1b) & -w_3I'_v(w_3b) & -w_3K'_v(w_3b) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w_3I'_v(w_3c) & w_3K'_v(w_3c) & -w_2K'_v(w_2c) \end{bmatrix} = 0$$

Estas matrices se analizan en Mathematica® de donde se obtienen los índices efectivos modales. La Figura 2.4 muestra el índice efectivo del núcleo y de los modos del anillo para una fibra con los siguientes parámetros:  $a = 2.9\mu m$  ,  $b = 5\mu m$  ,  $c = 8\mu m$  ,  $n_1 = 1.4598$  ,  $n_2 = 1.4458$  ,  $n_3 = 1.4498$  y  $n_4 = 1.4458$ .

De acuerdo con los resultados de la Figura 2.4, el estrecho núcleo central de la fibra de dispersión desplazada utilizada en este trabajo es monomodo, pues solo se obtiene el modo guiado fundamental  $LP_{01}$ . El núcleo en anillo es multimodo ya que los resultados muestran dos modos guiados,  $LP_{01}$  y  $LP_{11}$  , como puede observarse en la figura.

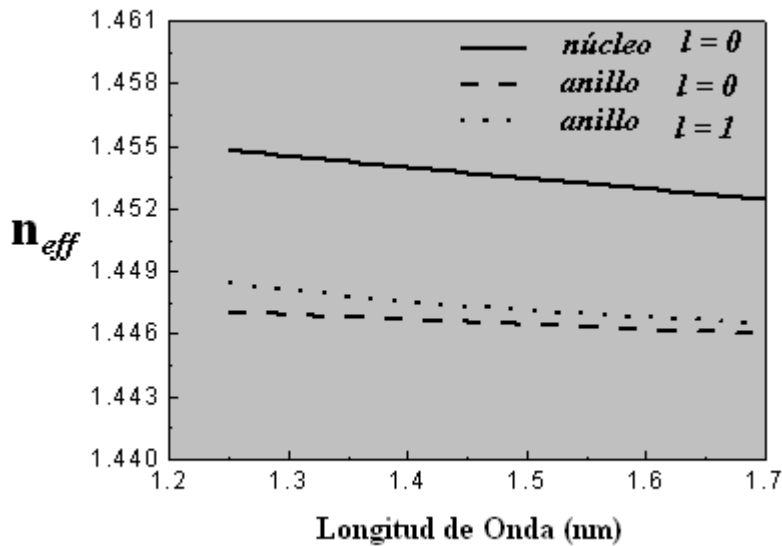


Fig. 2.4. Índices efectivos de los modos en el núcleo y núcleo en anillo de una fibra DSF.

Los resultados muestran que los modos están confinados en el núcleo central y en el núcleo en anillo. Dan también una idea del tipo de modos que se acoplarán cuando se fabriquen las RPL en la fibra.

## 2.6 Conclusiones

Se demostró como aplicar el análisis de onda escalar y teoría de guiado débil en fibras con una estructura de 4 capas. Una vez que se tiene la matriz de Eigen-valores se puede utilizar algún software como *Matlab* o *Matematica* para hacer cálculos variando parámetros de la fibra. El análisis es útil para encontrar los índices efectivos tanto del núcleo como del anillo, las constantes de propagación modal y entender el tipo de modos que soporta la estructura a diferentes longitudes de onda. La importancia que tiene conocer los modos propagados en la estructura es que podemos darnos una idea de cuales y cuantos modos son los que se propagan en la fibra, ya que son los que se van a acoplar en la rejilla de periodo largo.

Aun queda mucho por hacer, en cuanto a teoría se refiere, para poder explicar completamente que es lo que sucede con la luz en este tipo de rejilla RPL engrosada con arco eléctrico. Con el estudio e investigación continua de este tipo de rejillas pretendemos simular la transmisión de la rejilla engrosada para corroborar los resultados experimentales. Esto también será conveniente para el caso contrario, de poder simular la transmisión con diferentes parámetros de fabricación y diferentes estructuras de fibras, además de las descargas de arco eléctrico para de esta forma darnos una idea de que resultados esperar en el laboratorio. También es necesario obtener las expresiones para los coeficientes (A-F) de la estructura y las distribuciones modales en forma grafica antes y después de la fabricación de la RPL aplicando la teoría de modos acoplados.

**2.7 Referencias**

- [1] G. Agrawal. Third Edition. Chapter 1, pp. 4-8.
- [2] Charles Tsao. Chapter 10. pp. 370- 441. Oxford University Press. 1992.
- [3] Georges Humbert, Abdelrafik Malki, Sebastien Fevrier, Philippe Roy, Jean-Louis Auguste, Jean-Marc Blondy. Optics Communications 2003. **225**:pp. 47-53.
- [4] Kenji Kawano and Tsutomu Kitoh. Chapter 1. pp. 1-12. A wiley interscience publication. John Wiley & Sons, Inc.
- [5] W. Snyder and John D. Love. Kluwer academic publishers.
- [6] D.Gloge. Applied Optics 1971, **10**(10):pp. 2252-2258.
- [7] D. Gloge, Applied Optics 1971. **10**(11): pp. 2242-2245.
- [8] R. Spiegel. Tablas matemáticas, Pp. 126.
- [9] Smith – Longley. Calculo diferencial.
- [10] John A. Buck. A Wiley interscience publication. John Wiley & Sons, Inc.
- [11] D. Marcuse. Second Edition. Academic Press.
- [12] The Wolfram functions site. <http://functions.wolfram.com>.
- [13] Ali Rostami, and Morteza Savadi-Oskouei. Optics Communications 2007. **271**: pp. 413-420.
- [14] Ajoy Ghatak and K. Thyagarajan. Cambridge University Press 1998.

[15] Partha Roy Chaudhuri, C.Lu, W. Xiaoyan. Optics Communications 2003. **228** pp. 285-293.

[16] Xiaoping Zhang, and Xiangping Tian. Optics and Laser Technology 2003. **35** pp. 237-244.

[17] Markus Hautakorpi and Kaivola. Journal of the Optical Society of America A 2005. **22** (6): pp. 1167-1169.





## Capítulo 3

En este capítulo se describe el método de fabricación de filtros de rechazo de banda, con una máquina de empalme, basado en el aumento del diámetro de la fibra con la técnica conocida como “engrosamiento”, que hasta donde sabemos no ha sido utilizada para fabricar filtros de longitud de onda. Con esta técnica ha sido posible fabricar *RPLs* con una longitud de hasta 3 mm, cuya transmisión muestra una profundidad de la banda de atenuación de más de 20 dB y con un ancho de banda de más de 100 nm.

---

### LA REJILLA ENGROSADA COMO FILTRO

---

#### *3.1 Introducción*

#### *3.2 El proceso de empalme y engrosado de la fibra.*

#### *3.3 Esquema experimental*

#### *3.4 Método de fabricación*

#### *3.5 Características de los filtros*

#### *3.6 Conclusiones*

#### *3.7 Referencias*

### 3.1 Introducción

En 1996 apareció el concepto de rejillas de periodo largo en fibras ópticas [1], (*LPFG, por sus siglas en inglés*) y desde entonces, la investigación de estos dispositivos se sigue haciendo en diferentes tipos de fibras y con diversos métodos de fabricación. Básicamente se iniciaron estas investigaciones modulando periódicamente el índice de refracción del núcleo de la fibra, logrando fabricar RPL útiles en diversas aplicaciones como, por mencionar solo algunas, el filtrado óptico en láseres de fibra de Er/Yb, equalización de ganancia en EDFAs (*Erbium doped fiber amplifiers, por sus siglas en inglés*) y filtros de rechazo de banda. El principio de operación de estas rejillas de periodo largo se basa en el acoplamiento del modo guiado fundamental del núcleo a los modos del revestimiento a longitudes de onda que satisfacen la condición de amarre de fase.

Una manera eficaz para fabricar rejillas de periodo largo en cualquier tipo de fibra óptica es aplicar descargas de arco eléctrico de forma periódica [2-4]. En esta técnica una sección sin recubrimiento de una fibra óptica se coloca entre dos electrodos de una maquina de empalme por fusión. Se aplican una o más descargas de arco en varios puntos los cuales se separan de 400 – 700 micrones. La distancia entre estos puntos se conoce como el periodo de la rejilla. La posición de la fibra con respecto al arco eléctrico se controla por una etapa de traslación motorizada la cual puede ser automatizada. Al mismo tiempo la fibra se mantiene fija y tensa por medio de un objeto con cierto peso en el lado opuesto de la fibra. Es de esperarse que los parámetros de la maquina de empalme, (i. e., potencia del arco eléctrico, tiempo de exposición al arco, y la tensión debida al peso aplicado) influyan en las características tanto físicas como ópticas de la RPL.

En trabajos reportados donde basan la fabricación de rejillas en métodos de descarga de arcos eléctricos, la modulación del índice del núcleo se induce por la contribución causada por la modificación de la estructura del vidrio y la deformación geométrica del núcleo-revestimiento. La reducción del diámetro de la fibra se logra con la tensión aplicada, al suavizado del vidrio, la potencia del arco y al tiempo de exposición de la fibra al arco. Para este caso, el mecanismo principal detrás de la modulación del índice en la rejilla es la deformación geométrica de la estructura núcleo-revestimiento que cambia el índice efectivo visto por los modos en esas secciones [5].

Otra forma para fabricar RPL's con la técnica del arco eléctrico es aplicando altas potencias de arco y nada de tensión sobre la fibra. De esta manera, la modulación del índice se induce directamente por el cambio de la estructura del vidrio sin alterar el diámetro de la fibra [6]. En algunos casos esta modulación se debe a una relajación periódica de esfuerzos residuales en el núcleo de la fibra o por difusión de los elementos contaminantes, que se encuentran en el núcleo, hacia la capa del revestimiento [7,8].

Los métodos de fabricación de rejillas de periodo largo con descargas de arco eléctrico son en esencia cuatro. Se utilizan para ajustar los modos entre empalmes de diferentes fibras: a) estrechamiento, b) difusión del núcleo y c) relajación de esfuerzos. El cuarto método utilizado para ajuste de modos es el engrosamiento del diámetro de la fibra óptica [9]. Hasta donde sabemos, este método no ha sido utilizado para fabricar RPL, sin embargo, este proceso puede ser útil en la fabricación de filtros de longitud de onda con longitudes menores a 0.5 cm.

Por otro lado, las máquinas comerciales para empalme por fusión tienen la posibilidad de engrosar el diámetro de la fibra óptica. Con estas máquinas, la fibra puede engrosarse siguiendo los pasos utilizados para empalmar la fibra óptica, que se mencionaran posteriormente, para fabricar rejillas de periodo largo que tengan la función de filtros de rechazo de banda.

### 3.2 El proceso de empalme y engrosado de la fibra

El empalme por fusión puede resumirse en una serie de pasos básicos para lograr el objetivo de unir la fibra. Primero necesitamos quitar completamente el recubrimiento de polímero que protege la fibra. Después, se debe lograr tener un corte plano de la región que se quiere empalmar lo cual se obtiene con una máquina especial para cortar fibra. Las fibras cortadas y limpias, una vez colocadas en la máquina se alinean y, en algunos casos, se alinean por rotación sobre sus ejes. Los extremos de las fibras deben calentarse a su punto de suavizado para luego juntarlas por presión para formar una unión [10]. Esta presión de golpe entre las fibras es lo que se conoce como empuje en caliente (*hot push*, en inglés). Típicamente se hace algún tipo de prueba de calidad para estimar las pérdidas en la fibra y finalmente, si es necesario, se protege la fibra del ambiente colocándole un recubrimiento plástico.

Existe una gran variedad de máquinas comerciales para empalme por fusión las cuales pueden clasificarse en tres grupos: las de campo que son resistentes y portátiles, las industriales que no son portátiles y no necesariamente son expuestas a perturbaciones ambientales, y las utilizadas en los laboratorios para la investigación, las cuales se diseñan con sistemas para empalme altamente flexibles de manera que puedan empalmar fibras especiales. Algunas calientan la fibra con arco eléctrico mientras que otros equipos usan un filamento resistivo de metal (tungsteno) para calentarla. La parte más importante del proceso de empalme por fusión es el calentado de las puntas de la fibra y la formación de la unión. Aunque los diferentes tipos de máquinas de empalme que existen en la actualidad utilicen diferentes fuentes para calentar y otra terminología para nombrar las diferentes etapas de formación de la unión del empalme, los principios básicos son los mismos.

Estos principios básicos o pasos estándares son los que nos interesan conocer para controlar la fabricación de las rejillas engrosadas. La Figura 3.1 es un diagrama de los tiempos del proceso de empalme que muestra los pasos principales necesarios para el calentamiento de la fibra y unirla en forma definitiva, pero en nuestro caso, vamos a engrosarla [11].

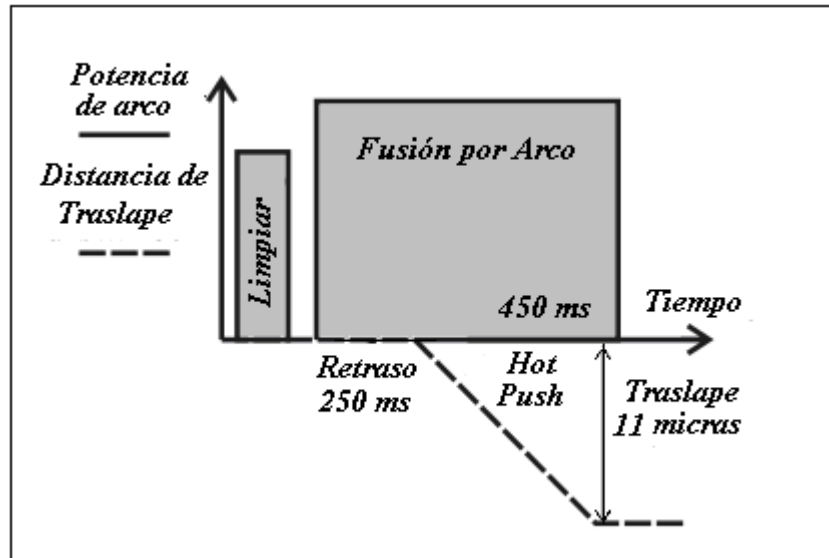


Fig. 3.1. Pasos básicos para el engrosamiento de la fibra óptica.

Observamos de la figura que el proceso inicia con una descarga para limpiar la fibra. Esta descarga es de baja intensidad (30 W) y con un tiempo de duración muy corto (100ms). Una vez que termina el proceso de limpieza, se activa la descarga de arco eléctrico principal, en donde por 250 ms, conocido como retraso del empuje en caliente (*hot push delay*), el calor del arco eléctrico aplicado suaviza la fibra. Se puede observar que en esta etapa la potencia de arco es más alta. Terminado el suavizado de la fibra, el arco continúa aplicándose por 450 ms, paso del proceso llamado empuje en caliente (*hot push*), en donde las puntas de las dos fibras se empujan una contra otra traslapándose una distancia de 11  $\mu\text{m}$  para formar la unión. El traslape y la aplicación del arco eléctrico principal terminan con un pequeñísimo tiempo de diferencia y de esta manera la fibra queda unida. Para engrosarla no es necesario cortarla y se pueden aplicar los arcos eléctricos necesarios en el mismo punto. De esta manera, el diámetro de la fibra se hace más grande debido a la cantidad de traslapes que se hacen. Ya conocidos estos pasos, es ahora que se tienen que modificar los parámetros de la máquina de empalme para fabricar los filtros y armar un esquema experimental que nos ayude en este proceso.

### 3.3 Esquema experimental

El engrosamiento de la fibra óptica produce una deformación geométrica de la estructura de la fibra por lo cual esperamos que ocurra un acoplamiento de la energía del modo fundamental en el núcleo hacia los modos del revestimiento conocidos como de fuga o radiados [10,12]. La Figura 3.2 describe el esquema experimental utilizado para la fabricación de filtros de rechazo de banda por el método de *engrosamiento* descrito en la sección anterior. La foto de la descarga de arco eléctrico se tomo de la referencia 13.

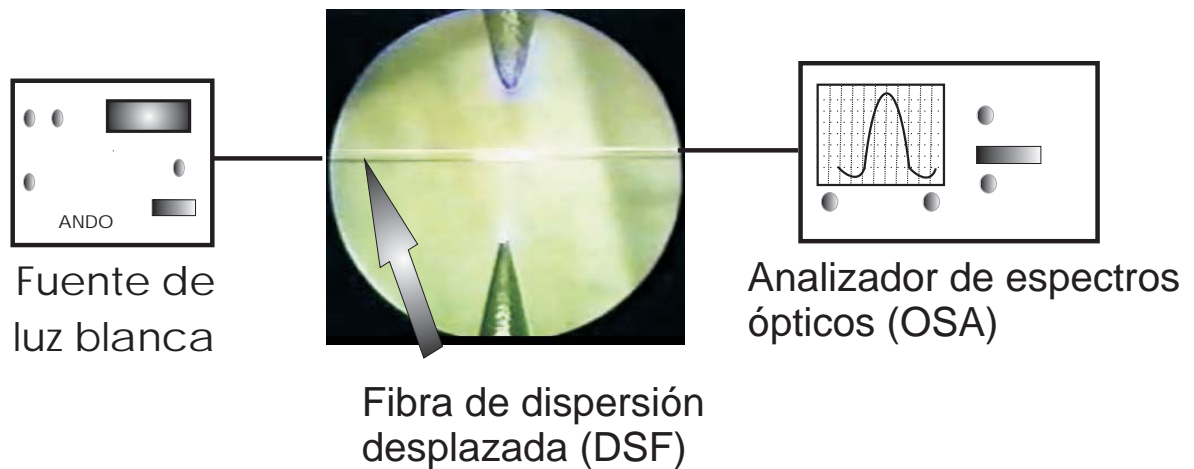


Fig. 3.2. Esquema experimental usado en la fabricación de las rejillas de periodo largo.

Es necesario que una sección sin recubrimiento de la fibra óptica se coloque en los sujetadores laterales de fibra de la máquina para empalmar (FITEL S186). Una fuente de luz blanca de amplio espectro se acopla a un extremo de la fibra óptica mientras que el otro queda conectado a un analizador de espectros ópticos (OSA) para observar la transmisión durante el proceso de fabricación. La máquina para empalme se utiliza en modo manual para modificar los parámetros de fabricación como corriente de arco, tiempo de pre-fusión, y la distancia de empuje entre las fibras. Esto se hace para controlar el diámetro final de la sección engrosada de la fibra. Se aplican los pasos estándares para empalme de fibra repitiéndolos en el mismo punto hasta que la fibra adquiere el diámetro deseado. Para poder repetir el proceso en otro punto, a una distancia que depende del periodo de la rejilla, se suelta la fibra de uno de los sujetadores. Utilizando los controles de la máquina de

empalme se mueve el otro sujetador en dirección paralela al eje de la fibra. Colocada la fibra a la distancia requerida, se fija la fibra en el sujetador correspondiente y de esta manera se puede repetir el proceso en el nuevo punto. La poca calidad en la preparación inicial de la fibra o las condiciones ambientales influyen en la deformación inmediata de la fibra en la primera descarga. Para evitar esto, debe realizarse una prueba de arco y un empalme después de cortar la fibra, de esta manera se puede iniciar el engrosado sin contratiempos. Hasta este punto, ya se puede empezar a fabricar rejillas de periodo largo.

### 3.4 Método de Fabricación.

Para fabricar el filtro de rechazo de banda ó una RPL se necesitan pocas secciones engrosadas en la fibra. En la primera prueba mostrada en este trabajo, los parámetros en la máquina de empalme se modificaron hasta quedar de la siguiente manera: el retraso del empuje en caliente fue de 240 ms, el empuje en caliente de 450 ms y la distancia de traslape fue de 11  $\mu\text{m}$ . La potencia de limpieza fue de 30 W y la potencia de engrosado fue de 78W. Para seleccionar los parámetros se debe realizar una prueba de arco con lo cual la máquina de empalme seleccionará las potencias de limpieza y suavizado iniciales dependiendo del tipo de fibra. Después, se aplican los arcos y se varían los parámetros dependiendo de la calidad y profundidad de la banda de atenuación observada en la transmisión con el OSA. Durante el proceso de fabricación la fibra se engrosó en posiciones separadas por aproximadamente 25 $\mu\text{m}$  y en cada posición el proceso descrito en la figura 3.1 se repitió 5 veces lo cual resultó en una distancia de traslape de 55  $\mu\text{m}$ .

La Figura 3.3 muestra la evolución del espectro de transmisión de acuerdo al número de puntos aplicados con el proceso de engrosado. Vemos que después de aplicar el proceso 8 veces en la fibra, (i. e., curva sólida más gruesa), se forma un pico con aproximadamente 18.6 dB de profundidad y con una longitud central aproximadamente en 1675nm. El pico tiene una gran pendiente que va desde 1380 nm a 1680 nm y la pérdida observada fuera de la banda es menor a 2.5 dB. Con 17 puntos de engrosado, un segundo pico de menos de 7.6 dB de profundidad se forma alrededor de 1220 nm mientras que el pico alrededor de 1675nm ha reducido su profundidad a menos de 4.5 dB y las pérdidas fuera de banda aumentaron 7.5 dB. Un proceso posterior con 26 puntos en la fibra da como resultado pérdidas fuera de banda y un pico más ancho; el cual va de aproximadamente 1380 a 1430 nm, mientras que el pico en 1675 nm casi ha desaparecido. De estos últimos resultados se puede concluir que el número óptimo de puntos engrosados para estos parámetros es del orden de 8 ya que existe una banda de atenuación con mínimas pérdidas.



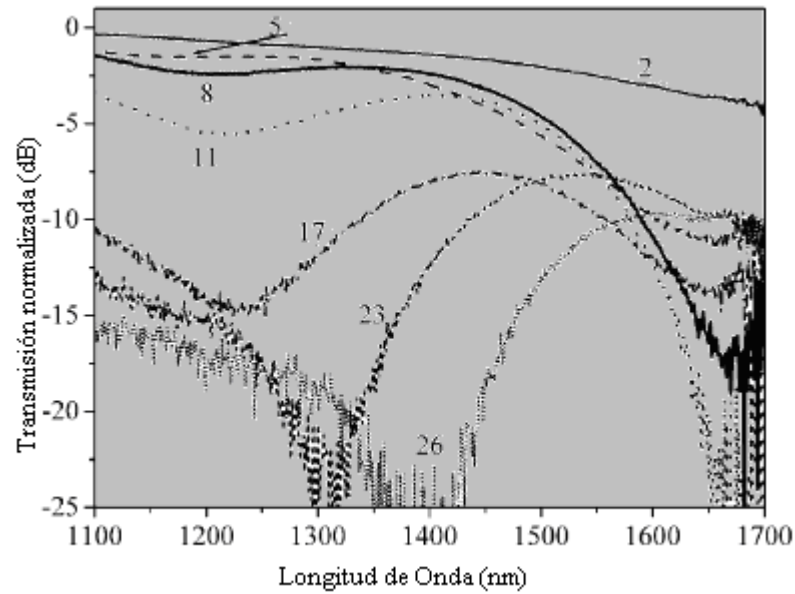


Fig. 3.3 Evolución del espectro de transmisión normalizado en función de la longitud de onda para un filtro de rechazo de banda con respecto al número de puntos (indicado con números) en donde el proceso de ensanchamiento es aplicado.

En una segunda prueba se cambiaron algunos de los parámetros de la máquina de empalme, de manera que se aumentó el tiempo del retraso en caliente a 250 ms y el tiempo de empuje en caliente a 550 ms. Los otros parámetros se mantuvieron en los mismos valores como en la primera prueba. La figura 3.4 muestra la evolución del espectro de transmisión normalizado al aumentar el número de puntos engrosados. Observamos que para nueve puntos aplicados para engrosar, se obtienen en el espectro 3 picos con longitudes de onda centradas en 1100, 1410 y 1680 nm. Aplicando 15 puntos para engrosar, se observa que el pico alrededor de 1410 nm se hace más profundo, mientras que el pico alrededor de 1100 cambia ligeramente pero el pico a 1680 nm prácticamente ha desaparecido. Con 19 puntos para engrosar se desplaza la longitud de onda central del pico más profundo desde 1410 a 1480 nm. Ahora el espectro de transmisión tiene regiones de pérdidas alrededor de las longitudes de onda centrales de 1100, 1480, y 1660 nm los cuales tienen profundidades de 5.47, 18 y 6 dB, respectivamente. Es importante mencionar que aunque el método se reporta en fibra de dispersión desplazada, este se puede aplicar a otro tipo de fibra óptica variando solamente el proceso de fabricación y quizás algunos parámetros en la máquina de empalme.

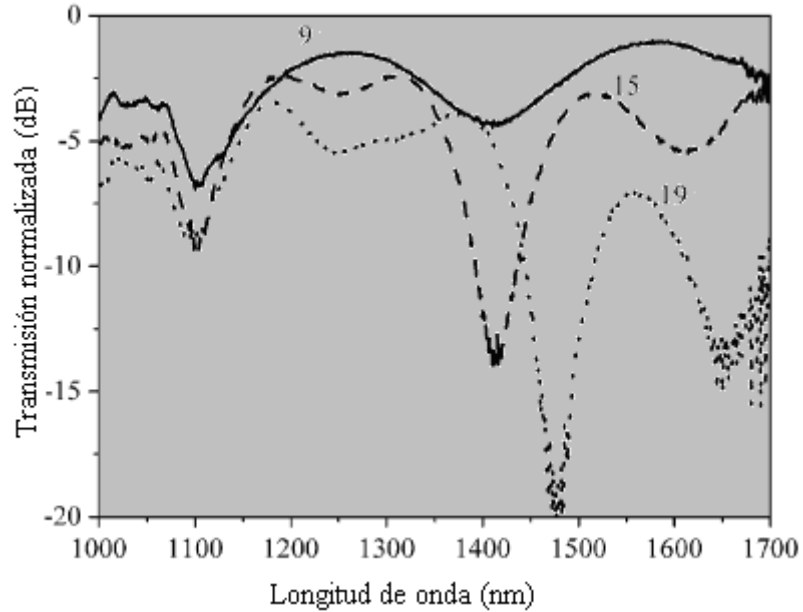
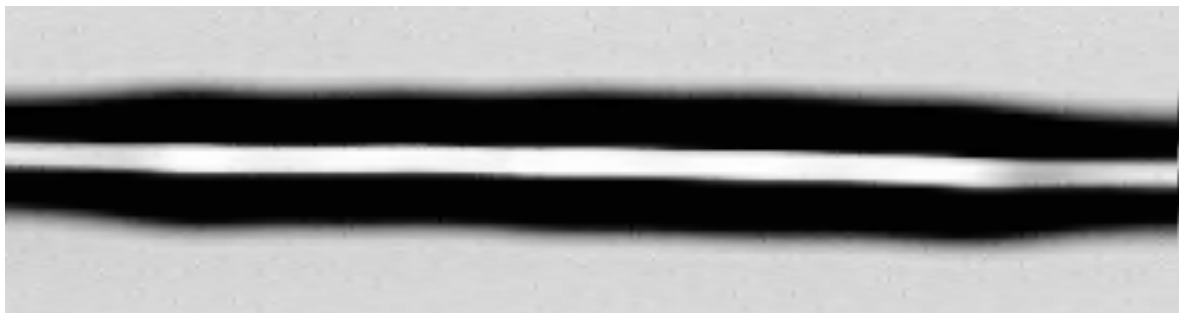


Fig. 3.4 Evolución del espectro de transmisión en función de la longitud de onda para un filtro de rechazo de banda con respecto al número de puntos en donde el proceso de *engrosado* es aplicado.

La fotografía F 3.1 muestra una RPL grabada con 6 puntos engrosados en la fibra DSF (Dispersion-Shifted-Fiber). La imagen se capturó utilizando un microscopio con un objetivo a 20X y un software que sirve para capturar imágenes. Físicamente, la rejilla tiene longitud máxima de 3 mm. Se observa claramente que los puntos engrosados, que son los elementos periódicos que inducen la perturbación en la fibra óptica, no son uniformes. Por lo tanto, observamos en la transmisión bandas de atenuación más anchas de lo que se acostumbra ver en la literatura sobre RPL fabricadas con otros métodos.



F 3.1. RPL formada con 6 puntos engrosados separados periódicamente a 150  $\mu\text{m}$ .

### 3.5 Características de los filtros de fibra.

Una de las propiedades más interesantes de las rejillas de periodo largo es la sensibilidad que presentan a perturbaciones externas causadas por tensión, temperatura, cambios al índice de refracción del medio circundante y doblamiento de la fibra [11-14]. Esta sensibilidad es particularmente útil en aplicaciones de sensado por fibra óptica. En este trabajo se caracterizaron las muestras obtenidas con la temperatura y tensión para realizar un estudio de su comportamiento a estos parámetros ambientales. En la Figura 3.5 se muestra la evolución del espectro de transmisión normalizado de un filtro de fibra a cuatro diferentes valores de temperatura, es decir, 25 °C (*curva trozada*), 100 °C (*curva punteada*), 150 °C (*curva en líneas cortas*) y 190 °C (*curva sólida*). Como puede observarse, la longitud de onda central se mueve desde 1538.36 nm a temperatura ambiente a 1550 nm a 190 °C. Esto significa que el pico recorrió 11.64 nm para este rango de temperaturas.

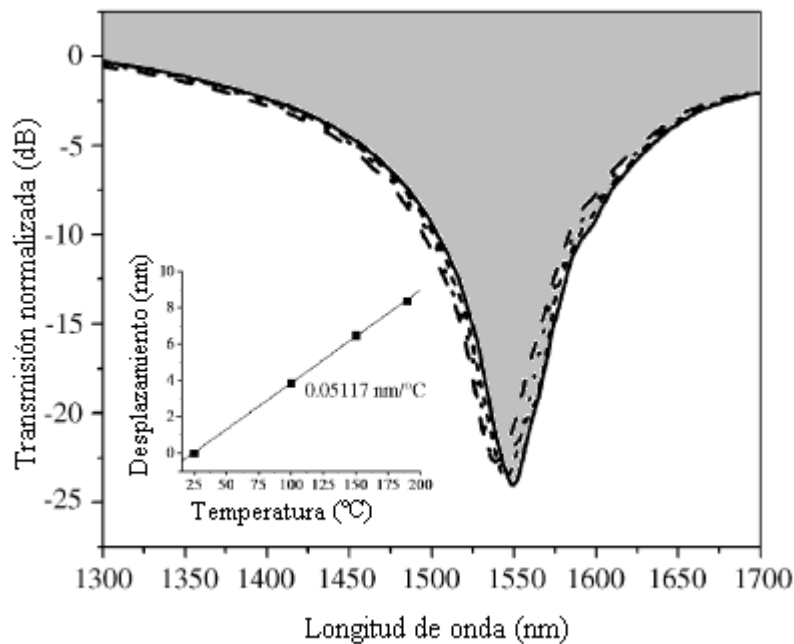


Fig. 3.5. Cambios con la temperatura en el espectro de transmisión del filtro de fibra. La gráfica adjunta muestra el desplazamiento de longitud de onda central de la banda de atenuación como función de la temperatura.

La grafica adjunta en la Figura 3.5 muestra el cambio lineal de la banda de atenuación al aumentar la temperatura. El coeficiente de temperatura para el desplazamiento en longitud de onda es de  $51.17 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , valor que se encuentra dentro del rango de valores medidos en rejillas de periodo largo inducidas por luz (UV), es decir,  $(46 -154 \text{ pm}/^\circ\text{C})$  [12]. Al mismo tiempo que se observan desplazamientos de la longitud de onda central del filtro de fibra, vemos que la profundidad del pico también crece linealmente a  $0.00777 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ .

Por otro lado, las pruebas de tensión se realizaron desde cero hasta el punto donde la fibra se rompe, sorpresivamente en secciones no engrosadas. La sensibilidad medida fue de  $3.078 \text{ nm}/\% \epsilon$  lo cual es más bajo que lo que se midió en otros trabajos. Con rejillas de Bragg se obtuvo una sensibilidad de  $8.3 \text{ nm}/\% \epsilon$  y en rejillas de periodo largo inducidas por luz (UV) se obtuvo entre  $4.29$  y  $15.21 \text{ nm}/\% \epsilon$  [11]. Debido a que el método de fabricación aumenta el diámetro de la fibra, es de esperarse que la sensibilidad al esfuerzo en las secciones engrosadas sea menor aunque esto realmente no se ha medido ya que la fibra se rompe fuera de la región de la rejilla, es decir, en la fibra DSF.

También se hicieron pruebas para medir la sensibilidad de la rejilla a la curvatura. Observamos que los filtros son más sensibles en longitudes cercanas a la longitud de onda de corte que según el tipo de fibra es  $\sim 1260 \text{ nm}$ . De forma contraria a las rejillas de periodo largo inducidas con luz (UV), en las rejillas fabricadas con *engrosamiento*, no se observa una división de la banda de pérdidas en la transmisión tampoco que exista algún desplazamiento de la longitud de onda conforme aumenta gradualmente el radio de curvatura [14]. La Figura 3.6 muestra los cambios en el espectro de transmisión a varios radios de curvatura para un filtro de fibra de longitud de onda central de alrededor de  $1255 \text{ nm}$ . Puede observarse que la profundidad de la banda aumenta desde  $15.34 \text{ dB}$  para un radio de curvatura de  $\rho = 3 \text{ cm}$  hasta  $21.38 \text{ dB}$  para  $\rho = 4 \text{ cm}$ . Excepcionalmente, las curvaturas de radios más grandes tienen el efecto de variar la profundidad de la banda de transmisión entre estos dos valores. La respuesta variable sobre la atenuación de la banda se debe a la birrefringencia inducida por la curvatura cuyo efecto, en este caso, es que parte de la luz guiada se escape, ya que la birrefringencia actúa principalmente en las capas exteriores de la fibra.

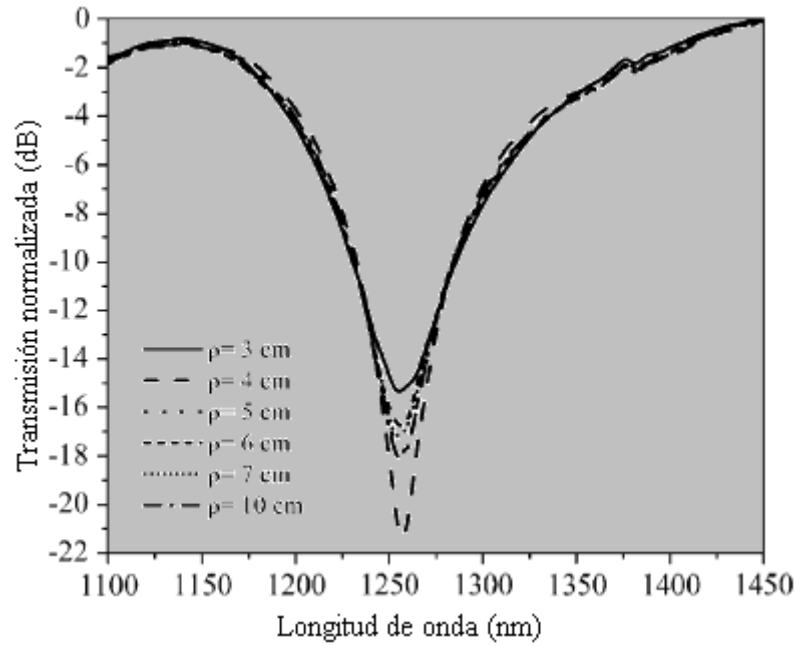


Fig. 3.6. Espectro de transmisión de un filtro de fibra a diferentes radios de curvatura de la fibra alrededor de la rejilla.

La Figura 3.7 muestra el espectro normalizado de transmisión para un filtro fabricado con el método descrito en la sección 3.4. Se observa que la longitud de onda central se encuentra alrededor de 1387 nm y muestra una banda con una profundidad de más de 20 dB. El ancho de banda del filtro es de alrededor de 130 nm a 3 dB, mientras que las pérdidas fuera de banda están en un rango de 0.5 – 5 dB lo cual depende principalmente de la preparación inicial de la fibra. También incluye una foto del filtro en donde los puntos engrosados se muestran claramente y en donde además puede observarse que solo se utilizaron 2 secciones engrosadas. Físicamente la RPL es de aproximadamente 1 mm de longitud.

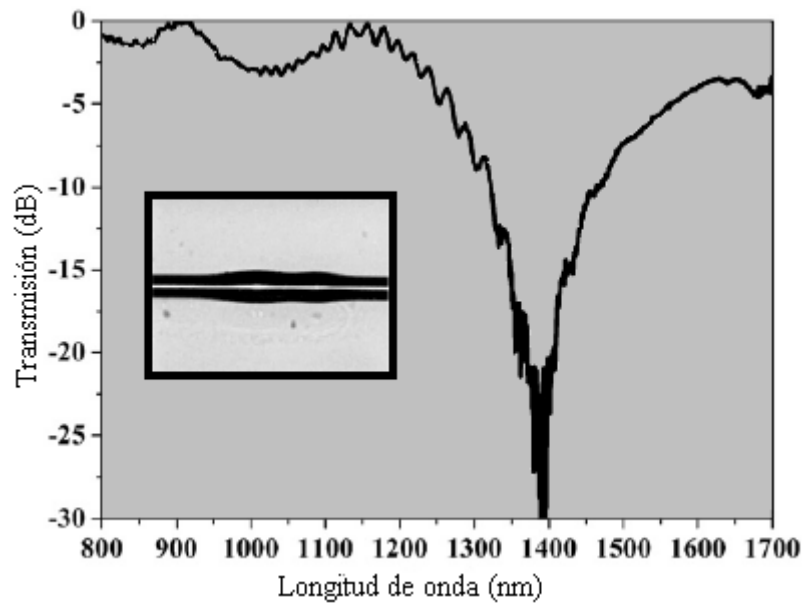


Fig. 3.7. Espectro de transmisión del filtro de rechazo de banda. La foto adjunta muestra las secciones engrosadas de la fibra.

La variación del diámetro se muestra en la Figura 3.8. Se puede observar que el diámetro tiene un valor máximo de  $186\ \mu\text{m}$  y otro valor máximo de  $170\ \mu\text{m}$  a una distancia de  $325\ \mu\text{m}$  desde el primer máximo. Utilizando esta variación del diámetro se realizó una simulación utilizando un software de propagación de haz en donde la estructura multicapas de la fibra de dispersión desplazada es aproximadamente igual a un perfil de índice en escalón, los resultados se muestran en la Figura 3.9.

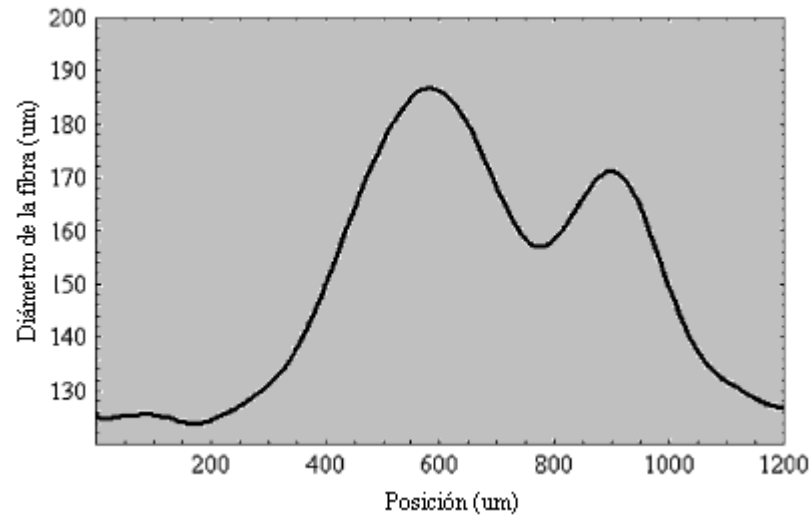


Fig. 3.8. Variación del diámetro de la fibra DSF en las secciones engrosadas.

Se observa en la Figura 3.9 diferentes curvas que describimos a continuación: la curva ligeramente trozada representa el espectro de transmisión calculado para el caso en que a la fibra no se le ha aplicado ningún arco eléctrico (i. e, sin procesar). La curva punteada muestra el caso en que la geometría de la fibra se deforma solo por el aumento en las dimensiones de la fibra suponiendo que el perfil del índice de refracción no se altera en el proceso. Por otro lado, la curva suave sólida muestra el caso en donde la fibra se deforma debido al aumento en dimensiones de la fibra y el índice de refracción ha cambiado en las secciones engrosadas.

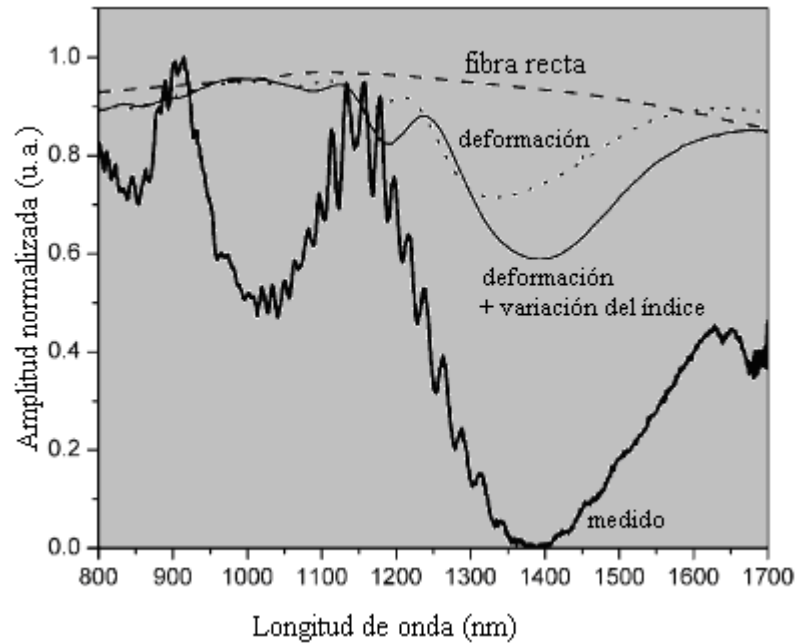


Fig. 3.9. Espectro de transmisión experimental y teórico.

Como puede observarse, las simulaciones muestran que la deformación geométrica induce una banda de pérdidas en el espectro de transmisión cuya profundidad es más grande que la del espectro de transmisión medido. Agregando un cambio en el índice de las secciones engrosadas, y un cambio máximo de 0.1 en el diámetro, la profundidad de la banda aumenta. Es difícil por ahora, que esta nueva técnica se encuentra en vías de desarrollo, determinar la información exacta que explique los cambios del perfil de índice de la fibra así como el mecanismo principal que contribuye a los cambios en las propiedades de la guía de onda, aunque observamos el resultado del filtrado de la longitud de onda [5]. Por esto no se pudieron encontrar los parámetros exactos para relacionar el espectro de transmisión experimental y el simulado.



La solución modal completa es necesaria debido a que el aumento del diámetro de la fibra excita modos de alto orden en el núcleo y en consecuencia las características de acoplamiento con los modos del revestimiento son diferentes del acoplamiento que surge solamente con el modo fundamental.

Otro factor que influye en las características del filtro es el cambio asimétrico del diámetro que puede ser el resultado de tener un arco asimétrico y a la distribución de la temperatura con respecto al centro de la fibra, el cual se observa en la mayoría de los procedimientos de empalme por fusión. Se ha mostrado que esta perturbación asimétrica induce birrefringencia y causa acoplamiento de la energía del modo fundamental en el núcleo a modos anti simétricos en el revestimiento [15].

Un trabajo a futuro es la implementación de un modelo basado en la teoría de acoplamiento de modos con el propósito de encontrar un ajuste adecuado de la información experimental.

### **3.6 Conclusiones**

Presentamos un método nuevo que ha resultado efectivo y confiable para fabricar filtros de rechazo de banda el cual se basa en el engrosamiento de pequeñas secciones de la fibra óptica (DSF). El engrosamiento se hace siguiendo el procedimiento estándar de empalme por fusión en modo manual. El procedimiento consiste básicamente de dos pasos fundamentales o etapas. El primer paso es un retardo del empuje en caliente en donde la fibra se suaviza. El segundo es el empuje en caliente en donde la fibra se junta por presión en la región en donde se aplica el arco y en consecuencia se provoca un traslape que da como resultado el aumento del diámetro. Debido a que las variaciones del diámetro no son graduales, existe un fuerte acoplamiento hacia los modos de radiación y del revestimiento, lo cual nos permite realizar funciones de filtrado en longitud de onda.

Utilizando este método nos ha sido posible fabricar un filtro de rechazo de banda con una longitud de onda centrada en 1387 nm, con una profundidad de atenuación de > 20 dB, un ancho de banda de 3 dB de menos de 138 nm y pérdidas fuera de la banda de 0.5 dB. La sensibilidad medida a la temperatura y la tensión de algunas muestras de filtros de fibra engrosada fue de 51.1 pm / °C y 3.07 nm / %ε, respectivamente. Esta sensibilidad es de valores cercanos a los que se observan con rejillas de periodo largo inducidas con luz (UV). La selección de la longitud de onda de resonancia es por ahora meramente experimental, ya que las que se obtuvieron en este trabajo, se aproximan a las calculadas por al condición de amarre de fase, pero, el proceso de ensanchamiento cambia el periodo de la rejilla, lo cual cambia este parámetro.

La principal ventaja de este método que se propone para fabricar filtros de fibra es que puede ser implementado en cualquier máquina para empalme de fibra comercial. Pues no requiere de aditamentos especiales como monturas, etapas de traslación con motor u objetos pesados externos que sirvan para aplicar tensión a la fibra. Simplemente se pueden utilizar los controles de la misma máquina lo cual disminuye costos, y espacios de manufactura.

**3.7 Referencias**

- [1] Vengsarkar A.M., Lemaire P.J., Judkins J. B., Bhatia V., Erdogan T., and Sipe J. E. *Journal of lightwave technology* 1996. **14**(1): pp. 58-65.
- [2] Kosinski, S.G., Vengsarkar, A.M. *Proceedings of the optical fiber communications conference, San Jose, CA, USA. OSA Technical digest series, vol 2, paper THG3, 1998. pp. 278-279.*
- [3] Rego, G., Marques, P., Santos, J.L., and Salgado, H.M. *Fiber and Integrated Optics* 2005. **24**: pp. 245.
- [4] Rego, G., Falate, R., Santos, J.L., and Salgado, H.M., Fabris, J.L., Semjonov, S.L., et al. *Optics Letters* 2005. **30**: pp. 2065.
- [5] Dürr, F., Rego, G., Marques, P.V.S., Semjonov S.L., Dianov, E.M., Limberger, H.G. *Journal lightwave Tecnology* 2005. **23**: pp. 3947-53.
- [6] Nam, S., Zhan, C., Lee, J., Hahn, C., Reichard, K., Ruffin, P. *Optics Express* 2005. **13**. pp. 731-737.
- [7] Enomoto, T., Shigehara, M., Ishikawa, S., Danzuka, T., Kanamori, H. *Proceedings of the optical fiber communication conference, San Jose, CA. USA. OSA Technical digest series. Vol. 2, paper ThG2, 1998. pp. 277-278.*
- [8] O'Brien, E.M., and Hussey, C.D. *Electronics Letters* 1999. **35**:pp.168-169.
- [9] <<http://www.feasa.ie/comp5.htm>>
- [10] Yablon, A.D. *Optical fiber fusion splicing. First edition. New York: Springer; 2005.*
- [11] Bhatia, B. Vengsarkar, A. M., *Optics Letters* 1996. **21**:pp.692-694.
- [12] Shu, X., Zhang, L., Bennion, I., J. *Lightwave Technology* 2002. **20**(2). pp.255.-266.

[13] Ivanov, O. V., and Rego, G. Optics Express 2007. **15**(21). pp.13936-13941.

[14] Block, U.I., Dangui, V., Digoneet, M.J.F., Fejer, M.M. J. Lightwave Technology 2006. **24**(2). pp.1027-1034.

[15] Rego, G., Ivanov, O., Marques, P.V.S. Optics Express 2006. **14**(21). Pp.9594-9599.



## Capítulo 4

En este capítulo se propone un dispositivo del tipo interferómetro Mach-Zehnder el cual consiste de dos rejillas engrosadas de periodo largo fabricadas en serie (i. e., una después de otra) en una fibra de dispersión desplazada. Buscando características de sensado en el dispositivo, se hace una caracterización de temperatura y esfuerzo. Finalmente se hace un adelgazamiento del 50% en la fibra, centrado entre las rejillas. El fin es aumentar la sensibilidad del interferómetro ya que el dispositivo de control de temperatura es de rango limitado.

---

### ***REJILLAS ENGROSADAS EN SERIE***

#### *4.1 Introducción*

#### *4.2 Principio de operación*

#### *4.3 Características de la rejilla RPL para el interferómetro*

#### *4.4 Interferómetro Mach-Zehnder*

#### *4.5 Respuesta a la temperatura y tensión*

#### *4.6 Conclusiones*

#### *4.7 Referencias*

## 4.1 Introducción

Los interferómetros fabricados completamente de fibra óptica son interesantes debido a las características de estabilidad que presentan, también a su reducido tamaño y a que son sistemas simples. Una técnica utilizada para fabricar este tipo de dispositivo es usar rejillas de periodo largo en serie las cuales funcionan como un interferómetro Mach-Zehnder. Los interferómetros Mach-Zehnder se pueden utilizar para detectar cambios del índice de refracción del medio ambiente circundante, así como variaciones de los parámetros físicos como temperatura y esfuerzo [1-6]. Al fabricar este tipo de rejillas en serie, es importante tomar en cuenta que la distancia entre cada rejilla es significativa ya que los cambios en este parámetro ocasionan variaciones espaciales entre cada franja, cambiando evidentemente, el patrón de interferencia.

En este capítulo se propone un dispositivo del tipo interferómetro Mach-Zehnder el cual consiste de dos rejillas engrosadas de periodo largo fabricadas en una fibra de dispersión desplazada. Buscando características de sensado se hacen pruebas de temperatura y esfuerzo. En las pruebas experimentales de temperatura esperamos observar estabilidad térmica ya que estudios realizados anteriormente muestran que las rejillas fabricadas con arco eléctrico son térmicamente estables [7]. Además se hace un estrechamiento del 50% entre las rejillas con *engrosamiento* buscando aumentar la sensibilidad del interferómetro, ya que el dispositivo que controla la temperatura es de rango limitado (0-200 °C).

Las pruebas de esfuerzo o tensión están limitadas al punto de ruptura de las rejillas y por esto se hacen pruebas de tensión de la fibra sin rejilla. Se observó que las fibras de dispersión desplazada se rompen a 5393  $\mu\epsilon$  de manera que el esfuerzo se aplicará por debajo de ese valor. Se espera que las propiedades que resulten de este tipo de interferómetro sirvan para aplicaciones en comunicaciones ópticas así como en sensado por fibra óptica.

## 4.2 Principio de operación

La fibra monomodo de dispersión desplazada que utilizamos para este trabajo es de una estructura de cuatro capas con un núcleo central rodeado por un segundo núcleo en anillo. Tomaremos en cuenta que en las rejillas de fibra con este tipo de estructura, el acoplamiento se logra entre el modo fundamental del núcleo y los modos en el anillo. Con esto en mente se explicará el funcionamiento teórico de un interferómetro hecho con rejillas de fibra de dispersión desplazada (*DSF*, por sus siglas en inglés).

Un parámetro importante para conocer de cualquier tipo de fibra es el índice efectivo. Sabemos que por la condición de amarre de fase existe una relación entre la longitud de onda central o de resonancia de los filtros de fibra con el periodo de la rejilla. El índice diferencial efectivo de la fibra se obtiene simplemente de la condición de resonancia de una sola rejilla de periodo largo,  $\Delta n_{eff} = \lambda_{res} / \Lambda$ , donde  $\Lambda$  es el periodo de la rejilla y  $\lambda_{res}$  es la longitud de resonancia de dicha rejilla y el índice efectivo diferencial  $\Delta n_{eff}$  se define como  $\Delta n_{eff} \equiv n_{eff}^{co} - n_{eff}^{clad}$ .

Solo por simplicidad nombraremos la capa que forma el núcleo en anillo como el revestimiento de la fibra. La Figura 4.1 muestra un esquema que explica de manera grafica el principio de operación del interferómetro Mach-Zehnder. Dos rejillas en serie de periodo largo tienen el efecto de que parte de la luz guiada que incide en la fibra viaja por el núcleo y se acopla al modo del revestimiento en la primer rejilla. Además, en la segunda rejilla, el modo del revestimiento se vuelve a acoplar al modo del núcleo que no se había acoplado en la primera rejilla y es allí donde se da la interferencia.

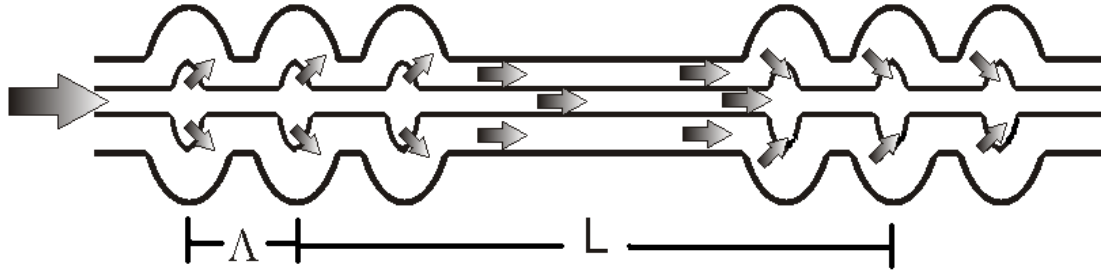


Fig. 4.1. Dos rejillas RPL con fattening funcionando como un interferómetro Mach-Zehnder.  $\Lambda$  es el periodo y L es la separación de las rejillas.

El patrón de franjas de interferencia que se obtiene se explica por la diferencia de trayecto óptico o la fase relativa de los dos haces que viajan por el núcleo y el revestimiento de la fibra. Estos dos trayectos ópticos forman los brazos del interferómetro Mach-Zehnder.

En teoría, la interferencia entre el modo del núcleo y los del revestimiento se puede describir en función de sus intensidades y la diferencia de fase originada en un interferómetro de longitud L [2]. La diferencia de fase es causada principalmente por el cambio del índice de refracción efectivo de los modos acoplados de las dos rejillas y esta dada por  $\phi = \kappa \Delta n_{eff} L$ . Después de una expansión de Taylor del número de onda  $k$  y utilizando el primer término, se obtiene una relación que sólo se aplica cuando la dispersión del modo guiado es insignificante, es decir:  $\phi \approx \phi_0 - \frac{2\pi\Delta\lambda}{\lambda^2} \Delta n_{eff} L$ . En particular, el índice efectivo de un modo guiado depende tanto de la dispersión del material como la dispersión de la guía de onda en el dispositivo. Así, el índice efectivo diferencial debe reemplazarse con el índice de grupo modal  $\Delta m_{eff}$  para finalmente obtener la siguiente relación [8]:

$$\phi \approx \phi_0 - \frac{2\pi\Delta\lambda}{\lambda^2} \Delta m_{eff} L. \tag{4}$$

con  $\Delta m_{eff}$  definida de la siguiente manera:  $\Delta m_{eff} = \Delta n_{eff} - \lambda \frac{\partial}{\partial \lambda} \Delta n_{eff}$ .



Una relación espacial entre las franjas  $S_f$  se obtiene de la fase relativa entre los modos, suponiendo que una banda de las franjas de interferencia se obtiene cuando la fase relativa es un múltiplo entero de  $2\pi$  y al diferenciar la ecuación (4) con respecto a  $\lambda$  y además haciéndola  $2\pi$  tenemos [2]:

$$S_f \approx \frac{\lambda^2}{\Delta m_{eff} L}. \quad (5)$$

De esta manera, cuando la luz pasa a través de ambas rejillas, la fase relativa entre el núcleo y el revestimiento es afectada. La rejilla induce un desplazamiento de la franja debido a la variación del índice refractivo en el anillo y núcleo de la fibra. El desplazamiento de fase en la región de la rejilla es diferente al desplazamiento fuera de la rejilla y cuando la separación entre las rejillas cambia, el espacio entre las franjas también cambia. El índice refractivo de la fibra es afectado, así como el periodo de la rejilla y las constantes de propagación del modo guiado fundamental y los modos del anillo. Es decir,  $\beta_{01}$  y  $\beta$ , respectivamente, experimentan cambios diferentes causando desplazamiento de las franjas espectrales conforme las condiciones externas cambian.

La ecuación que representa el desplazamiento de las franjas con respecto a la temperatura es [9-11]:

$$\frac{d\lambda_i}{dT} = \frac{\lambda_i}{\Delta m_{eff}} \left( \frac{\partial \Delta n_{eff}}{\partial T} \right) + \Delta n_{eff} \alpha_T. \quad (6)$$

en donde  $\lambda_i$  es la longitud de onda de interferencia,  $\alpha_T$  es el coeficiente de expansión térmico de la fibra y  $\Delta m_{eff}$  es el índice efectivo diferencial de grupo.

### 4.3 Características de la rejilla RPL para el interferómetro.

Utilizando una fuente de luz blanca, una máquina para empalme de fibra por fusión (de *Furukawa Information Technologies and Telecommunications*, FITEL S175) y un analizador de espectros, como se muestra en la Figura 4.2, se fabricaron seis secciones engrosadas con un diámetro máximo de 179  $\mu\text{m}$ . (Los diámetros se miden usando la opción “medir revestimiento” del menú de la máquina de empalme). La fibra utilizada es una fibra de dispersión desplazada y el periodo de la rejilla es  $\Lambda = 150 \mu\text{m}$ .

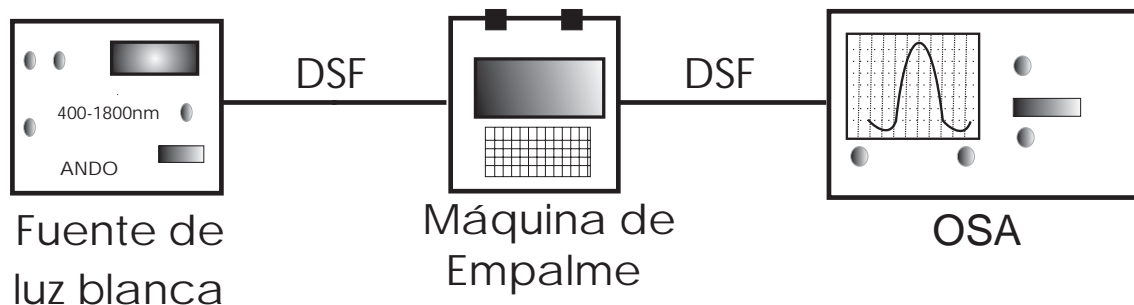


Fig. 4.2. Esquema experimental utilizado para engrosar la fibra de dispersión desplazada en el cual se utiliza una fuente de luz blanca en el rango de longitud de onda de 400-1700nm y un analizador de espectros FITEL S175

Varias descargas eléctricas se aplican para fabricar un punto engrosado agregando un espacio pequeño entre descarga y descarga de 5  $\mu\text{m}$ . Cuando el punto engrosado se completa después de cinco descargas, la fibra se libera de uno de los sujetadores de la máquina de empalme y se desplaza el otro sujetador a la distancia periódica ya establecida. Este proceso se repite dos veces más pero las descargas eléctricas se reducen a 4 y 3 descargas por punto. Después de obtener estos tres puntos se agregan otros tres puntos engrosados siguiendo el mismo proceso de fabricación pero de forma descendente, es decir, 3, 4 y 5 descargas en el último punto. Este proceso dio como resultado, para este caso, el mejor acoplamiento de los modos y por ende bandas de atenuación más profundas, aunque experimentalmente se aplicaron y probaron varios procesos de fabricación con diferentes combinaciones de descargas de arcos eléctricos.

Cuando la rejilla se termina de fabricar con estos 6 puntos periódicos y engrosados, esta tiene una longitud aproximada de menos de 4 mm. La banda de pérdidas observada tiene una profundidad de 15 dB con aproximadamente 130 nm de ancho. La longitud de onda central de la banda se encuentra a 1250 nm como se muestra en la Figura 4.3. Para fabricar esta rejilla de periodo largo, la potencia de arco de la máquina de empalme se fijó a 74 W, el tiempo de pre-fusión en 240 ms, el tiempo de duración del arco en 650 ms y el traslape de 11  $\mu\text{m}$ .

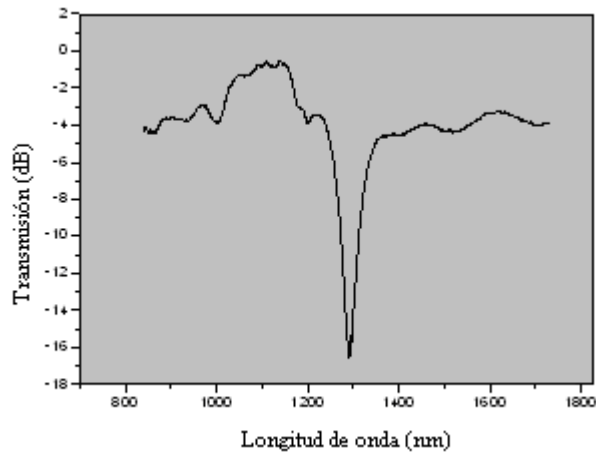


Fig. 4.3. Espectro de transmisión de una RPL engrosada con arco y centrada aproximadamente a 1250 nm.

#### 4.4 Interferómetro Mach-Zehnder

La figura 4.4 muestra el espectro de transmisión del interferómetro tipo Mach-Zehnder de fibra engrosada con un periodo  $\Lambda$  alternado de 150 y 200 nm entre puntos engrosados. La separación entre las rejillas engrosadas es de 7 mm ya que mínimo deben estar separadas a la distancia que iguale el tamaño de las rejillas para que exista un fuerte acoplamiento entre los modos. Se observa una profundidad de pérdidas alrededor de 12 dB en la longitud de onda central resonante del espectro del interferómetro.

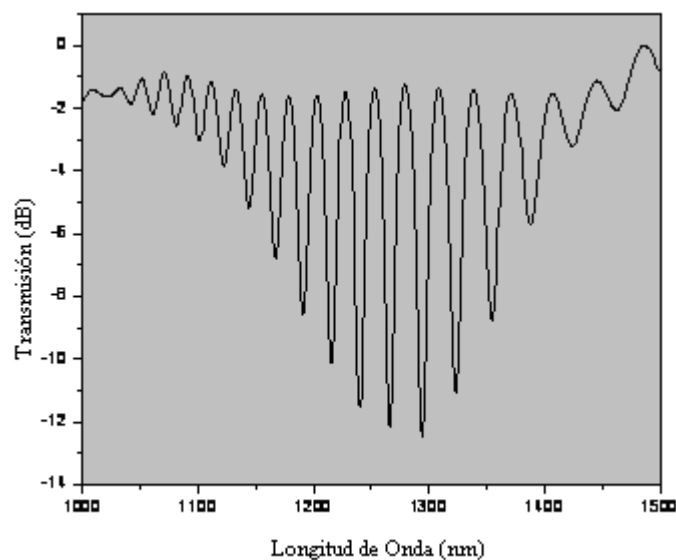


Fig. 4.4 Espectro de transmisión de un interferómetro de fibra engrosada observado en un rango de 1000-1500 nm.

El ancho de banda de las franjas es de 25 nm. En otra muestra se observó un espectro similar cuando se fijó el período a 150 nm obteniendo en este caso una banda de pérdidas centrada en 1300nm. Se espera que la sensibilidad del interferómetro aumente si se adelgaza la fibra en la parte central de la fibra entre las rejillas como se muestra en la Figura 4.5. En la región del estrechamiento o adelgazamiento de la fibra, el modo del núcleo central se extiende al modo del anillo y al del revestimiento. Esto aumenta la sensibilidad debido a que el campo total queda más expuesto a perturbaciones de índice del medio circundante.

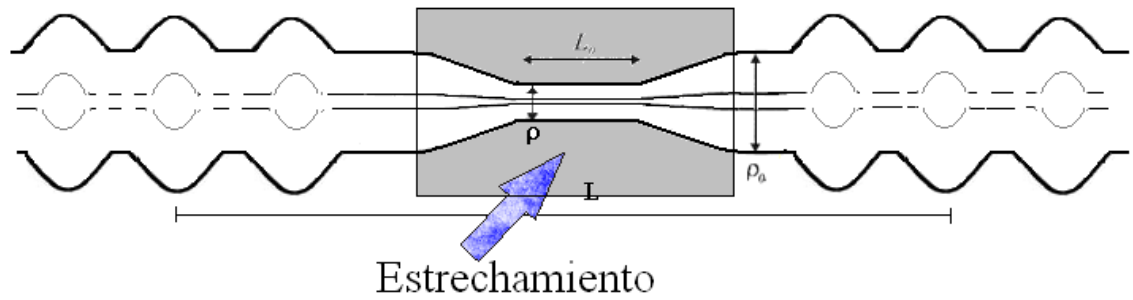


Fig. 4.5 estructura de un estrechamiento del diámetro al 50% de la fibra DSF entre dos RPLs con engrosamiento.

En la figura mostrada  $L$  es la distancia de separación de centro a centro de las rejillas,  $L_0$  es la distancia de oscilación a la cual se mueve la flama para calentar la fibra,  $\rho_0$  es el diámetro inicial del núcleo y  $\rho$  es el diámetro final del adelgazamiento de la fibra. La Figura 4.6 muestra el espectro de las dos rejillas engrosadas en serie con una distancia de 6 mm de separación y un estrechamiento del 50% de diámetro entre ellas.

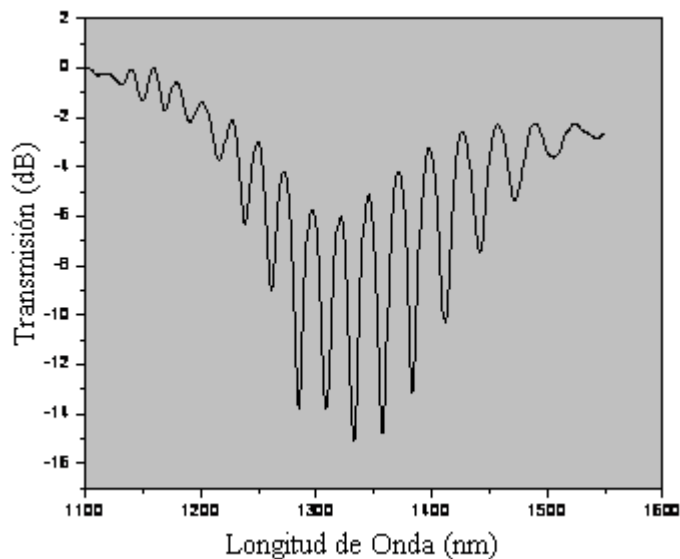


Fig. 4.6 Espectro del interferómetro de la fibra entre las rejillas con una longitud de estrechamiento de 5 mm.

Al aumentar la distancia entre las rejillas engrosadas por más de 5 mm el espacio entre las franjas o bandas de atenuación se cierra con lo cual se observa un espectro de bandas de atenuación muy estrechas y con obviamente anchos de banda mas pequeños. Utilizando la ecuación 5 que define el espacio entre franjas, se obtiene un valor de índice efectivo de grupo de  $\Delta m_{eff} = 8.93 \times 10^{-3}$  y un valor de índice efectivo diferencial de  $\Delta n_{eff} = 8.3 \times 10^{-3}$ , a partir de los datos experimentales. Con esto fue posible hacer un cálculo teórico del espacio entre las franjas y compararlo con los resultados experimentales. La Figura 4.7 muestra el espacio entre las franjas tanto teóricas como experimentales. Las diferencias que se observan entre las curvas pueden deberse a las variaciones del arco eléctrico, a la incertidumbre al medir la separación entre las rejillas así como a la dispersión en la fibra.

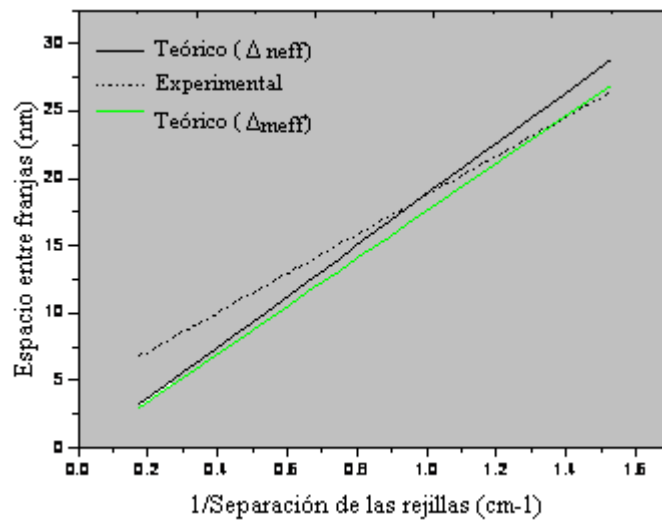


Fig. 4.7 Cálculos teóricos y experimentales de la separación entre las franjas de atenuación del interferómetro.

La Figura 4.8 muestra el promedio de ancho espectral de las bandas de atenuación contra la distancia de separación para varios interferómetros. Al espectro en longitud de onda se le puede aplicar una transformada de Fourier para obtener el espectro en frecuencia espacial de las franjas de interferencia y poder observar la frecuencia espacial del pico principal [12-13]. Esto nos dará una idea de cómo las variaciones que se hacen en el método de fabricación influyen en el comportamiento de las bandas centrales de los interferómetros.

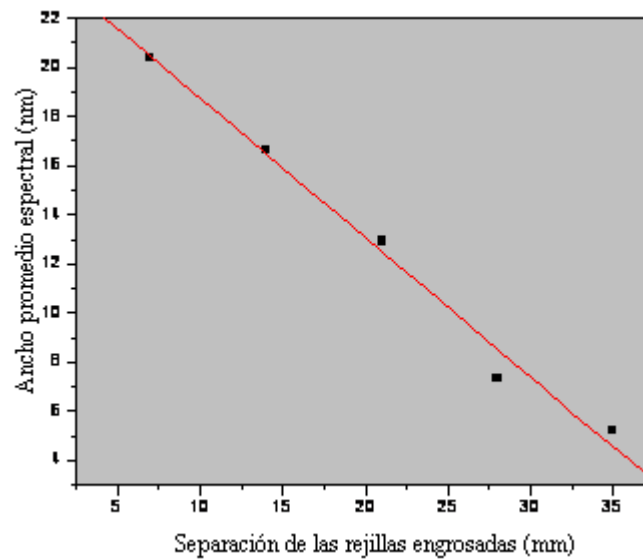


Fig. 4.8. Ancho de banda espectral de las bandas de atenuación del interferómetro en función de la separación de las rejillas.

#### 4.5 Respuesta a la Temperatura y Tensión

Se realizaron pruebas de temperatura y tensión en varias muestras de interferómetros de fibra con lo cual se observó un pequeño desplazamiento de las bandas de atenuación. Se utilizó un analizador de espectros ópticos a una resolución de 5 nm para observar los cambios en el espectro de cada interferómetro. Un control de temperatura Thorlabs TC200 ® sirvió para aplicar temperatura a las muestras. Este dispositivo de control de temperatura es un instrumento que funciona en el rango de 27 a 200 °C.

Los interferómetros probados respondieron principalmente en la región espectral monomodo que fue la región en donde se observaron cambios significativos al observarse que las franjas se desplazaban a longitudes de onda más largas conforme aumentaba la temperatura. El desplazamiento más bajo medido fue de 9 pm/°C a una longitud de onda de 1206 nm y el máximo desplazamiento observado fue de 17 pm/°C a 1373 nm. Observamos entonces que las franjas no se desplazan igual dado que una minoría se mueve solo media longitud que el resto. La Figura 4.9 muestra este comportamiento.

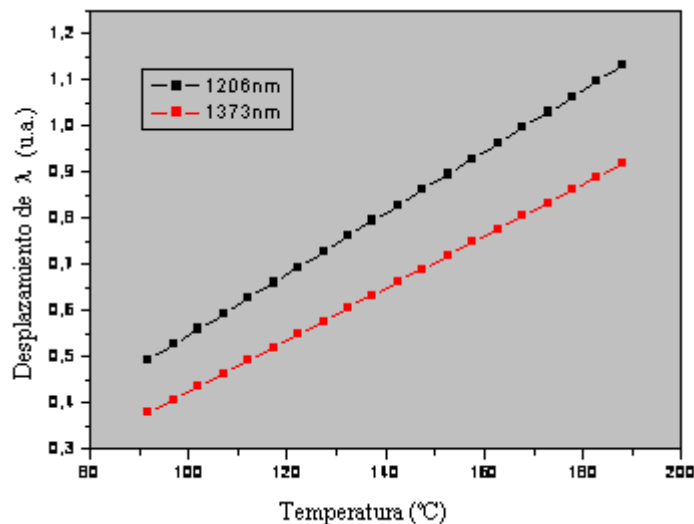


Fig. 4.9 Desplazamiento de las bandas de atenuación de un interferómetro de periodo variable. Las pruebas de temperatura se realizaron en el rango de 100-180 °C.



Cuando un adelgazamiento del 50 % se hizo entre las rejillas engrosadas, la respuesta al desplazamiento por temperatura de la gran mayoría de las franjas fue el mismo a diferentes temperaturas. La respuesta más alta observada quedo en 17 pm/°C. Al fabricar interferómetros con rejillas separadas a más distancia y hacer el adelgazamiento entre estas causaba distorsión en el espectro sin poder recuperarse el original. Esto no permitió que se realizaran más pruebas de temperatura con el equipo utilizado.

Las pruebas de tensión se hicieron con una etapa de traslación motorizada controlada con un software en computadora, una fuente de luz blanca y un analizador de espectros. Un extremo de la fibra se coloca en un punto fijo del riel y el otro es jalado por la etapa motorizada ubicada a 35 cm del primer extremo. Antes de comenzar las pruebas de tensión con las rejillas de periodo largo se colocó una fibra de dispersión desplazada sin rejillas la cual se tensionó hasta el punto de ruptura. Esta caracterización nos dio un resultado de 5373  $\mu\epsilon$  que utilizamos como el límite máximo de tensión que se puede aplicar a una fibra de este tipo.

Los interferómetros probados respondieron poco a la tensión y se encontró que las bandas de atenuación se desplazan a longitudes de onda corta en todas las muestras. Una banda de atenuación con longitud de onda centrada en 1258 nm se desplazó 1.4 pm/ $\mu\epsilon$  y otra centrada a 1487 nm se movió 2.9 pm/ $\mu\epsilon$ , ver Figura 4.10. Observamos un comportamiento similar al aplicar temperatura a la muestra ya que los desplazamientos de algunas bandas son de el doble que el resto pero en dirección contraria.

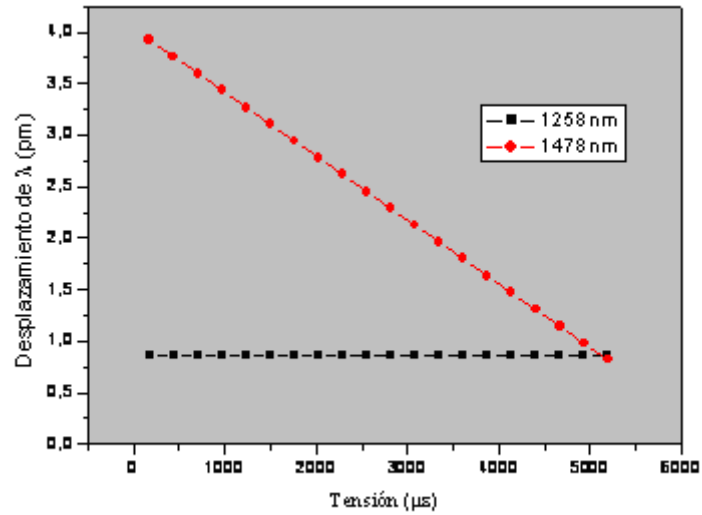


Fig. 4.10. Respuesta a la tensión de las bandas de atenuación en el rango de 1258-1478 nm entre 1.4 y 2.9 pm/με.

El desplazamiento de las bandas de atenuación no depende de la separación entre las rejillas ya que en la mayoría de las muestras se mueven a una constante de 1.4 pm/με. Los interferómetros probados con periodo variable mostraron tener una respuesta más alta a la tensión ya que las bandas se desplazaron en mayor cantidad y de forma constante a 2.9 pm/με tanto en las regiones monomodo como multimodo.

## 4.6 Conclusiones

Se fabricó un interferómetro Mach-Zehnder de forma simple y compacta usando dos rejillas engrosadas en serie en una fibra de dispersión desplazada. Se observó un espectro amplio en el rango de 1000-1500nm. Las bandas de atenuación tienen un ancho de banda máximo de 25 nm el cual disminuye conforme aumenta la separación entre las rejillas. En general la profundidad de las bandas es de 15 dB.

En las pruebas de temperatura se observó que el desplazamiento de las franjas mejora en muestras fabricadas con periodo variable y un estrechamiento entre las rejillas. Se observó que la mayoría de las franjas se desplazaron a un máximo durante las pruebas, es decir a  $17 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ . La respuesta del interferómetro a la tensión se encontró entre un límite inferior de  $1.4 \text{ pm}/\mu\epsilon$  y uno superior de  $2.9 \text{ pm}/\mu\epsilon$  en un rango de 0 - 4780  $\mu\epsilon$ . Otra vez, los mejores resultados se observaron en rejillas de periodo variable ya que la mayoría de las franjas se desplazaron hacia el azul a  $2.9 \text{ pm}/\mu\epsilon$  en las regiones espectrales monomodo y multimodo.

Aunque se detectó un leve desplazamiento tanto en pruebas de temperatura como tensión, la respuesta general del interferómetro tiende a ser estable para ambos parámetros ambientales, aunque también se observa que no todas las franjas se desplazan de igual forma. Al parecer, este comportamiento, depende de que tan cerca se encuentren las bandas de atenuación a la región monomodo o multimodo y también al hecho de que, en muchas fibras con este perfil de índice de 4 capas, la luz guiada está bien confinada al núcleo y al anillo.

El dispositivo es sencillo y barato para fabricar por el método de engrosamiento. Las características de pequeña respuesta a parámetros ambientales pueden mejorarse para aplicaciones de sensado óptico, pero en este caso, el dispositivo ha demostrado ser estable a lo cual se le podrían encontrar aplicaciones más factibles.

#### 4.7 Referencias

- [1] J. H. Lim, H. S. Jang, and K. S. Lee: *Optics Letters* 2004. **29** pp. 346.
- [2] H. Young Choi, M. Jin Kim, and B. Ha Lee: *Optics Express* 2007. **15** pp. 5711.
- [3] X. Dong, L. Su, P. Shum, Y. Chung, and C. C. Chan: *Optics Communications* 2006. **258** pp. 159.
- [4] J. Mora, B. Ortega, A. Díez, J. L. Cruz, M. V. Andrés, J. Capmany, and D. Pastor: *Journal. Lightwave Technology* 2006. **24**. pp. 2500.
- [5] S. K. Abi Kaed Bey, T. Sun, and K. T. V. Grattan: *Optics Communications* 2007 **272**. pp. 15.
- [6] R. P. Murphy, S. W. James, and R. P. Tatam: *Journal. Lightwave Technology* 2007. **25**. pp. 825.
- [7] A. Malki, G. Humbert, Y. Ouerdane, A. Boukhenter, and A. Boudrioua: *Applied Optics* 2003. **42**. pp. 3776.
- [8] X. Zhang, and X. Wang: *Optics & Laser Technology* 2005. **37** pp. 167.
- [9] G. Humbert, A. Malki, S. Février, P. Roy, J. Auguste, and J. Blondy: *Optics Communications* 2003 . **225** pp. 47.
- [10] B. Ha Lee, and J. Nishii: *Applied Optics* 1999. **38** pp. 3450.
- [11] G. Humbert, and A. Malki: *Optics Communications* 2002. **208** pp. 329.
- [12] J. S. Petrovic, H. Dobb, V. K. Mezentsev, K. Kalli., D. J. Webb, and I. Bennion: *Journal Lightwave Technology* 2007 **25** pp. 1306.
- [13] R. P. Murphy, S. W. James, and R. P. Tatam: *Journal Lightwave Technology* 2007. **25** pp. 830.



## Capítulo 5

Las rejillas de periodo largo se aplican en el campo de las comunicaciones ópticas y sistemas de sensado. En sistemas de comunicaciones ópticas, las *RPLs* se utilizan como filtros ecualizadores de ganancia y multiplexores sintonizables en longitud de onda *add/drop*. En el campo de sistemas de sensado, las *RPL* se aprovechan como sensores de temperatura, de tensión y de índice de refracción, entre otros. En este capítulo se describirá la utilidad que hasta ahora se les ha dado a las rejillas engrosadas, que si bien parecen funcionar, aún estas investigaciones están en vías de desarrollo para optimizar los dispositivos.

### *APLICACIONES*

---

*5.1 Las RPL engrosadas como sensor de temperatura*

*5.2 La RPL engrosada como sensor de índice de refracción*

*5.3 Referencias*

*5.4 Conclusiones*

### 5.1 La RPL engrosada como sensor de alta temperatura

Los sensores de temperatura tienen un sin número de aplicaciones tanto comerciales como industriales. Además, los sensores de fibra óptica han demostrado ser dispositivos versátiles para la medición de temperatura sobre amplios rangos dinámicos y con alta sensibilidad. Se caracterizan por poseer desplazamientos espectrales grandes y por ser económicos para producirse en masa y que pueden demodularse (i.e., que se les puede extraer la información) [1]. Es por esto que nos interesa investigar y optimizar las rejillas engrosadas de periodo largo para que compitan con lo conocido hasta ahora y que aun se encuentran en vías de desarrollo.

Para este trabajo se hizo un estudio del efecto de la temperatura en dos rejillas de periodo largo engrosadas con arco eléctrico diferentes. Las rejillas en cuestión tienen una longitud de onda central a 1524 y 1550nm y fueron fabricadas en fibra DSF siguiendo el método mencionado en el capítulo 3. El esquema experimental empleado para caracterizar cada rejilla a la temperatura consiste de una fibra dopada con Erblio bombeada a 980 nm con un diodo láser que en conjunto se utiliza como la fuente de luz para introducir en la rejilla de fibra, un dispositivo controlador de temperatura y un analizador de espectros como se muestra en la Figura 5.1

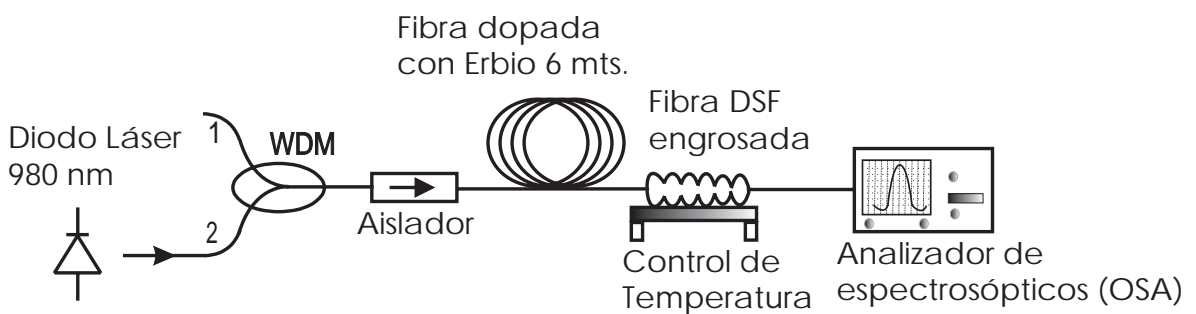


Fig. 5.1. Esquema experimental usado para la caracterización de las rejillas engrosadas.

Inicialmente el diodo láser se opera a una corriente máxima de 30mA solo para observar la transmisión de la fluorescencia de la fibra dopada en el analizador de espectros. Cuando se agrega la rejilla al esquema, se observa el filtrado en una región del espectro del ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). Conforme se aumenta la corriente del diodo de bombeo arriba de 50 mA, la banda de atenuación parece no tener efecto debido a que la

ganancia de la fibra dopada también aumenta, sin embargo, el filtro está funcionando. Se observa un pico que empieza a crecer parecido al láser a una longitud de onda de 1528 nm lo cual se muestra en la Figura 5.2.

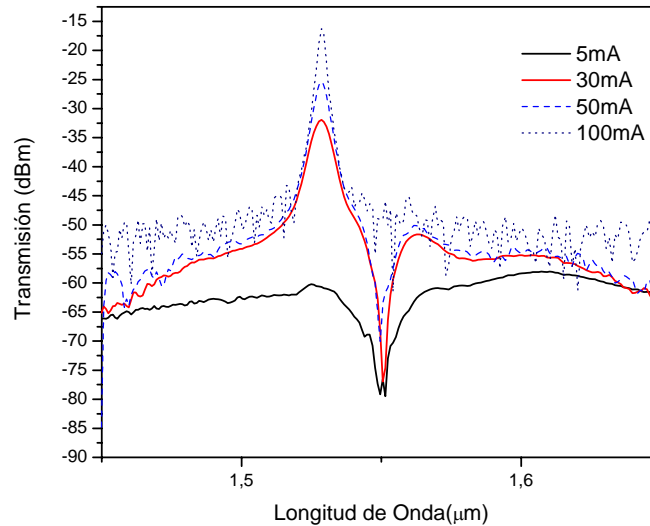


Fig. 5.2. Espectro de transmisión de la rejilla engrosada a 1550 nm.

La corriente de operación del diodo de bombeo se fijó en 30 mA debido a que se observó una profundidad de la banda de atenuación de aproximadamente  $\sim 20$  dB con una longitud de onda central de 1.55  $\mu\text{m}$ . La caracterización a la temperatura se hizo en un rango de (50-500)  $^{\circ}\text{C}$ . La banda de atenuación se desplazó en este caso de forma no lineal en un promedio de 72 pm/ $^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, de manera repetible. Esto es un 29% más alto de lo que se obtuvo anteriormente [2] y [Cap. 3] con luz blanca. Se observa en esta prueba que la banda se desplaza, hacia el rojo o longitudes de onda más grandes, una distancia aproximada de 36 nm, ver Figura 5.3.

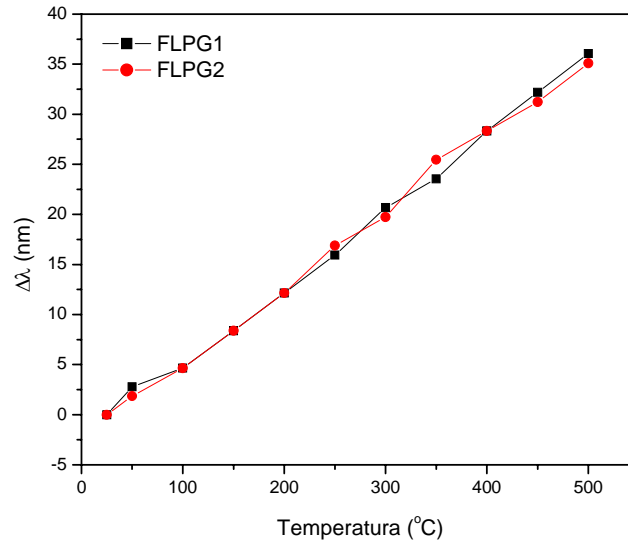


Fig. 5.3. Desplazamiento de la banda de atenuación en un rango de 36 nm.

La otra rejilla a 1524 nm también fue probada con el esquema de la Figura 4.2 con resultados similares y se consideró para el sensor de temperatura.

Cabe mencionar que un diodo láser a 1550 nm a baja corriente de operación (5-10mA) también se utilizó como fuente de luz para la caracterización de ambas rejillas a la temperatura. Debido a la forma del espectro de las fuentes de luz a ciertas corrientes de operación (i.e, en modo lineal en el analizador de espectro) y la posición en longitud de onda de las bandas de atenuación de cada rejilla, se esperaba que el desplazamiento de la banda hacia el rojo afectará la amplitud de la transmisión observada conforme aumentara la temperatura. Ver Figura 5.4. La caracterización realizada mostró que la potencia disminuía conforme la temperatura aumentaba. Este comportamiento abrió otra opción de medir la temperatura sensada y fue precisamente la que se utilizó.



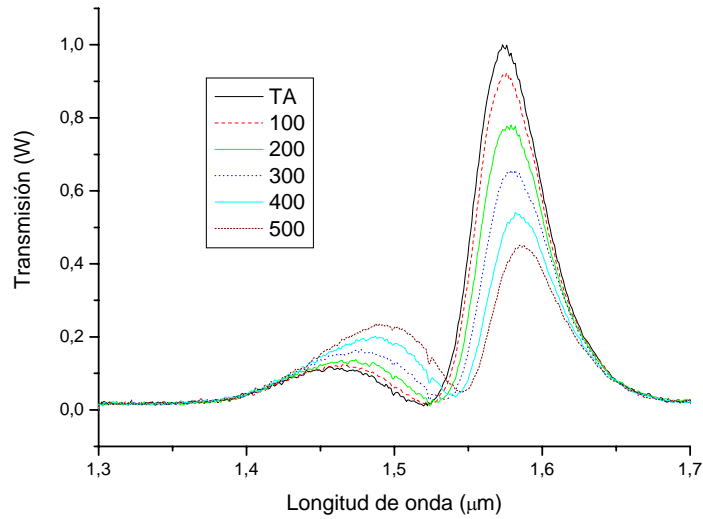


Fig. 5.4. Espectro de transmisión en potencia de la rejilla a 1524 nm y temperatura.

El comportamiento observado en el espectro de la figura anterior, es suficiente y repetible para realizar un sensor de temperatura. Con los resultados obtenidos se procedió a realizar el sensor con el esquema de la Figura 5.5. En este experimento se incluye un detector que convierte la luz a señal de voltaje la cual es detectada y medida con un osciloscopio.

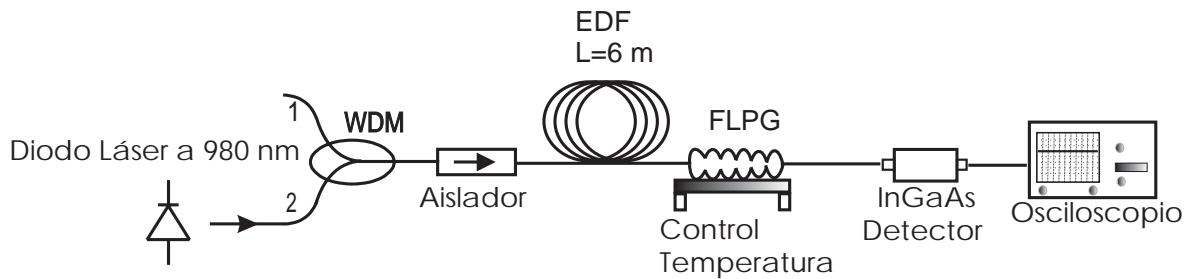


Fig. 5.5. Esquema experimental del sensor de temperatura..

La Figura 5.6 muestra como aumenta la potencia observada con el analizador de espectros a la salida de la rejilla de 1524 nm cuando aumenta la temperatura. La corriente de operación del diodo de bombeo fue de 110 mA.

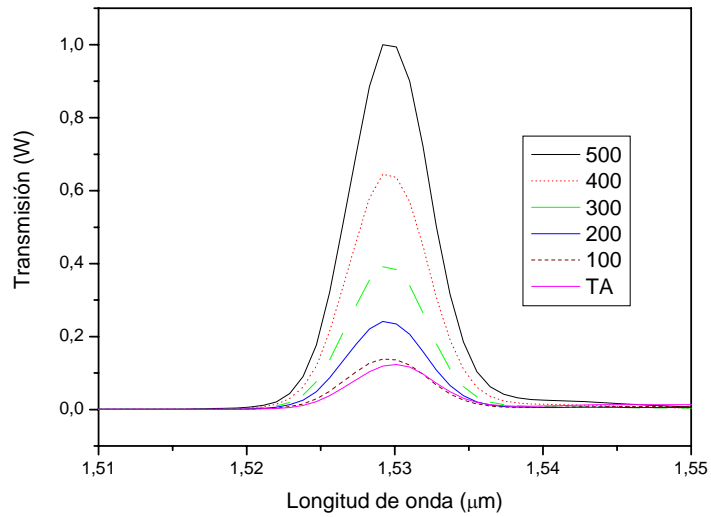


Fig. 5.6 Cambios ascendentes de la potencia con el aumento de temperatura.

El voltaje medido de acuerdo al comportamiento que muestra el sensor de temperatura es el que se muestra en la Figura 5.7. Se observa que existe la posibilidad de seguir sensando cambios a temperaturas arriba de 500°C pero el dispositivo es limitado.

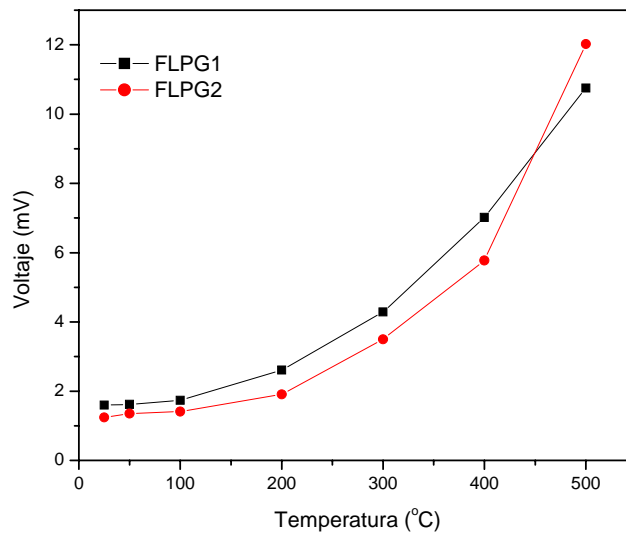


Fig. 5.7 Aumento en la medición en voltaje con la temperatura en un rango de (25-500)°C.

De la gráfica también llama la atención que el comportamiento en el rango de (25-200)°C se muestra estabilidad a la temperatura ya que son cambios mínimos y casi lineales los que

se observan. Todo lo contrario se ve en el rango de (200-500)°C, ya que la pendiente  $\frac{dV}{dT}$  es mayor lo que indica que el sensor es sensible a partir de 200 °C. El mismo comportamiento es observado cuando se utiliza solamente el diodo a 1550nm, la rejilla, el detector y el osciloscopio. Aunque para ese caso la potencia disminuye, se observa claramente que a partir de 200 °C la pendiente decae observándose mayor sensibilidad a la temperatura a partir de ese punto.

## 5.2 La RPL engrosada como sensor de índice de refracción.

La sensibilidad al índice refractivo de las RPLs surge de la dependencia de la condición de amarre de fase sobre el índice refractivo efectivo de los modos del revestimiento. Los índices efectivos de los modos del revestimiento dependen de la diferencia entre el índice refractivo del revestimiento y el del medio que rodea el revestimiento. La sensibilidad al índice refractivo se manifiesta como el cambio en la longitud de onda central y en el valor mínimo de transmisión de las bandas de atenuación. La sensibilidad más alta se muestra por los modos de orden más alto y ocurre a índices de refracción que se aproximan al del revestimiento [3]. Cuando el índice refractivo es igual al del revestimiento, el revestimiento parece extenderse infinitamente y por lo tanto no mantiene los modos. La sensibilidad al índice refractivo de las RPLs es un atributo que se ha explotado para hacer sensores de índice de refracción, sensores químicos de concentración [4-6], un sensor de líquido [7] y como parte de un filtro espectral sintonizable [8]. Existen más aplicaciones [9-11] en la literatura para este tipo de dispositivo y es una aplicación interesante de probar con las nuevas RPLs engrosadas con arco eléctrico ya que aparte de su optimización se busca que puedan aplicarse exitosamente como sensores.

Utilizando dos rejillas inducidas por arco eléctrico en una fibra de dispersión desplazada, se utilizó el esquema de la Figura 5.8 para hacer pruebas con aceites de diferente índice de refracción.

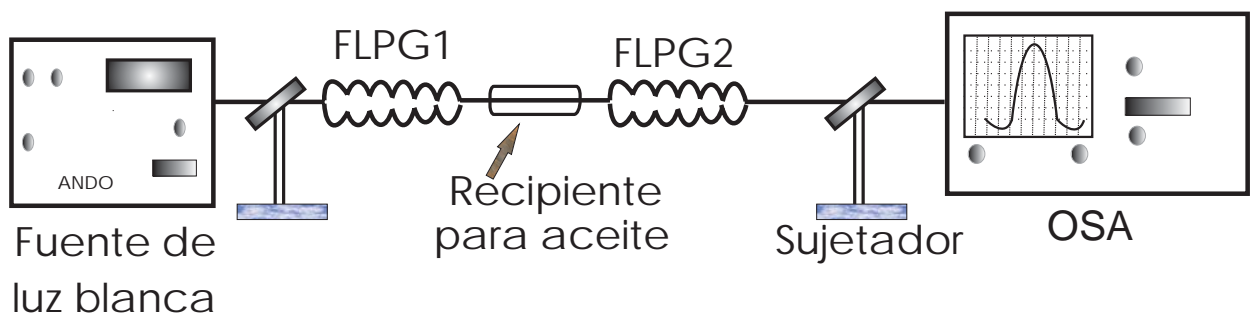


Fig. 5.8 Arreglo experimental para sensado al índice de refracción.

Se observó y midió el desplazamiento de las bandas de atenuación formadas por las dos rejillas en serie. Se utilizaron diferentes distancias de 7, 14 y 21 mm de separación entre las rejillas buscando en unas primeras pruebas desplazamientos óptimos de las franjas con los aceites de índice siendo esta de 14mm donde a la vez, se observan en la transmisión franjas más agudas que hacen posible localizar con mayor precisión la longitud de onda central. Esta distancia entre las rejillas también hace posible hacer un estrechamiento entre las rejillas sin afectarlas buscando una mayor sensibilidad al índice de refracción del medio.

Se hace un estrechamiento entre las rejillas al 50% de la fibra, es decir, adelgazarla hasta un diámetro de 62.5  $\mu\text{m}$  con flama oscilante a una longitud de cintura de 6.9 mm. Se hacen mediciones con los líquidos de índice en el rango de 1.402 a 1.450 con una diferencia de 0.002 entre cada uno de ellos. Los resultados se observan en la Figura 5.9.

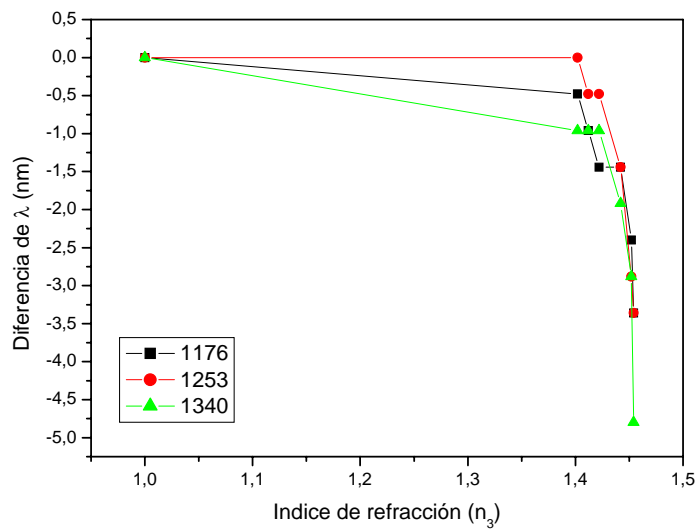


Fig. 5.9. Mediciones de índice con estrechamiento de diámetro al 50%.

Se observa que los picos se desplazan en longitud de onda pero algunos no se atenúan con los primeros valores de índice de refracción. Esto puede deberse a que los modos están aún confinados en su mayor parte al núcleo central y núcleo en anillo. Por esto se decide estrechar otra fibra con rejillas a un diámetro de 30 $\mu\text{m}$ , esperando mejorar las características del sensado. Se utilizó para esta prueba un diodo a 1310 nm ya que las

pérdidas aumentaron y no era posible observar adecuadamente el espectro de transmisión. Se uso en el analizador de espectros la escala lineal, una resolución de 2 nm y alta sensibilidad. Se obtuvieron los siguientes resultados:

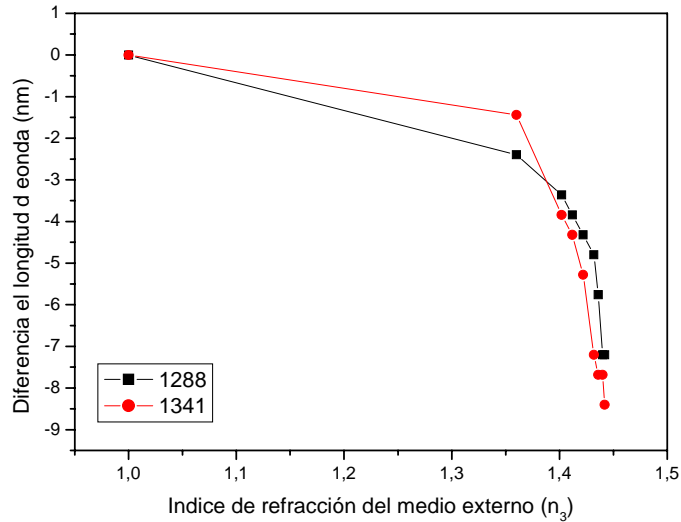


Fig. 5.10. Mediciones de índice con estrechamiento de diámetro de 30  $\mu$ m.

Se puede observar como el desplazamiento de las bandas de atenuación mostradas del interferómetro muestran un desplazamiento mas lineal y conforme aumenta el valor del índice del aceite estas se atenúan, lo cual es normal debido al efecto del aceite. Como el índice de refracción del medio ambiente (aceite) no excede el de la capa exterior o revestimiento, la sensibilidad de la RPL al aumento del índice externo se hace evidente con un desplazamiento de la longitud de onda central de las bandas de atenuación en el espectro de transmisión de las rejillas y una disminución de la profundidad de algunos picos [14]. La atenuación es causada debido a coeficientes de acoplamiento mas pequeños que resultan de la disminución de la integral de traslape entre los modos del núcleo y los modos del núcleo en anillo. La sensibilidad del espectro de las RPLs pueden explicarse de la siguiente manera: La dispersión material que existe debido a la dependencia en longitud de onda del núcleo, a los índices refractivos externos y revestimientos, aunado a la dispersión de guía de onda de las constantes de propagación, implica que los índices efectivos modales  $n_{eff,co}^m$  y  $n_{eff,cl}^m$  dependen de la longitud de onda. Las perdidas en la fuerza de acoplamiento con el aumento del índice de refracción para cada una de las bandas de atenuación se atribuye a la expansión del modo del revestimiento mas allá de la

frontera del revestimiento (conforme se sale del material del revestimiento), disminuyendo de esta manera el coeficiente de acoplamiento [12].

Algunos trabajos describen matemáticamente la variación de la longitud de onda resonante de una RPL,  $\lambda_0$ , en función de un índice refractivo externo menor al del revestimiento  $n_{ext} < n_{cl}$  ( para el cual el efecto espectral es aun debido a la reflexión total interna [15]. *Bhatia* simplemente establece la siguiente relación en [16] y destaca la dependencia del índice efectivo del revestimiento en el del medio ambiente:

$$\frac{d\lambda_0}{dn_{ext}} = \frac{d\lambda_0}{dn_{eff,cl}^m} \left( \frac{dn_{eff,cl}^m}{dn_{ext}} \right). \quad (1)$$

El término entre paréntesis es único a cada condición de acoplamiento y los resultados experimentales muestran que la sensibilidad al índice de refracción externo depende en gran medida del orden del modo en la capa externa. Se ha observado en la literatura que se presenta una mayor sensibilidad con modos de alto orden en el revestimiento debido a que estos modos se encuentran menos confinados a la estructura de la guía de onda de la fibra [17]. Estudios mas detallados se realizaron por *Allsop et al*, en donde el desplazamiento de la longitud de onda resonante se atribuye a dos factores: primero, al índice efectivo diferencial,  $\delta n_{eff}$  y segundo, al índice refractivo diferencial de grupo entre los modos del núcleo y del revestimiento (este último el cual sirve para especificar si la longitud de onda central se mueve a valores mas altos – desplazamiento al rojo – o valores más bajos - desplazamiento azul – con los cambios en el  $n_{ext}$ ). En un medio dieléctrico dispersivo, como una SMF, tanto el índice efectivo de los modos del revestimiento y del núcleo dependen de la longitud de onda, como se observa en las definiciones de los correspondientes índices grupales siguientes [18]:

$$m_{g,co} = n_{eff,co} - \lambda \left( \frac{dn_{eff,co}}{d\lambda} \right). \quad (2)$$

$$m_{g,cl} = n_{eff,cl}^m - \lambda \left( \frac{dn_{eff,cl}^m}{d\lambda} \right). \quad (3)$$

De esta manera, el índice diferencial de grupo (que depende de las propiedades de la fibra tanto como el periodo de la rejilla) esta dado por  $\delta m_g = m_{g,co} - m_{g,cl}$  y entonces:

$$\therefore \delta m_g = \delta n_{eff} - \lambda \left( \frac{d(\delta n_{eff})}{d\lambda} \right). \quad (4)$$

Si la condición de ajuste de fase la escribimos como  $\Lambda = \frac{\lambda}{\delta n_{eff}}$  y diferenciamos ambos lados con respecto a la longitud de onda tenemos lo siguiente:

$$\frac{d\Lambda}{d\lambda} = \frac{\delta n_{eff} - \lambda \left[ \frac{d(\delta n_{eff})}{d\lambda} \right]}{(\delta n_{eff})^2}. \quad (5)$$

Sustituyendo el índice de refracción diferencial de grupo en la ecuación anterior se comprueba que la polaridad de este gradiente solo queda determinado por el signo del índice diferencial de grupo y no la polaridad del índice diferencial efectivo modal:

$$\frac{d\Lambda}{d\lambda} = \frac{\delta m_g}{(dn_{eff})^2}. \quad (6)$$

La derivación anterior es importante para los cambios espectrales causados por perturbaciones ambientales del índice refractivo porque muestra la influencia del índice refractivo de grupo en el desplazamiento de la longitud de onda resultante. Cuando la constante de propagación diferencial  $\Delta\beta$  definida como  $\beta_{co} - \beta_{cl}^m = \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda}$ , se diferencia con respecto a la longitud de onda y además se sustituye la ecuación 6 en el resultado obtenido, se consigue una expresión que demuestra que el índice diferencial de grupo solo afecta la polarización del desplazamiento de la longitud de onda central de la banda de



atenuación ya que  $\frac{d(\Delta\beta)}{d\lambda} > 0$  indica un desplazamiento hacia el color azul y  $\frac{d(\Delta\beta)}{d\lambda} < 0$ , denota un desplazamiento hacia el color rojo:

$$\frac{d(\Delta\beta)}{d\lambda} = 2\pi \left[ \frac{d(1/\Lambda)}{d\lambda} \right] = -\frac{2\pi}{\Lambda^2} \left( \frac{d\Lambda}{d\lambda} \right).$$

$$\therefore \frac{d(\Delta\beta)}{d\lambda} = -\frac{2\pi}{\Lambda^2} \left[ \frac{\delta m_g}{(\delta n_{eff})} \right]. \quad (7)$$

Allsop *et al* describe la magnitud del desplazamiento de la longitud de onda resonante debido al cambio  $n_{ext}$  en términos similares a los que se encontraron en la ecuación 1 pero se da un análisis más detallado para las partes componentes. Aunque este análisis no se incluye en este trabajo, es importante tenerlo en cuenta ya que puede orientar en el análisis más exhaustivo del comportamiento hacia el índice de refracción externo en rejillas RPL indicadas con arco y optimizadas en trabajos futuros inmediatos.

Se debe mencionar que este trabajo también incluye el análisis y experimentación con índices de refracción externos con valores más altos que los del revestimiento o capa exterior que si se concluye a tiempo se incluirá a continuación.

### 5.3 Conclusiones

El desarrollo de sensores con RPLs es importante por las características ópticas y espectrales que muestran las rejillas a diversos parámetros ambientales. Sin embargo, es importante cuidar ciertos aspectos como la sensibilidad cruzada para tener el sensor correcto en la aplicación indicada. Debemos tomar en cuenta para hacer el estudio, que características tanto espectrales como físicas se verán afectadas con el parámetro ambiental a medir para hacer un análisis correcto.

Por ejemplo para temperatura, se tiene la contribución del material de la fibra que causa efectos termo-ópticos y el cambio en el periodo de la rejilla debido a la contribución de la guía de onda. Esto involucra saber que los cambios en el espectro de transmisión, debidos a la temperatura, dependen de los parámetros físicos de la fibra así como el orden del modo principal en la capa exterior y el periodo de la rejilla, entre otros factores.

Para el sensado de índice de refracción, sabemos que este no afecta al periodo de la fibra, pero para evitar variaciones o sensibilidad cruzada, debemos mantener la temperatura constante y nada de tensión. El efecto del desplazamiento o disminución de de la banda de atenuación es debida al índice efectivo de grupo el cual involucra el orden del modo, ya que dependiendo del orden, este se encontrará mas expuesto y en efecto se radiara mas luz conforme aumente el índice refractivo.

En este estudio, observamos que las RPLs engrosadas con arco eléctrico resultan convenientes para aplicaciones de filtrado y sensado de parámetros externos ambientales. Los resultados a pruebas ambientales con las rejillas engrosadas se mantienen dentro de los ya conocidos para rejillas fabricadas con otros métodos de fabricación. Es importante resaltar que el desarrollo de este tipo de rejillas engrosadas aun se encuentra en vías de desarrollo tanto de fabricación como teórica, (y no se encuentra literatura sobre el tema, mucho menos desarrollo teórico), y una vez optimizado el método de fabricación, estamos seguros que encontraremos mayor capacidad de sensado a diversos parámetros ambientales por los resultados que ya se obtuvieron en este trabajo inicial. Como objetivo inmediato se tiene el disminuir las perdidas por inserción que se observaron en el desarrollo del trabajo y probar el método con diferentes tipos de fibras cambiando, si es necesario, el proceso de fabricación.

#### 5.4 Referencias

- [1] Jang, J.N., Kim, S.Y., Kim, S.W., and Kim, M.S. *Electronics Letters* 1999. **35**, pp.2134-2136.
- [2] R.I. Mata-Chávez, A. Martínez-Ríos, I. Torres-Gómez, J.A. Álvarez-Chávez, R. Selvas-Aguilar, and J.M. Estudillo-Ayala: *Optics & Laser Technology* 2007. **40** pp 671.
- [3] Patrick, H.J., Kersey, A.D., and Bucholtz, F. *Journal of Lightwave Technology* 1998, **16**. pp. 1606-1642.
- [4] Shu, X., and Huang, D. *Optical Communications* 1999. **171**, pp. 65.69.
- [5] Allsop, T., Zhang, L., and Bennion, I. *Optical Communications* 2001, **191**, pp. 181-190.
- [6] Falciai, R., Mignanai, A.G., and Vannini, A, *Sensors Actuators*, **B74**, pp. 74-77, 2001.
- [7] Khaliq, S., James, S.W., and Tatam, R.P. *Optics Letters* 2001, **26**, pp. 1224-1226.
- [8] Yin, S., Chung, K,W., and Zhu, X. .*Optical Communications* 2001, **196**, pp. 181-186.
- [9] DeLisa, M.P., Zhang, Z., Shiloach, M., Pilevar, S., Davis, C.C., SirKis, J.S., and W.E. Bentley. *Analytical Chemistry* 2000. **72**, pp. 2895-2900.
- [10] Dankers, J.P., Lenhart, J.L., Kueh, S.R., van Zanten, J,H., Advani, S. G., and Parnas, R.S. *Optics laser Engineering* 2001. **35**, pp. 91-104.
- [11] Kueh, S.R.M., Parnas, R.S., Advani, S.G.,. *Composite Science Technology* 2001. vol.**62**, pp. 311-327.
- [12] Patrick, H.J., Kersey, A.D., and Bulcholtz, F.. *Journal of Lightwave Technology* 1998. **16**(9): pp.1606-1612.

[13] Lee, B.H., Liu, Y., Lee, S.B., Choi, S.S. and Jang, J.N. Optics Letters 1997. 22(23): pp.1769-1771.

[14] Laffont, G. and Ferdinand, P. Proceedings of SPIE 4185(2000):pp.326-329.

[15] Hou, R., Ghassemlooy, Z., Hassan, A., Lu,C., and Dowcker, K.P. Measurement Science and Technology 2001. **12**(10): pp.1709-1713.

[16] Bhatia, V. Optics Express 1999. **4**(11): pp. 457-466.

[17] Allsop, T., Zhang, L., and Bennion, I. Optics Communications 2001. **191** : pp. 181-190.

[18] Adams, M.J. Chichester: John Wiley & Sons.1981.



## Capítulo 6

La fabricación de rejillas de periodo largo con el novedoso método de engrosamiento de pequeñas secciones de la fibra óptica ha resultado interesante por las características que muestra. Estos resultados nos sugieren que una vez optimizado el método de fabricación se podrá explorar en el diseño de dispositivos para sensado óptico y comunicaciones ópticas de mayor fiabilidad tanto para aplicaciones comerciales como industriales. Las rejillas inducidas con el método de *fattening* muestran funciones de filtrado, cuya longitud de onda central puede variar al cambiar el proceso de fabricación. Muestran regularmente una profundidad de la banda de atenuación de  $> 15\text{dB}$ , un ancho de banda a 3 dB de  $> 138\text{ nm}$  y una longitud de menos de 4 mm.

---

### CONCLUSIONES

*6.1 Resumen General*

*6.2 Conclusión*

*6.3 Trabajo a futuro*

## 6.1 Resumen General

Las *RPLs* inducidas con arco eléctrico se investigan a detalle y se fabrican con diferentes métodos en la actualidad. En la búsqueda de implementar dispositivos de fabricación más simples y económicos se ha llegado a su fabricación con arco eléctrico, debido a la disponibilidad de las máquinas de empalme en los laboratorios de fibras ópticas. Dentro de la misma técnica de arco, existen varios métodos de fabricación, a decir, el método de adelgazamiento y el de micro curvaturas. En este trabajo se emplea el método de *fattening* que es un engrosamiento puntual de la fibra en regiones separadas a la misma distancia. Con esta técnica se han obtenido filtros de rechazo de banda con muy buenas características espectrales y de filtrado.

Un análisis teórico de la estructura de la fibra de dispersión desplazada de 4 capas es necesario y se explica a partir de las ecuaciones de Maxwell, debido a que los campos electromagnéticos en fibras con varios revestimientos son soluciones de estas ecuaciones y están sujetos a condiciones de frontera. Para obtener estas soluciones, nos enfocamos solamente en los modos guiados y aplicamos ventajosamente las condiciones de guiado débil para simplificar las soluciones. Se obtiene la conocida relación de dispersión también llamada ecuación característica ó ecuación de eigen-valores la cual queda determinada por el determinante de una matriz de 6x6 para nuestro caso. Como es necesario tener soluciones no triviales, el determinante de coeficientes debe desaparecer. De la condición  $[a_{ij}] = 0$ , se determina la constante de propagación  $\beta$  u otras características modales como el índice efectivo  $n_{eff}$ , inclusive los modos en la fibra, apoyándose en un software como *Matlab*® ó *Matematica*®.

El análisis teórico sirve para saber que modos son excitados en la fibra DSF y darnos idea de lo que sucederá al fabricar las rejillas de periodo largo por efecto de la condición de ajuste de fase. Una máquina de empalme, una fuente de luz blanca y un espectro analizador son suficientes para fabricar rejillas engrosadas. El nuevo método utilizado es simple, pero aun esta en vías de desarrollo ya que falta optimizar el proceso y probar con otro tipo de fibras hasta lograr disminuir las perdidas por inserción. Los filtros obtenidos tienen una profundidad de la banda de atenuación de más de 15dB con un ancho

de banda a 3 dB de hasta 138 nm y una longitud de menos de 4 mm. Al caracterizarlos a la temperatura (25-190°C) mostraron un comportamiento dentro de los rangos obtenidos con filtros fabricados con UV de 51 pm/°C. El desplazamiento de la banda de atenuación se observó hacia longitudes de onda más grandes (rojo), siendo mas uniforme con rejillas de periodo variable entre 150-200 μm, además mostraron un crecimiento lineal de la profundidad de la banda de 0.00777 dB/ °C. En pruebas de tensión mostraron una sensibilidad baja de 3.078 nm /%ε ya que las rejillas de Bragg muestran una sensibilidad de 8.3 nm/%ε. Este resultado es de esperarse, debido al incremento del diámetro de la fibra con el *fattening*. Para el caso de curvatura, los filtros mostraron ser más sensibles a longitudes de onda cercanas a la longitud de onda de corte en operación monomodal. De acuerdo a los resultados obtenidos, los filtros resultan se estables a perturbaciones externas, lo cual los hace interesantes en aplicaciones donde se requiera este tipo de estabilidad.

Usando el método de *fattening* pero cambiando un poco el proceso de fabricación, se hicieron dos rejillas en serie separadas aproximadamente 6 mm. La respuesta de las dos rejillas en conjunto se mostró como un amplio patrón de interferencia bien definido cuyas bandas centrales mostraban una profundidad de al menos 15 dB. Las bandas o franjas del interferómetro mostraban un ancho de 20 nm y conforme se agrandaba la distancia entre las rejillas, el ancho de estas disminuía en proporción a la separación entre las rejillas. Se probaron algunas muestras a temperatura (50-200°C) resultando un máximo desplazamiento de 17 pm/°C con la banda a 1373nm y 9 pm/°C con la banda de 1206 nm. Ya que no todas las franjas se desplazaron uniformemente, se decidió agregar un estrechamiento entre las rejillas del 50% del diámetro. Con esto, se logró que la mayor cantidad de bandas se desplazaran a 17 pm/°C en el mismo rango de temperatura en dirección al rojo. En las pruebas de tensión se obtuvo una máxima sensibilidad de 2.9 pm / με en 1487 nm en dirección al azul y un mínimo de 1.4 pm/ με. La sensibilidad se hizo mas uniforme con rejillas de periodo variable, desplazándose la mayoría a la más alta sensibilidad medida. De nueva cuenta, el dispositivo se muestra estable, debido a la baja sensibilidad que muestra a estos parámetros siendo esto atractivo para aplicaciones donde no se requiere sensibilidad a estas medidas.

Aunque los dispositivos han mostrado baja sensibilidad a la temperatura, es preciso notar que estas mediciones estuvieron limitadas al controlador de temperatura que se utilizó en el laboratorio. Sin embargo, se contó con un dispositivo con control de temperatura en un rango de 27-540°C, en la estancia pre-doctoral, la cual se utilizó para hacer de nueva cuenta caracterizaciones de temperatura con filtros de longitud de onda central a 1550 nm y 1524 nm. Ya que se contaba con un diodo láser a 1550 y una fibra EDF bombeada a 980 nm, se utilizaron ambos sistemas como fuentes de luz para las rejillas. Se observó que en promedio, la banda de atenuación se desplaza 72pm/°C. De acuerdo a los resultados se procedió a caracterizar nuevamente pero ahora midiendo la respuesta con un detector conectado a un osciloscopio cuya salida mostró resultados satisfactorios ya que la diferencia observada fue que a partir de 200°C el filtro muestra más sensibilidad a la temperatura siendo en este caso el límite de 500°C. Los resultados gráficos muestran también que en el rango de 27-200°C existe más estabilidad a la temperatura ya que se observa un cambio mínimo en comparación a temperaturas mayores. En conclusión, se tiene un sensor a partir de 200 °C y esperando que el comportamiento sea el mismo a temperaturas mayores de 500 °C, el sensor de temperatura será útil para aplicaciones industriales en ambientes de difícil acceso para humanos y donde dispositivos electrónicos resultarían severamente dañados.

Las rejillas RPLs engrosadas también se probaron en cambios de índice de refracción ambiental en una región de índice menor al del material del revestimiento externo. Se fabricaron dos rejillas en serie con un periodo de 150 micras y a 14 mm de separación. Para aumentar la sensibilidad se hizo un adelgazamiento de la fibra entre las rejillas del 30% del diámetro inicial. Los resultados gráficos muestran el comportamiento del desplazamiento de la banda de atenuación y al mismo tiempo una disminución gradual de la profundidad de la banda de absorción. Esto se explica porque conforme el valor del índice del medio externo se acerca al valor de índice del revestimiento o capa exterior de la fibra, la luz empieza a escaparse ya que a valores cercanos al índice de la capa externa, esta pareciera expandirse o volverse infinita.



## 6.2. Conclusión

En conclusión, el nuevo método de fabricación por *fattening* de RPLs es factible ya que la fabricación resulta simple y económica. Esto queda demostrado con los filtros de rechazo de banda que se obtuvieron, cuya diferencia con los fabricados con otros métodos y técnicas, es que muestran un ancho de banda más grande. Otra diferencia importante de notar es que se utilizó fibra de dispersión desplazada cuya estructura interna es de 4 capas. Esta característica se observa también en los interferómetros Mach-Zehnder obtenidos ya que dos rejillas fabricadas en serie a una distancia de 7mm muestran en la transmisión un patrón de interferencia de un ancho de banda total de 500 nm aproximadamente. Este ancho de banda puede resultar útil en algunas aplicaciones como la eliminación de ruido ASE en amplificadores de fibra EDFA.

Como sensores de temperatura se concluye que son estables en el rango de 25-190°C y muestran sensibilidad a partir de 200°C en adelante. También son sensibles al índice de refracción pero altamente estables a tensión y curvatura. Es ineludible el optimizar el proceso de fabricación ya que se observan algunas pérdidas por inserción. Siendo posible eliminar esas pérdidas se tendrán filtros y sensores altamente fiables para aplicaciones comerciales e industriales.

### **6.3 Trabajo a futuro**

El siguiente trabajo se realizará posteriormente para seguir investigando el método:

1. Optimizar la fabricación de las RPLs engrosadas con arco eléctrico para reducir pérdidas por inserción.
2. Probar la fabricación de estas rejillas en otros tipos de fibras y con diferente proceso de fabricación.
3. Análisis teórico de modos acoplados para explicar el comportamiento de las rejillas engrosadas.
4. Una vez optimizadas las rejillas buscar aplicaciones para los filtros como sensores potenciales para aplicaciones industriales.