



INAOE

Diseño y Fabricación de un Filtro Sintonizable Basado en Interferencia Multimodal

por

J. Enrique Antonio López

Tesis sometida como requisito parcial para
obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN LA
ESPECIALIDAD DE ÓPTICA**

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica**

Agosto 2008

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Daniel A. May Arrijoja, INAOE

Dr. J. Javier Sánchez Mondragón, INAOE

©INAOE 2008

El autor otorga al INAOE el permiso de
reproducir y distribuir copias en su totalidad o en
partes de esta tesis



Resumen

La tendencia actual en la fabricación de dispositivos basados en fibras ópticas lleva a múltiples aplicaciones de estas debido a su rápida respuesta y a su gran capacidad de transmisión de datos. Tales dispositivos se elaboran combinando las múltiples características de las fibras, ya sea utilizando solo fibras monomodales o solo fibras multimodales, o haciendo una combinación de ambas fibras. Además en algunos dispositivos se hace uso de otros materiales para lograr una mejor manipulación de ellos o para alcanzar resultados que no se podrían lograr utilizando solamente las fibras. Tal es el caso del dispositivo elaborado en esta tesis, donde se utilizaron ambos tipos de fibras alineadas en el interior de un tubo capilar (ferrule) de 125 μm de diámetro, el cual se llenó utilizando un líquido especial de índice de refracción de acoplamiento contenido dentro del tubo capilar el cual funcionaría como una guía de onda multimodal de longitud variable. Este dispositivo es un Filtro Sintonizable basado en Interferencia Multimodal, lo cual se logra haciendo el siguiente arreglo: una fibra monomodal 9/125, la cual tiene una de sus caras conectada a la fuente de luz de entrada, y la otra cara de la fibra va dentro del tubo capilar en cuyo interior se deposita el líquido. Por el otro extremo de este mismo capilar se tiene una de las caras de una sección de Fibra

multimodal 105/125, correspondiente a la primera imagen, la cual se complementara con el liquido para formar una sola guía multimodal de longitud variable. La otra cara de la fibra multimodal, es empalmada a una sección de fibra multimodal No-Core, correspondiente a la tercera imagen. La otra de las facetas de esta Fibra No-Core, esta empalmada a una fibra monomodal la cual servirá como la salida de luz que será colectada por un fotodetector, o un analizador de espectros óptico.

Ya que la Interferencia Multimodal es dependiente de la longitud de onda y de la longitud de la guía multimodal, la sintonización se lleva acabo separando gradualmente la cara de la fibra monomodal de la cara de la fibra multimodal, y manteniendo a esta ultima fija. A medida que se realiza esta separación, parte del liquido va tomando lugar entre las dos caras para así formar una guía multimodal cuya longitud incrementa o decrementa gradualmente, según sea el caso, y de esta manera se mostrara su aplicación en un sensor de microdesplazamiento y en un láser de fibra óptica sintonizable.

Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, por permitirme ser parte de él, por su hospitalidad y apoyo.

Al CONACYT por el apoyo económico brindado a través de la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría y por el apoyo mediante el programa de becas mixtas para estudiantes en el extranjero.

Mi más sincero agradecimiento a los Drs. Daniel A. May Arrijoja asesor y J. Javier Sánchez Mondragón coasesor, por todo su apoyo para llevar a cabo este proyecto de tesis, por sus consejos y su valioso tiempo invertido.

A los Drs. Francisco Renero Carrillo, Julio Cesar Ramírez San Juan y a Miguel Ángel Basurto Pensado por el interés puesto en este trabajo y sobre todo por el tiempo invertido en la revisión de este trabajo.

A mi familia, por su apoyo incondicional. A mis padres, Hilario y Lola, de quienes he recibido las enseñanzas y las herramientas más valiosas de la vida. A mis hermanos, Javier, Roberto, Adriana, Ignacio, Saúl e Hilario y a mis tiernos sobrinos Alex, Ingrid, Vianey y Xunaxi por su gran cariño.

A todos mis compañeros y amigos por su desinteresado apoyo que siempre me brindaron y por todos los buenos y malos momentos que pasamos juntos.

A CREOL (The College of Optics and Photonics) y al Dr. Patrick L. LiKamWa por el apoyo con sus instalaciones y servicios para la realización de mis estancias de investigación para el desarrollo de esta tesis.

for my parents

Índice General

1. Introducción	1
1.1 - Antecedentes	2
1.2 - Fibras Ópticas	3
1.2.1 Funcionamiento de la fibra Óptica.	6
1.2.2 Atenuación en las Fibras Ópticas.	9
1.2.3 Ancho de Banda de las Fibras Ópticas.	11
1.3 - Aplicaciones en Comunicaciones Ópticas y en Sensado	13
1.4 - Objetivos	15
1.5 - Organización de la Tesis	16
2. Fundamentos Teóricos	17
2.1 - Interferencia Multimodal en Guías Multimodales	18
2.1.1 Constante de Propagación	19
2.1.2 Análisis de Propagación de Modos Guiados	22
2.2 - Interferencia General	24
2.2.1 Imagen Simple	24
2.2.2 Imágenes Múltiples	25
2.3 - Interferencia Restrictiva	26
2.3.1 Interferencia Par	27
2.3.2 Interferencia Simétrica	28
2.4 - Interferencia Multimodal en Fibras Ópticas	28
3. Filtro Sintonizable Basado en Interferencia Multimodal	31

3.1 - Filtro Basado en Interferencia Multimodal	32
3.2 - Mecanismo de Sintonización	36
3.3 - Arreglo Experimental	39
3.4 - Resultados Experimentales.	41
4. Aplicaciones	46
4.1 - Sensor de Microdesplazamiento	46
4.2 - Laser de Fibra Óptica Sintonizable	49
5. Conclusiones y trabajos futuros	52
5.1 - Conclusiones Generales.	52
5.2 - Trabajos Futuro.	53
Bibliografía.	55

Prefacio

La Interferencia Multimodal es uno de los fenómenos más importantes que ocurren en las guías multimodales planas o en las fibras multimodales que da lugar a la generación de autoimágenes, el cual es la base para la operación del dispositivo que se presenta en esta tesis. La parte fundamental de este efecto es que la generación de dichas imágenes esta relacionada a la longitud de onda, o a la longitud de la guía multimodal. Por lo que es factible la fabricación de filtros ópticos en fibra al modificar alguna de estas variables.

En el caso de fibras ópticas para un campo incidente centrado simétricamente alrededor del eje óptico en la cara de una fibra multimodal, los efectos de la interferencia multimodal resultan en localizaciones periódicamente longitudinales de las autoimágenes dentro de la fibra óptica y lo largo de su eje óptico. Con la caracterización de estos efectos en una fibra multimodal, es posible fabricar y diseñar filtros fijos y sintonizables. El dispositivo que se presenta en esta tesis es un filtro pasabandas en línea, todo de fibra óptica basado en interferencia multimodal, el cual presenta bajas pérdidas por inserción, con un ancho de banda adecuado y un gran aislamiento para sistemas de multiplexaje por división de longitud de onda gruesa. El filtro puede ser elaborado fácilmente para cualquier

longitud de onda central que sea necesario o según la aplicación que se le quiera dar.

El filtro puede tener buenas aplicaciones en telecomunicaciones ópticas, espectroscopia y sensado. Para esta última, mediante este mismo esquema se logro elaborar un sensor de microdesplazamiento, el cual posee un buen rango de medición. Al mismo tiempo se diseño un láser sintonizable de fibra dopada con erbio, empleando para estas aplicaciones las mismas características de las fibras ópticas multimodales.

Capítulo 1

Introducción

En la última década el uso de las fibras ópticas ha observado un incremento notable, tanto en el área de comunicaciones ópticas así como en aplicaciones relacionadas al desarrollo de sensores. Aunque la función principal de las fibras ópticas es guiar luz, es posible desarrollar dispositivos fotónicos en los cuales la variación de ciertos parámetros físicos de las fibras permite su uso como dispositivos activos. Existen actualmente una variedad de dispositivos desarrollados para comunicaciones ópticas como son: divisores/combinadores de haces, multiplexores/demultiplexores por división de longitud de onda, filtros (fijos y sintonizables), láseres, amplificadores, circuladores, etc., en los cuales la fibra óptica es un elemento fundamental. En el área de sensores la inmunidad de las fibras ópticas a interferencia electromagnética permite su uso en ciertos ambientes donde sensores electrónicos son seriamente afectados. Además el hecho de operar con luz los hace elementos idóneos para sensores en ambientes altamente explosivos.

En el desarrollo de dispositivos basados en fibra (en ambas aplicaciones), existen diferentes configuraciones para lograr un dispositivo funcional. Sin embargo, existe gran preferencia a dispositivos en-línea (o todo fibra) en los cuales la luz no sale de la fibra óptica. La ventaja de estos dispositivos es

que son más robustos y fáciles de integrar. Para el desarrollo de dichos dispositivos es necesario tener una base fundamental sobre el funcionamiento y características de las fibras ópticas, de modo tal que sepamos que parámetros podemos emplear para la función requerida. El presente capítulo presenta entonces un breve resumen de las características más importantes de las fibras ópticas.

1.1. Antecedentes

El desarrollo de las fibras ópticas tiene su origen en la década de los 50's, cuando el físico irlandés John Tyndall descubrió que la luz podía viajar dentro de un material (agua) curvándose por reflexión interna total. Este principio fue utilizado en su época para iluminar corrientes de agua en fuentes públicas. En 1952, el físico Narinder Singh Kapany, apoyándose en los estudios de John Tyndall, realizó experimentos que condujeron a la invención de la fibra óptica.

Desde su invención, las pérdidas en las fibras ópticas fueron el punto clave para su uso comercial. Charles Kao, en su tesis doctoral de 1966, estimó que las máximas pérdidas que debería tener la fibra óptica, para que resultara práctica en enlaces de comunicaciones, eran de 20 dB/km. En 1970 los investigadores Maurer, Keck, Schultz y Zimar que trabajaban para Corning Glass Works fabricaron la primera fibra óptica aplicando impurezas de titanio en sílice. Las pérdidas eran de 17 dB/km. Durante esta década las técnicas de fabricación se mejoraron, consiguiendo pérdidas de tan solo 0,5 dB/km. Como resultado, el 22 de abril de 1977, *General Telephone and Electronics* envió la primera transmisión telefónica a través de fibra óptica, en 6 Mbit/s, en Long Beach, California [1]. Y en 1978 ya se transmitía a 10 Gb/s.

Sin embargo, el amplificador que marco un antes y un después en el uso de la fibra óptica en conexiones interurbanas, reduciendo el costo de ellas,

fue el amplificador de fibra dopada con Erblio inventado por David Payne de la universidad de Southampton, y Emmanuel Desurvire en los laboratorios de Bell. Esto dio lugar al primer enlace transoceánico con fibra óptica (el TAT-8), que comenzó a operar en 1988. Desde entonces se ha empleado fibra óptica en multitud de enlaces transoceánicos, entre ciudades y paulatinamente se va extendiendo su uso desde las redes troncales de las operadoras hacia los usuarios finales [2].

Estos aspectos clave fueron los que detonaron el uso extensivo de la fibra óptica en sistemas de telecomunicaciones y redes. El desarrollo de diferentes tipos de fibra y fibras especiales contribuyó al desarrollo de dispositivos fotónicos que son requeridos en sistemas de comunicación. Al mismo tiempo, estos impulsaron su uso a otras aplicaciones, en particular hacia sensores por fibra óptica. Actualmente las fibras ópticas se utilizan como sensores para medir la tensión, la temperatura, la presión y otros parámetros [2, 3].

1.2. Fibras Ópticas

En un sistema de comunicaciones las fibras ópticas son el medio por el cual las señales de comunicaciones son transmitidas de un lugar a otro en forma de luz guiada a través de delgadas fibras de vidrio o de plástico. Estas señales son pulsos de luz portadores de información continuamente modulados. Estos pueden ser información de voz, datos, video, o cualquier otro tipo de información.

Este mismo tipo de información puede ser enviada en cables metálicos, tales como par trenzados y coaxial y también a través del aire o frecuencias de microondas. La razón para usar las fibras ópticas, es porque ofrece ventajas que no podemos encontrar en cualquier conductor metálico o microondas [3]. La principal ventaja de la fibra óptica es que esta puede

transportar más información a grandes distancias en menos tiempo que cualquier otro medio de comunicación. Adicionalmente, es inmune a la interferencia por radiación electromagnética, haciendo posible la transmisión de información y datos con muy bajo ruido. Entre las desventajas más importantes de la fibra óptica podemos mencionar el costo; no son fáciles de fabricar; se requiere controlar precisamente su diámetro y el índice de refracción del núcleo y cubierta. Además, es conveniente que sean lo más largas posibles para evitar pérdidas por acoplamiento al realizar empalmes de fibras [4].

Un sistema para transporte de datos basado en fibras ópticas, está hecho de tres elementos fundamentales como se muestra en la figura 1.1.

1. Transmisor: Una fuente de luz en un extremo (diodo láser), incluyendo un conector u otro mecanismo de alineamiento para conectar o acoplar la luz a la fibra. La fuente de luz recibirá su señal de la electrónica de soporte para convertir la información eléctrica a información óptica.
2. La fibra (y su cable, conectores o divisores) de punto a punto. La fibra transportara esta luz a su destino.
3. Receptor: Un fotodetector en el otro extremo con un conector para recibir la luz de la fibra óptica. El detector convierte la luz de entrada a una señal eléctrica, produciendo una copia de la señal eléctrica original de entrada. La electrónica de soporte procesara que señal realizara su función de comunicación.

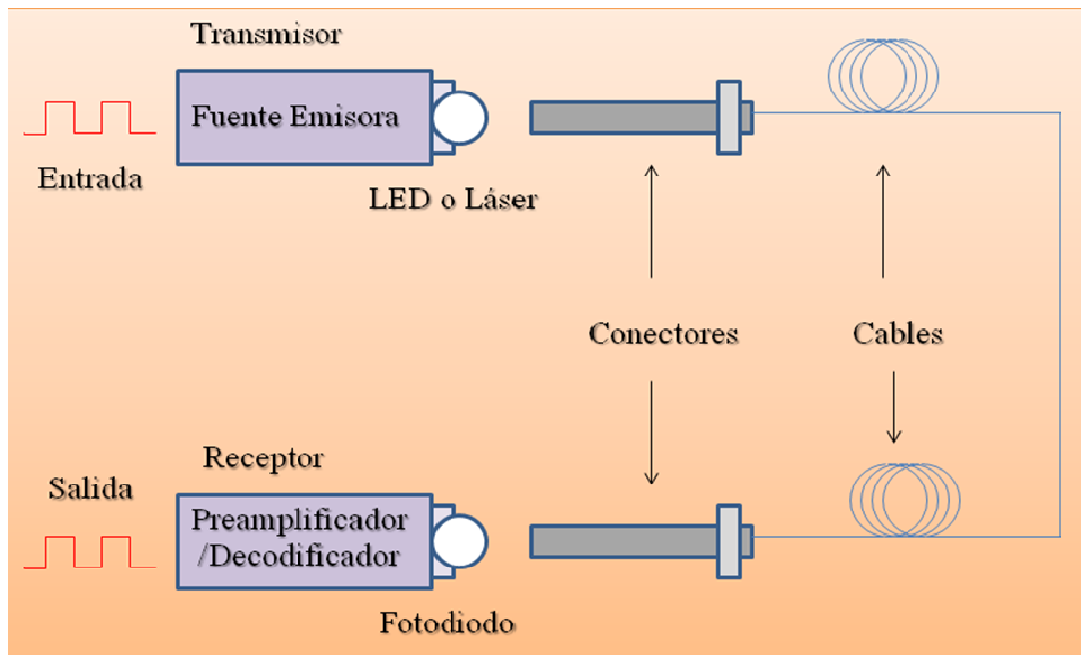


Fig. 1.1: Esquema de un típico sistema de enlace de datos hecho con fibras ópticas [5].

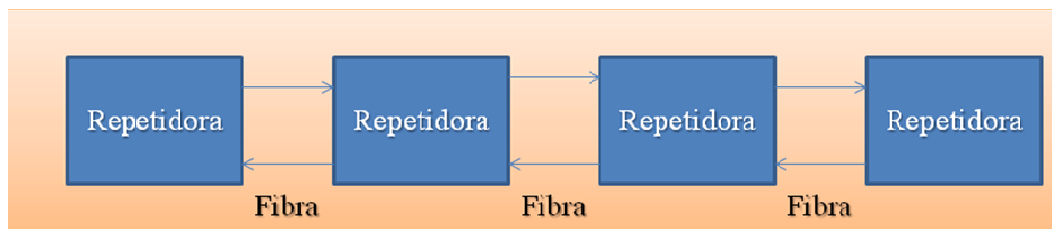


Fig. 1.2: Un sistema para enlace de datos a grandes distancias, requiere del uso de repetidoras para regenerar las señales [5].

En sistemas a largas distancias (arriba de 100 Km), como en la figura 1.2, es necesario el uso de amplificadores intermedios para compensar las pérdidas de la señal a lo largo de la longitud de recorrido en la fibra. De esta manera, las redes para largas distancias estarán compuestas de un número de enlaces idénticos conectados una con otra. Cada repetidor consiste de un receptor, un transmisor y la electrónica de soporte [5]. Los repetidores compensan las pérdidas de las fibras ópticas por medio de amplificadores

ópticos. En sistemas con longitudes cortas de fibra es posible el uso de fibras con diámetros de núcleo más grande. Estas son las fibras multimodales, en las cuales aunque las pérdidas son mayores, debido a la corta distancia esta no afecta demasiado. Además, es posible usar un simple diodo emisor de luz (LED). Los conceptos básicos de guiado, tipos de fibra, mecanismos de atenuación, y ancho de banda en dichas fibras son explicados a continuación.

1.2.1. Funcionamiento de la Fibra Óptica

Las fibras ópticas (fig. 1.3) están compuestas de un núcleo portador de luz rodeado por un revestimiento que mantiene la luz en el núcleo mediante el principio de reflexión total interna. Haciendo el núcleo de la fibra con un material con un alto índice de refracción, podemos lograr que la luz en el núcleo sea totalmente reflejada en la frontera con el revestimiento para toda la luz que incide a un ángulo mayor que el ángulo crítico. El ángulo crítico está determinado por la diferencia en la composición de los materiales usados (índice de refracción) para el núcleo y el revestimiento. El núcleo y el revestimiento son hechos de vidrio, típicamente de óxido de silicio y germanio cubiertas por una funda de plástico que protege la fibra de vidrio de daños físicos y de la humedad. Algunas fibras hechas de plástico son usadas para aplicaciones específicas.

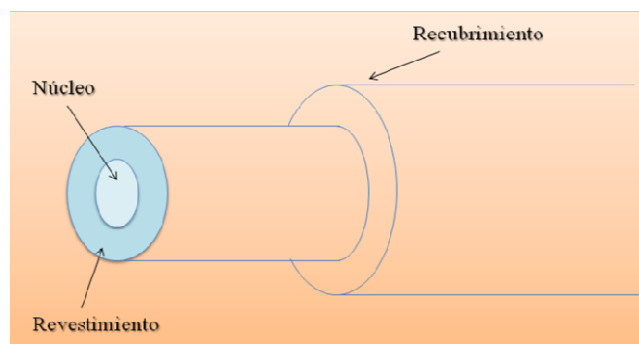


Fig. 1.3: Constituyentes de una fibra óptica [5].

Hay dos tipos básicos de fibras ópticas comerciales; la multimodo y la monomodo como se muestran en la figura 1.4. En la fibra multimodal, la luz puede viajar en diferentes trayectorias (llamadas modos) a través del núcleo de la fibra, entrando y saliendo en la fibra a varios ángulos. La apertura numérica (NA) define el ángulo más grande al que la luz es aceptada dentro del núcleo de la fibra. Existen dos tipos de fibras multimodal, caracterizadas por el perfil de índices de sus núcleos y por ende la forma en la que la luz viaja en ellas.

La fibra multimodo de índice abrupto tiene un núcleo compuesto de un solo tipo de vidrio. La luz se propaga por rebotes reflejándose en la interfase núcleo-revestimiento de la fibra óptica. La apertura numérica está determinada por la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y del revestimiento y puede ser calculado por la ley de Snell. Debido a que cada modo o ángulo de la luz viaja a diferente trayectoria, un pulso de luz es dispersado mientras que va viajando por la fibra, limitando el ancho de banda de la fibra de índice abrupto [3, 5].

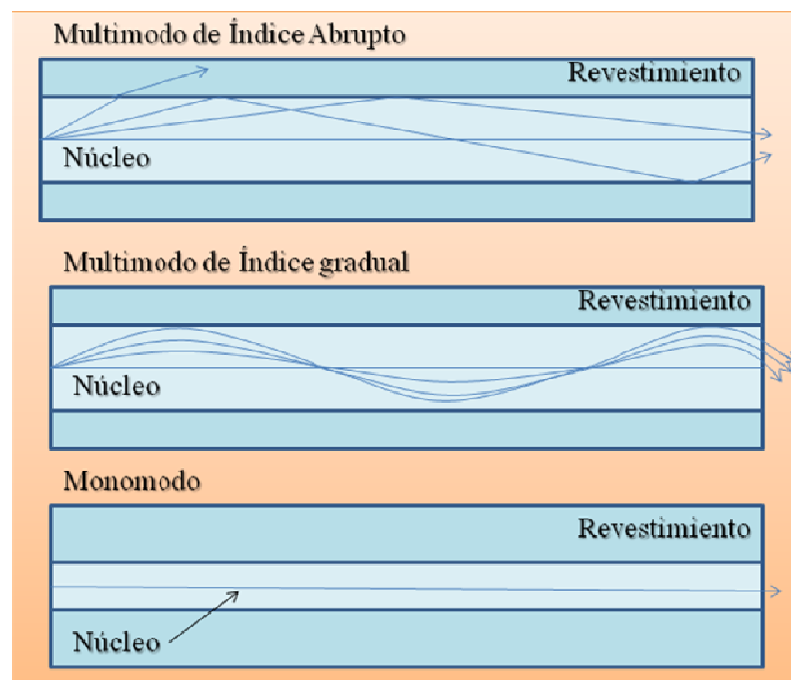


Fig. 1.4: Los tres tipos de fibras ópticas [5].

En las fibras multimodales de índice gradual, el núcleo está compuesto de diferentes capas de vidrio con índices de refracción seleccionados de manera que puedan producir un perfil de índice aproximado a una parábola. La idea es que el índice de refracción central se reduzca cuando este se aproxima al revestimiento, y de esta manera la luz viaja más rápido en esta región de la fibra óptica. Del mismo modo la luz que viaja más cercana al centro del núcleo viajara más lenta. Un perfil de índices propiamente diseñada compensara para las diferentes longitudes de la trayectoria de cada modo, incrementando la capacidad del ancho de banda de la fibra por más de 100 veces en comparación con la fibra de índice abrupto. Esto se puede observar en la Tabla 1.1 donde se muestran algunas características adicionales de fibras multimodo, así como de la fibra monomodo.

Tabla 1.1: Tipos de fibras y sus especificaciones típicas [5].

Tipo de fibra	Diámetro (μm) Núcleo/Cladding	Coeficiente de Atenuación (dBkm)			Ancho de banda (MHz- Km)
		850 nm	1300 nm	1550 nm	
Multimodal / plástico	1mm	(1 dB/m a 665 nm)			Bajo
Multimodo Índice abrupto	200/240	6			50, 850 nm
Multimodo Índice gradual	50/125	3	1		600, 1300 nm
	62.5/125	3	1		500, 1300 nm
	85/125	3	1		500, 1300 nm
	100/140		3	1	300, 1300 nm
Monomodo	8-9/125	0.5	0.3		Alto

En el caso de la fibra monomodal solo se reduce el tamaño del núcleo a un diámetro que es aproximadamente seis veces la longitud de onda de la luz que se propaga en la fibra. Se mantiene además una pequeña diferencia en el índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento, y esta combinación causa que toda la luz viaje en un solo modo. Así la dispersión modal

desaparece y el ancho de banda de la fibra incrementa tremendamente en comparación a la fibra multimodo de índice gradual [5].

Las fibras ópticas comúnmente usadas para comunicaciones ópticas son las de vidrio, y pueden ser monomodo o multimodo. Muchas de las telecomunicaciones de hoy y comúnmente en los sistemas de antenas de televisión (CATV) usan fibras monomodo, mientras que las redes de área local (LANs) usan fibra multimodal de índice gradual.

Las fibras ópticas de plástico son fibras multimodales de índice abrupto con núcleo de diámetro grande, ya que las fibras ópticas de plástico de índice gradual están bajo desarrollo. Debido a que el diámetro del núcleo es grande en las fibras ópticas de plástico y que pueden ser cortadas con simples herramientas, estas pueden ser muy fáciles de trabajar y pueden utilizar conectores de bajo costo. Las fibras ópticas de plástico, no son empleados en transmisiones a largas distancias por que esta tiene alta atenuación y bajo ancho de banda en comparación con las fibras multimodales de vidrio. Sin embargo, las fibras ópticas de plástico pueden ser usadas en conexiones cortas desde las calles a la casa u oficina y dentro de la casa o la oficina misma.

1.2.2. Atenuación en las Fibras Ópticas

La pureza del medio es muy importante para la mejor transmisión de una señal óptica dentro de la fibra. Ya que todas las fibras ópticas comerciales están hechas de núcleos sólidos (recordemos que las fibras fotónicas pueden ser de núcleo hueco), es necesario fabricar las fibras con vidrios extremadamente puros. Las impurezas son partículas no deseadas que pueden obtenerse dentro de la fibra y llegar a ser una parte de su estructura. Las impurezas una vez integradas dentro de la fibra al momento de la manufactura no pueden ser limpiadas. Por lo tanto, estas impurezas

causaran que partes de las señales ópticas sean pérdidas debido a esparcimiento o absorción de la luz, causando atenuación de la señal. Si tenemos demasiadas impurezas en la fibra, perderemos gran parte de la señal óptica y lo que queda en la salida de la fibra no será suficiente para comunicaciones fiables.

La atenuación en las fibras ópticas es un resultado de dos factores; absorción y esparcimiento como se muestra en la figura 1.5. La absorción es causada por las moléculas del vidrio, ya que estas absorben la luz y convierten en calor. Los absorbentes primarios son residuos de OH^+ y dopantes usados para modificar el índice de refracción del vidrio. Esta absorción ocurre en longitudes de onda discretas, determinados por los elementos absorbentes de la luz. La absorción OH^+ es predominante y frecuentemente ocurre alrededor de 1000 nm, 1400 nm y por encima de 1600 nm.

La atenuación debida al esparcimiento tiene una respuesta anisotrópica, y ocurre cuando la luz interacciona con átomos individuales en el vidrio. La luz que es dispersada en ángulos fuera del ángulo crítico de la fibra será absorbida por el revestimiento o dispersada en todas direcciones, incluso podría transmitirse hacia atrás, de regreso a la fuente.

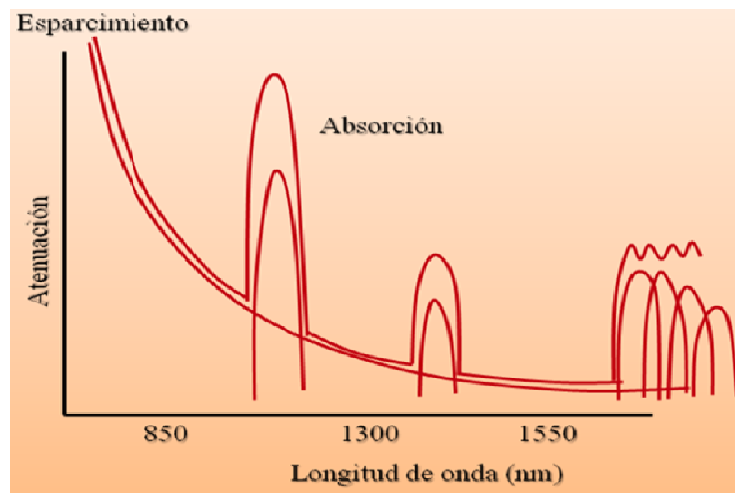


Fig. 1.5: Mecanismos de pérdidas en las fibras ópticas [5].

El esparcimiento es también una función de la longitud de onda, inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda de la luz. Así, si duplicamos la longitud de onda de la luz reducimos las pérdidas por esparcimiento por 2^4 o 16 veces. De esta manera para transmisiones a largas distancias, es ventajoso usar grandes longitudes de onda para lograr una mínima atenuación y alcanzar la máxima distancia entre repetidoras. La absorción y el esparcimiento juntos, producen la curva de atenuación para una típica fibra óptica de vidrio, mostrada en la figura 1.5.

Esta es la razón por la que los sistemas transmisores de fibra óptica crean ventanas entre las bandas de absorción a 850 nm, 1300 nm, y 1550 nm, y donde la física también permite una fácil fabricación de láseres y detectores. Las fibras de plástico tienen una banda de longitud de onda más limitada, que obliga el uso práctico de fuentes a 660 nm (LED's) [5, 6].

1.2.3. Ancho de Banda de las Fibras Ópticas

La capacidad de transmisión de información de las fibras ópticas está limitado por dos componentes de dispersión separadas: modal (figura 1.6) y cromática (figura 1.7). La dispersión modal ocurre en fibras multimodales de índice abrupto donde las trayectorias de los diferentes modos son de longitudes variables. Esto da como resultado que los modos experimenten diferentes velocidades de grupo.

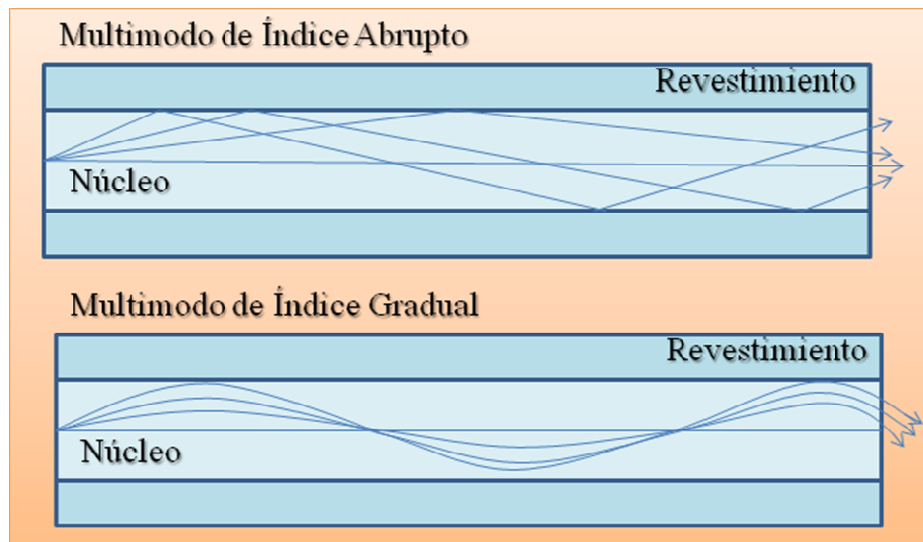


Fig. 1.6: Dispersión modal causada por diferentes longitudes en las trayectorias dentro de la fibra óptica, es corregida en las fibras de índice gradual [5].

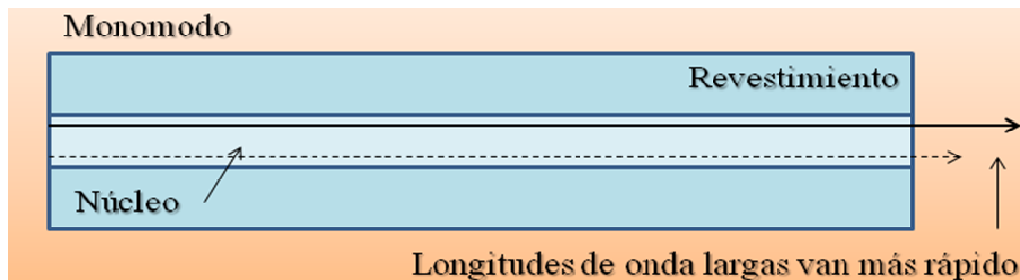


Fig. 1.7: La dispersión cromática ocurre porque la luz de diferentes longitudes de onda viaja a diferentes velocidades en el núcleo de la fibra óptica [5].

Una manera elegante de solucionar este problema es usando fibra multimodal de índice gradual. El perfil de índice gradual fue elegido teóricamente para permitir que todos los modos tengan la misma velocidad de grupo o velocidad de tránsito a lo largo de la longitud de la fibra. Esto se logra haciendo la parte exterior del núcleo de un índice de refracción gradualmente más bajo que el de la parte central. De esta forma los modos

de orden más alto se aceleran a medida que se van alejando del centro del núcleo, y de esta forma compensan su larga trayectoria longitudinal. Sin embargo, en fibras reales el perfil del índice gradual es más una aproximación escalonada, y por lo tanto todos los modos no son perfectamente transmitidos permitiendo alguna dispersión modal. Ya que los modos de orden mayor sufren mayor dispersión, entre mas modos sean propagados en la fibra mayor será la dispersión modal y por ende menor ancho de banda transmisible.

Al usar una fibra monomodal (figura 1.7) la dispersión modal es nula. Sin embargo existe un segundo factor en el ancho de banda de la fibra y es la dispersión cromática. Como sabemos un prisma separa el espectro de luz incidente ya que la luz viaja a diferentes velocidades de acuerdo a su longitud de onda y de esta manera es refractado a diferentes ángulos. Esto sucede debido a que el índice de refracción del vidrio es dependiente de la longitud de onda. Por lo tanto, si nuestro pulso de luz no es espectralmente puro (como en el caso de los LED's) aun en fibras monomodales es posible sufrir de dispersión. De aquí que el uso de láseres con alta pureza espectral sea estándar en comunicaciones de larga distancia [5, 6].

1.3. Aplicación en Comunicaciones Ópticas y en Sensado

Entre los diferentes dispositivos que pueden desarrollarse, los filtros basados en fibra óptica son componentes claves usados extensivamente en comunicaciones por fibras ópticas, en multiplexado por división de longitud de onda (WDM), así como en espectroscopia y sensado óptico. Existen comercialmente dos tipos de filtros basados en fibras ópticas, los filtros de rejillas de Bragg (FBG) y filtros de rejillas de periodo largo (LPG) grabados en el núcleo de una fibra monomodal. Los filtros LPG pueden ser configurados como filtros pasabandas, usando dos LPG en serie para acoplar la luz resonante del núcleo de la fibra dentro del revestimiento y entonces

regresarla al núcleo. El núcleo de la fibra dentro de los LPG's es bloqueado para eliminar la luz resonante. En el caso de filtros FBG es necesario el uso de un circulador el cual es relativamente costoso.

En el área de sensores los filtros son usados debido a que la longitud de onda central exhibe cambios de acuerdo a cambios en los parámetros físicos de la fibra. Es posible entonces sensar temperatura, stress, presión, etc. Más aun, exponiendo la sección de la rejilla y combinando con algún polímero sensitivo a algún compuesto particular, es posible realizar bio-sensores. Es importante mencionar que el uso más importante de sensores basados en FBG se debe a que es posible realizar sensores distribuidos, ya que se puede usar una longitud de onda específica en puntos específicos y de esta forma poder monitorear varios puntos a la vez.

Aunque los dispositivos basados en FBG y LPG funcionan adecuadamente, la única desventaja es el costo requerido en grabar las rejillas en la fibra. Más aun, no es un proceso altamente repetitivo cuando se trata de obtener una longitud de onda central en particular. Una solución podría ser sintonizar el filtro, sin embargo el rango de sintonización que se puede obtener sin alterar significativamente la rejilla es mínimo. Esto es crítico en algunas aplicaciones donde el poder sintonizar en tiempo real es importante, además de que se reducen costos al poder elegir longitudes de onda diferentes con un solo dispositivo.

Anteriormente al trabajo que se presenta en esta tesis, se reporto en la literatura un filtro basado en interferencia multimodal empalmando una sección de fibra multimodal (MMF) con una longitud específica entre dos fibras monomodales (SMF). Aunque se demostró un filtro relativamente simple y económico, el único medio de sintonización era cambiando la longitud del segmento multimodal, lo que es impráctico para aplicaciones reales. También se aplico tensión al dispositivo, pero se demostró un rango

mínimo de sintonización de menos de 2 nanómetros. Por lo tanto, en este trabajo se demuestra un mecanismo novedoso para sintonizar filtros en fibra basados en interferencia multimodal, y su aplicación al desarrollo de un láser sintonizable y sensor de desplazamiento.

1.4. Objetivos

El objetivo de este trabajo es el diseño y fabricación de un filtro sintonizable basado en Interferencia Multimodal. Este fenómeno se presenta en las fibras ópticas multimodales, y da lugar a la generación de autoimágenes del campo óptico de entrada a lo largo de la fibra óptica a distancias específicas. Dicho fenómeno se presenta en fibras multimodales de índice escalonado, y por lo tanto existe una dependencia con respecto a la longitud de onda de las imágenes formadas.

El mecanismo de sintonización está basado en la introducción de un tubo capilar llenado con líquido de índice de refracción más alto que el del mismo tubo capilar. Una de las uniones SMF-MMF se deja sin empalmar y ambas fibras se introducen en el tubo capilar. Al variar la distancia entre estas fibras se cambia en tiempo real la longitud efectiva de la fibra multimodal (ya que el tubo capilar con líquido funciona como una guía multimodal) y de esta forma se modifica la respuesta en longitud de onda del filtro.

Una vez fabricado el filtro, se pretende demostrar su uso hacia sensado de desplazamientos. Esto es posible debido a que la longitud de onda central del filtro cambia al cambiar la separación entre las fibras SMF y MMF. Se pretende además aplicar dicho filtro para lograr sintonización en un láser basado en fibra. Para esto se fabricaría una cavidad en anillo, en la cual nuestro filtro pasabandas sintonizaría la emisión láser en tiempo real. Las ventajas serían obviamente el bajo costo y la simplicidad en la operación del filtro.

1.5. Organización de la Tesis

El presente documento se encuentra organizado de la siguiente manera. En el capítulo 1 se presenta el modelo conceptual del funcionamiento y la aplicación de las fibras ópticas en sensado y comunicaciones ópticas en base al fenómeno de la interferencia multimodal. En el capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos de las guías de onda multimodales, primero en guías de ondas planas y posteriormente cómo se llevo este principio a las guías de ondas con simetría circular, en particular a las fibras ópticas, haciendo una breve descripción de dos principios en particular, los cuales son la autoimagen generadas periódicamente en las guías de onda multimodales a longitudes determinadas y la interferencia multimodal característica propia en las guías de ondas multimodales que será presentada al final del capítulo 2. En el capítulo 3 se hablará del filtro sintonizable basado en interferencia multimodal, objetivo principal de esta tesis, empezando con una breve descripción de lo que es un filtro pasabandas, y las aplicaciones de esta, así como el mecanismo de sintonización del filtro sintonizable propuesto y el arreglo experimental que se utilizó para la realización del filtrado, finalmente, se presentan los resultados que se alcanzaron en la parte experimental y en las diferentes etapas de desarrollo de este dispositivo, presentando algunos compromisos y principales limitaciones del esquema de fabricación del filtro propuesto. En el capítulo 4 se muestran dos aplicaciones como sensores aplicando el fenómeno de interferencia multimodal en fibras ópticas, tales aplicaciones son, como sensor de nivel y como sensor de índice de refracción de líquidos, así como su aplicación práctica en el campo de la química o en ambientes peligrosos donde el uso de corriente eléctrica sea impráctico. En el capítulo 5 se dan las conclusiones y algunas propuestas para un trabajo futuro que surgen a partir de la tesis, tanto en aplicaciones de sensado como en comunicaciones ópticas.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

El incremento en el uso de dispositivos fotónicos, principalmente en comunicaciones ópticas, impone varios requisitos en el desempeño de los mismos. La mayoría de los dispositivos fotónicos para comunicaciones deben ser dispositivos compactos, insensibles a polarización, operar en anchos de banda grandes, tener bajas pérdidas, y que sean fáciles de fabricar. Los dispositivos basados en Interferencia Multimodal (MMI, por sus siglas en inglés) cumplen fácilmente con las características mencionadas, además de tener excelentes propiedades y ser relativamente fáciles de fabricar. Esto ha despertado un interés creciente en aplicaciones basadas en interferencia multimodal, principalmente en óptica integrada, y recientemente en fibras ópticas.

La razón por la cual interferencia multimodal en guías multimodales resulta atractiva se debe a la capacidad de generar autoimágenes. Esto es algo similar al efecto Talbot que se presenta cuando un objeto periódico es iluminado por luz coherente. En guías multimodales dichas autoimágenes se refieren a poder reproducir un perfil óptico, a la entrada de la guía multimodal, en imágenes simples o múltiples en intervalos periódicos a lo largo de la guía multimodal. Este efecto se ha utilizado en dispositivos integrados para desarrollar acopladores direccionales, divisores de $1 \times N$, en

interferómetros Mach-Zehnder, etc. Esto debido a la facilidad de realizar casi cualquier geometría, y los efectos electro-ópticos disponibles. En fibras ópticas existen ciertas limitaciones, pero existe la posibilidad de desarrollar ciertas aplicaciones.

En este capítulo se describen las estructuras MMI, así como algunos casos especiales en los cuales la longitud de la guía MMI puede ser reducida. Aunque este trabajo está basado en fibras ópticas, se usa una descripción basada en óptica integrada ya que proporciona una mejor visión del efecto de interferencia multimodal, además de obtener relaciones directas para las posiciones de las imágenes formadas. La descripción del efecto MMI en fibras es un poco más compleja como resultado de su simetría cilíndrica, y requiere del uso de herramientas numéricas para obtener valores específicos de posición de la imagen, aunque el tratamiento es similar al caso integrado.

2.1. Interferencia Multimodal en Guías Multimodales

La estructura central de un dispositivo basado en interferencia multimodal, es una guía de onda diseñada para soportar un número muy grande de modos, típicamente, ≥ 3 . Para acoplar la luz dentro de la guía multimodal y para extraerla de esta, típicamente se colocan guías de onda monomodales en la faceta de entrada y salida de la guía multimodal. Estos dispositivos son generalmente conocidos como acopladores basados en interferencia multimodal $N \times M$, donde N y M son los número de guías de ondas de entrada y de salidas respectivamente.

El concepto de autoimagen existe de manera general en estructuras multimodales tridimensionales. Sin embargo, en el caso de óptica integrada, típicamente las guías de onda son monomodales en la dirección transversal. Como las dimensiones laterales son más grandes que las dimensiones transversales, esto justifica asumir que los modos tienen el mismo comportamiento transversal en todas las partes de la guía de onda. Podemos

entonces hacer el análisis MMI usando estructuras bidimensionales (lateral y longitudinal) tal como el que se representa en la figura 2.1. La reducción de 3D a 2D como se muestra en la figura 2.1 puede hacerse usando varias técnicas, tales como el método del índice efectivo (EIM) o el método del índice espectral (SIM).

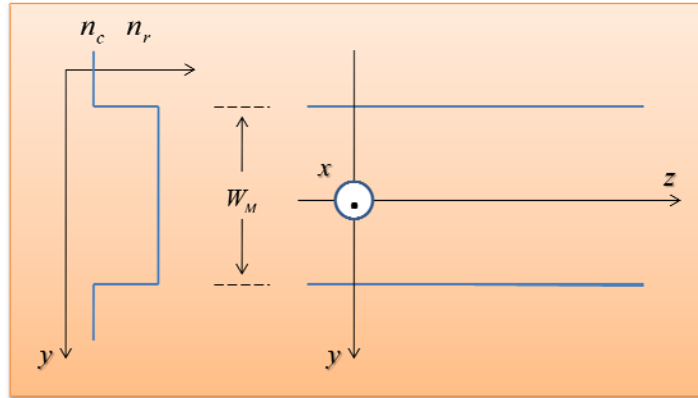


Fig. 2.1: Representación bidimensional de una guía multimodal de índice abrupto con índice (efectivo) lateral perfil izquierdo, y vista superior de las fronteras de la guía y el sistema coordenado, con n_c como el índice de refracción del revestimiento, n_r índice de refracción del modo fundamental y W_M ancho efectivo de la guía.

El análisis de dispositivos MMI se ha hecho usando diferentes métodos como son el método de rayos [7], método de propagación de haces (BPM) [8], y el de análisis de propagación de modos [9]. Aquí seguiremos el análisis de propagación de modos (MPA), para la formulación de imágenes periódicas, debido a que proporciona una forma fácil para la visualización de los modos guiados a través de la guía de onda multimodal.

2.1.1. Constantes de Propagación

Antes de iniciar el análisis MPA se obtendrán relaciones para la diferencia entre las constantes de propagación de los modos guiados, las cuales serán

empleadas en cálculos subsecuentes. Para esto, partiendo de la figura 2.1, tenemos una guía multimodal de índice abrupto con ancho W_M , de índice de refracción (efectivo) del modo fundamental n_r y revestimiento de índice de refracción (efectivo) n_c . La guía de onda soporta m modos laterales, como se muestra en la figura 2.2, con números de modos $\nu = 0, 1, \dots (m - 1)$ para una longitud de onda en el espacio libre λ_0 .

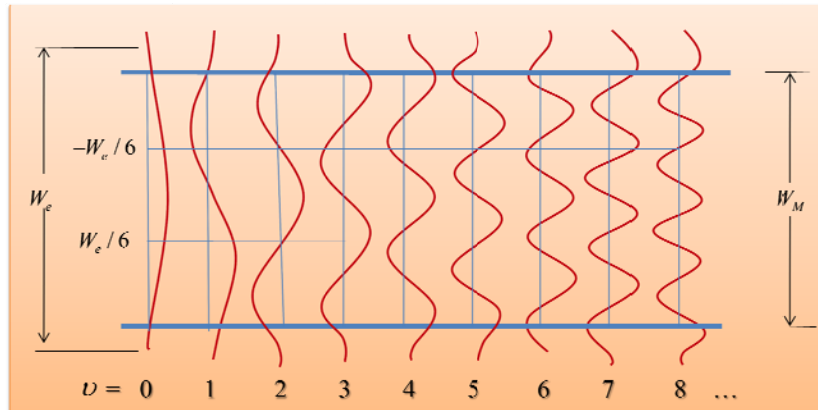


Fig. 2.2: Ejemplo de amplitud normalizada del perfil del campo lateral $\psi_\nu(y)$, correspondientes a los primeros modos guiados en la guía multimodal de índice abrupto [9, 10].

Ya que se trata de una guía de onda plana donde los modos se expandirán lateralmente, el número de onda $k_{y\nu}$ para los modos laterales y la constante de propagación β_ν están relacionados al índice efectivo n_r mediante la relación de dispersión

$$k_{y\nu}^2 + \beta_\nu^2 = k_0^2 n_r^2, \quad (2.1)$$

con

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \quad (2.2)$$

$$k_{y\nu} = \frac{(\nu + 1)\pi}{W_{e\nu}}, \quad (2.3)$$

donde el ancho efectivo W_{ev} de la guía multimodal, toma en consideración la profundidad de penetración lateral de cada modo del campo asociado con el cambio Goos-Hahnchen en las fronteras de las guías. Para las guías de ondas de alto contraste, la profundidad de penetración es muy pequeña, de manera que podemos considerar $W_{ev} \approx W_M$. En general, el ancho efectivo W_{ev} puede ser aproximado por el ancho efectivo W_{e0} correspondiente al modo fundamental, (el cual se denotara como W_e por simplicidad):

$$W_{ev} \cong W_e = W_M + \left(\frac{\lambda_0}{\pi}\right) \left(\frac{n_c}{n_r}\right)^{2\sigma} (n_r^2 - n_c^2)^{-(1/2)}, \quad (2.4)$$

donde $\sigma = 0$ para TE y $\sigma = 1$ para TM. Despejando para β_ν y usando la expansión binomial para la ecuación 2.1, y considerando $k_{y\nu}^2 \ll k_0^2 n_r^2$, en la ecuación 2.1. La constante de propagación β_ν se puede escribir de la siguiente manera.

$$\beta_\nu \cong k_0 n_r - \frac{(\nu + 1)^2 \pi \lambda_0}{4 n_r W_e^2}. \quad (2.5)$$

De esta manera se encuentra que la constante de propagación en una guía de onda multimodal muestra una dependencia casi cuadrática con respecto al número de modo ν . Definiendo a L_π como la longitud crítica de los dos modos de orden más bajo se obtiene la ecuación 2.6

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \cong \frac{4 n_r W_e^2}{3 \lambda_0}. \quad (2.6)$$

Por lo tanto, la diferencia entre la constante de propagación del modo de orden más bajo y los modos subsecuentes puede ser escrita de la siguiente manera

$$(\beta_0 - \beta_\nu) \cong \frac{\nu(\nu + 2)\pi}{3 L_\pi}. \quad (2.7)$$

2.1.2. Análisis de Propagación Modos Guiados

Considerando que un perfil de campo de entrada $\psi(y, 0)$ es acoplado en $z = 0$ y totalmente confinado dentro W_e como en la figura 2.3, este será descompuesto en un campo de distribución modal $\varphi_\nu(y)$ para todos los modos ν soportados por la guía multimodal. Podemos entonces representar esta distribución modal del campo de entrada mediante la siguiente ecuación

$$\Psi(y, 0) = \sum_{\nu} c_{\nu} \psi_{\nu}(y), \quad (2.8)$$

en la cual se debe entender que la sumatoria incluye tanto modos guiados, así como también los modos radiados. Los coeficientes de excitación del campo c_{ν} pueden ser estimados usando integrales de traslape

$$c_{\nu} = \frac{\int \Psi(y, 0) \psi_{\nu}(y) dy}{\sqrt{\int \psi_{\nu}^2(y) dy}}, \quad (2.9)$$

basadas en las relaciones ortogonales del campo.

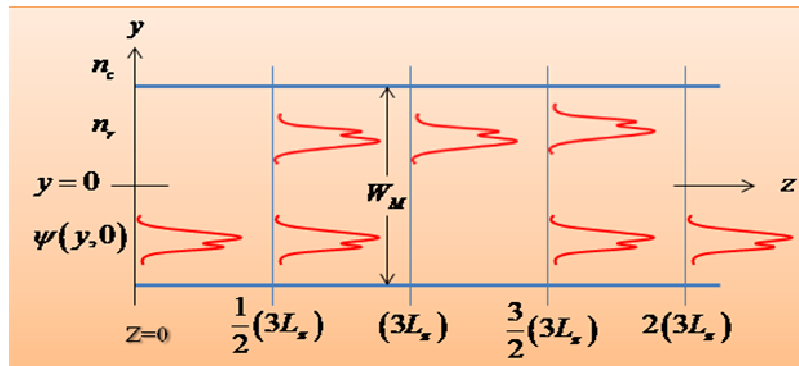


Fig. 2.3: Guía de onda multimodal mostrando el campo de entrada $\Psi(y, 0)$, una autoimagen invertida en $(3L_{\pi})$, una autoimagen directa en $2(3L_{\pi})$, e imágenes dobles en $\frac{1}{2}(3L_{\pi})$ y $\frac{3}{2}(3L_{\pi})$ [9, 10].

Si el “espectro espacial” del campo de entrada $\Psi(y, 0)$ es lo suficientemente estrecho para no excitar los modos no guiados (una

condición satisfecha para todas las aplicaciones prácticas), este debe ser descompuesto en solo modos guiados

$$\Psi(y, 0) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \psi_v(y). \quad (2.10)$$

El perfil del campo a una distancia z puede ser entonces escrito como una superposición de todos los modos guiados de la distribución de campo

$$\Psi(y, z) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \psi_v(y) \exp[j(\omega t - \beta_v z)]. \quad (2.11)$$

Tomando la fase del modo fundamental como un factor común decreciente fuera de la suma y asumiendo dependencia en tiempo $\exp(j\omega t)$ implícita en lo sucesivo, el perfil de campo $\Psi(y, z)$ llega a ser

$$\Psi(y, z) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \psi_v(y) \exp[j(\beta_0 - \beta_v)z]. \quad (2.12)$$

Entonces se puede hallar una expresión usada para el perfil de campo a una distancia $z = L$ substituyendo la ecuación 2.7 en la 2.12

$$\Psi(y, L) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \psi_v(y) \exp\left[j \frac{v(v+2)\pi}{3L\pi} L\right]. \quad (2.13)$$

La forma del campo $\Psi(y, L)$, y consecuentemente los tipos de imágenes formados, serán determinados por el factor de confinamiento del campo de entrada c_v y las propiedades del factor de fase del modo

$$\exp\left[j \frac{v(v+2)\pi}{3L\pi} L\right]. \quad (2.14)$$

Por lo tanto, veremos que bajo ciertas circunstancias, el perfil del campo $\Psi(y, L)$ será una reproducción (autoimagen) del campo de entrada $\Psi(y, 0)$. De acuerdo a las condiciones de excitación del campo de entrada llamamos *interferencia general* al mecanismo de autoimagen el cual es independiente

de la excitación modal, e *interferencia restrictiva* a aquellos que son obtenidos excitando solo ciertos modos.

Las siguientes dos propiedades que a continuación se muestran, serán útiles para realizar las deducciones subsecuentes:

$$v(v+2) = \begin{cases} \text{par para } v \text{ par} \\ \text{impar para } v \text{ impar} \end{cases} \quad (2.15)$$

y

$$\psi_v(-y) = \begin{cases} \psi_v(y) \text{ para } v \text{ par} \\ -\psi_v(y) \text{ para } v \text{ impar} \end{cases} \quad (2.16)$$

siendo este ultimo una consecuencia de la simetría estructural con respecto al plano $y = 0$. (fig. 2.2 y 2.3) [9].

2.2. Interferencia General

En esta sección cubriremos el mecanismo de interferencia el cual es independiente de la excitación modal. Como se menciono antes, este corresponde al caso de interferencia general ya que no estamos planteando ninguna restricción en los coeficientes c_v . Analizaremos la periodicidad de la ecuación 2.14, y mostraremos que podemos obtener imágenes simples o múltiples del campo de entrada. Iniciaremos analizando el caso para imágenes simples.

2.2.1. Imagen Simple

Analizando la ecuación 2.13, podemos ver que $\Psi(y, L)$ será una imagen del campo de entrada $\Psi(y, 0)$ si

$$\exp\left[j\frac{v(v+2)\pi}{3L_\pi}L\right] = 1 \quad \text{o} \quad (-1)^v. \quad (2.17)$$

La primera condición significa que los cambios de fase de todos los modos a lo largo de L deben diferir por múltiplos enteros de 2π . Esto significa que todos los modos guiados interfieren con la misma fase relativa como en $z = 0$; por lo que las imágenes son así una réplica directa del campo de entrada. La segunda condición significa que los cambios de fase deben ser alternativamente múltiplos pares o impares de π . En este caso, los modos pares estarán en fase y los modos impares fuera de fase o en desfase. Como resultado de la simetría impar establecida en la ecuación 2.16, la interferencia produce una imagen invertida con respecto al plano $y = 0$.

Tomando en cuenta la ecuación 2.15, es evidente que la primera y la segunda condición en la ecuación 2.17 se cumplirán en

$$L = p(3L_\pi) \quad \text{con } p = 0, 1, 2, \dots \quad (2.18)$$

para p par y p impar, respectivamente. El factor p denota la naturaleza periódica de las imágenes a lo largo de la guía de onda multimodal. Por lo tanto, las autoimágenes directas e invertidas del campo de entrada $\Psi(y, 0)$ serán formadas por interferencia general a distancias z que son múltiplos par o impar respectivamente de la longitud ($3L_\pi$) como se muestra en la figura 2.3. Debe ser claro en este punto que las autoimágenes directas e invertidas pueden ser respectivamente explotadas en acopladores 2x2 donde la luz acoplada se transfiera a la guía opuesta, o se mantenga sobre la misma guía de entrada.

2.2.2. Imágenes Múltiples

Como resultado de la interferencia entre los modos propagándose en la guía multimodal, es posible obtener imágenes múltiples. Consideremos primero las imágenes obtenidas a mitad de la trayectoria entre las posiciones de las imágenes directas y las imágenes invertidas, i.e., a distancias

$$L = \frac{p}{2}(3L_\pi) \quad \text{con } p = 1, 3, 5, \dots \quad (2.19)$$

El campo total a esta longitud se encuentra sustituyendo la ecuación 2.19 en la 2.13

$$\Psi\left(y, \frac{p}{2} 3L_\pi\right) = \sum_{\nu=0}^{m-1} c_\nu \psi_\nu(y) \exp\left[j\nu(\nu+2)p\left(\frac{\pi}{2}\right)L\right], \quad (2.20)$$

con p entero impar. Tomando en consideración la propiedad de la ecuación 2.15 y las condiciones de simetría de los modos del campo de la ecuación 2.16, la ecuación 2.20 puede ser escrita como

$$\begin{aligned} \Psi\left(y, \frac{p}{2} 3L_\pi\right) &= \sum_{\nu \text{ par}} c_\nu \psi_\nu(y) + \sum_{\nu \text{ impar}} (-j)^\nu c_\nu \psi_\nu(y) \\ &= \frac{1 + (-j)^p}{2} \Psi(y, 0) + \frac{1 - (-j)^p}{2} \Psi(-y, 0). \end{aligned} \quad (2.21)$$

La ecuación anterior representa un par de imágenes de $\Psi(y, 0)$ en cuadratura con las amplitudes $1/\sqrt{2}$, a distancias $z = \frac{1}{2}(3L_\pi), \frac{3}{2}(3L_\pi), \dots$ como se muestra en la figura 2.3. Estas dos imágenes repetidas pueden ser usadas para realizar acopladores de 3 dB usando dispositivos MMI de 2x2 [9]. Cabe destacar que es posible calcular las posiciones de imágenes múltiples triples, cuádruples, etc. Sin embargo, el obtener una relación general queda fuera del enfoque de la tesis.

2.3. Interferencia Restrictiva

Hasta el momento no se han colocado restricciones en la excitación de entrada, pero en esta sección investigamos como al excitar selectivamente solamente algunos de los modos guiados esto revela múltiples interesantes de $\nu(\nu+2)$, los cuales permiten nuevos mecanismos de interferencia a través de periodicidades cortas del factor de fase de los modos descrito en la ecuación 2.14. Como en el caso de interferencia general podemos obtener imágenes simples y múltiples. Se contemplan dos situaciones especiales, denominadas interferencia par e interferencia simétrica.

2.3.1. Interferencia Par

El análisis empieza notando que

$$\text{mod}_3[\nu(\nu + 2)] = 0 \quad \text{para } \nu \neq 2, 5, 8, \dots, \quad (2.22)$$

es evidente que la longitud periódica del factor de fase de los modos en la ecuación 2.14 será reducida tres veces si

$$c_\nu = 0 \quad \text{para } \nu = 2, 5, 8, \dots, \quad (2.23)$$

como se muestra en [12] y [13], ahora se obtienen solo imágenes del campo de entrada $\Psi(y, 0)$ en:

$$L = p(L_\pi) \quad \text{con } p = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.24)$$

siempre que los modos $\nu = 2, 5, 8, \dots$ no sean excitados en la guía de onda multimodal. Por la misma razón se pueden encontrar imágenes dobles en $(p/2)L_\pi$ con p impar. Basado en simulaciones numéricas, N imágenes se formaran a la distancia

$$L = \frac{p}{N}(L_\pi), \quad (2.25)$$

donde $p \geq 0$ y $N \geq 1$ son enteros que no tienen divisor común.

Una forma simple de alcanzar la excitación selectiva de la ecuación 2.23 es excitando con un campo de entrada simétrico $\Psi(y, 0)$ (por ejemplo, un haz Gaussiano) en $y = \pm W_e/6$. En esta posición, los modos $\nu = 2, 5, 8, \dots$ presentan un cero con simetría impar, como se muestra en la figura 2.2. Las integrales de traslape en la ecuación 2.9 entre el campo de entrada (simétrico) y el campo modal (asimétrico) desaparecerán y por lo tanto $c_\nu = 0$ para $\nu = 2, 5, 8, \dots$. Obviamente, el número de guías de ondas de entrada en este caso se limita a dos.

Cuando se cumple con la excitación selectiva de la ecuación 2.23 los modos que contribuyen a las imágenes están relacionados por pares, i.e. los modos pares $0 - 1, 3 - 4, 6 - 7, \dots$ tienen propiedades relativamente similares. Por lo tanto este mecanismo es llamado *interferencia par*.

2.3.2. Interferencia Simétrica

Como en el caso de la interferencia par, empezamos notando que

$$\text{mod}_4[\nu(\nu + 2)] = 0 \quad \text{para } \nu \text{ par} \quad (2.26)$$

es evidente que la longitud periódica del factor de fase de los modos en la ecuación 2.14 será reducida cuatro veces si

$$c_\nu = 0 \quad \text{para } \nu = 1, 3, 5, \dots \quad (2.27)$$

De esta manera, serán obtenidas imágenes únicas del campo de entrada $\Psi(y, 0)$ en longitudes definidas por:

$$L = p \left(\frac{3}{4} L_\pi \right) \quad \text{con } p = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.28)$$

si los modos impares en la guía multimodal no son excitados. Esta condición se logra acoplando un campo simétrico en el centro de la guía de onda multimodal. La imagen se obtiene por combinaciones lineales de los modos simétricos (pares) y el mecanismo es llamado *Interferencia simétrica*.

En general, N imágenes son obtenidas a distancias dadas por la siguiente ecuación

$$L = \frac{p}{N} \left(\frac{3}{4} L_\pi \right), \quad (2.29)$$

con N imágenes del campo de entrada $\Psi(y, 0)$ localizados simétricamente a lo largo del eje y con igual espaciamento W_e/N [9].

El aspecto importante en interferencia restrictiva es que la longitud de los dispositivos es reducida significativamente, manteniendo las propiedades de formación de imágenes como su contraparte de interferencia general.

2.4. Interferencia Multimodal en Fibras Ópticas

De acuerdo con el concepto de las guías de ondas ópticas, un campo propagándose dentro de una fibra de índice abrupto puede expresarse como

una superposición de los modos guiados de la fibra. Como en la ecuación 2.8, esta superposición (con los mismos coeficientes) también se aplican para los campos magnéticos en las fibras. Ya que los campos son ortogonales, los coeficientes pueden ser determinados usando la ecuación 2.9. Una vez que los coeficientes de los modos guiados son encontrados, el perfil del campo a una distancia a lo largo de la longitud de la fibra puede ser encontrado usando la ecuación 2.11.

Aunque el análisis exacto debe realizarse con todos los modos que pueden propagarse en la guía multimodal, es posible realizar una aproximación empleando los dos primeros modos. Considérese entonces un perfil de entrada Gaussiano, acoplado al núcleo de una fibra multimodal. De esta manera, es posible descomponer el campo de entrada en un juego de funciones ortogonales que representan las amplitudes complejas de los modos guiados. De la ecuación 2.12, solo los primeros dos modos dominantes se incluirán en el siguiente análisis.

$$\varphi(r, z) = \exp(j\beta_{inside,0}z) \{c_0\varphi_0(r) + c_1\varphi_1(r)\exp[j(\beta_{inside,1} - \beta_{inside,0})z]\}, \quad (2.30)$$

donde r considera la geometría cilíndrica de la guía, c_0 y c_1 son constantes que representan los coeficientes del campo de entrada para los primeros dos modos definidos por las integrales de traslape (ecuación 2.9). La reimagen única del campo de entrada aparece en longitudes específicas dentro de la fibra multimodal donde $|\varphi(r, z)| = |\varphi(r, 0)|$. Esta condición fuerza a la unidad al término exponencial de la ecuación 2.30 y sucede en longitudes periódicas a lo largo de z considerada como el eje de la fibra óptica. Por lo tanto obtenemos la siguiente ecuación para las siguientes reimágenes en fibras ópticas.

$$z_m(\lambda) = \frac{m\pi/2}{\beta_{inside,0}(\lambda) - \beta_{inside,1}(\lambda)}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.31)$$

que es equivalente a la ecuación 2.6 para los modos guiados en una guía de onda plana. Aquí $\beta_{inside,0}$ y $\beta_{inside,1}$ representan la constante de propagación longitudinal dentro de la fibra multimodal para cada modo. Estos términos pueden ser determinados usando la aproximación guiado débil, aplicando las dimensiones físicas y las propiedades del material de la fibra multimodal a la relación de dispersión que caracteriza la propagación de luz dentro de la fibra óptica. Considerando a los modos con polarización lineal, la relación de dispersión para los primeros dos modos en la fibra óptica, como en [5], pueden ser descritos como

$$\frac{J_0(u)}{uJ_1(u)} = \frac{\kappa_0(w)}{w\kappa_1(w)}, \quad (2.32)$$

$$\frac{J_1(u)}{uJ_0(u)} = \frac{-\kappa_1(w)}{w\kappa_0(w)}, \quad (2.33)$$

donde $u = a\sqrt{k_0^2 n_{core}^2 - \beta_{inside}^2}$ y $w = a\sqrt{\beta_{inside}^2 - k_0^2 n_{clad}^2}$. Estas ecuaciones proveen las constantes de propagación transversal asociada con cada modo particular, de esta manera permite que el índice efectivo y la constante de propagación longitudinal asociada con cada modo particular puedan ser determinados también [11]. Una vez calculadas las constantes de propagación podemos entonces encontrar la distancia a la cual se produce la imagen exacta del campo de entrada.

Es claro que no se obtiene una relación tan simple como en el caso integrado. Sin embargo, podemos notar cierta similitud con el caso de interferencia simétrica en guías integradas. Esto debido a que cuando se empalma la SMF a la MMF, se está acoplando un campo simétrico a la MMF. Como se demostrara en el capítulo siguiente, esto fue corroborado experimentalmente, y la distancia a la cual las autoimágenes son formadas en las fibras multimodales, pueden ser fácilmente calculadas empleando la ecuación 2.29. En el siguiente capítulo estos conceptos son usados para diseñar y fabricar un filtro sintonizable con estructura SMF-MMF-SMF.

Capítulo 3

Filtro Sintonizable Basado en Interferencia Multimodal

Un filtro óptico puede definirse como aquel dispositivo o medio que permite la transmisión de ciertas longitudes de onda, ya sea suprimiendo o atenuando las longitudes de onda restantes. Existen diferentes mecanismos de filtrado los cuales pueden ser por reflexión, o por absorción o esparcimiento (extrayendo) del espectro no deseado. Dependiendo del rango de frecuencias sin filtrar estos se clasifican como paso alto o paso bajo si el rango sin filtrar con respecto a una frecuencia de corte determinada es mayor o menor respectivamente. En los filtros de paso de banda se filtran las frecuencias por encima y por debajo de ciertos límites.

En el desarrollo de dichos filtros se han empleado diferentes configuraciones y materiales. Sin embargo, los filtros basados en fibra y en línea son de interés particular para comunicaciones ópticas y sensado. Más importante aun es que el filtro sea sintonizable, es decir, que podamos elegir la frecuencia o longitud de onda central del filtro. En sistemas de comunicación WDM esto ayuda a reducir costos, ya que un solo filtro puede ser usado para elegir la frecuencia deseada. En aplicaciones de sensado, esto permite interrogar cada sensor por separado en un sistema distribuido.

En este capítulo se presenta el diseño y fabricación de un filtro sintonizable basado en interferencia multimodal en fibras ópticas. La sintonización se realiza usando un tubo capilar (ferrule) que permite extender la longitud efectiva de la MMF. Al mismo tiempo el uso de una fibra especial sin núcleo, permite incrementar el contraste de índice entre núcleo y revestimiento, lo que se refleja en un contraste más alto del filtro.

3.1. Filtro basado en interferencia multimodal

De acuerdo al análisis mostrado en el capítulo 2, al empalmar un segmento de MMF entre dos SMF, como se muestra en la Figura 3.1, es posible obtener un dispositivo el cual va a formar una imagen del campo óptico de entrada a una distancia determinada por los parámetros de la fibra multimodal. En forma breve lo que sucede es que la señal de entrada de la SMF excita los modos que pueden ser guiados en la MMF, y la interferencia entre estos modos conforme se propagan a lo largo de la MMF dará lugar a la formación de imágenes en intervalos periódicos del campo de entrada a lo largo de la MMF.

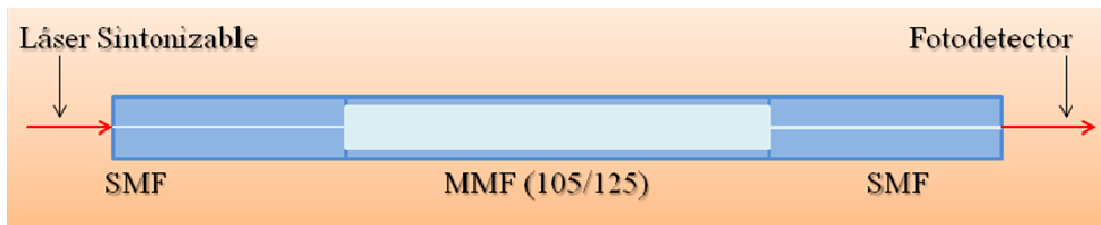


Fig. 3.1: Esquema del filtro basado en interferencia multimodal (SMF-MMF-SMF).

En la figura 3.1 se muestra el caso de una MMF con un núcleo de 105 μm , y revestimiento de 125 μm . La formación de estas autoimágenes pueden ser observadas usando el método de propagación de haces por diferencias finitas (FD-BPM) usando el software BeamPROP de la compañía RSoft Inc.

Como se muestra en la figura 3.2, al incrementar la longitud de la fibra multimodal, podemos observar la formación periódica de imágenes del campo de entrada. Cabe destacar que la primera y tercera imagen son conocidas como pseudoimágenes y resultan del aspecto simétrico de la propagación. La imagen real es la cuarta imagen formada a una distancia aproximada de 44.2 mm.

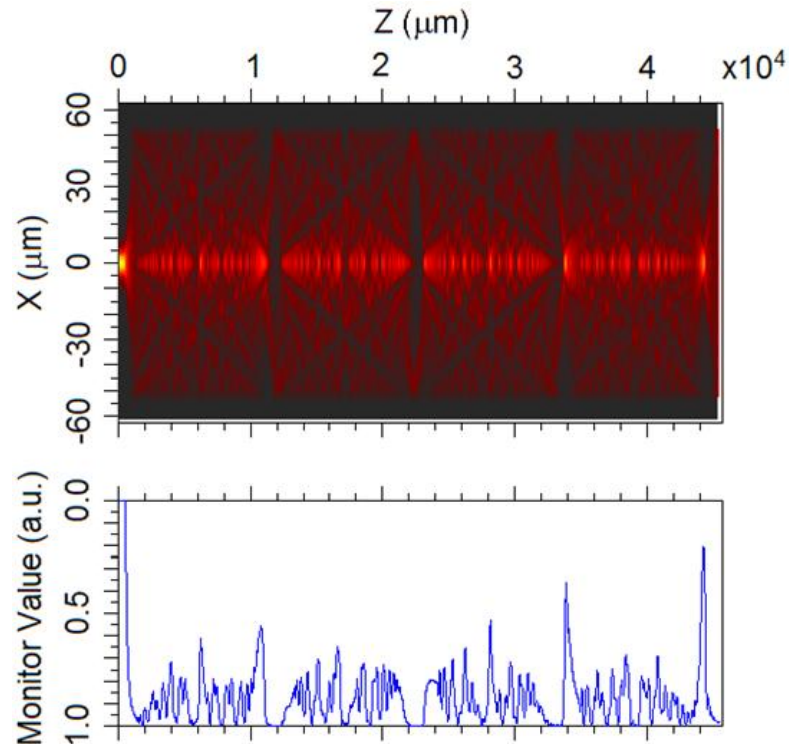


Fig. 3.2: Efecto de interferencia multimodal en un arreglo de SMF-MMF(105/125)-SMF.

Las posiciones exactas de las imágenes son calculadas entonces empleando la ecuación 3.1 para interferencia simétrica multimodal como se demostró en el capítulo 2

$$L = p \left(\frac{3L_{\pi}}{4} \right) \text{ con } p = 0, 1, 2, \dots, \quad (3.1)$$

donde p corresponde al número de imagen en la fibra multimodal y L_{π} es la longitud crítica definida por la siguiente ecuación

$$L_{\pi} \cong \frac{4n_{MMF}W_{MMF}^2}{3\lambda_0}, \quad (3.2)$$

donde n_{MMF} y W_{MMF} corresponden al índice de refracción y al diámetro del núcleo de la fibra multimodal respectivamente, con λ_0 como la longitud de onda en el espacio libre.

Podemos ver que en la ecuación 3.2 la longitud crítica (L_{π}) es directamente proporcional al índice de refracción y al cuadrado del ancho efectivo de la fibra multimodal, e inversamente proporcional a la longitud de onda. De esta manera a mayor longitud de onda menor es la longitud de la MMF para encontrar la imagen, y viceversa.

En el caso de la figura 3.2 la longitud de onda se mantuvo constante ($\lambda=1.55 \mu\text{m}$) y se incremento la longitud de la MMF para encontrar las imágenes a esta longitud de onda. Sin embargo, usando la ecuación 3.2 es posible calcular la longitud de MMF necesaria para la longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$, y empalmar esta MMF entre dos segmentos de SMF como en el esquema mostrado en la figura 3.1. Obviamente cuando se acopla luz a una longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$ en la SMF de entrada, se producirá una imagen al final de la MMF y esta se acoplara en la SMF de salida. Sin embargo, y de acuerdo a la ecuación 3.2, si se usa una longitud de onda diferente esta producirá una imagen a una distancia diferente, y por lo tanto la energía acoplada a la SMF de salida será menor. Este efecto obviamente puede usarse para filtrar longitudes de onda diferentes a la longitud de onda pico, y por lo tanto funciona como un filtro pasabanda.

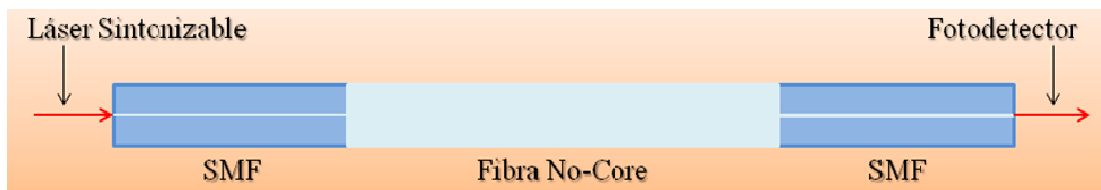


Fig. 3.3: Esquema de un filtro pasabandas basado en interferencia multimodal con la longitud de la MMF constante.

El filtro fue ensamblado usando una fibra especial denominada “no-core” o sin núcleo, como se muestra en la figura 3.3. Esta fibra es básicamente una fibra monomodal SMF-28 pero sin el núcleo. De esta forma cuando se remueve la cubierta de 250 μm tenemos entonces una MMF con núcleo de 125 μm de diámetro, y cuyo revestimiento es el aire. Este alto contraste de índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento ayuda a mejorar el contraste del filtro [14].

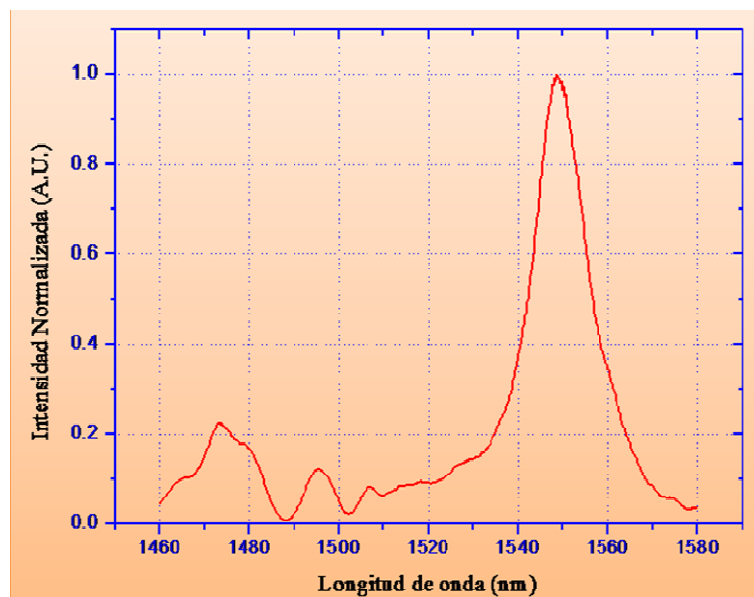


Fig. 3.4: Respuesta a la variación de longitudes de onda del filtro con longitud de la MMF constante.

La respuesta experimental (intensidad transmitida) del filtro al acoplar un rango de longitudes de onda (1460-1580 nm) es mostrada en la figura 3.4. Como se puede observar se obtiene un máximo de transmisión alrededor de 1.55 μm , y conforme nos movemos de este valor la intensidad decrece. El ancho de banda del filtro es de aproximadamente 14 nm, con una extinción de ~ 10 dB fuera de ± 20 nm de la longitud de onda central y ~ 12 dB fuera de ± 40 nm de la longitud de onda central. Es obvio que en este filtro la longitud

de onda central es fija, y hasta la fecha no se ha reportado un mecanismo de sintonización efectivo.

3.2. Mecanismo de sintonización

Una forma de sintonizar filtros basados en fibra es estirando cuidadosamente el arreglo empalmado de fibras, básicamente aplicar tensión y lograr un cambio de índice de refracción. Este mecanismo de sintonización aparte de ser bastante delicado, solo permite un rango muy pequeño de sintonización. En el caso del filtro mostrado en la figura 3.3 se logra sintonizar poco menos de 1.2 nm (Figura 3.5) lo cual lo hace inadecuado para aplicaciones en donde se requiera de manera constante un rango mayor de sintonización.

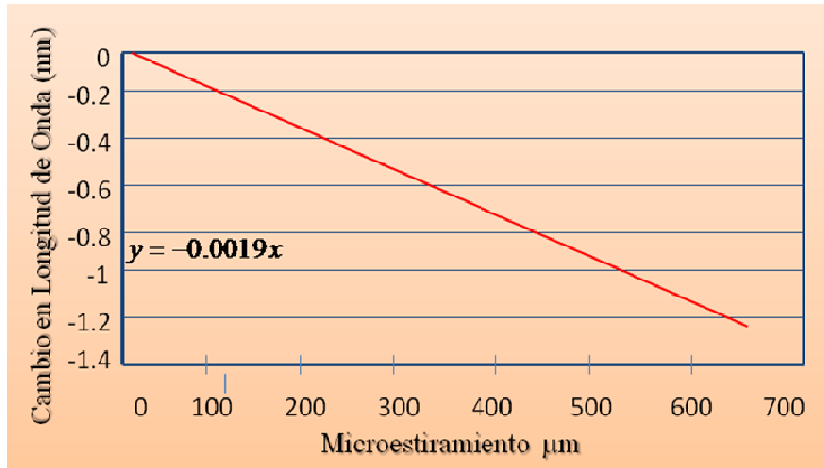


Fig. 3.5: Rango de sintonización mediante el estiramiento de las fibras ópticas [7].

Analizando la ecuación 3.2, podemos observar que la longitud de onda central del filtro depende de forma inversamente proporcional a la longitud crítica, como se muestra en la ecuación 3.3

$$\lambda_0 \cong \frac{4n_{MMF}W_{MMF}^2}{3L\pi}, \quad (3.3)$$

Como podemos darnos cuenta en las ecuaciones anteriores, el término en el numerador permanece constante y es superado ligeramente en órdenes de magnitud por el término en el denominador, pero al tratarse de magnitudes muy pequeñas, podemos ver que para grandes cambios en la longitud de onda requerido, el cambio de la longitud efectiva de la fibra multimodal es pequeño. Esto es una ventaja si se trata de diseñar dispositivo para aplicaciones donde el tamaño pequeño o pequeñas variaciones de la longitud sean necesarias, ya sea para tener una mejor estabilidad o para lograr una respuesta más eficiente.

Al graficar la longitud de onda central con respecto al cambio de la distancia crítica (Ec. 3.3), podemos observar que la sintonización es básicamente infinita si es posible extender la longitud de la MMF. En la figura 3.6 mostramos únicamente un rango de 100 nm. El principal reto por supuesto es lograr extender en forma continua dicha longitud de MMF.

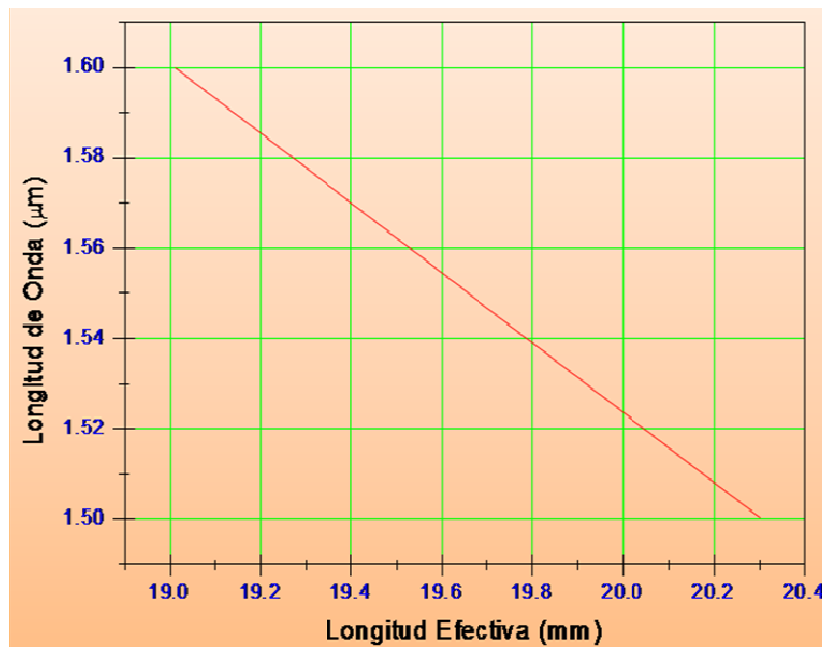


Fig. 3.6: Grafica que muestra la razón de cambio de la longitud efectiva de la fibra multimodal, contra la longitud de onda.

Nuestra propuesta para cambiar la longitud efectiva de la MMF es relativamente simple, y se muestra en la figura 3.7. El componente central es un tubo capilar de vidrio ($n=1.44$) cuyo diámetro interior de $125\ \mu\text{m}$. Esto permite abrir uno de los empalmes SMF-MMF y poder insertar ambas fibras en el capilar. Al llenar el capilar con un líquido de índice de refracción más alto que el del tubo capilar, se forma una guía de onda multimodal con núcleo líquido de $125\ \mu\text{m}$ de diámetro. Por lo tanto podemos incrementar la separación entre la SMF y la MMF, y la luz se mantendrá guiada dentro del tubo capilar. De esta forma incrementamos la longitud efectiva de nuestra MMF, y por ende sintonizamos la longitud de onda central del filtro. Una ventaja adicional del capilar es que las fibras se alinean automáticamente, algo que como veremos más adelante juega un papel crítico en este dispositivo.

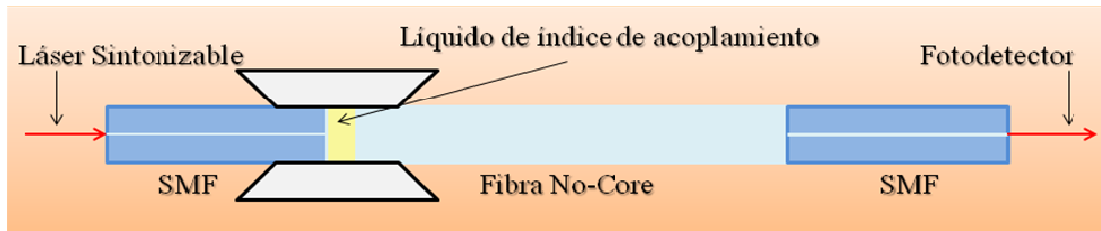


Fig. 3.7: Esquema del filtro sintonizable propuesto basado en interferencia multimodal.

La parte importante es hacer que el líquido sirva como una guía multimodal variable, y esto lo logramos utilizando un líquido con alto índice de refracción. Sin embargo no hay que olvidar que la fibra No-Core no tiene revestimiento, y por lo tanto el exponer la fibra al líquido podría ser contraproducente ya que al probar con índices de refracción de valores más grande al de dicha fibra, la luz podría guiarse por los costados de la fibra, resultando esto en pérdidas, ya que esta no se guiaría al 100% por el núcleo de la No-Core. De esta manera, la solución es empalmar una MMF 105/125 cuya longitud es

calculada de modo que la primera imagen se forme al final de este segmento, y a esta se empalma la fibra No-Core cuya longitud se calcula de manera que se formen tres imágenes, a manera tener el segmento de fibra multimodal correspondiente a la cuarta imagen. Esto se muestra en la figura 3.8.

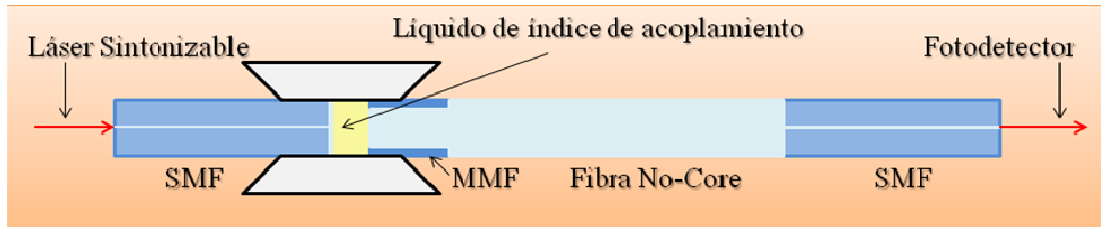


Fig. 3.8: Esquema del filtro sintonizable basado en interferencia multimodal utilizando MMF 105/125 y MMF no-core.

Es importante resaltar que como las fibras tienen núcleos de diámetro diferente, el cálculo de la distancia a la cual las imágenes se formaran es diferente. Debido a la cubierta de la MMF 105/125 podemos usar líquido con índice de refracción alto, hasta de 1.64.

3.3. Arreglo Experimental

La caracterización del filtro se llevo a cabo usando el arreglo experimental mostrado en la figura 3.9. Nuestra fuente de luz es un laser sintonizable Hewlett Packard, Modelo 8164A con un rango de sintonización de 1460 a 1580 nm. La salida del laser sintonizable se acopla al filtro, y la intensidad transmitida a través del filtro se mide con un fotodetector marca Newport (modelo 818-IR) el cual está conectado a un multímetro marca Keithley modelo 2000. La captura de las características del filtro fue controladora por computadora usando el software LabVIEW.

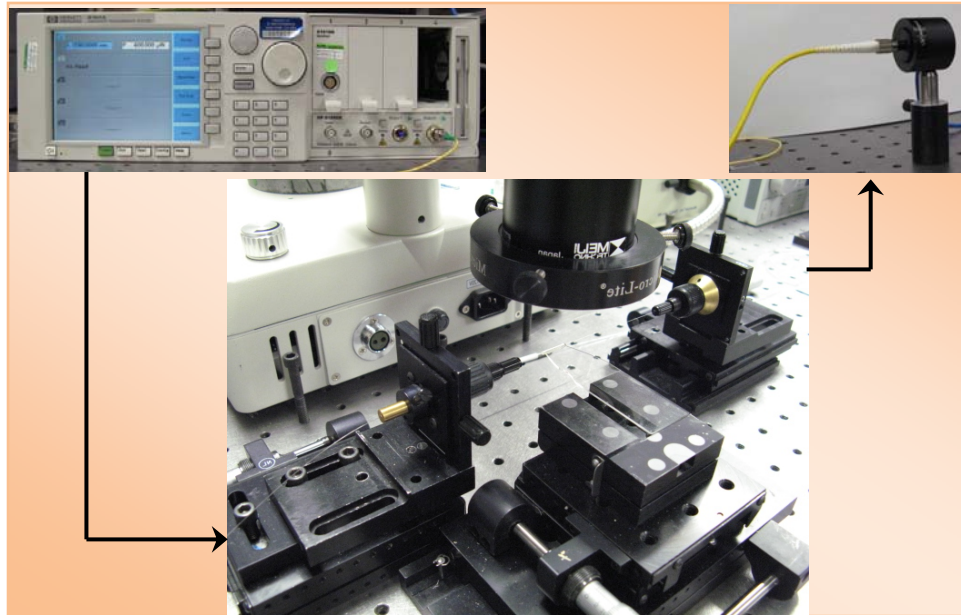


Fig. 3.9: Arreglo experimental para la caracterización del filtro sintonizable.

El arreglo del filtro sintonizable se monto en tres bases de traslación con desplazamiento micrométrico donde dos de ellas sujetan un posicionador para la fibra óptica de entrada y otro posicionador para la fibra óptica de salida. En tales posicionadores van montadas unas guías de metal, que son unos sujetadores de fibra, los cuales servirán como guía a las fibras ópticas, además que nos ayudan a tener un mejor alineamiento entre las fibras. El tercer posicionador sirve para montar el tubo capilar. El tubo capilar se llenaba de líquido por capilaridad y con la ayuda de un microscopio podíamos observar que en el interior no hubiera ningún tipo de partícula o suciedad que pudiera meter perdidas al filtro. De igual manera se observaba que ambas facetas de las fibras estuvieran limpias antes de introducirlas al tubo capilar.

En este experimento, la sintonización se realizó variando la longitud efectiva de la fibra multimodal, ya sea de manera creciente o decreciente. Se introdujo por uno de los extremos del tubo capilar lleno de un líquido solo 4mm de la fibra multimodal y se mantiene fija. Por el otro extremo del mismo

tubo capilar se coloca una sección de fibra monomodal que servirá para conectar con la fuente de entrada. Cada que se modifica la separación entre SMF y MMF (No-Core), se hace un escaneo con el laser sintonizable en todo el rango disponible.

3.4. Resultados Experimentales

Para obtener los mejores resultados, se realizaron múltiples escaneos en un rango de longitudes de onda entre 1460nm a 1580 nm, esto con un laser sintonizable a 1 mW de potencia, diseñando el filtro para una longitud de onda máxima que caiga dentro del rango de longitudes de onda de nuestro espectro de entrada, preferentemente entre longitudes de onda de 1550 nm y 1560 nm, lo que conlleva a obtener para estos valores de longitud de onda, una longitud efectiva de la fibra multimodal entre 54.6 mm y 54.2 mm respectivamente (ver tabla 3.1 para más detalle). Adicionalmente estos escaneos se realizaron con los líquidos de índice de refracción diferentes contenidos dentro del tubo capilar que van desde 1.40 como índice de refracción mínimo, hasta 1.64 como índice de refracción máximo, a pasos de 0.02. Cabe destacar que se tienen dos extremos, el índice de 1.64 que nos da una guía bien definida en el ferrule, y el índice 1.40 que en principio no debería guiar ya que es más bajo que el índice del capilar. Sin embargo, y contrario a lo que se esperaba, con el índice de 1.40 obtuvimos un mejor contraste y un mejor ancho de banda del pico de transmisión del filtro en análisis. Esto puede atribuirse a la pérdida de algunos modos de orden superior, con lo cual se obtiene una mejor imagen.

Para un arreglo de un filtro en particular, se utilizo fibra monomodal SMF 28 con núcleo de 9 μm de diámetro, fibra óptica multimodal 105/125 para la primera imagen y fibra multimodal especial no-core cuyo índice de refracción

es 1.46, además del líquido de índice de refracción de 1.4 y del tubo capilar de 15 mm de longitud con índice de refracción de 1.44.

Tabla 3.1: Longitudes de las MMF para la longitud total del filtro.

	105/125 1 ^{era} imagen (mm)	125 no-core 3 ^{era} imagen (mm)	L _{total} MMF (mm)
$\lambda = 1550 \text{ nm}$	10.395	44.198	54.594
$\lambda = 1555 \text{ nm}$	10.362	44.056	54.418
$\lambda = 1560 \text{ nm}$	10.328	43.915	54.244

El escaneo para el rango de longitudes de onda mencionado, se inicia desde que las facetas de las fibras se encuentran juntas dentro del tubo capilar, es decir, el incremento de la longitud efectiva de la fibra multimodal es 0 μm . De esta manera obtenemos el primer pico de transmisión correspondiente a la longitud de onda máxima para la que fue diseñado el filtro. Posteriormente se hace un desplazamiento de 100 μm entre las facetas de las fibras ópticas con la ayuda del tornillo micrométrico de las bases de traslación, para tener mayor exactitud en el movimiento, manteniendo fija la fibra multimodal y desplazando lentamente la fibra monomodal. Hacemos nuevamente el escaneo de longitudes de onda para obtener el segundo pico de transmisión.

Siguiendo esta misma secuencia se obtuvieron los otros picos de transmisión correspondientes a longitudes de onda más bajas, haciendo incrementos de 100 μm en la longitud efectiva de la fibra multimodal, llegando a tener un incremento de 1000 μm entre la faceta de la fibra monomodal y la faceta de la fibra multimodal. Con este incremento en la longitud efectiva se obtuvo un rango de sintonización de aproximadamente 25 nm como se muestra en la gráfica de longitud de onda contra

desplazamiento de la figura 3.10. Así mismo, podemos ir de longitudes de onda bajas, a longitudes de onda altas, disminuyendo la separación entre la faceta de las fibras dentro del tubo capilar hasta llegar a 0 μm . De esta manera, los picos de transmisión usando líquido con índice de refracción de 1.64, mostraban un contraste de 16.5 dB y un ancho de banda de 14 nm, como se muestra en la figura 3.11 (a). y para líquido con índice de refracción de 1.40, mostraban un contraste de 20.91 dB, y un ancho de banda de 11 nm como se muestra en la figura 3.11 (b). En estas graficas se muestra la intensidad contra longitud de onda de los picos de transmisión a pasos de 200 μm .

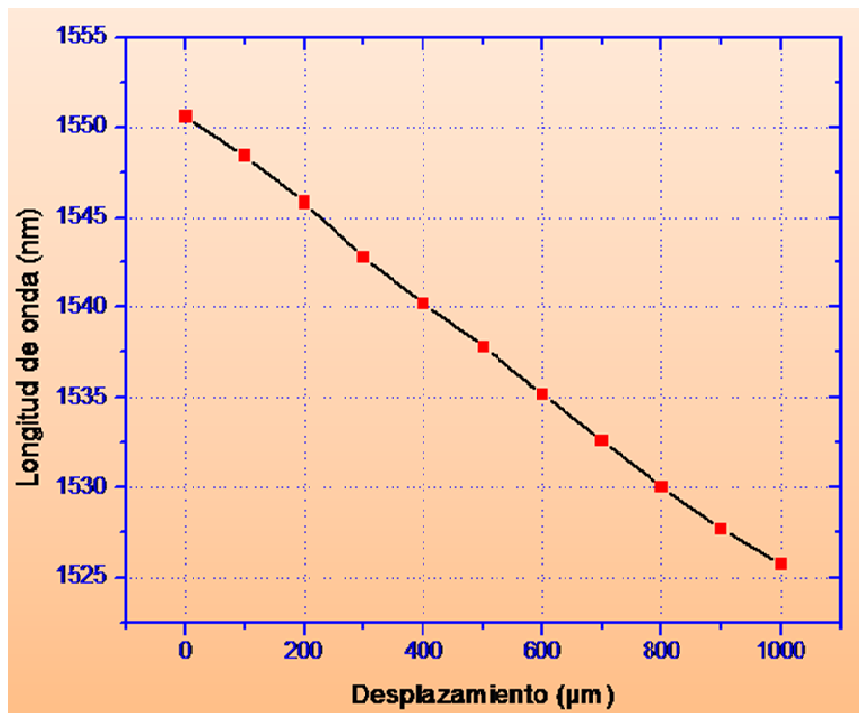


Fig. 3.10: grafica que muestra la razón de cambio de la longitud efectiva de la fibra multimodal, contra la longitud de onda, en el experimento real.

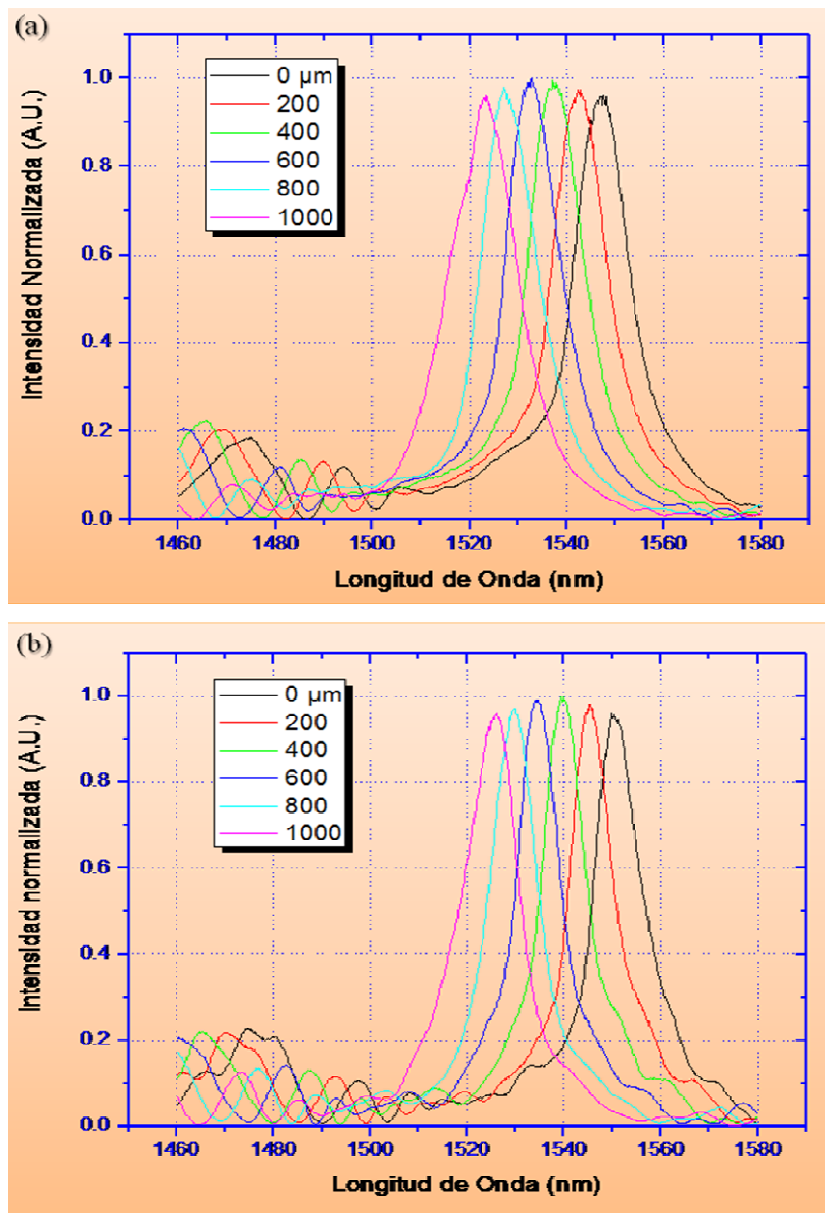


Fig. 3.11: Graficas del los picos de transmisión obtenidos experimentalmente con el filtro sintonizable. (a) con liquido de índice de refracción de 1.64 y (b) con liquido de índice de refracción de 1.40.

Es importante resaltar el cambio de intensidad al sintonizar el filtro, el cual a pesar de ser muy bajo en estos 25 nm de sintonización, puede llegar a la mitad para separaciones mayores. Anteriormente se ha investigado el efecto de la desalineación de los ejes de las SMF y MMF [15]. Este análisis

numérico consistió en introducir un desajuste lateral de $5 \mu\text{m}$ entre el eje de la SMF y la MMF y los resultados se muestran en la figura 3.12.

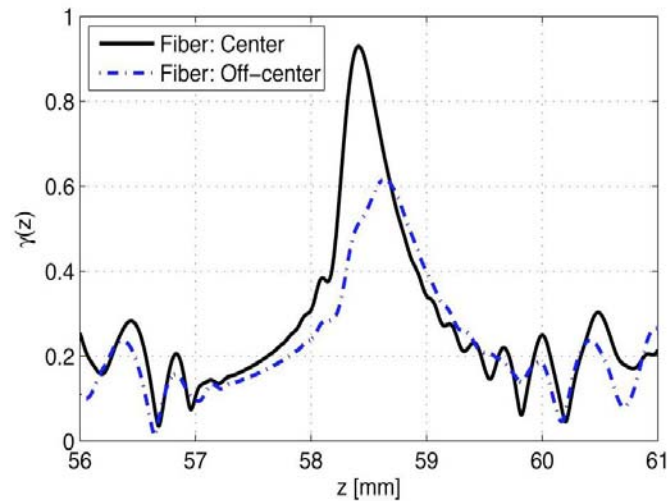


Fig. 3.12: Comparación del perfil de salida de un arreglo SMF-MMF-SMF. Con las fibras centradas y fuera de centro [15].

Se puede notar que la intensidad de la imagen acoplada disminuye debido a que la imagen no se traslapa con la guía de salida. Sin embargo, tal valor de desalineación no es posible en nuestro sistema. Para corroborar el diámetro real del tubo capilar, se cortó un capilar y se midió su diámetro, obteniéndose un valor entre 127 y 128 micras. Por lo tanto el desplazamiento lateral puede llegar a 1.5 micras, el cual aun no es suficiente para el valor de atenuación observado. Sin embargo, es factible que la cara de la fibra tenga cierto ángulo si existe un pequeño error de alineación, y esto se añade al factor anterior. De ahí que entre mayor la separación mayor la diferencia de intensidad. Creemos que de contar con un tubo capilar con mayor control en su diámetro, y de longitud mayor, ayudaría a reducir dichas pérdidas. Sin embargo, para un rango de 25 nm el filtro funciona adecuadamente, y como se demuestra en el siguiente capítulo es suficiente para dos aplicaciones.

Capítulo 4

Aplicaciones

Como mencionamos anteriormente, existen diferentes aplicaciones para filtros sintonizables tanto en comunicaciones como en sensado. Si bien nuestro filtro presenta algunas limitaciones para usarse directamente en sistemas con multiplexado por división de longitud de onda con espaciamiento ancho (CWDM), existen otras aplicaciones más tolerantes donde funciona adecuadamente. En este capítulo mencionamos dos aplicaciones y resultados iniciales que resaltan el impacto que el filtro puede tener en diferentes aplicaciones.

4.1. Sensor de Desplazamiento

Un aspecto importante en el área de sensores es la habilidad de medir desplazamientos lineales, o aquellos inducidos debido a la curvatura de algún material bajo presión. Existen diferentes formas de lograr esto empleando fibras ópticas, y en algunas de ellas podemos detectar algunos problemas que hacen al sensor difícil de implementar. Por ejemplo, se ha usado fibra de doble núcleo con la cual se forma un anillo, y el desplazamiento se aplica sobre el anillo formado. En la punta de la fibra se coloca un espejo, el cual refleja la luz y esta se acopla a una fibra

monomodal formando entonces un interferómetro de Michelson [16]. El detalle en este caso es que ambos núcleos deben estar perfectamente alineados en la dirección del desplazamiento y esto limita la consistencia del dispositivo ya que esta no es una tarea simple. Otra forma comúnmente usada, consiste en sensar los cambios de intensidad que son reflejados por la superficie que se desplaza. Esto se ha hecho usando fibras monomodales, multimodales, y arreglos de fibras de ambos tipos [17], [18]. El problema principal en este caso es que la reflectividad de la superficie tiene que ser adecuada, y la fibra (o conjunto de fibras) tiene que estar y permanecer perpendicular a dicha superficie.

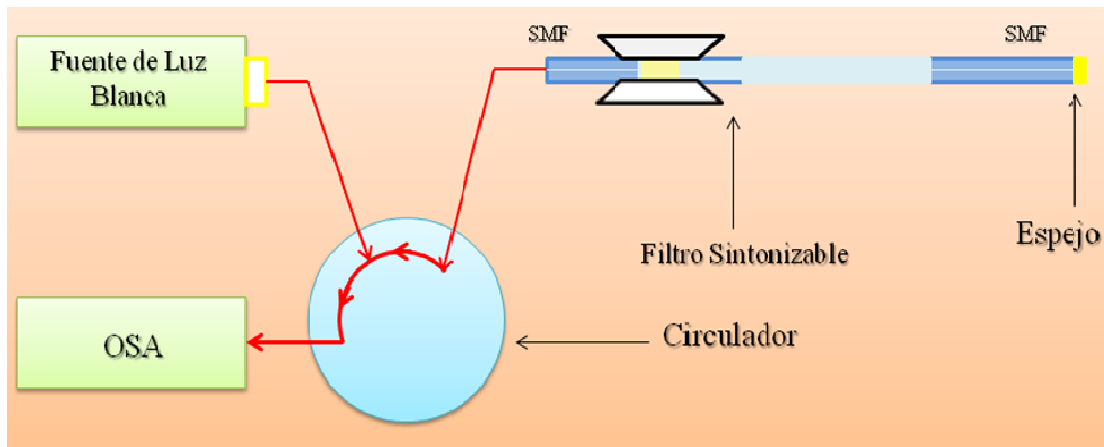


Fig. 4.1: Diagrama de sensor de desplazamiento basado en interferencia multimodal.

Una solución simple y más robusta para sensar desplazamiento es la mostrada en la figura 4.1. Usando fuente de luz blanca puede ser acoplada a un circulador, el cual transfiere dicho espectro a nuestro filtro sintonizable. Al final del filtro, en la faceta de la SMF se evapora una capa de oro de 200 nm que funciona como espejo. Esta sección de fibra monomodal, es la que está sujeta al objeto que se desplaza. El espectro reflejado es enviado al puerto inferior y entonces podemos seguir los cambios por desplazamiento

reflejados en corrimientos espectrales. Cabe destacar que el circulador puede ser reemplazado por un acoplador que es mucho más económico.

En nuestro arreglo la fuente fue nuestro laser sintonizable (HP 8164A), y se uso un circulador comercial. Aunque sabemos que la intensidad decae a separaciones mayores, el pico de transmisión es perfectamente distinguible hasta una separación de 4 mm. Los resultados de longitud de onda pico reflejada contra separación se muestran en la figura 4.2.

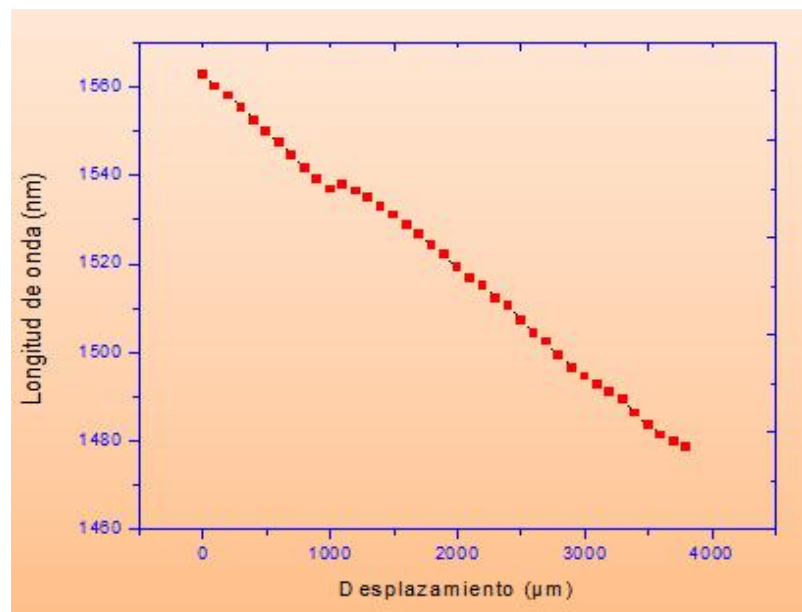


Fig. 4.2: Grafica del cambio de longitud de onda pico contra separación (desplazamiento) de la SMF – MMF.

Como podemos observar se obtiene la respuesta lineal característica de nuestro filtro. Cabe mencionar que para sensado de desplazamiento existen aquellos que miden desplazamientos del orden de una micra, y aquellos de decenas de micras. Nuestro arreglo como tal califica en decenas de micras. Sin embargo, si medimos cambios de intensidad en lugar de longitud de onda, es factible medir valores de unidades de micra debido a que el cambio de intensidad en el pico de transmisión es altamente sensible.

4.2. Laser de Fibra Óptica Sintonizable

La aplicación inmediata de filtros sintonizables es por supuesto el sintonizar láseres de fibra. Para esto se armo una configuración estándar de laser de fibra dopada de Er^{3+} en anillo, como se muestra en el esquema de la figura 4.3 [19].

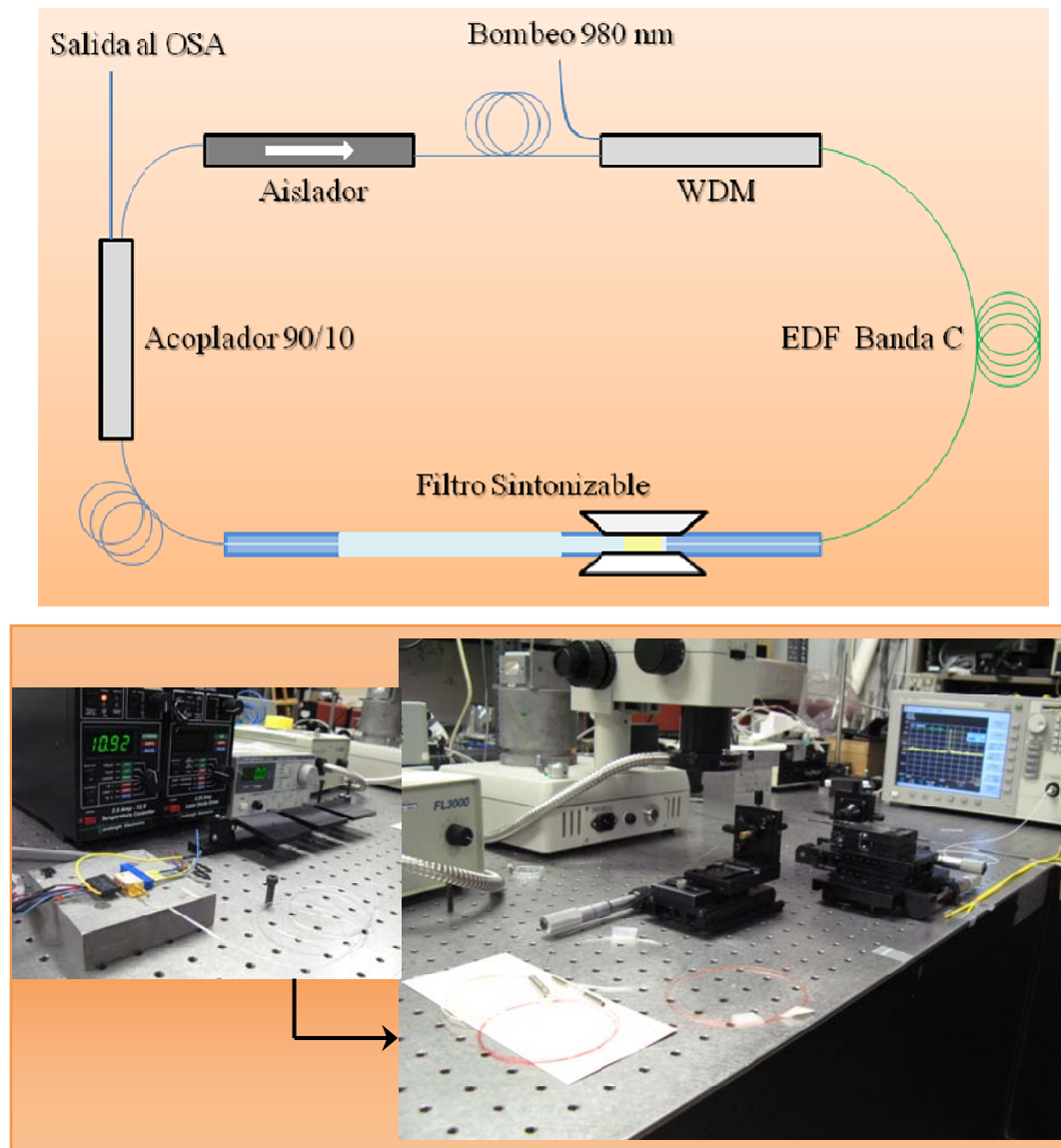


Fig. 4.3: Arreglo esquemático y experimental del laser en fibra sintonizable.

Como fuente de bombeo se usó un diodo láser marca Bookham (mod. LC93F-20) a 980 nm, con una potencia máxima de salida de 130 mW (ver Fig. 3.9 foto de la izquierda). Este bombeo se acopla dentro del anillo usando un WDM 980/1550, el cual se empalma a 5 metros de fibra dopada con Er^{3+} operando en la banda C (MetroGain™ M-5/90/125). La salida de la fibra dopada se empalma entonces al filtro sintonizable MMI, el cual a su vez se empalma a un acoplador 90/10. La salida de 10% se empalma al analizador de espectros (Agilent 86146B), mientras que la salida de 90% se empalma a un aislador que garantiza la circulación de la emisión en una sola dirección. La salida del aislador se empalma al WDM cerrando entonces el anillo.

La sintonización del láser se realizó incrementando la separación entre la SMF y MMF dentro del capilar, y en cada paso se fue tomando el espectro de salida en el analizador de espectros, en el cual se fijó una resolución de 0.2 nm. La gráfica de sintonización se observa en la figura 4.4.

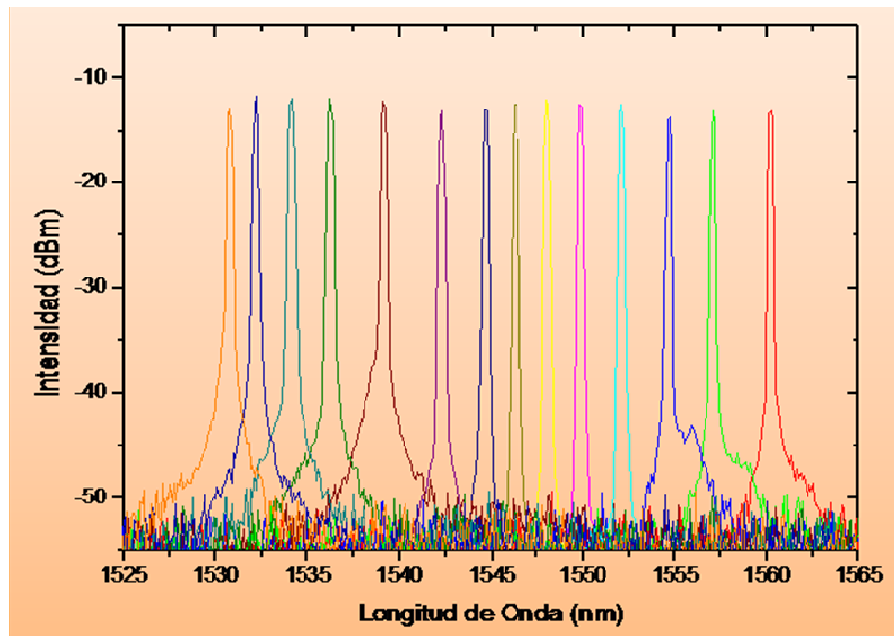


Fig. 4.4: Respuesta espectral del láser sintonizable en función de la separación del filtro sintonizable.

Como se puede observar es posible sintonizar sin ningún problema el rango de 30 nm disponible en banda C (1530-1560 nm). El ancho de banda de la emisión fue de 0.4 nm, con un razón señal a ruido de más de 40 dBm. Cabe destacar que no se realizó ninguna optimización para obtener la longitud óptima de fibra dopada de Er^{3+} ya que nuestro principal interés fue demostrar su uso como sintonizador. Esto es algo sobre lo que se plantea desarrollar más adelante. La ventaja de nuestro filtro, es que con solo cambiar la longitud del segmento multimodal, podemos movernos a otras bandas (S o L) y el costo del filtro es mínimo. Estas aplicaciones demuestran el potencial de nuestro filtro, para el cual se tienen contempladas algunas aplicaciones adicionales.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones generales

En el presente trabajo de tesis, se investigó el funcionamiento de un novedoso mecanismo de sintonización que emplea las propiedades de autoimagen productos de la interferencia multimodal en las guías de ondas multimodales, de esta manera, se ha desarrollado un dispositivo basado en el efecto de interferencia multimodal para el filtrado de longitudes de ondas orientado a la sintonización mediante la aplicación de fibras ópticas con estructuras tipo SMF-MMF-SMF cumpliendo con requerimientos de sintonización estable y en tiempo real.

Utilizando esta configuración SMF-MMF-SMF, se logro sintonizar hasta 30 nm con poca variación en la intensidad, pudiendo obtener un rango de sintonización más amplio, pero para rangos más grandes, la intensidad empezaba a variar pero no de manera drástica.

Así mismo, se pueden observar que la interferencia multimodal se puede emplear con gran efectividad en la elaboración de dispositivos hechos de

fibra óptica, para sensado de desplazamientos o de porcentajes de concentraciones en soluciones químicas.

Una de las aplicaciones interesantes de este filtro fue para sintonizar un laser en la banda C con lo cual se demostró la eficiencia del filtro. Ya que el espectro de ganancia del laser, compensa la disminución de la intensidad del pico de salida del filtro más allá de los 30 nm, de esta manera pudimos tener un laser sintonizable con más de 30 nm de sintonización.

De esta manera, podemos decir que con el uso del efecto de interferencia multimodal, podemos elaborar diferentes dispositivos bastante efectivos donde los costos son bastante reducidos en comparación con otros dispositivos del mismo género lo cual representa una gran ventaja en campos donde el presupuesto para la investigación es reducido.

5.2. Trabajos Futuro

Como se vio en este trabajo, el efecto de interferencia multimodal, es bastante efectivo para la elaboración de filtros pasabandas teniendo un arreglo adecuado para el dispositivo. Como se vio también, otra de las variables para hacer posible la sintonización es el ancho efectivo de las guía de ondas multimodales, por esta razón, actualmente se está trabajando en esta forma de sintonización, pero cabe señalar que esta nueva forma de sintonización resulta más complicada, ya que el filtrado se haría usando un dispositivo integrado, y la sintonización se realizaría mediante canales de microfluidos para tener un control bastante exacto del ancho de la guía multimodal.

Este mismo efecto de interferencia multimodal es también efectivo para aplicaciones en sensado de índice de refracción y de porcentajes de concentraciones en compuestos químicos, por lo tanto se está trabajando en la obtención de estos dispositivos de manera integrada ya que como

sabemos, logramos reducir dimensiones para su fácil aplicación en ambientes peligrosos.

Referencias

- [1] Jeff Hetch, *City of de light: The Story of fiber Optics*. Oxford University Press, 1999.
- [2] *Optical Fiber Span 30 years*. Lightwave Magazine, July 2000 Article.
- [3] Govind P. Agrawal, *Fiber optics Communications Systems*. John Wiley & Sons, 2002.
- [4] David J. Griffihs, *Introduction to Electrodynamics*, Prentice Hall, 1999.
- [5] Jim Hayer, *Fiber Optics Technician's Manual*. Delmar Thomson Learning, 2000.
- [6] John Crisp, *Introduction to Fiber Optics*. Newnes, 2001.
- [7] R. Ulrich and G. Ankele, "*Self-Imaging in Homogeneous Planar Optical-Waveguides*," Applied Physics Letters, vol. 27, pp. 337-339, 1975.
- [8] G. J. Liu, B. M. Liang, Q. Li, and G. L. Jin, "*Beam propagation in nonlinear multimode interference waveguide*," Journal of Optics a-Pure and Applied Optics, vol. 7, pp. 457-462, 2005.
- [9] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "*Optical Multimode Interference Devices Based on Self-Imaging - Principles and Applications*," Journal of Lightwave Technology, vol. 13, pp. 615-627, 1995.

-
- [10] Lung-Wei C., San-Liang L. and Yen-Juei L., "*Principles and application of reduced beat length in MMI couplers*," Optics Express, vol. 14, pp. 8753-8764, 2006.
- [11] Alok M., Waleed S. and Eric G. Johnson "*Multimode Interference-Based Fiber-Optic Displacement Sensor*," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 15, pp. 1129-1131, 2003.
- [12] E. C. M. Pennings, "*Bends in optical ridge waveguides, modelling and applications*," Ph. D. Thesis, Delf Univ. of technology, 1990.
- [13] L. B. Soldano, F. B. veerman, M. K. Smit, B. H. Verbeek, A. H. Dubost, and E. C. M. Pennings, "*Planar monomode optical coupler based on multi-mode interference*," J. Lightwave technology, Vol. 10, pp. 1843-1850, 1992.
- [14] Waleed S. M. and Peter W. E. S., "*All-fiber multimode interference bandpass filter*," Optics Letters, vol. 31, pp. 2547-2549, 2006.
- [15] Hongbo Li, Moysey B., Li Li, Axcel S., Nasser P. and Jerome V. M., "*Multimode interference in circular step-index fibers studied with the mode expansion approach*," Optics Letters, vol. 24, pp. 2707-2720, 2007.
- [16] Causado-Buelvas, Jesus D., Gomez-Cardona, Nelson D., Torres, Pedro "*In-fiber Integrated Micro-displacement Sensor*", AIP Conference Proceedings, Volume 992, pp. 888-892, 2008.
- [17] Vijay K. Kulkarni, Anandkumar S. Lalasangi, I. I. Pattanashetti, U. S. Raikar "*Fiber optic micro-displacement sensor using coupler*," Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, vol. 8, pp. 1610-1612, 2006.

-
- [18] Moh. Yasin, S. W. Harun, Kusminarto Karyono , H. Ahmad *"Fiber-optic displacement sensor using a multimode bundle fiber,"* Microwave and Optical Technology Letters, vol. 50 Issue 3, pp. 661–663.
- [19] Nan-Kuang Chen, Sien Chi, Shiao-Min Tseng, *"An efficient local fundamental-mode cutoff for thermo-optic tunable Er³⁺-doped fiber ring laser,"* Optics Express, vol. 13, No. 18, pp. 7250-7255.