



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“FIBRAS ÓPTICAS LÁSER EN CONFIGURACIÓN DE
ANILLO CON ACOPLADORES SOBRE-ACOPLADOS”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA
(MÓDULO EN INGENIERÍA BIOMÉDICA)**

PRESENTA:

Dámaris Noguero Galicia

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN HERNÁNDEZ CORDERO



MÉXICO, D.F. DICIEMBRE 2008.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Esta tesis es la culminación de una parte de mi vida y el comienzo de otra, por esto y más la dedico y agradezco a Dios por poner en mi camino a las siguientes personas:

Mis padres, Elías Noguerón y Elvia Galicia, por enseñarme a luchar y alcanzar mis metas; por brindarme la oportunidad, confianza y apoyo necesario en mi formación académica. Gracias por alentarme a seguir adelante.

Mis hermanas, Lydia, Sara, Areli y Jael, por ser uno de mis grandes ejemplos a seguir, por todos los momentos que vivimos juntas, por escucharme cuando fue necesario. Por esa unión y apoyo que hemos demostrado tener en los momentos difíciles y que seguiremos teniendo a lo largo de la vida.

Mi sobrino, Omar Esteban, por llenar de luz y alegría mi corazón, por hacer que todos los días sean mas divertidos, gracias.

Mis cuñados, Julio Arturo y Hugo, por compartir conmigo grandes momentos desde mi infancia, por su apoyo brindado todo este tiempo.

Adán, por su amistad durante la carrera, por su amor, paciencia y comprensión en los momentos difíciles. Te agradezco el impulsarme a seguir adelante y por las sonrisas que tenemos día a día.

Mis amigos, por la ayuda brindada a lo largo de la carrera, por los momentos compartidos fuera y dentro del aula que son inolvidables. Por su amistad, porque es difícil encontrar un verdadero amigo.

Dr. Juan Hernández Cordero, por ser un excelente profesor, por la ayuda y los consejos brindados en el desarrollo de este trabajo, por su confianza y amistad.

CONACYT, por la beca otorgada en el proyecto NSF-2004-08, que sin duda es uno de los más importantes de mi vida y gracias a éste obtendré mi título como Ingeniera.

Mis Sinodales, Ing. Gabriel Alejandro Jaramillo Morales, Dr. José Ismael Martínez López, Dr. Sergei Khotiaintsev, Dr. Gabriel Eduardo Sandoval Romero, por su contribución y valiosas aportaciones en este trabajo.

Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de estudiar desde Iniciación Universitaria hasta culminar mi Carrera Profesional, gracias por ser mi segunda casa.

Sinceramente Dámaris.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Acopladores en sistemas de fibra óptica.	2
1.2 Acopladores de fibra óptica.	3
1.2.1 Acoplamiento entre guías de onda.	4
1.2.2 Fabricación y clasificación de acopladores de fibra óptica.	6
1.2.3 Aplicaciones de los acopladores de fibra óptica.	9
1.3 Fibras Ópticas Láser.	11
Capítulo 2. Fabricación y caracterización de acopladores de fibra óptica	17
2.1 Descripción de la máquina utilizada.	21
2.2 Experimentación con acopladores de fibra óptica.	23
2.2.1 Acopladores fabricados utilizando un LED.	25
2.2.2 Acopladores fabricados utilizando la fibra láser sintonizable.	27
2.3 Características espectrales de los acopladores.	29
Capítulo 3. Características espectrales de acopladores y efectos del índice de refracción	36
3.1 Características espectrales: efectos de la longitud de onda.	37
3.2 Investigación sobre los efectos del índice de refracción.	40
3.3 Acopladores en resonadores de anillo y resonadores Fabry-Perot.	47
Capítulo 4. Investigación sobre las propiedades de resonadores en anillo con acopladores sobre-acoplados	49

4.1 Arreglo experimental.	49
4.2 Espectros de transmisión de los acopladores (anillo abierto).	52
4.3 Características de la emisión láser con distintos acopladores (anillo cerrado).	54
Capítulo 5. Conclusiones	60
Apéndice	67
Referencias	72

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sistemas de comunicaciones ópticos ha sido un gran impulsor de avances en diversas áreas de la ciencia y la tecnología. La capacidad de estos sistemas para transmitir grandes cantidades de información a altas velocidades, ha sido lo suficientemente atractiva como para motivar el desarrollo de fuentes de luz, detectores y otros dispositivos electro-ópticos que han marcado también un avance rápido en otras áreas. Un ejemplo claro de esto son las fibras ópticas: ideadas originalmente como medio de transmisión para señales ópticas en sistemas de comunicaciones, han resultado también de gran utilidad para el desarrollo de sensores, sistemas de iluminación y para adquisición de imágenes. De esta manera, las fibras ópticas han resultado ser elementos muy versátiles para distintos campos de aplicación.

La tecnología de las fibras ópticas ha evolucionado rápidamente gracias al desarrollo de diversos dispositivos que son compatibles con este tipo de guías de onda. Por ejemplo, en muchas aplicaciones es necesario separar la luz guiada en la fibra de acuerdo con sus componentes espectrales. Actualmente, estas funciones de filtrado pueden realizarse con dispositivos fabricados completamente a partir de fibras ópticas, lo cual ha sido de mucha utilidad para minimizar las pérdidas en la señal. Dispositivos tales como los acopladores de fibra óptica y las rejillas de Bragg, han demostrado ser también útiles para fabricar sensores y como elementos de propósito general para las distintas áreas en las que se utilizan las fibras ópticas [3].

En este trabajo se presenta un estudio experimental y el análisis sobre el uso de acopladores de fibra óptica en sistemas láser de fibra (secciones 2.1, 2.2, 2.3, 3.2, 4.1, 4.2, 4.3). Los acopladores, fabricados por el método de fusión, fueron utilizados en resonadores de fibra en configuración de anillo. Una parte importante de este trabajo es la fabricación de los acopladores con distintos coeficientes de acoplamiento. Esto se logró mediante ajustes en el proceso de

fabricación, lo cual permite obtener acopladores con distintos grados de acoplamiento. El empleo de estos dispositivos en los resonadores en anillo permite sintonizar en distinto grado el espectro de emisión de la fibra láser.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es fabricar acopladores de fibra óptica con distintos coeficientes de acoplamiento y determinar la influencia de éstos en las características espectrales de la fibra láser utilizando una configuración en anillo.

1.1 Acopladores en sistemas de fibra óptica.

El término “acoplador” tiene un significado especial en las fibras ópticas. Un acoplador conecta dos o más extremos de la fibra (o dispositivos ópticos como detectores y transmisores) con otros dispositivos o bien, con otras fibras ópticas. Como tal, es distinto de los conectores y de los empalmes, los cuales ensamblan dos extremos de la fibra, o una fibra con un emisor o un detector de luz. La distinción es mucho más importante en fibras ópticas que en electrónica, por la manera en que viajan las señales en las fibras. Un buen acoplamiento de fibra es difícil de realizar, e incluso los mejores acopladores sufren pérdidas más altas que sus contrapartes electrónicas. Sin embargo, para las aplicaciones más comunes, las pérdidas son lo suficientemente bajas como para que los acopladores funcionen de manera adecuada.

Las aplicaciones de los acopladores en los sistemas de fibra óptica son muy variadas. Dependiendo de sus características espectrales, pueden utilizarse como filtros, o bien, como separadores de haz. La ventaja que ofrecen comparados con los dispositivos de óptica convencionales, es que no es necesario extraer la luz de la fibra óptica para realizar las funciones antes mencionadas. De esta manera, pueden fabricarse sistemas multiplexados por longitud de onda o sistemas interferométricos utilizando exclusivamente fibras ópticas. La fabricación de

acopladores ha permitido también el desarrollo de dispositivos para modular haces de luz. Muchos de los “interruptores” ópticos están basados en la misma tecnología de los acopladores. De hecho, algunos interruptores son versiones especializadas de acopladores, con características adicionales que permiten cambiar la trayectoria de la luz que pasa a través de ellos [1].

1.2 Acopladores de fibra óptica.

La mayoría de los acopladores ópticos son dispositivos pasivos que dividen señales entre dos o más puertos de salida. Una de las características fundamentales en los acopladores pasivos es que la potencia total de salida puede no ser mayor que la potencia de entrada, ya sea por pérdidas o bien por la división de potencia óptica generada por el acoplador mismo. Por ejemplo, si consideramos un acoplador con dos fibras de entrada y dos fibras de salida, la pérdida característica del acoplador se define como la razón de la potencia de salida a la potencia total de entrada (generalmente estas razones se expresan en dB). Si la potencia óptica a la entrada del acoplador se divide equitativamente entre las dos fibras de salida (50% de la potencia total de entrada en cada fibra) se dice que éste causa una pérdida de 3 dB. Cualquier pérdida adicional a ésta es llamada pérdida de exceso. Evidentemente, esto puede extenderse a casos más generales (varias entradas y salidas) y también para varias razones de potencia de salida y entrada (por ejemplo, salida de 10% en una fibra y 90% en la otra) [2].

La fibra óptica es una guía de ondas en forma de filamento generalmente de vidrio, aunque también puede ser de materiales plásticos. Ésta es capaz de dirigir la luz a lo largo de su longitud confinándola dentro de una región llamada núcleo. Las guías de onda se basan en el confinamiento de la luz, efecto que se logra mediante el uso de dos medios con índice de refracción diferente. El medio con índice de refracción mayor (núcleo) se embebe en el medio con índice de refracción menor (revestimiento o cubierta); la luz queda confinada en el núcleo debido a reflexión total interna.

Los acopladores de guías de onda son un dispositivo de gran utilidad en muchas aplicaciones. Con éstos pueden construirse divisores de haz, moduladores y otros dispositivos, tanto en óptica integrada como en fibra óptica. El principio de operación es el acoplamiento entre guías de onda que se basa en aproximar dos guías de onda lo suficiente como para que exista transferencia de potencia óptica entre los núcleos de las dos guías (ver figura 1.1) [4].

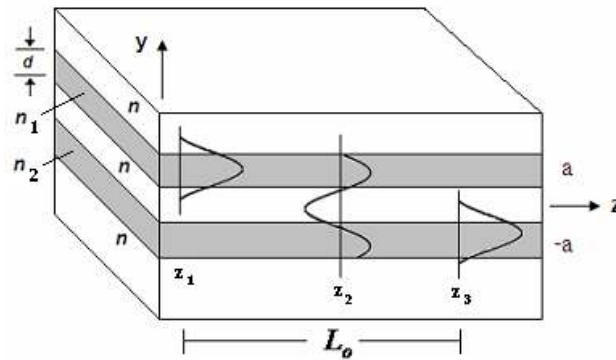


Figura 1.1. Acoplamiento entre guías de onda.

1.2.1 Acoplamiento entre guías de onda.

La descripción teórica del acoplamiento de luz entre guías de ondas se desarrolla a partir de las ecuaciones de modos acoplados. Éstas relacionan la amplitud de los modos que se propagan en los núcleos y consideran tanto la geometría como las propiedades ópticas del material utilizado en la guía. Tomando como referencia la figura 1.1, la potencia óptica confinada en cada una de las guías puede expresarse como:

$$P_1(z) = P_1(0) \left(\cos^2 \gamma z + \left(\frac{\Delta\beta}{2\gamma} \right)^2 \text{sen}^2 \gamma z \right) \quad (1)$$

$$P_2(z) = P_1(0) \frac{|C_{12}|^2}{\gamma^2} \text{sen}^2 \gamma z$$

Donde $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ es la diferencia de fase por unidad de longitud y C_{ij} son los coeficientes de acoplamiento. De esta forma, podemos ver que la potencia se intercambia de manera periódica entre las guías de onda. El período es $\frac{2\pi}{\gamma}$ y por conservación de energía se requiere que $C_{21} = C_{12} = C$.

Los coeficientes de acoplamiento dependen de la geometría de las guías de onda y del índice de refracción. Explícitamente, los coeficientes se expresan como:

$$C_{21} = \frac{1}{2}(n_2^2 - n^2) \frac{k_0^2}{\beta_1} \int_a^{a+d} u_1(y)u_2(y)dy$$

$$C_{12} = \frac{1}{2}(n_1^2 - n^2) \frac{k_0^2}{\beta_2} \int_{-a-d}^{-a} u_2(y)u_1(y)dy$$
(2)

Un caso particular que se usa mucho para propósitos prácticos es cuando las guías de onda son idénticas, esto es, $n_1 = n_2$, $\beta_1 = \beta_2$ y $\Delta\beta = 0$. En este caso, las dos ondas guiadas están igualadas en fase y las soluciones se simplifican a:

$$P_1(z) = P_1(0) \cos^2 C z$$

$$P_2(z) = P_1(0) \text{sen}^2 C z$$
(3)

Nótese que en este caso la transferencia de potencia puede ser total, por ejemplo, toda la potencia óptica guiada en uno de los núcleos puede transferirse a la otra guía de onda. El resultado de esto es que podemos hacer un dispositivo para acoplar una cantidad de potencia cualquiera de una guía de onda a otra. A partir de estas expresiones se pueden definir parámetros como la distancia de transferencia, dada por:

$$z = L_0 = \frac{\pi}{2C}$$
(4)

Ésta es la distancia a la cual se presenta la transferencia total de potencia de una guía a otra. Similarmente, a una distancia $z = \frac{L_0}{2}$ la transferencia es del 50% (acoplador de 3 dB), como ya se había mencionado anteriormente (ver figura 1.2) [4].

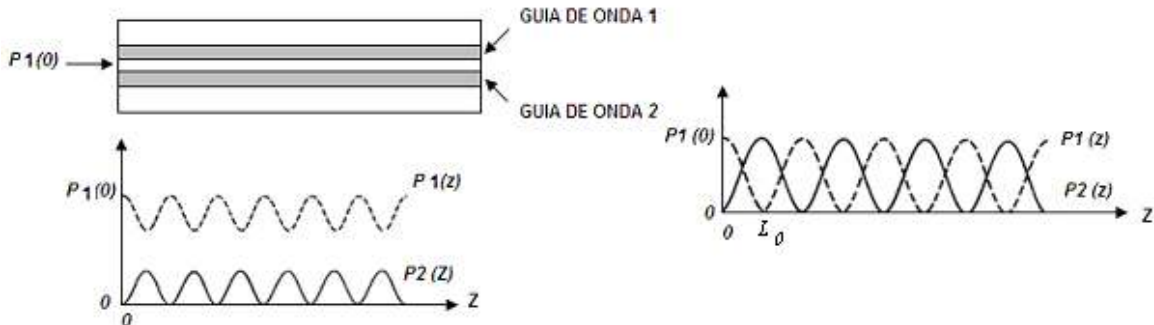


Figura 1.2. Transferencia de potencia entre guías de onda, la potencia de la guía uno se acopla periódicamente a la guía dos.

1.2.2 Fabricación y clasificación de acopladores de fibra óptica.

Tener la habilidad de transferir potencia de la luz de una fibra a otra, en acoplamientos de 2x2 ó de NxN, es una característica fundamental en los componentes de un sistema de comunicación de fibra óptica. Un acoplador permite que la señal de la luz sea compartida entre fibras, funcionando entonces como un divisor de potencia, o bien como multiplexor si la luz se divide en función de la longitud de onda. Las técnicas más empleadas para fabricar acopladores de fibra óptica son mediante pulido o fusionando 2 ó más fibras juntas. En el primer caso, las fibras se montan en bloques de vidrio para que el material del revestimiento sea removido y dejar expuesto el núcleo de la fibra sin deformación. De manera general, el acoplamiento de la luz se da por la interacción del campo electromagnético en una fibra con sus guías de onda vecinas. En este caso, esto se logra al poner las dos fibras pulidas en contacto mediante líquidos con índice de refracción adecuado.

La técnica de fusión es quizás la más conveniente, pues el proceso de fabricación de los acopladores puede realizarse con un alto grado de automatización y control. En este caso, las dos fibras son fusionadas longitudinalmente y adelgazadas al mismo tiempo, el tamaño en la sección del cuello se reduce a un punto tal que la región de la cintura funciona como el nuevo núcleo. La región de la cintura total funciona como nueva guía y el medio a su alrededor (usualmente aire) es el nuevo revestimiento.

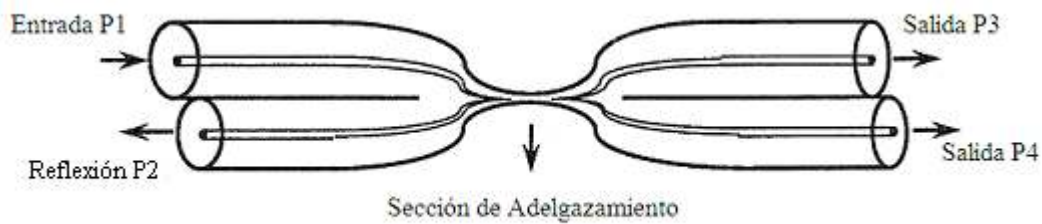


Figura 1.3. Perfil de un acoplador fusionado y adelgazado de 2x2.

La figura 1.3. muestra un acoplador fusionado de 2x2, en donde pueden verse las fibras ópticas de entrada y salida, así como la región de acoplamiento que se obtiene durante el proceso de fusión y adelgazamiento de las fibras. Cuando la luz entra a la región de acoplamiento, se presentan fenómenos de interacción entre los modos soportados por esta guía de onda, generando un comportamiento oscilatorio en la potencia de salida que depende de la elongación, longitud de onda e índice de refracción del medio. De esta manera, el comportamiento del acoplamiento fusionado también puede ser utilizado como filtro, multiplexor/demultiplexor de longitud de onda, atenuador y como sensor [1].

Existen varios tipos de acopladores que pueden clasificarse de acuerdo con su topología. Los más utilizados son los de tipo estrella, árbol y T, mostrados en la figura 1.4. El acoplador T tiene tres puertos, algunos diseños tienen una geometría en forma de Y, y son algunas veces llamados acopladores Y. En

general, la luz que entra no necesita ser dividida igualmente entre los puertos de salida, y los acopladores T están hechos con varias razones de acoplamiento.

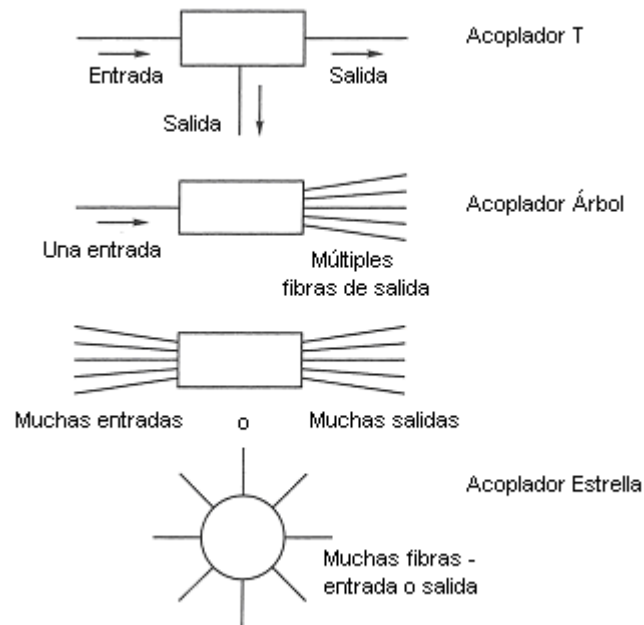


Figura 1.4. Acopladores tipo T, Árbol y Estrella

Los acopladores de árbol tienen una sola entrada y más de dos salidas (o puede ser invertido, tener muchas entradas y una sola salida). Los acopladores de estrella tienen múltiples entradas y múltiples salidas. Algunos acopladores de estrella son direccionales, con grupos separados de entrada y salida de fibras.

La mayoría de los acopladores pueden ser fabricados con fibras multimodales porque sus núcleos pueden colectar luz eficientemente. En contraste, algunos de estos acopladores no pueden fabricarse con fibras monomodales porque el núcleo es muy pequeño. Algunos de estos acopladores son también fabricados utilizando guías de onda planas, cuyas salidas y entradas están generalmente acopladas a fibras ópticas [2].

1.2.3 Aplicaciones de los acopladores de fibra óptica.

Los acopladores no eran necesarios en los primeros sistemas de fibra óptica, pues las señales enlazaban únicamente parejas de puntos. Sin embargo, muchas aplicaciones en comunicaciones requerían conexiones entre muchas terminales, tales como la red de área local mostrada en la figura 1.5. En cada punto donde un dispositivo es conectado a la red, la señal necesita dividirse en dos partes, una será pasada a lo largo de la red, y la otra enviada al dispositivo. Esto se puede hacer de varias maneras, y en todas ellas se requieren acopladores. El único camino para evitar la necesidad de acopladores es convirtiendo la señal óptica en forma electrónica y distribuirla adecuadamente (lo cual de hecho se hace en algunas redes).

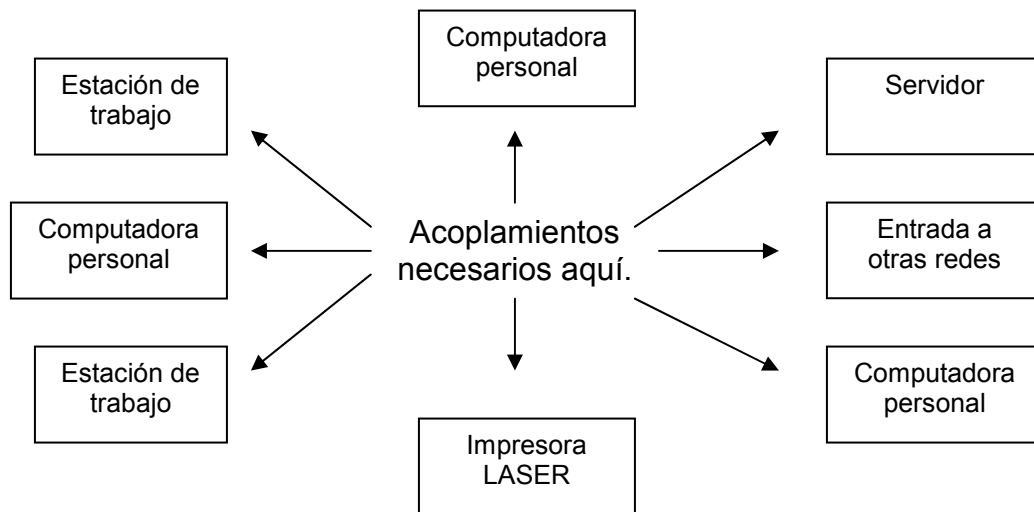


Figura 1.5. Ejemplo de una red de área local en donde se utilizan acopladores.

Como se mencionó anteriormente, los acopladores son también utilizados para separar o combinar señales, usualmente para longitudes de onda diferentes, y enviarla a través de la misma fibra. En la figura 1.6 se muestra como tres señales con diferentes longitudes de onda pueden ser cargadas a través de las mismas fibras. Esta técnica se conoce como multiplexado por longitud de onda

(WDM, por sus siglas en inglés) y funciona porque la luz de diferentes longitudes de onda viaja a través de la misma fibra sin que éstas interactúen lo suficiente como para afectar la transmisión de la señal. En este caso, los acopladores necesitan combinar señales de luz de diferentes fuentes en la entrada para ser separadas a la salida. La dirección de transmisión es importante porque algunos acopladores transmiten diferente luz en diferentes direcciones. En la figura 1.6, las señales con longitudes de onda λ_1 y λ_2 son enviadas a la derecha de la señal y la señal con longitud de onda λ_3 es enviada hacia la izquierda.

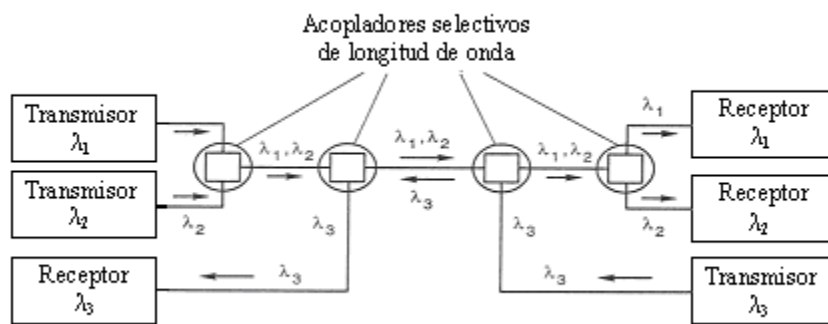


Figura 1.6. Multiplexado de señales ópticas por longitud de onda con acopladores.

Aunque pueden usarse otros dispositivos para separar señales de diferente longitud de onda, siempre se requieren acopladores que dividan la señal antes de que se pueda seleccionar la longitud de onda deseada. Procesos como éste pueden crear más pérdidas en la señal, aunque tienen la ventaja de poder separar longitudes de onda más cercanas si se utilizan dispositivos más selectivos en longitud de onda. Los acopladores selectivos de longitud también se usan para separar señales de bombeo en amplificadores ópticos.

Las funciones de separar o combinar señales por medio de acopladores son intrínsecamente direccionales, y esto depende de la manera en la que se transmite la señal. Si las señales son transmitidas en ambas direcciones por el sistema, el mismo acoplador bidireccional puede servir como ambos como un divisor o como un combinador. Por esta razón, algunas veces los acopladores son llamados también divisores o combinadotes [2].

1.3 Fibras Ópticas Láser.

La estructura básica de una fibra óptica consta de un núcleo central de vidrio (óxido de silicio y germanio) rodeado de una capa de un material similar (dióxido de silicio) con un índice de refracción ligeramente menor llamada revestimiento (ver figura 1.7). Debido a la diferencia de índices de refracción, la luz puede quedar confinada en el núcleo por reflexión total interna si se satisfacen las condiciones para que ésta se presente. Así, en el interior de una fibra óptica, la luz puede propagarse al reflejarse en la frontera núcleo-revestimiento en ángulos determinados por la relación de índices de refracción. Para propósitos prácticos, se considera que la luz viaja por el núcleo de la fibra, aunque la descripción de la propagación de acuerdo con la óptica de ondas muestra que una parte del haz de luz puede viajar en el revestimiento (onda evanescente).

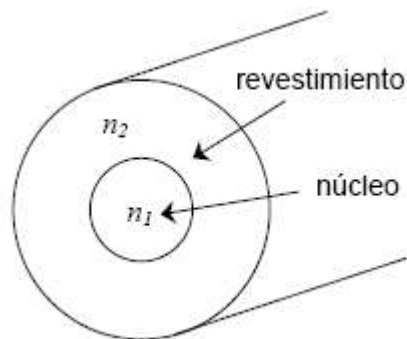


Figura 1.7. Núcleo y revestimiento de la fibra óptica ($n_1 > n_2$).

En los sistemas de comunicaciones, las señales ópticas que viajan a través de fibras ópticas necesitan amplificación, lo cual hasta finales de la década de 1980 se lograba mediante repetidores electrónicos. Esto cambió radicalmente con el desarrollo de los amplificadores de fibra óptica, fabricados al incorporar elementos de tierras raras en el núcleo de la fibra. Con estos elementos es posible obtener emisión estimulada de fotones y de esta manera amplificar una señal óptica. Este tipo de guías de onda son conocidas como fibras ópticas láser.

El desarrollo de sistemas láser se basa en el empleo de materiales que emitan luz a través de procesos luminiscentes. Para generar y amplificar luz mediante estos procesos se requiere, además del material, un resonador óptico y una fuente de energía externa. Este último elemento puede ser un campo eléctrico, una corriente eléctrica o inclusive otra fuente de luz. Por su parte, el resonador se construye en su forma más simple utilizando dos espejos paralelos entre sí. En los sistemas láser de fibra, el material láser utilizado se encuentra dentro del núcleo de la fibra, y como se muestra esquemáticamente en la figura 1.8, la fuente de energía externa es otra fuente de luz (típicamente un diodo láser). Las características espectrales de la luz láser están dadas por el tipo de tierra rara utilizado en el núcleo de la fibra, mientras que el resonador permite el ajuste fino de las frecuencias de operación del sistema láser.

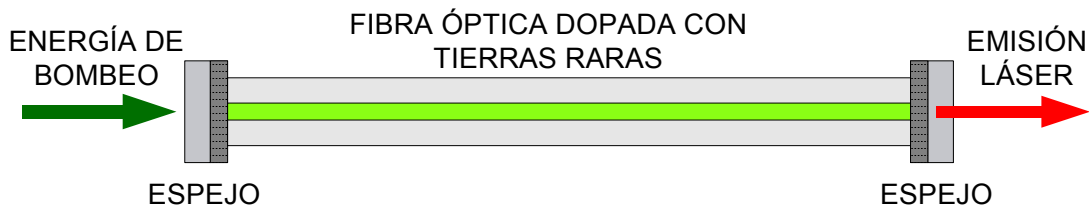


Figura 1.8. Esquema de una fibra láser.

Los lantánidos o tierras raras son quince elementos que ocupan la sexta serie de la tabla periódica entre el Lántano y el Hafnio. Estos elementos presentan luminiscencia en una banda angosta entre el espectro visible y el infrarrojo, y en cuanto a su valencia, se les puede encontrar de tres tipos: divalentes, trivalentes o tetravalentes. El erbio (Er) es quizás el elemento más importante para aplicaciones de fotónica; éste presenta una banda luminiscente muy fuerte alrededor de los 1535 nm que es casualmente la región espectral de pérdidas más bajas en las fibras ópticas de dióxido de silicio.

Los procesos mediante los cuales se produce la emisión de luz en las fibras láser son los mismos que se presentan en otros sistemas láser: absorción, emisión espontánea y emisión estimulada. En general, los átomos, moléculas e iones sólo

pueden encontrarse en estados energéticos bien definidos, y pueden interactuar con un campo electromagnético emitiendo o absorbiendo radiación. Si la energía de la radiación electromagnética coincide con los estados energéticos del ensamble atómico, la interacción podrá generar un cambio en la configuración electrónica de los átomos y se podrá generar entonces emisión de radiación. Los materiales que pueden emitir luz al interactuar con radiación electromagnética mediante los procesos anteriores se conocen como materiales láser.

El proceso de absorción se presenta cuando los electrones de valencia del material se encuentran en equilibrio térmico. Al interactuar con radiación electromagnética, si la energía de ésta es la adecuada, se producirá el fenómeno de absorción, en el que un número determinado de átomos pasará a un estado superior de energía. Posteriormente, los átomos podrán regresar a su estado original a través de dos procesos de emisión radiante conocidos como emisión espontánea y emisión estimulada.

La absorción de energía genera en el material una condición conocida comúnmente como inversión de población, término que indica que la población de electrones en el material se encuentra fuera del estado de equilibrio. Para obtener la inversión de población, es necesario llevar a los electrones a un nivel más elevado de energía, razón por la cual al proceso de excitar al material láser se le conoce como bombeo. El bombeo de electrones se logra mediante el suministro de energía externa al material, y el tipo de energía requerido para esto depende de las características del material mismo. La gran mayoría de los sistemas láser de estado sólido, incluyendo a las fibras láser, utilizan bombeo óptico; es decir, requieren de otra fuente de luz para generar la inversión de población y estar en posibilidades de emitir luz mediante los procesos de emisión radiantes. La emisión espontánea de radiación se genera con el decaimiento espontáneo de un electrón a su nivel energético original, y puede darse por fluctuaciones térmicas o vibraciones en la estructura del material. Estos fotones emitidos espontáneamente viajan a través del material estimulando a su vez el decaimiento

de más electrones que generan la emisión de más fotones. Los fotones generados por la emisión estimulada tienen como característica el tener la misma fase y frecuencia del fotón original, creándose entonces un haz de luz coherente.

Existen varios métodos para bombear fibras láser, aunque el más utilizado consiste en enfocar el haz de la fuente de bombeo directamente al núcleo de la fibra. A medida que la luz de bombeo se propaga a través de la fibra óptica se genera la inversión de población, y puede entonces presentarse la emisión espontánea y estimulada de radiación. La luz generada por los iones de tierras raras incorporados en el núcleo de la fibra queda confinada en la guía de onda, y puede propagarse a lo largo del eje óptico de la fibra para estimular la emisión de más fotones. Evidentemente, los niveles energéticos relevantes para las transiciones electrónicas involucradas en la absorción y la emisión de luz, dependen del tipo de ión incorporado en el núcleo de la fibra óptica. En el neodimio (ión Nd^{3+}), por ejemplo, las transiciones más útiles se realizan entre cuatro niveles de energía, mientras que en el erbio (ión Er^{3+}) éstas se llevan a cabo entre tres niveles como se muestra en la figura 1.9.

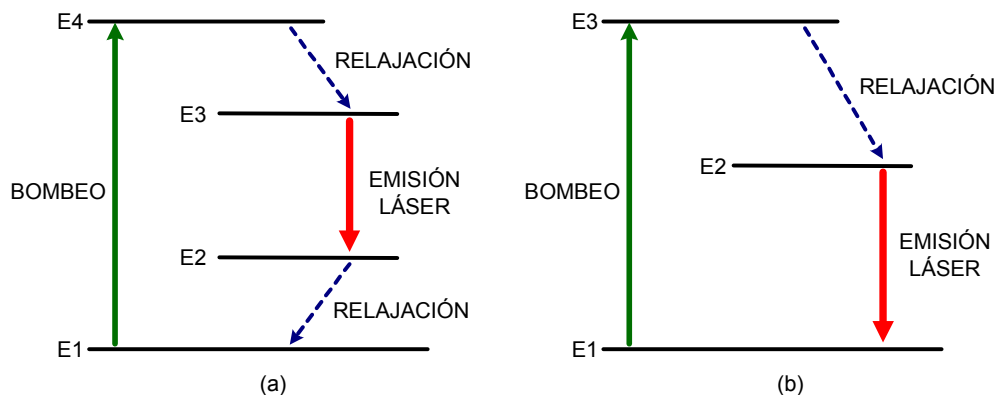


Figura 1.9. Transiciones electrónicas involucradas en la absorción y la emisión de luz (a) neodimio (ión Nd^{3+}) (b) erbio (ión Er^{3+}).

Los sistemas láser de fibra se han beneficiado con el desarrollo de dispositivos de fibra óptica que, aunque han sido pensados para otros tipos de aplicaciones, han demostrado ser lo suficientemente versátiles como para ser

considerados elementos de propósito general. De esta manera, es posible ahora diseñar sistemas láser utilizando únicamente dispositivos de fibra óptica, lo cual ha sido de gran importancia para disminuir el tamaño e incrementar la eficiencia de estos sistemas. Los dispositivos más utilizados son las rejillas de Bragg y los acopladores de fibra óptica.

En los sistemas láser de fibra los acopladores de 3 dB pueden ser utilizados para fabricar espejos con coeficientes de reflectividad cercanos al 100%. Estos espejos, conocidos como espejos en anillo de fibra óptica, tienen propiedades espectrales determinadas por el acoplador, y en contraste con las rejillas de Bragg, la respuesta espectral puede ser dentro de un rango extenso de longitudes de onda (ver figura 1.10).

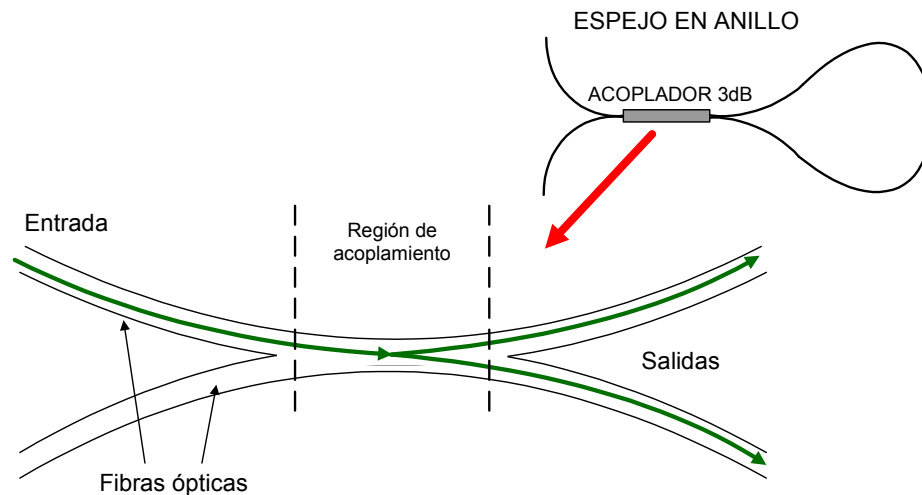


Figura 1.10. Esquema de un acoplador de fibra óptica.

Tanto las rejillas de Bragg como los acopladores de fibra óptica han permitido el desarrollo de resonadores perfectamente compatibles con las fibras dopadas con tierras raras. En algunos casos, es posible incluso fabricar los dispositivos directamente en las fibras láser para obtener sistemas láser de fibra de unos cuantos centímetros de longitud. Los resonadores más utilizados son el de Fabry-Perot y el de configuración de anillo (ver figura 1.11). El primero consta de dos espejos planos y perfectamente paralelos entre sí, y es quizás el más

utilizado en sistemas láser. Los resonadores de anillo, por su parte, han encontrado gran aplicación en el desarrollo de sistemas láser basados en fibra, sobre todo por la gran disponibilidad de dispositivos como los acopladores de fibra óptica [3].

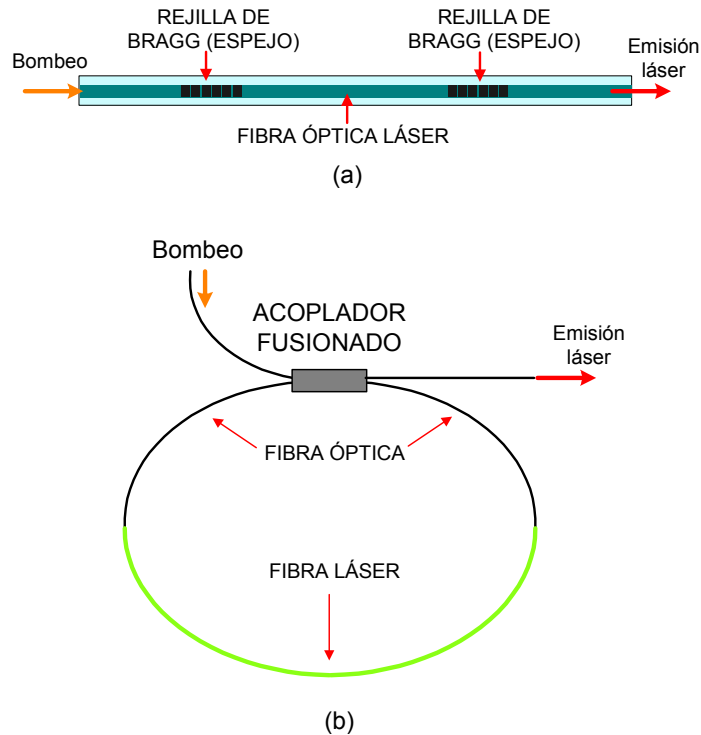


Figura 1.11. (a) Resonador Fabry-Perot. (b) Resonador en configuración de anillo.

En el siguiente capítulo se explica el proceso de fabricación de acopladores de fibra óptica mediante el método de fusión. En los capítulos posteriores se estudiarán las propiedades espectrales de estos dispositivos y como se afectan al cambiar el coeficiente de acoplamiento y el índice de refracción.

CAPÍTULO 2. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA

Los acopladores de fibra óptica utilizados en este trabajo fueron fabricados con la técnica de fusión. Ésta se basa en fusionar dos fibras ópticas longitudinalmente de tal manera que la luz que viaja a través de una de ellas, se acople parcial o totalmente a la otra fibra. La ventaja principal de este método de fabricación es que puede realizarse de manera controlada, y pueden obtenerse resultados consistentes. Para obtener acopladores con pérdidas bajas, es necesario realizar la fusión de las fibras calentándolas y jalándolas simultáneamente, tratando siempre de obtener un adelgazamiento adiabático (esto es, un adelgazamiento gradual y suave). Esto se logra utilizando motores de pasos y controladores de flujo de gas accionados por computadora.

El proceso de fabricación de acopladores fusionados comienza con la limpieza de la fibra óptica quitando el recubrimiento polimérico y limpiándola con alcohol etílico. Se utiliza una fuente de luz para alimentar la fibra primaria y la potencia óptica a la salida de ambas fibras se monitorea con dos detectores ópticos. Por medio de la computadora se controlan la velocidad de elongación, el tiempo de exposición ante la flama, el barrido de la antorcha y el flujo de gas. El acoplamiento de luz entre las fibras se monitorea durante el proceso de fabricación y se registra en una gráfica de potencia contra longitud de elongación (figura 2.1).

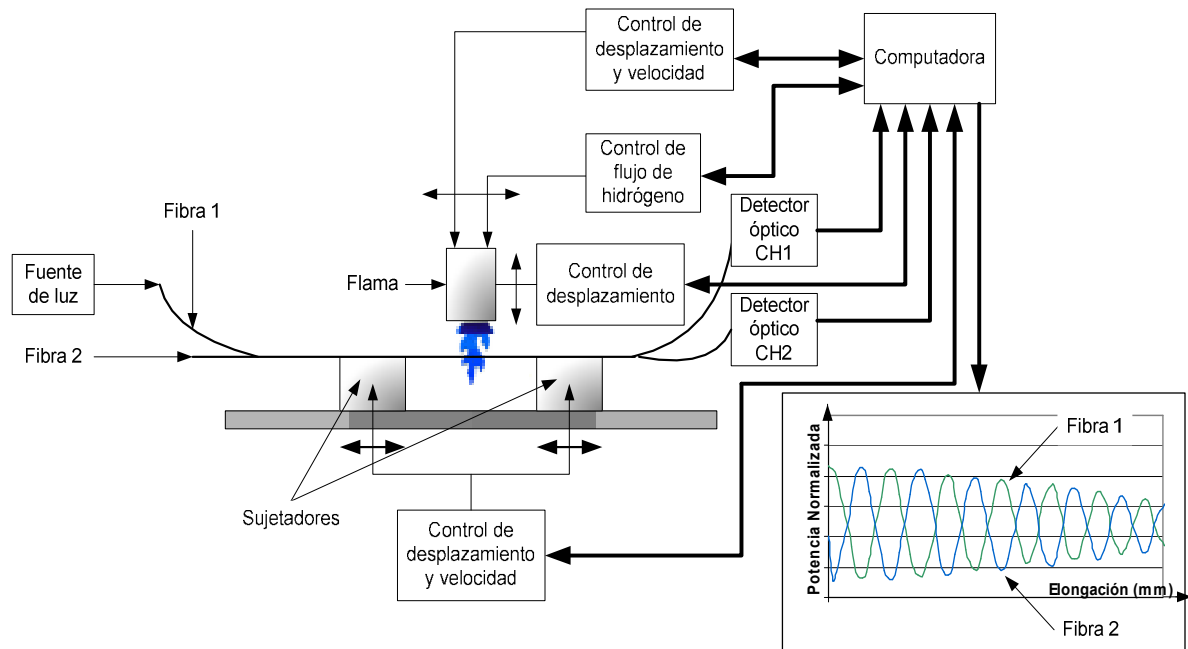


Figura 2.1. Diagrama de bloques del proceso de fabricación de acopladores mediante la técnica de fusión.

La caracterización de acopladores involucra el registro de las características de transferencia de potencia y las pérdidas ópticas generadas durante el proceso de fabricación. Típicamente, se monitorea de manera simultánea la potencia óptica a la salida de ambas fibras en función de la longitud de jalado (longitud de elongación). Con esto pueden calcularse las pérdidas y ajustarse así la velocidad de jalado y la temperatura de la flama utilizada en el proceso de fusión. El control de temperatura se logra mediante la dosificación del flujo de gas (normalmente hidrógeno) que alimenta la flama.

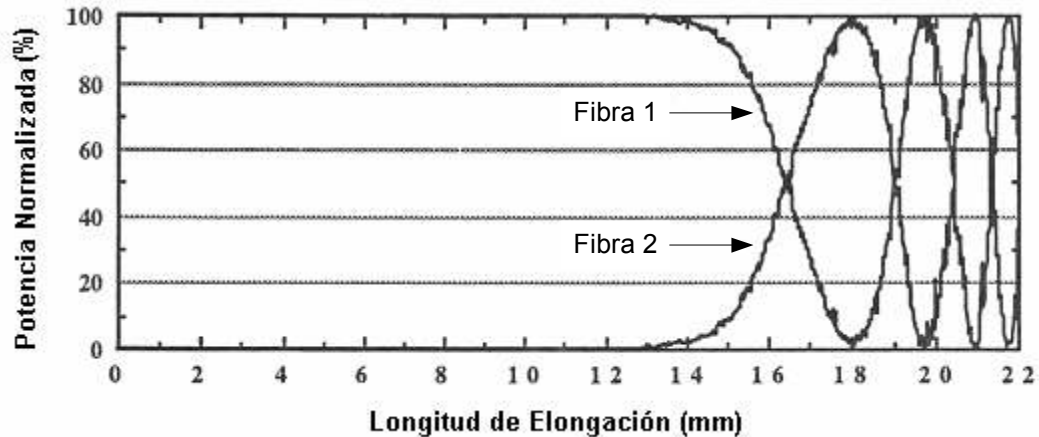


Figura 2.2. Potencia normalizada vs longitud de elongación de los puertos de salida de la fibra 1 y la fibra 2 de un acoplador sobre-acoplado mediante la técnica de fusión.

Las curvas típicas del proceso de fabricación de acopladores fusionados se muestran en la figura 2.2. Este tipo de gráfica se conoce como curva de transferencia de potencia, y representa el cambio en la potencia óptica guiada en cada una de las fibras en función de la longitud de elongación. Cuando se inicia el proceso de elongación, la potencia óptica es máxima en la fibra primaria (fibra 1), y a medida que las fibras comienzan a fusionarse, comienza la transferencia de energía entre las fibras [1]. Esto puede verse en la figura 2.2 a partir de los 13 mm de elongación, en donde la potencia de la fibra 1 comienza a disminuir, mientras que la potencia en la fibra 2 comienza a ascender. La transferencia del 50% de la potencia ocurre cuando ambas curvas se cruzan (aproximadamente a los 16.5 mm de elongación en la figura 2.2) y este punto se conoce como punto de 3 dB. Puede obtenerse la transferencia completa de potencia (18 mm en la figura 2.2), y cuando la elongación continúa más allá de este punto, la luz acoplada en la segunda fibra regresa a la fibra primaria. Al continuar elongando, el proceso de transferencia se repite de manera cíclica, y cuando esto sucede se dice que el acoplador es sobre-acoplado; es decir, la potencia de la luz oscilará entre las dos fibras.

Las pérdidas que pueden presentarse en los acopladores de fibra óptica láser se determinan usando la potencia de entrada (P_{in}) y la potencia a la salida de cada una de las fibras (P_{F1} , P_{F2}). Éstas se definen de la siguiente manera [6]:

- Pérdidas en exceso: es el cociente de la potencia óptica total de los puertos de salida del acoplador, con respecto a la potencia óptica del puerto de entrada del acoplador, expresado en dB. Estas pérdidas se calculan como:

$$L_E = -10 \text{ Log} \left[\frac{P_{F1} + P_{F2}}{P_{in}} \right] \quad (1)$$

- Pérdidas de inserción: es el cociente de la potencia óptica de cualquiera de los puertos de salida del acoplador, con respecto a la potencia óptica del puerto de entrada del acoplador, expresado en dB. La pérdida de inserción incluye la razón de acoplamiento del dispositivo y también las pérdidas en exceso. Estas pérdidas son las más útiles para el diseño de acopladores. Las pérdidas de inserción pueden calcularse con:

$$L_I = -10 \text{ Log} \left[\frac{P_{F1}}{P_{in}} \right] \quad (2)$$

El software que incluye la máquina proporciona información sobre ambos tipos de pérdidas, aunque la extracción de estos datos para procesamiento posterior no es confiable. De esta manera, las pérdidas que se presentarán en este trabajo se han calculado directamente utilizando los datos de las curvas de transferencia de potencia.

Contar con una máquina acopladora para fabricar acopladores sobre-acoplados por el método de fusión permite manipular y controlar el proceso de fabricación. Con estos acopladores se pueden realizar dispositivos de fibra óptica como filtros, acopladores de 3 dB, multiplexores por longitud de onda (WDM),

atenuadores y sensores. Dado que el proceso de fabricación puede adecuarse para fabricar dispositivos con las características convenientes para una aplicación en particular, la máquina para fabricar acopladores es un equipo de gran importancia para desarrollar trabajo de investigación con acopladores de fibra óptica.

2.1 Descripción de la máquina utilizada.

La máquina para fabricar acopladores de fibra óptica es de disponibilidad comercial, fabricada en China por la compañía DOWSON, y el modelo es el OC2010 (figura 2.3). Este tipo de máquinas se conocen también como estaciones de trabajo, y son utilizadas para fabricar dispositivos comerciales como acopladores de 3 dB y multiplexores por longitud de onda (WDM). Los elementos que componen la estación de trabajo son los siguientes:

- a. Un quemador de gas (flama).
- b. Rieles para colocar y tirar de las fibras (sujetadores).
- c. Encapsulador para recubrir los acopladores.
- d. Entradas para detección de potencia óptica de la fibra uno y dos, CH1 y CH2 respectivamente.
- e. Software OC-2010 para el manejo y control de la máquina.
- f. Un tanque de hidrógeno que alimenta al sistema, específicamente al quemador.
- g. Una bomba de vacío para sujetar las fibras una vez colocadas en los rieles.

Los pasos que se siguen para fabricar acopladores con esta máquina son los siguientes:

1. Remover el recubrimiento polimérico que tiene la fibra óptica en los extremos de las fibras y en el área donde se fusionarán.

2. Limpiar con alcohol etílico las áreas expuestas de la fibra óptica. Con esto se trata de eliminar cualquier residuo de recubrimiento o polvo que pueda contaminar el material de las fibras y causar pérdidas en exceso.
3. Colocar las fibras limpias en los rieles y sujetarlas utilizando la succión generada con la bomba de vacío.
4. Utilizar una fuente de luz para alimentar la fibra primaria (fibra 1) y registrar la potencia a la salida de la misma con el detector de potencia óptica (CH1).
5. En el segundo detector óptico (CH2) se debe colocar el extremo de la segunda fibra.
6. Asegurarse que ambas fibras se encuentren totalmente en contacto en la región donde se realizará la fusión. Esto es muy importante para que ambas puedan elongarse y fundirse simultáneamente.
7. Una vez seleccionados los parámetros para el flujo de gas y velocidad de elongación se inicia el proceso de fabricación.
8. Al mismo tiempo que se lleva a cabo la elongación y el calentamiento de las fibras, con ayuda del software, son monitoreadas la potencia de salida y las pérdidas de ambas fibras. Estos parámetros son visualizados en una gráfica de potencia vs longitud de elongación.



Figura 2.3. Estación de trabajo DOWSON OC2010.

2.2 Experimentación con acopladores de fibra óptica.

Para fabricar acopladores con bajas pérdidas es necesario optimar los diferentes parámetros de fabricación que pueden ajustarse con la máquina. Los ajustes realizados para obtener resultados adecuados fueron los siguientes:

1. Variación del flujo de hidrógeno.
2. Variación de la velocidad de desplazamiento de los rieles que tiran de la fibra óptica.
3. Variación del desplazamiento (barrido transversal) de la antorcha.
4. Variación de la altura de la antorcha.

Todos los ajustes anteriores permiten variar la región de calentamiento de las fibras (en dimensión y temperatura) que es en donde se genera la región de acoplamiento. Esto permite controlar parámetros fundamentales del acoplador tales como la geometría de la región de acoplamiento, la variación del radio de la sección de acoplamiento (sección del cuello del acoplador) y la longitud del acoplador. Los parámetros de fabricación utilizados se determinaron de manera experimental. Para llevar a cabo este proceso de calibración se realizaron varios experimentos con el fin de determinar los parámetros adecuados que permitieran obtener un adelgazamiento bicónico y adiabático en las fibras. Los parámetros encontrados para obtener acopladores con pérdidas bajas y con alta repetibilidad son:

- Flujo de hidrógeno: $H_2 = 250.0$ sccm
- Altura de la antorcha: $TH = 3.0$ mm
- Elongación inicial de las fibras: $PT = 1.0$ mm
- Velocidad de jalado: $PS = 0.020$ mm/s
- Desplazamiento de la antorcha: $SL = 6.0$ mm
- Velocidad de desplazamiento de la antorcha: $SS = 5.0$ mm/s

Nótese que todos estos parámetros fueron optimizados utilizando el mismo tipo de fibra óptica para todos los acopladores. En particular, la fibra utilizada para el desarrollo de este trabajo fue fibra óptica monomodo estándar SMF-28, fabricada por Corning. Esta fibra óptica tiene una longitud de onda de corte cercana a los 1200 nm y es monomodal para las longitudes de onda con las que se trabajó. Otras características relevantes de esta fibra pueden consultarse en los anexos de la tesis. El uso de otras fibras ópticas con distintas características requiere modificar los parámetros de fabricación.

La fabricación de acopladores con estos parámetros se realizó utilizando dos tipos distintos de fuente de luz: un LED con salida acoplada a fibra óptica (ancho espectral >100 nm) y una fibra láser sintonizable (ancho espectral <0.5 nm). Las diferencias encontradas en cada caso se describen a continuación. El espectro de transmisión de cada acoplador se obtiene utilizando el LED y un analizador de espectros ópticos como se muestra esquemáticamente en la figura 2.4. Las propiedades espectrales de los acopladores se determinan enviando la luz del LED a través de la fibra 1 y registrando su transmisión a la salida de ambas fibras en los extremos opuestos del acoplador (esto es, se registra un espectro para cada una de las fibras a la salida del dispositivo).

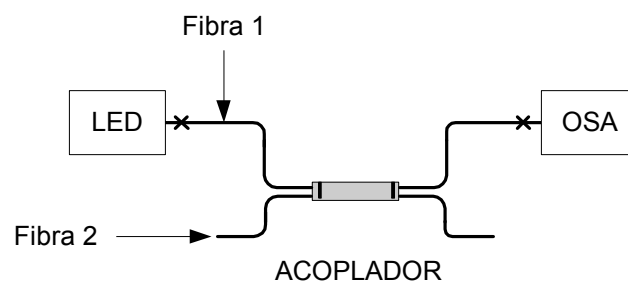


Figura 2.4. Esquema del arreglo utilizado para obtener el espectro de transmisión de los acopladores (OSA: analizador de espectros ópticos).

2.2.1 Acopladores fabricados utilizando un LED.

Los detectores ópticos utilizados en la estación de trabajo no discriminan la longitud de onda de la potencia óptica recibida. Cuando se utiliza un LED como fuente de luz, el detector de la fibra primaria recibe longitudes de onda en un rango espectral mayor a los 100 nm, y cualquier variación en potencia en las fibras ocurre dentro de este rango. El punto de 3 dB indica entonces que el acoplamiento se presenta a todas las longitudes, y se obtiene así un acoplador de banda ancha. Al continuar elongando las fibras, se obtiene un acoplador sobreacoplado pero selectivo en longitud de onda. En la figura 2.5 se muestra la curva de transferencia de potencia para un acoplador de este tipo. Nótese que la transferencia de potencia entre las fibras se detiene a partir de aproximadamente 7.0 mm de elongación. Esto se debe a que las fibras han sido adelgazadas hasta el punto de ruptura, y la luz deja de ser guiada en la estructura.

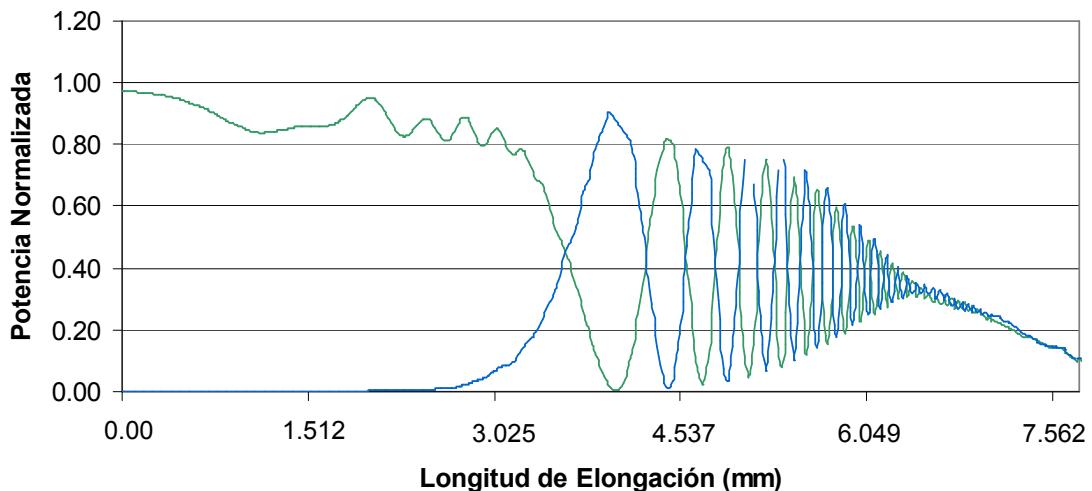


Figura 2.5. Gráfica obtenida en el monitoreo de la potencia óptica normalizada vs longitud de elongación utilizando como fuente de luz un LED.

Posteriormente, utilizando el analizador de espectros ópticos se observaron las características de transmisión de los acopladores. Un ejemplo típico de la transmisión a través de uno de estos dispositivos se muestra en la figura 2.6. En

la figura se observa en color gris el espectro del LED, y en color verde y azul el espectro de la luz acoplada de la fibra uno y dos, respectivamente. Nótese que a pesar de ser un acoplador sobre-acoplado, los puntos de cruce ocurren únicamente en dos longitudes de onda. Esto se debe al ancho espectral del LED, que al ser muy amplio, limita la selectividad en longitud de onda del acoplador fabricado, pues los detectores no pueden discriminar a qué longitudes de onda ocurre el acoplamiento de luz. De esta manera, el ancho espectral de la fuente utilizada durante el proceso de fabricación es muy importante para obtener las propiedades deseadas en un acoplador. Esto podrá observarse con mayor claridad en las siguientes secciones, en donde se reportan las características de los acopladores fabricados utilizando la fibra láser sintonizable.

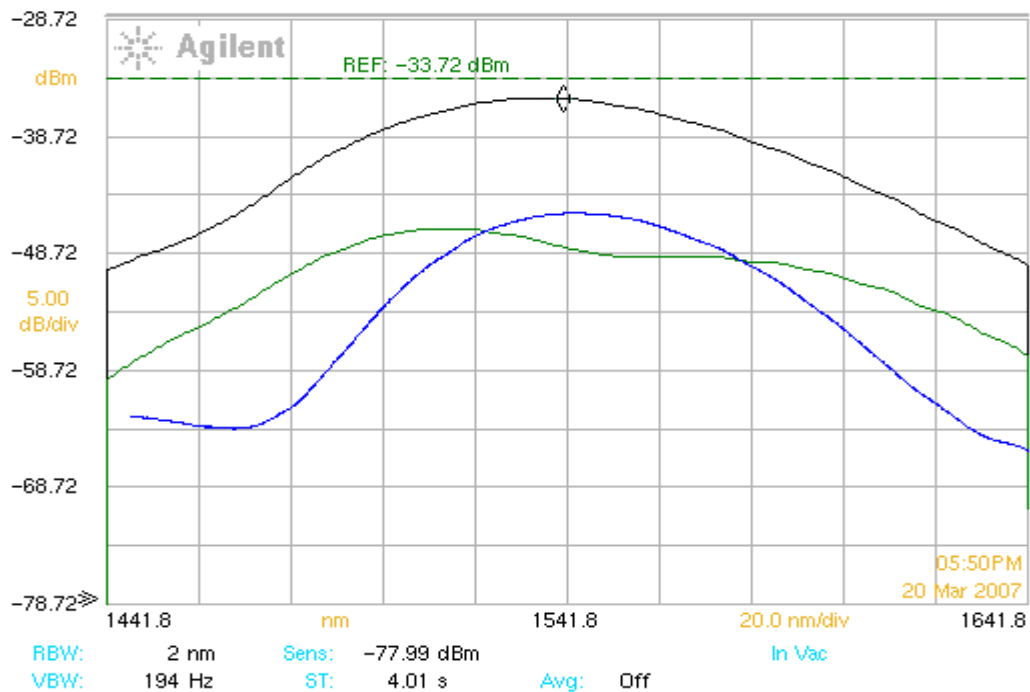


Figura 2.6. Espectro óptico del acoplador utilizando como fuente de luz un LED. En color gris el espectro del LED, en color verde y azul el espectro de la luz acoplada de la fibra uno y dos, respectivamente.

2.2.2 Acopladores fabricados utilizando la fibra láser sintonizable.

La fibra láser utilizada en el proceso de fabricación de acopladores se muestra en la figura 2.7. La fuente de corriente alimenta al diodo láser, el cual será la fuente de bombeo para la fibra láser; el acoplador tipo WDM servirá para separar las longitudes de onda de la fibra láser y del diodo láser (bombeo residual). La función del aislador (ISO) es permitir la salida de la longitud de onda solo en un sentido y que ésta no pueda retornar al resonador. La fibra de Erblio (Er^{3+}) es el material láser del sistema y proporciona la ganancia necesaria para que el láser funcione. El controlador de polarización (PC) ayudará para fijar y ajustar la polarización del sistema láser de fibra, mientras que el filtro Fabry Perot determina la longitud de onda de operación (alrededor de 1560 nm).

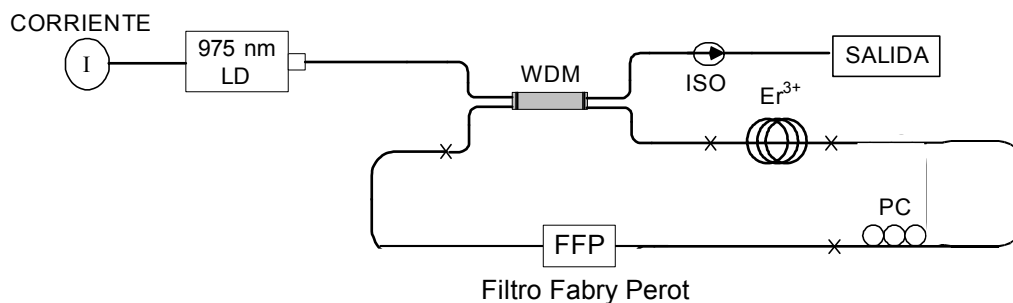


Figura 2.7. Esquema de la fibra láser sintonizable utilizada para obtener los acopladores sobre-acoplados.

Cuando se utiliza una fuente de luz con espectro angosto, los detectores de la máquina pueden registrar únicamente las variaciones de potencia sobre este ancho espectral limitado. Esto permite detectar con mayor sensibilidad los cambios en la potencia óptica debidos al cambio en la geometría de la región de acoplamiento. Para las longitudes de onda de la fibra láser (1530 nm a 1565 nm), la distribución de luz en la región de acoplamiento cambia más drásticamente al reducir la sección transversal de la guía de onda. De esta manera, los detectores

registran únicamente el acoplamiento a la longitud de onda del láser sin que otras longitudes de onda contribuyan a la cantidad de luz registrada a la salida del acoplador. Como puede verse en la figura 2.8, el uso de esta fuente de luz en el proceso de fabricación permite obtener acopladores con más de 100 ciclos de transferencia de potencia. Las pérdidas en exceso iniciales para este tipo de dispositivo fueron de 0.291 dB, y conforme aumenta el número de ciclos de transferencia de potencia pueden llegar hasta 2.99 dB. Esto se debe a la gran reducción en el diámetro de las fibras cuando se alcanza una elongación cercana a los 13 mm. En principio, las pérdidas para longitudes de elongación de esta magnitud pueden reducirse reajustando los parámetros de fabricación. Esto implica detener el proceso a una cierta longitud de elongación y ajustar nuevamente la velocidad de elongación y el barrido de la antorcha.

Para manipular los acopladores se utilizaron portaobjetos para microscopio (dimensiones de 5x3 cm). Para que pudieran alojar a los acopladores, los portaobjetos se indentaron en la región central (sobre la superficie del vidrio se deja una impresión o huella en forma tubular); el tamaño de la indentación es aproximadamente del ancho de la fibra óptica (figura 2.9), aunque la tolerancia con esta dimensión no fue muy estricta pues no es relevante para los objetivos de este trabajo. Una vez que el acoplador se coloca en esta montura, éste puede extraerse de la máquina y obtenerse el espectro de transmisión.

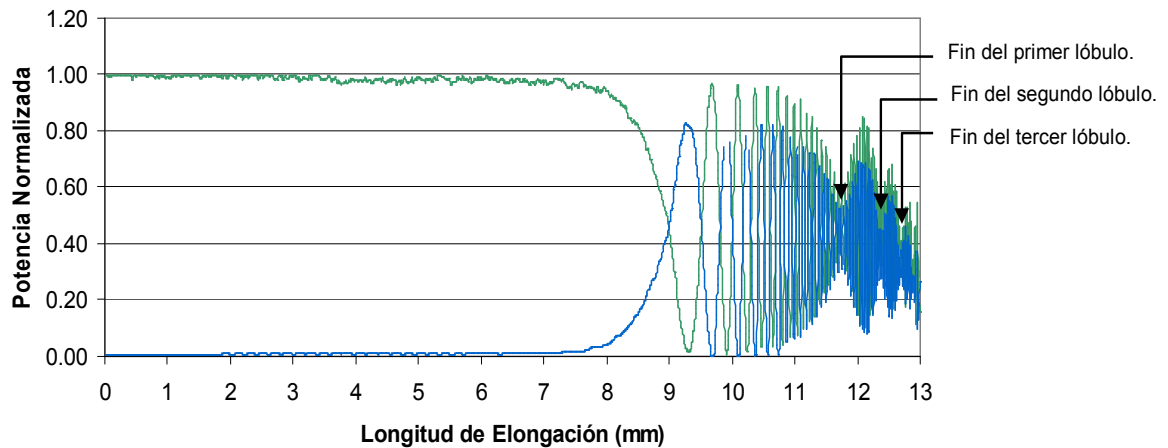


Figura 2.8. Potencia normalizada vs longitud de elongación de un acoplador sobre-acoplado con más de 100 ciclos de transferencia de potencia presentando 3 lóbulos completos.

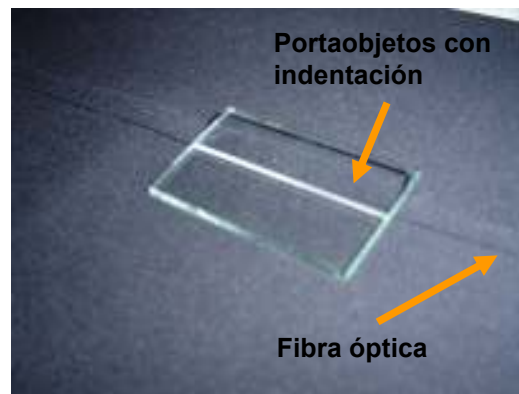


Figura 2.9. Portaobjetos con indentación para colocar la fibra óptica.

2.3 Características espectrales de los acopladores.

Los acopladores fabricados se clasificaron de acuerdo con el número de lóbulos obtenidos durante el proceso de fabricación. Tomando como referencia la figura 2.8, el lóbulo se define utilizando la envolvente de la curva de transferencia de potencia. El número de veces que esta curva se hace más angosta define el número de lóbulos del acoplador. Se trabajó con tres tipos de acopladores:

a) 1 Lóbulo...(figura 2.10).

- b) 2 Lóbulos...(figura 2.11).
- c) 3 Lóbulos...(figura 2.12).

La diferencia que existe entre éstos, además del número de lóbulos, es el tiempo de fabricación, pues para obtener un mayor número de lóbulos es necesaria una longitud de elongación mayor. Nótese que esto dependerá también de la colocación de las fibras ópticas en los rieles de jalado y la cercanía de ambas en la zona de calentamiento. En la práctica, la colocación de las fibras en la máquina es muy importante, pues debe tratarse siempre de que ambas fibras queden lo más juntas posible en la zona de elongación. Éste es el único paso dentro del procedimiento de fabricación de los acopladores para el cual no existe una forma automática de ajuste. De esta manera, es necesario adquirir experiencia en la colocación de las fibras antes de comenzar el proceso de fabricación. La influencia de la colocación de las fibras en los dispositivos fabricados puede observarse en las figuras 2.10, 2.11 y 2.12, pues puede verse que el primer punto de 3 dB para los tres casos ocurre para elongaciones distintas. Es por esto que en las figuras antes mencionadas, la elongación final requerida para obtener un acoplador con un mayor número de lóbulos, no es necesariamente mayor que la requerida para obtener un dispositivo de un lóbulo.

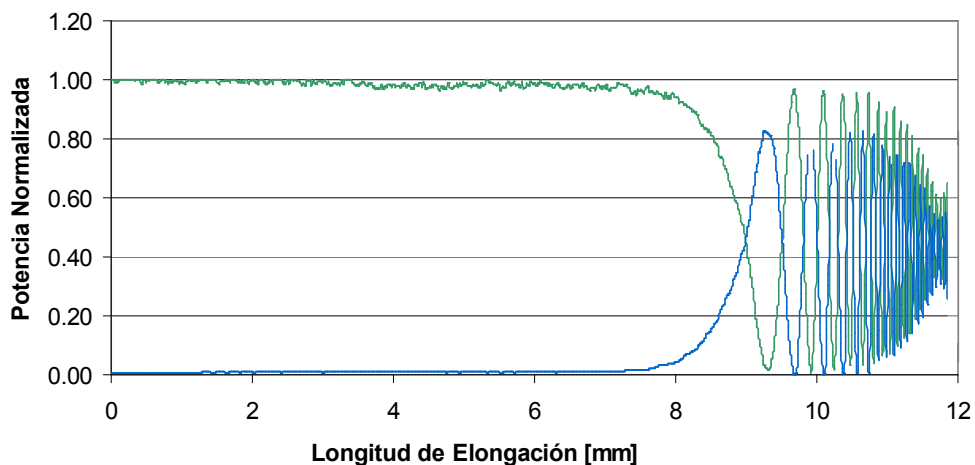


Figura 2.10. Gráfica de la potencia normalizada vs longitud de elongación de un acoplador sobreacoplado de 1 Lóbulo.

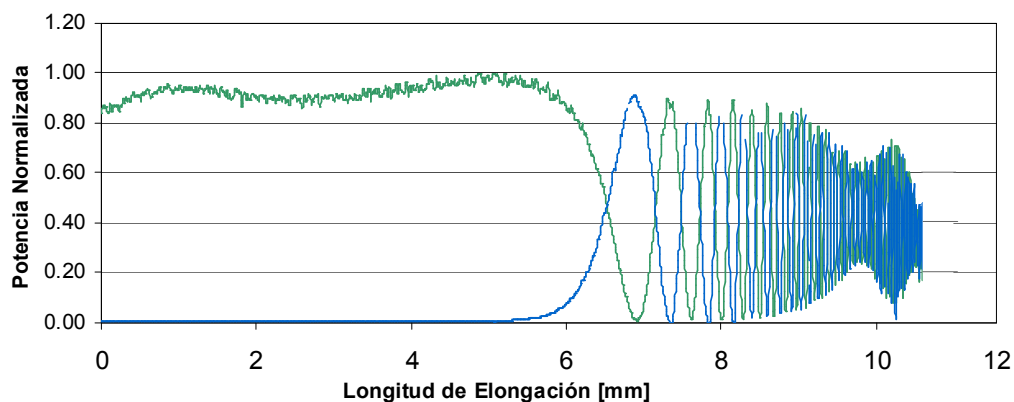


Figura 2.11. Gráfica de la potencia normalizada vs longitud de elongación de un acoplador sobreacoplado de 2 Lóbulos.

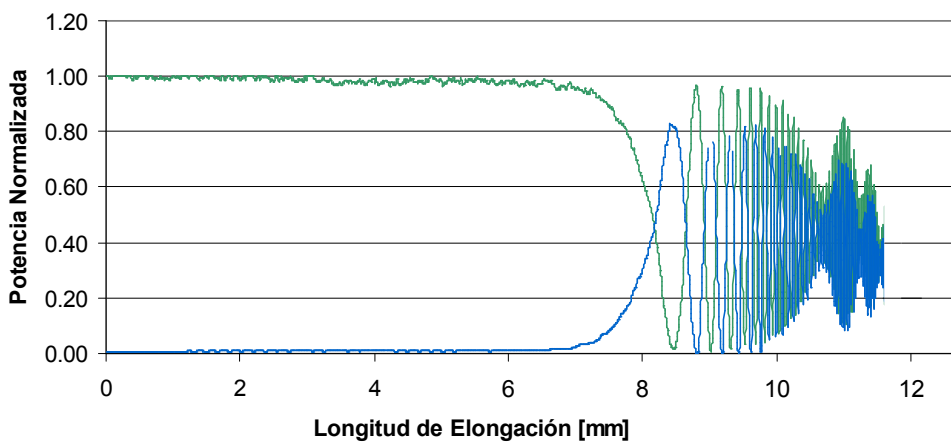


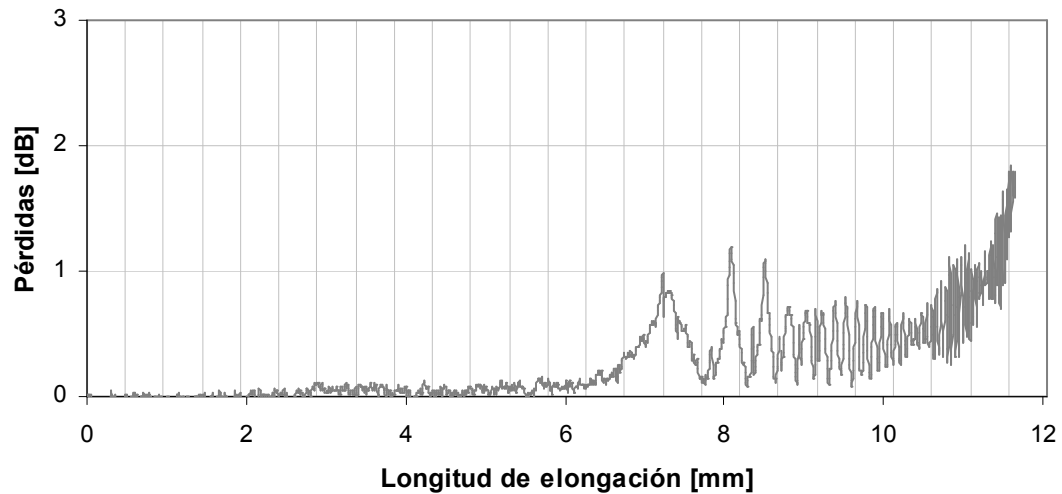
Figura 2.12. Gráfica de la potencia normalizada vs longitud de elongación de un acoplador sobreacoplado de 3 Lóbulos.

Como puede verse en las figuras, las características de transferencia de potencia en función de longitud de elongación son acordes a lo esperado. En primer lugar, al continuar el proceso de elongación, las fibras continúan adelgazándose y la luz se transfiere de una fibra a la otra un mayor número de veces. Esto puede verse claramente en las gráficas de acopladores de dos y tres lóbulos, pues la transferencia de potencia se presenta con longitudes de elongación más pequeñas. Es por esta razón que para el segundo y tercer lóbulo siempre hay un mayor número de ciclos de transferencia de potencia.

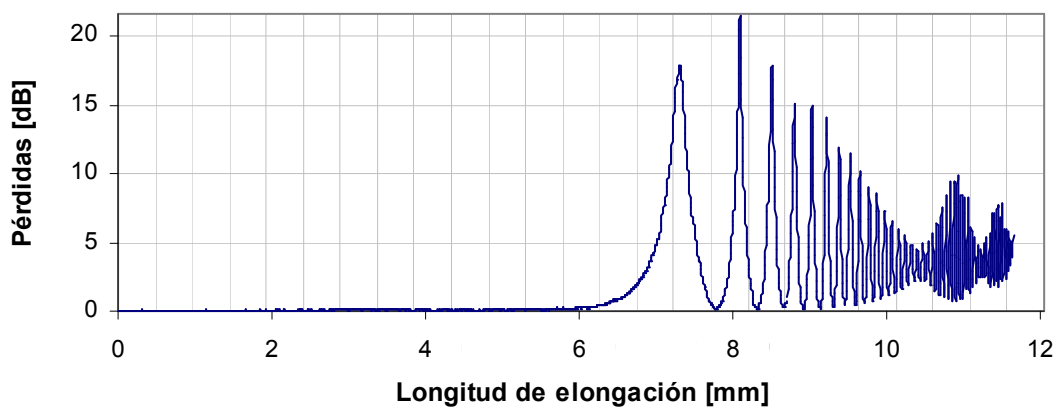
La figura 2.13 muestra las pérdidas en exceso (a) y de inserción (b) para el acoplador de 3 lóbulos cuyas características de transferencia de potencia se mostraron en la figura 2.12. Como puede verse, las pérdidas en exceso aumentan rápidamente cuando comienza la etapa de acoplamiento entre las fibras, debido a la deformación geométrica que sufren. Las pérdidas fueron calculadas mediante la ecuación 1 utilizando los datos de la curva de transferencia de potencia del acoplador. Asimismo, las pérdidas de inserción fueron calculadas con la ecuación 2. En esta gráfica podemos ver que la curva se parece a la de transferencia de potencia entre las fibras, lo cual concuerda con la definición de este tipo de pérdidas. Para acopladores de 1 y 2 lóbulos se obtuvieron curvas con tendencias similares a las de las figuras mostradas.

Al final del proceso de fabricación, las pérdidas en exceso típicas que presentan los acopladores son: para un lóbulo 1.47 dB, para dos lóbulos 3.7 dB y para tres lóbulos 3.76 dB. Con estos valores se observa que al aumentar el número de ciclos de transferencia de potencia de un lóbulo a dos, las pérdidas aumentan considerablemente; sin embargo, podemos notar que la diferencia de pérdidas entre un acoplador de dos lóbulos a tres es muy pequeña. Esto indica que las mayores pérdidas se obtienen cuando se realiza la primera etapa de sobre-acoplamiento (primer lóbulo); esta información es importante, pues indica que para obtener acopladores con menores pérdidas, es necesario un reajuste de los parámetros de fabricación una vez que se pase el punto de 3 dB. Para los

objetivos planteados en este trabajo, las pérdidas de los dispositivos fabricados fueron adecuadas, pero es importante notar que la fabricación de acopladores con alto grado de sobre-acoplamiento (200 ó 300 ciclos de transferencia de potencia) y con pérdidas bajas, requerirá un reajuste de parámetros después de alcanzar el punto de 3 dB.



(a)



(b)

Figura 2.13. (a) Pérdidas en exceso (b) Pérdidas de inserción vs longitud de elongación.

En la figura 2.14 se muestra el espectro de emisión del LED utilizado para caracterizar los acopladores. Los espectros obtenidos para dispositivos de dos y tres lóbulos fabricados en el laboratorio se muestran en la figura 2.15. La diferencia en la amplitud de los espectros mostrados se debe a que éstos fueron obtenidos bajo distintas condiciones experimentales; sin embargo, las figuras son útiles para mostrar las características espectrales de los acopladores. De la figura 2.15 se observa que mientras mayor sea el número de ciclos de transferencia de potencia, se presentan más bandas espectrales dentro del espectro de transmisión. Se puede notar también que hay mayor selectividad en longitud de onda en los acopladores con mayor número de ciclos de transferencia de potencia, pues las bandas de transmisión son más angostas. Adicionalmente, al ser más selectivo, el rango espectral de operación del acoplador se va haciendo también más angosto. Esto se debe a que la región de acoplamiento se hace más delgada y las longitudes de onda mayores se vuelven más susceptibles al salir del confinamiento en la guía de onda. La figura 2.15 muestra una de las características que distinguen a los acopladores sobre-acoplados: el acoplamiento de 3 dB se presenta a más de una longitud de onda. Como puede verse, a mayor número de lóbulos, mayor será el número de longitudes de onda a las cuales se presenta un acoplamiento de 3 dB.

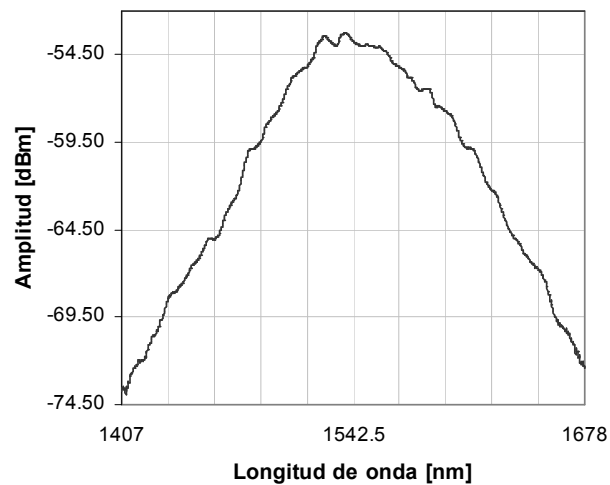


Figura 2.14. Espectro de transmisión de la fuente de luz utilizada, LED.

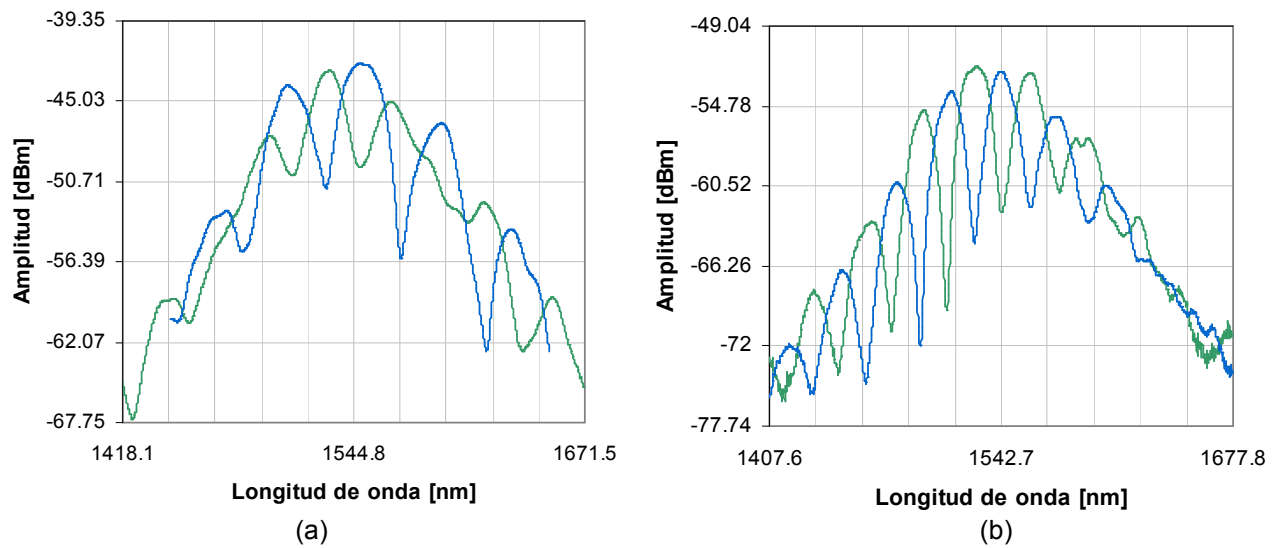


Figura 2.15. Espectros de transmisión del acoplador sobre-acoplado (a) 2 Lóbulos y (b) 3 Lóbulos.

Para todas las gráficas, la curva verde es la potencia de salida en la fibra 1 y la curva azul es la potencia de salida en la fibra 2. La fuente se acopla a la entrada de la fibra 1.

En el siguiente capítulo se explicará la importancia que tienen las características espectrales de los acopladores cuando son utilizados en resonadores de fibra óptica, y como se ve afectado el espectro al cambiar el índice de refracción del medio.

CAPÍTULO 3. CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE ACOPLADORES Y EFECTOS DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN

Las características espectrales de los acopladores de fibra óptica determinan la utilidad de estos dispositivos para alguna aplicación específica. Por ejemplo, en sistemas de comunicaciones ópticos basados en multiplexado por longitud de onda, la selectividad espectral de los acopladores debe ser adecuada para discriminar señales ópticas con separaciones espectrales pequeñas (alrededor de 0.8 nm). Por otro lado, otras aplicaciones requieren que el acoplamiento de luz entre las fibras se presente en un rango espectral mucho más amplio. El medio que rodea la sección de acoplamiento juega un papel determinante en las propiedades espectrales de los acopladores de fibra óptica. En esta región, la luz es guiada gracias a la diferencia de índices de refracción entre el vidrio y el medio que rodea al acoplador, y es por esto que los cambios en el índice de refracción modifican las propiedades espectrales de los acopladores.

En este capítulo observaremos que el coeficiente de acoplamiento de los acopladores de fibra óptica depende también de la longitud de onda. Esto implica que la cantidad de luz que se acopla entre las fibras depende de la longitud de onda, y el espectro de transmisión presentará bandas con anchos espectrales y separaciones que dependerán de los parámetros de fabricación utilizados. Esto es de interés para implementar resonadores de fibra óptica, pues si se utilizan acopladores como elementos de realimentación en un sistema de fibra láser, las propiedades espectrales del acoplador determinarán el espectro de emisión de esta fuente de luz. Estas características, en conjunto con los efectos del índice de refracción, resultan también útiles para fabricar sensores de fibra óptica láser.

3.1 Características espectrales: efectos de la longitud de onda.

El análisis teórico de los acopladores de fibra óptica requiere considerar las variaciones geométricas de la guía de onda en la sección de acoplamiento. Esto contrasta con el análisis de dispositivos de guía de onda plana, en los cuales la geometría y separación de los núcleos se mantiene constante a lo largo de todo el acoplador. Para acopladores de fibra óptica, los parámetros que determinan el coeficiente de acoplamiento incluyen la sección del cuello del acoplador (a_{cintura}), la longitud de elongación (L), la longitud inicial de la región de acoplamiento (L_{inicial}), la longitud eficaz de barrido de la antorcha (Δz_{eficaz}) y el diámetro inicial de la fibra (a_0), (ver figura 3.1).

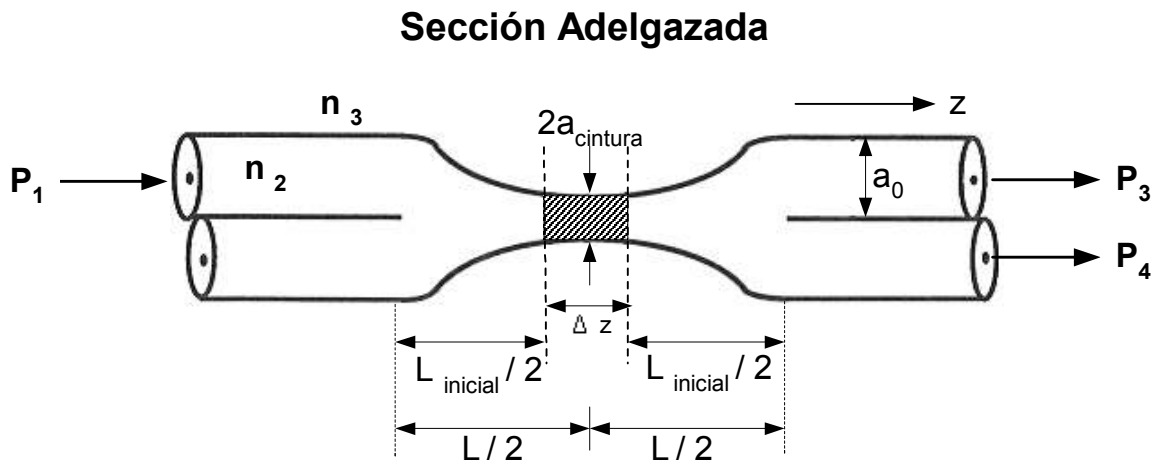


Figura 3.1. Sección del cuello de un acoplador de fibra óptica; el área sombreada representa la zona eficaz de calentamiento.

El análisis de acoplamiento se ha realizado en trabajos previos, y en éstos se considera que las fibras sufren un adelgazamiento adiabático. Con estas consideraciones y utilizando los parámetros antes descritos el coeficiente de acoplamiento queda expresado como:

$$C = \frac{3 \pi \lambda}{32 n_2 a_{\text{cintura}}^2} \frac{(L - L_{\text{inicial}})}{\left(1 + \frac{1}{V}\right)^2} \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda y n_2 es el índice de refracción del revestimiento. El diámetro de la sección de acoplamiento (a_{cintura}) y el número V se obtienen de la siguiente manera:

$$a_{\text{cintura}} = a_{\text{revestimiento}} \exp\left(\frac{-L}{2} \Delta z_{\text{eficaz}}\right) \quad (2)$$

$$V = \frac{2 \pi a_{\text{cintura}} \sqrt{n_2^2 - n_3^2}}{\lambda}$$

donde n_3 es el índice de refracción del medio externo, que es usualmente aire. De las ecuaciones anteriores podemos observar que el coeficiente de acoplamiento dependerá no sólo del índice de refracción del medio, sino también de la longitud de onda. La potencia óptica a la salida de la región de acoplamiento está dada por:

$$\begin{aligned} P_3 &= P_1 \cos^2 C \\ P_4 &= P_1 \sin^2 C \end{aligned} \quad (3)$$

donde P_1 es la potencia a la entrada de la fibra 1, P_3 es la potencia a la salida de la fibra 1 y P_4 es la potencia a la salida de la fibra 2.

Para ilustrar la dependencia del acoplamiento con la longitud de onda, la figura 3.2 muestra una gráfica de la potencia contra la longitud de elongación para longitudes de onda de 1.3 μm y 1.55 μm respectivamente, considerando una misma fibra óptica con $a_{\text{cintura}}=7.9 \mu\text{m}$, $n_1=1.461$, $n_2=1.458$. Si se observan las flechas de la figura, podemos ver que si detenemos la elongación alrededor de los 25.5 mm, la transferencia de potencia de la fibra 1 a la fibra 2 será del 100% para una longitud de onda de 1.3 μm , mientras que para una longitud de onda de 1.5 μm será de cero. Nótese que esto implica que para longitudes de onda de 1.5 μm , el acoplador tiene más de un ciclo de transferencia de potencia, pero para

esta longitud de elongación, la luz no será acoplada. Por lo tanto, si utilizamos una fuente de luz con ambas longitudes de onda, toda la luz de $\lambda=1.30 \mu\text{m}$ se irá a la fibra primaria y la luz de $1.55 \mu\text{m}$ será propagada por la fibra secundaria. Los acopladores que operan de esta manera se conocen como multiplexores por longitud de onda (WDM).

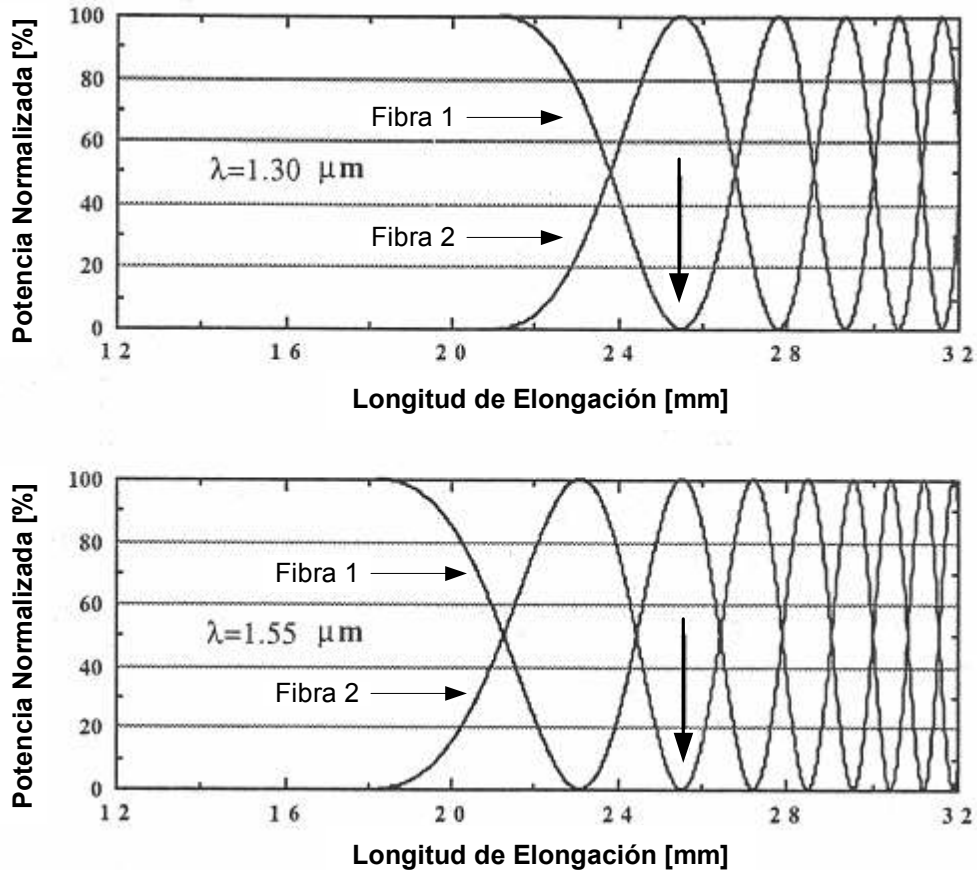


Figura 3.2. Gráfica de potencia normalizada vs. longitud de elongación para $\lambda=1.30 \mu\text{m}$, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$.

Utilizando estas mismas longitudes de onda en la ecuación (1), y con los mismos parámetros geométricos para la fibra óptica, se puede obtener la gráfica de la figura 3.3, en la que se muestra el coeficiente de acoplamiento contra la longitud de elongación. Se puede observar que el coeficiente de acoplamiento para $\lambda=1550 \text{ nm}$ siempre es mayor que para 1300 nm , lo cual indica que el coeficiente de acoplamiento en estos dispositivos siempre es mayor para longitudes de onda más grandes. Esto también indica que durante el proceso de

fabricación, el acoplamiento de luz comenzará a longitudes de elongación menores para longitudes de onda mayores. Estas variaciones en el coeficiente de acoplamiento generan cambios en la frecuencia de las funciones sinusoidales que describen la potencia de salida en ambas fibras (ver ecuación 3), y es por esto que los detectores registran variaciones sinusoidales de potencia durante el proceso de fabricación [1].

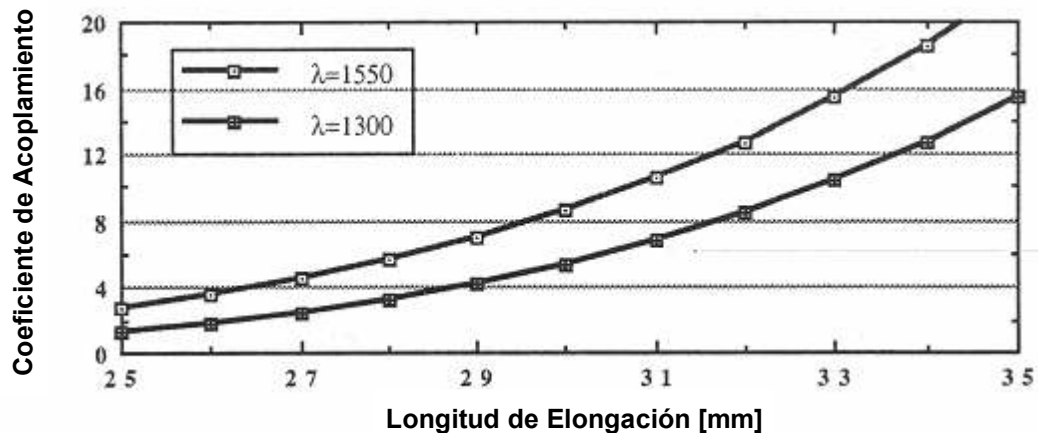


Figura 3.3. Gráfica del coeficiente de acoplamiento vs. longitud de elongación para $\lambda=1300$ nm y $\lambda=1550$ nm.

3.2 Investigación sobre los efectos del índice de refracción.

Para observar como varía la potencia de salida con respecto al índice de refracción del medio externo en un acoplador, podemos dibujarla de la ecuación 1 variando este parámetro. Utilizando valores de $L=40$ mm, $\Delta z_{\text{eficaz}}=6.35$ mm, $a_{\text{cintura}}=7.9$ μm , $n_1=1.461$, $n_2=1.458$, $\lambda=1300$ nm, se obtiene la gráfica de la figura 3.4. Podemos ver que si se utiliza aire como medio externo en el acoplador, la potencia a la salida es baja, en cambio si se trabaja con índices de refracción mayores la potencia de salida aumentará. Este cambio en potencia es debido a la diferencia de índices de refracción entre el medio externo y la región de acoplamiento. La cantidad de luz que sale del dispositivo dependerá de las propiedades del medio externo y, como puede verse en la gráfica, el acoplador

dejará de guiar la luz para índices de refracción cercanos al valor del índice de la fibra óptica (1.458 para una fibra óptica de SiO_2).

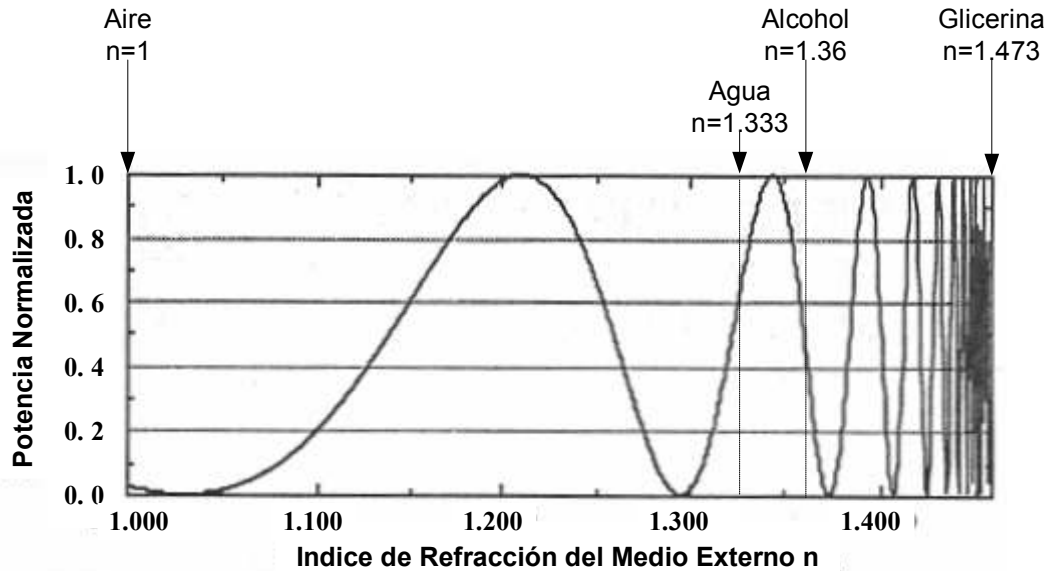


Figura 3.4. Gráfica de potencia contra índice de refracción del medio externo.

Desde punto de vista de aplicaciones de los acopladores, la variación del coeficiente de acoplamiento en función del índice de refracción proporciona también información importante. Por ejemplo, para aplicaciones en sensores, estos dispositivos pueden funcionar para determinar cambios en índice de refracción hasta valores cercanos a 1.458. Como referencia, en la figura se indican los índices de refracción del agua, alcohol y glicerina. Para líquidos como el agua y el alcohol, los acopladores pueden funcionar como sensores con una sensibilidad menor a la que se obtendría si se utilizaran líquidos con índices de refracción cercanos al del SiO_2 . Sin embargo, esto no considera procesos posteriores de fabricación en donde pueden utilizarse materiales para recubrir el acoplador y aumentar el índice del medio externo. Nótese también que cuando el acoplador se coloca en un medio con índice diferente al del aire, la potencia de salida puede también depender del volumen del medio en el que se encuentre sumergido, pues puede también formarse otra guía de onda por la interfaz medio externo-aire [1].

Para investigar la sensibilidad a los cambios en el medio externo de los distintos acopladores que se fabricaron, se depositó una gota de alcohol etílico en la región de acoplamiento. Las variaciones en los espectros de transmisión durante la evaporación del alcohol se observaron con el analizador de espectros ópticos (OSA) como se muestra en la figura 3.5. Estas mediciones permiten observar de manera dinámica como cambia el espectro de transmisión a medida que el alcohol se evapora. Las figuras 3.6 y 3.7 son los espectros más representativos para acopladores de dos y tres lóbulos durante el proceso de evaporación de la gota de alcohol etílico.

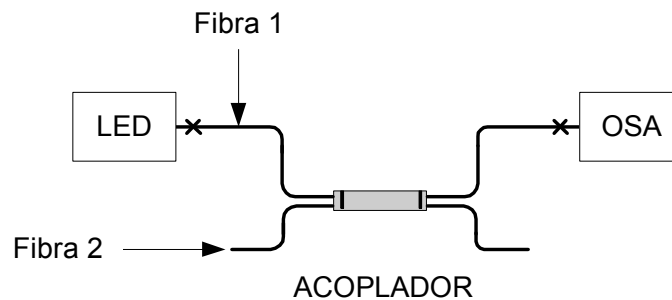


Figura 3.5. Configuración para obtener cambios en los espectros de transmisión.

De las gráficas del acoplador de dos lóbulos (figura 3.6) podemos observar que el espectro original antes de colocar una gota de alcohol etílico (a) presenta 8 bandas espectrales dentro de todo el espectro que abarca de los 1364.8 nm a los 1674.2 nm, teniendo una longitud de onda central en 1534.9 nm. Al colocar la gota de alcohol (b) se observan dentro del mismo rango espectral las variaciones de potencia de las bandas espectrales; las bandas espectrales centrales se conservan aunque se desplazan hacia longitudes de onda menores. Durante el proceso de evaporación se logra observar que desaparecen algunas de las longitudes de onda (c), para reaparecer posteriormente hasta llegar a obtener nuevamente el espectro original (d, e, f). Nótese que el último espectro (f) está recorrido ligeramente hacia la derecha (aproximadamente 15.4 nm), indicando que la región de acoplamiento retiene residuos de alcohol que contaminan la guía de onda.

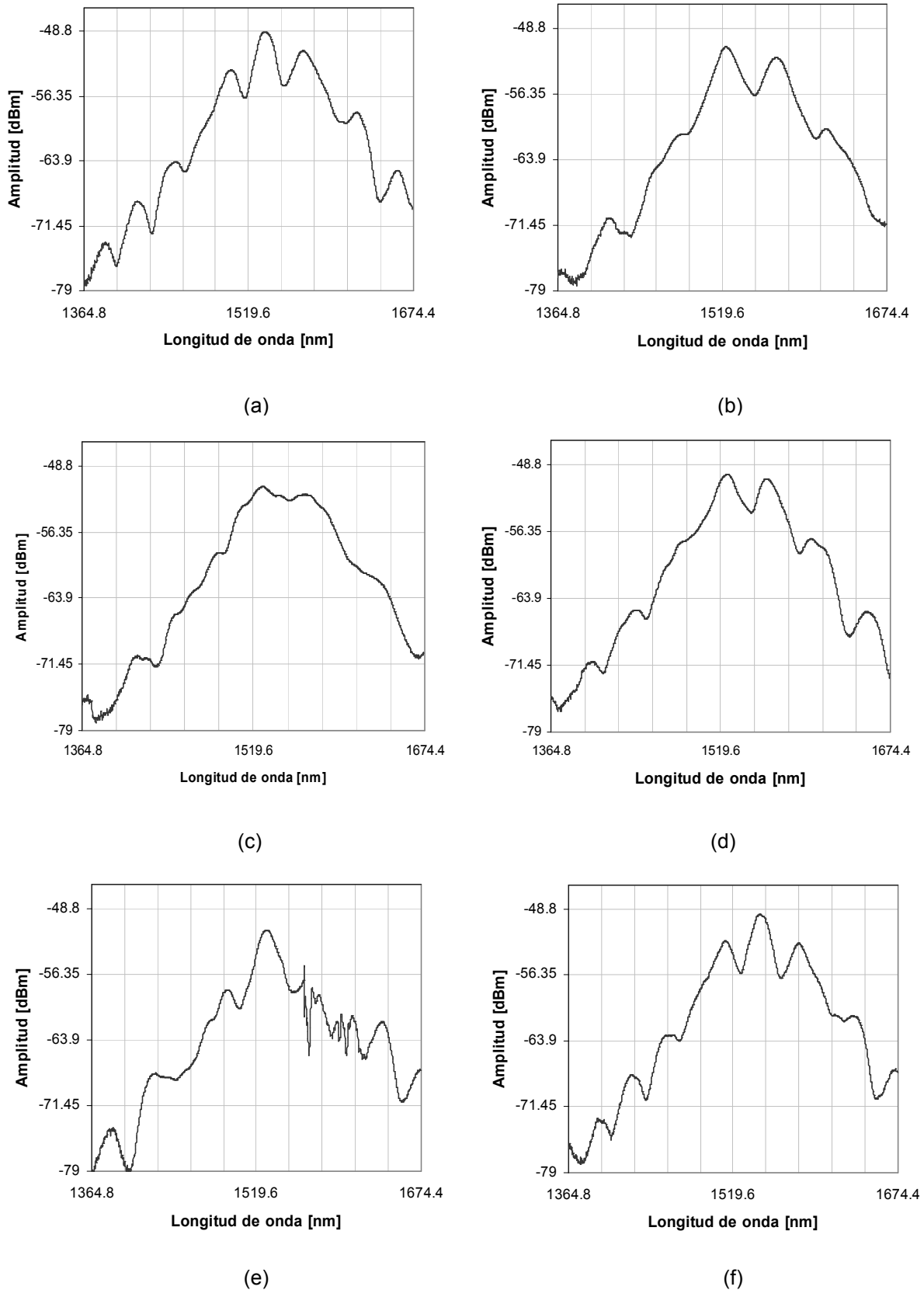
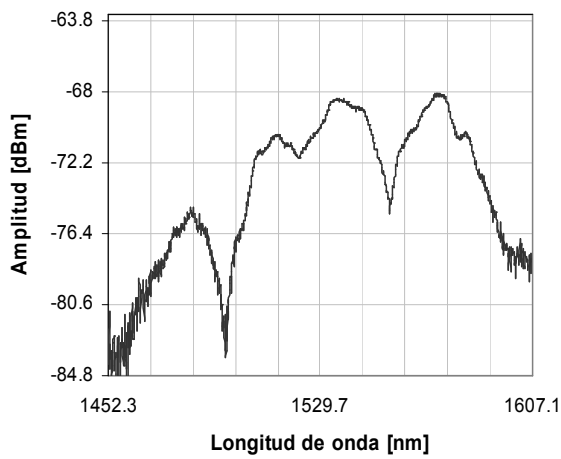
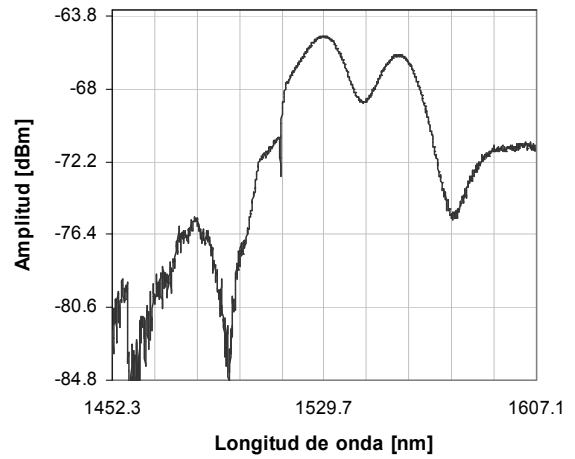


Figura 3.6. Espectros obtenidos para un acoplador sobre-acoplado de dos lóbulos descrito en la figura 2.11 durante el proceso de evaporación del medio externo (alcohol etílico).

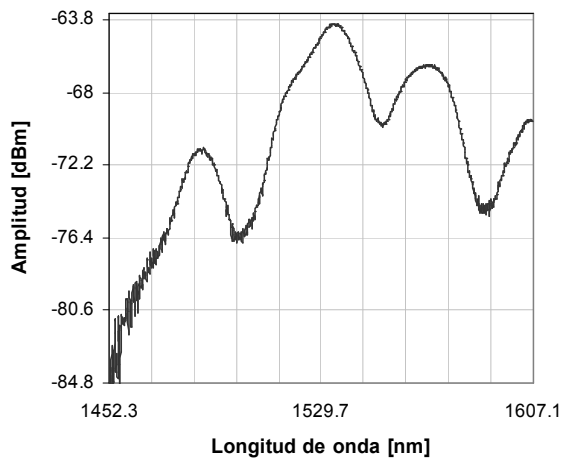
De las gráficas del acoplador de tres lóbulos (figura 3.7) podemos observar el espectro original antes de colocar una gota de alcohol etílico (a): éste presenta cuatro bandas espectrales dentro de todo el espectro que abarca de los 1452.3 nm a los 1607.0 nm, teniendo una longitud de onda central en 1529.7 nm. Comparando este rango espectral con el acoplador sobre-acoplado de dos lóbulos podemos observar que ahora se obtiene un rango de transmisión más pequeño debido a la mayor selectividad espectral para dispositivos con más ciclos de transferencia de potencia. Al colocar la gota de alcohol (b) se observan dentro del rango espectral de transmisión del acoplador las variaciones de potencia para las distintas longitudes de onda del espectro original. Puede observarse una mejor definición en las longitudes de onda centrales, pues el cambio en el índice de 1 a 1.36 (alcohol) disminuye la apertura numérica de la guía de onda y la luz queda mejor confinada. Durante el proceso de evaporación (c, d) se sigue observando mayor definición de las longitudes de onda centrales y a la mitad del proceso de evaporación (e) aparecen más bandas de transmisión en las longitudes de onda centrales. Al final del proceso (f) se observan cuatro bandas espectrales bien definidas. Al igual que en el caso anterior, el espectro de transmisión obtenido al final del experimento no es el mismo registrado en el inicio, y se debe también a los cambios que la guía de onda sufre durante este proceso. Nótese que los cambios espectrales son más marcados en este acoplador, lo cual es indicativo de una mayor sensibilidad a cambios en el índice del medio externo.



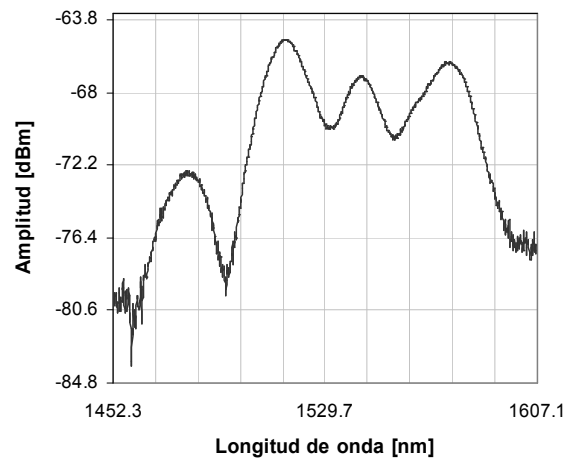
(a)



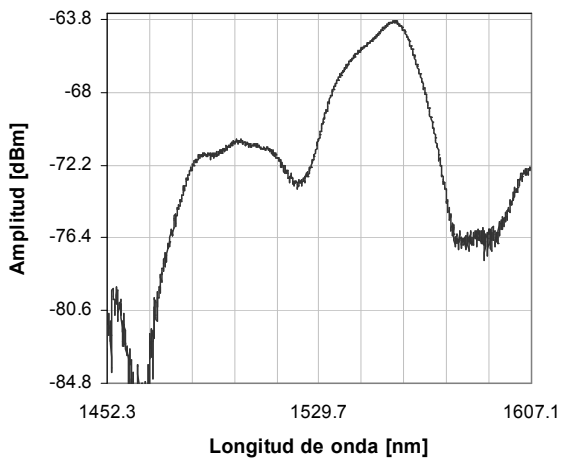
(b)



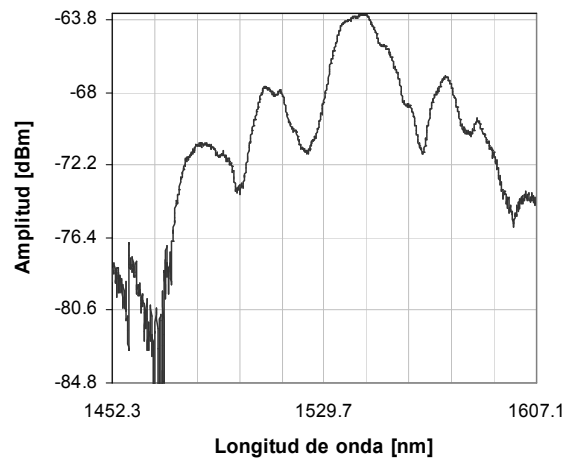
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.7. Espectros obtenidos para un acoplador sobre-acoplado de tres lóbulos descrito en la figura 2.12 utilizando un LED como fuente de luz y colocando una gota de alcohol.

El cambio en las características espectrales de los acopladores concuerda con el comportamiento descrito por las ecuaciones mostradas al inicio del capítulo. La potencia de salida de un acoplador es función del índice de refracción, del revestimiento de las fibras ópticas y del medio a su alrededor. Podemos hacer notar también que la sección adelgazada del acoplador, al quedar expuesta al medio exterior, está desprotegida de vibraciones, temperatura y otros parámetros externos. Como se mencionó anteriormente, ésta es una característica importante para aplicaciones en sensores de fibra óptica.

En la figura 3.8 se ilustra el cambio en la potencia con respecto al tiempo normalizado a la salida de la fibra 1 utilizando los acopladores de dos y tres lóbulos para un mismo cambio en índice de refracción (de 1 a 1.36). La potencia a la salida de la fibra se registró en los tiempos indicados en la gráfica y corresponde a la potencia registrada en los espectros mostrados en las figuras 3.6 y 3.7. Se puede observar claramente que la potencia a la salida del acoplador sufre mayores cambios en el dispositivo de tres lóbulos (de 1 a 2.031). Durante todo el proceso de evaporación la potencia a la salida del acoplador de tres lóbulos presenta menores cambios después del tiempo 1 y en el tiempo 5 no se acerca a la potencia de salida original (sin alcohol). En cambio en el acoplador de dos lóbulos, la potencia a la salida de la fibra sufre menores cambios (de 1 a 0.855). Durante todo el proceso de evaporación la potencia a la salida del acoplador presenta mayores cambios después de haber pasado el tiempo 1 y al tiempo 5 se acerca a la potencia de salida original (sin alcohol). Estas observaciones indican que el acoplador de tres lóbulos es más sensible a los cambios en el medio externo que el de dos lóbulos, pues no se logra obtener la potencia registrada al inicio de los experimentos. El incremento en la potencia normalizada al concluir el proceso de evaporación indica que el acoplador de tres lóbulos ha sufrido cambios más drásticos en la región de acoplamiento. Esto significa que los residuos de alcohol afectan más notoriamente el coeficiente de acoplamiento y las condiciones de confinamiento de luz de la guía de onda que se forma en la región de acoplamiento.

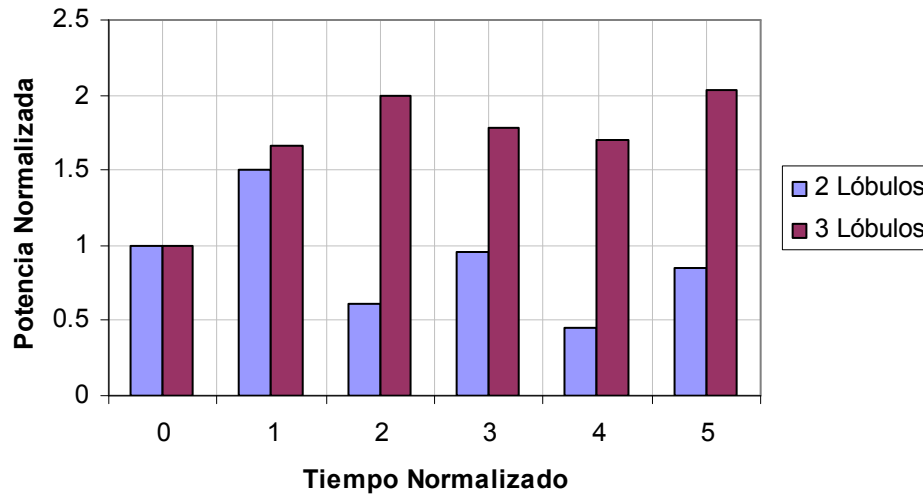


Figura 3.8. Potencia normalizada a la salida de una de las fibras de dos acopladores con diferente número de lóbulos, durante el proceso de evaporación del alcohol.

3.3 Acopladores en resonadores de anillo y resonadores Fabry-Perot.

El estudio de resonadores de fibra óptica es muy importante para determinar las características fundamentales de la luz láser que se puede generar con estos dispositivos. El desarrollo de sistemas láser basados en fibras se enfoca al uso de resonadores de fibra óptica, sobre todo por su tamaño compacto. Un resonador óptico es un dispositivo que almacena energía y confina luz a ciertas frecuencias de resonancia. En la figura 3.9 se ilustra un resonador de anillo de fibra óptica junto con su equivalente implementado con dispositivos ópticos convencionales. Como puede verse en la figura, el resonador en anillo se obtiene al unir dos de los brazos de un acoplador: la luz se propaga siguiendo una trayectoria cerrada entrando por uno de los brazos pasando por la sección de acoplamiento y saliendo por el otro brazo. Los dos brazos (fibras) del acoplador pueden acoplarse a una o más guías de onda. Las propiedades espectrales del resonador están determinadas por el coeficiente de acoplamiento del acoplador, ya que éste establece las longitudes de onda que podrán propagarse dentro del anillo.

La configuración de anillo de fibras ópticas láser permite que el haz de luz se transmita en dos direcciones dentro del anillo, con lo que se genera oscilación de varios modos y distorsión en la ganancia de la fibra. Generalmente, estas características pueden modificarse introduciendo un aislador óptico dentro del anillo, el cual obliga a una operación unidireccional. Los resonadores en anillo fabricados con dispositivos de fibra óptica han sido de gran interés sobre todo para el desarrollo de giroscopios de tamaño compacto. Asimismo, se ha comenzado a estudiar su empleo para el desarrollo de sensores polarimétricos. Las características de los acopladores utilizados en estos sistemas láser son entonces fundamentales para diversas aplicaciones [3][5].

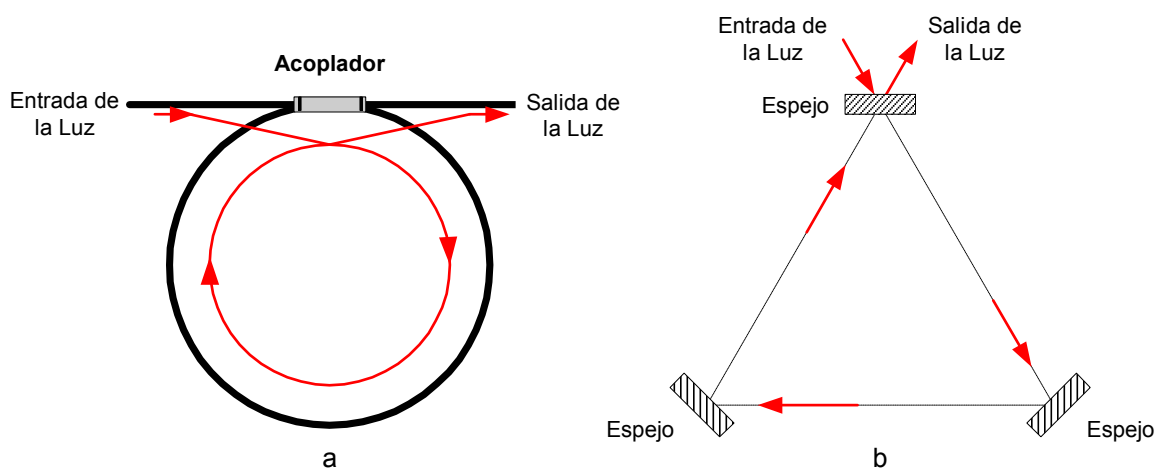


Figura 3.9. a) Resonador en anillo de fibra óptica; b) dispositivo equivalente utilizando elementos de óptica convencionales.

En el siguiente capítulo se mostrará como las propiedades espectrales de los acopladores fabricados determinan las longitudes de onda de operación de una fibra láser en una configuración de anillo. Veremos también como los cambios en el índice de refracción del medio externo modifican las características espectrales de la emisión láser generada con estos arreglos.

CAPÍTULO 4. INVESTIGACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES DE RESONADORES EN ANILLO CON ACOPLADORES SOBRE-ACOPLADOS

El uso de fibras ópticas láser en las comunicaciones y en sistemas de medición basados en sensores de fibra óptica ha permitido desarrollar dispositivos compactos que presentan características únicas. El desarrollo de sistemas láser se basa en el empleo de materiales que emitan luz a través de procesos luminiscentes. Para generar y amplificar luz mediante estos procesos se requiere, además del material láser, un resonador óptico que permita el ajuste fino de las frecuencias de operación del sistema láser y una fuente de energía externa.

Con el desarrollo de dispositivos láser de fibra óptica es posible ahora diseñar sistemas láser utilizando únicamente dispositivos de fibra óptica, lo cual ha sido de gran importancia para disminuir el tamaño e incrementar la eficiencia de estos sistemas [3]. En este capítulo veremos las características de sistemas láser de fibra utilizando resonadores de anillo contruidos con los acopladores fabricados en el laboratorio.

4.1 Arreglo experimental.

Para estudiar la influencia de los acopladores contruidos en las propiedades espectrales de un sistema láser de fibra, se construyó un resonador en configuración de anillo, cuyos elementos se muestran esquemáticamente en la figura 4.1. En esta configuración, el acoplador determina las longitudes de onda que circularán dentro del anillo para ser amplificadas y generar emisión láser. Dado que no se utilizan aisladores dentro del anillo, el resonador opera en modo bi-direccional, pues la luz generada puede circular simultáneamente en dos direcciones. Ésta es la configuración más simple para un láser de fibra en anillo y

es útil para determinar la influencia del acoplador en las características espectrales de la emisión láser.

El láser de fibra en configuración de anillo de la figura 4.1 consta de un diodo láser (LD), un acoplador tipo WDM, un aislador óptico (ISO), 40 cm de fibra de Erblio (Er^{3+}), un controlador de polarización (PC), y el acoplador sobre-acoplado (HOCC). El diodo láser se opera de manera controlada con una fuente de corriente regulada y proporciona la energía de bombeo para la fibra de erbio. Ésta se suministra a través del WDM, que se encarga de separar la luz que circula en el anillo en función de la longitud de onda. El controlador de polarización se utiliza para ajustar la polarización del haz generado en el arreglo, y permite mantener un estado de polarización fijo dentro del anillo. El aislador a la salida del anillo evita perturbaciones en el láser bloqueando la luz que pueda reflejarse hacia el resonador. El acoplador sobre-acoplado cierra el anillo y se encarga de seleccionar las componentes espectrales de la luz láser emitida por la fibra de erbio.

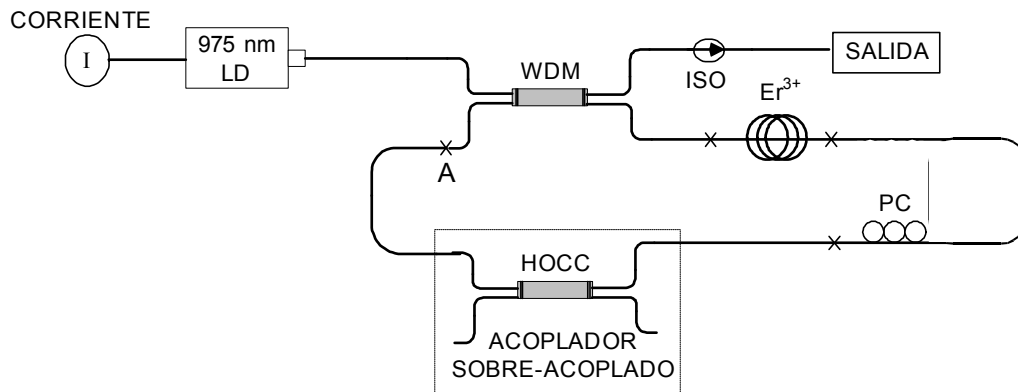


Figura 4.1. Sistema láser de fibra en configuración de anillo utilizando un acoplador sobre-acoplado.

Con los amplificadores de fibra óptica, fabricados al incorporar elementos de tierras raras en el núcleo de la fibra, las características espectrales de la luz láser estarán dadas por el tipo de tierra rara utilizado en el núcleo de la fibra. Para este trabajo se utilizó una fibra de Er^{3+} , que presenta una banda espectral de

emisión que va de 1530 nm a 1565 nm, teniendo máxima luminiscencia alrededor de los 1535 nm (ver figura 4.2). En la configuración de anillo, el WDM deja pasar todas las longitudes de onda dentro del rango espectral de emisión de la fibra de erbio. De esta manera, las longitudes de onda que serán amplificadas son aquellas que el acoplador sobre-acoplado seleccione; esto a su vez, depende de las características de fabricación del acoplador (número de ciclos, coeficiente de acoplamiento, etc.).

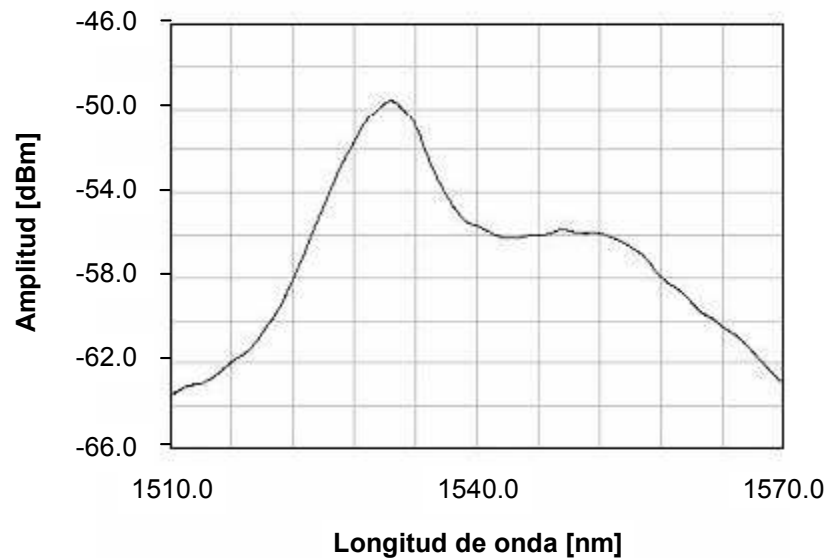


Figura 4.2. Espectro de emisión de la fibra de erbio.

Los experimentos realizados para observar los espectros de transmisión de los acopladores sobre-acoplados fueron de dos tipos: el primero en configuración anillo abierto (para dos y tres lóbulos) y el segundo en configuración anillo cerrado (para acopladores con uno, dos y tres lóbulos). El punto A en la figura 4.1 muestra la sección en la cual el anillo se abrió y se colocó el analizador de espectros ópticos (OSA) para observar los cambios espectrales. Para los espectros en anillo cerrado el OSA fue colocado a la salida del aislador óptico. El espectro de transmisión se registró para variaciones en el medio externo usando nuevamente alcohol etílico.

4.2 Espectros de transmisión de los acopladores (anillo abierto).

Los espectros de transmisión más representativos obtenidos en la configuración anillo abierto durante el proceso de evaporación de la gota de alcohol etílico se muestran en la figura 4.3. La secuencia de los espectros registrados es similar a la que se mostró cuando se utilizó un LED como fuente de luz; por simplicidad y dado que este tipo de experimento se mostró con más detalle en el capítulo anterior, en la figura se muestran únicamente tres espectros para cada acoplador (acoplador de dos lóbulos (a) y de tres lóbulos (b)). En ambos casos, la gráfica en color negro es el espectro antes de colocar alcohol etílico, la gráfica en color azul es el espectro obtenido con el alcohol y en color rojo se presenta el espectro registrado al finalizar el proceso de evaporación. A pesar de utilizarse otros acopladores distintos a los usados para los experimentos del capítulo anterior, los resultados son muy similares indicando que el proceso de fabricación de los dispositivos es bastante repetible. Para el acoplador de dos lóbulos (figura 4.3a) se logra observar el mismo comportamiento registrado al utilizar la fuente de espectro amplio, ya que al final del proceso de evaporación se logra obtener casi en su totalidad el espectro original. En el caso del acoplador de tres lóbulos, (figura 4.3b), de igual forma que al utilizar la fuente de espectro amplio, no se logra obtener el espectro original: hay pérdidas en amplitud y el espectro final se recorre hacia longitudes de onda mayores. Como se mencionó antes, estos cambios en ambos casos indican que la región de acoplamiento retiene residuos de alcohol que contaminan la guía de onda.

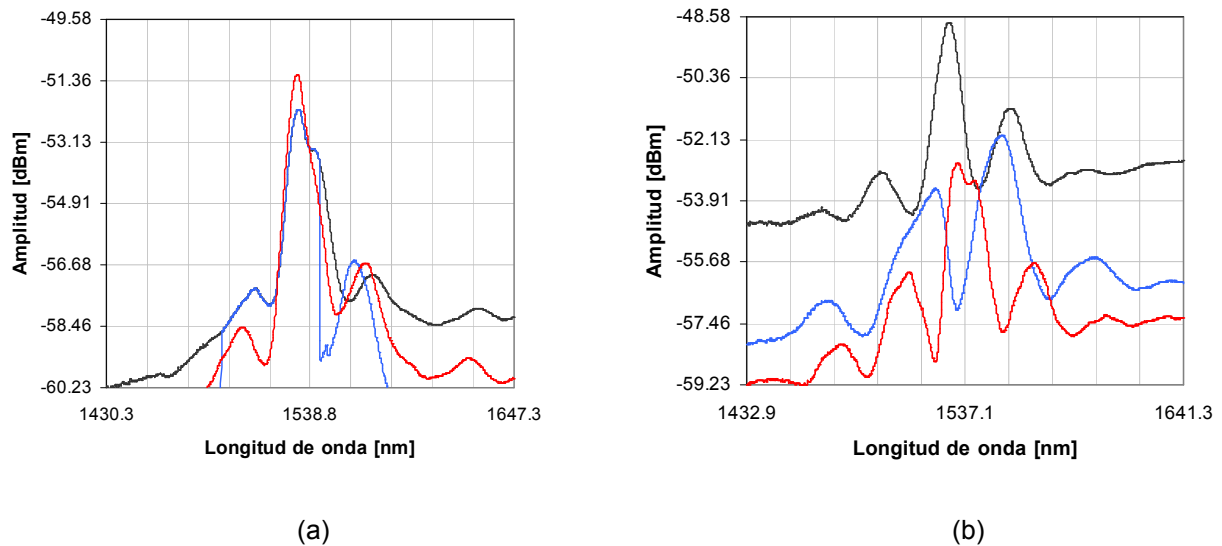


Figura 4.3. Espectros registrados durante el proceso de evaporación del medio externo: (a) acoplador sobre-acoplado de dos lóbulos, (b) acoplador sobre-acoplado de tres lóbulos.

En los espectros para ambos tipos de acopladores podemos ver que estos dispositivos realizan efectivamente la selección espectral de la luz que circulará dentro del anillo. Como veremos más adelante, el rango espectral de operación del láser en anillo estará entonces determinado por los acopladores y siempre estará dentro del rango espectral de emisión de la fibra de erbio.

En la figura 4.4 se ilustra el cambio en la potencia con respecto al tiempo normalizado a la salida de la fibra 1 utilizando los acopladores de dos y tres lóbulos para un mismo cambio en índice de refracción (de 1 a 1.36). Al igual que en los experimentos del capítulo anterior, los valores de potencia fueron registrados en el tiempo especificado en la gráfica. La potencia a la salida de la fibra sufre mayores cambios en el acoplador de tres lóbulos (de 1 a 0.04). Durante todo el proceso de evaporación la potencia a la salida del acoplador de tres lóbulos presenta menores cambios después del tiempo 1 y al tiempo 2 no se acerca a la potencia de salida original (sin alcohol). En cambio, en el acoplador de dos lóbulos, la potencia a la salida de la fibra sufre menores cambios (de 1 a 0.848). Al finalizar el proceso de evaporación (tiempo 2) la potencia a la salida de este acoplador se aproxima a la potencia de salida original (sin alcohol).

Nuevamente estas observaciones indican que el acoplador de tres lóbulos es más sensible a los cambios en el medio externo que el de dos lóbulos, pues no se logra obtener la potencia original. Después del tiempo 2 no se registró ningún cambio en el espectro de transmisión.

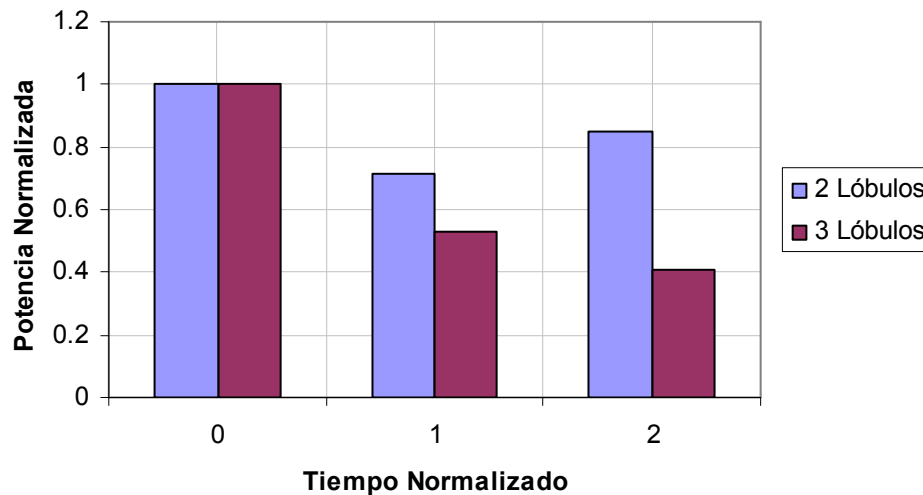


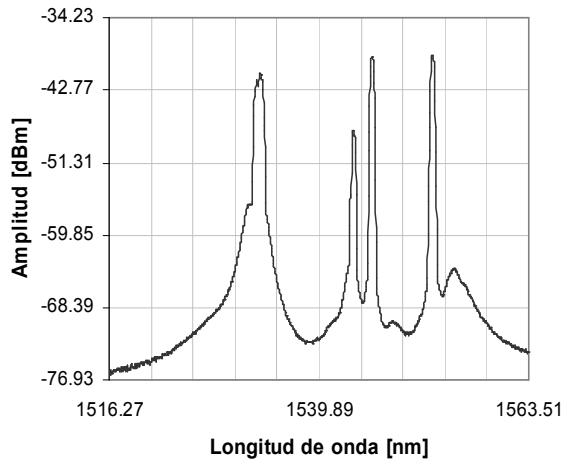
Figura 4.4. Potencia normalizada a la salida de una de las fibras de dos acopladores con diferente número de lóbulos, durante el proceso de evaporación del alcohol.

4.3 Características de la emisión láser con distintos acopladores (anillo cerrado).

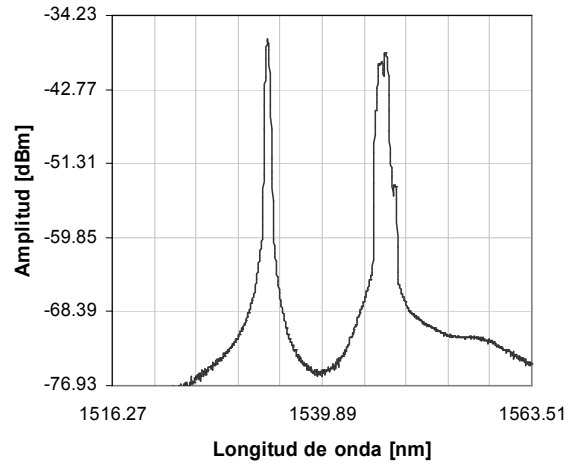
Al cerrar el anillo en el arreglo experimental, se obtiene un resonador láser en el que la emisión láser se genera a las longitudes de onda que puedan circular con menores pérdidas. Como se observó en la sección anterior, el acoplador dentro del anillo realiza la selección espectral que determinará las longitudes de onda que circularán con menores pérdidas dentro del anillo. Estas longitudes de onda son en las que el acoplador tiene bandas de trasmisión, y serán las que circulan dentro del anillo para ser amplificadas. En este caso, los cambios en el índice de refracción en la región de acoplamiento generarán cambios en la longitud de onda de emisión del láser en anillo.

El procedimiento experimental fue el mismo utilizado para las configuraciones anteriores. Para tener un punto adicional de comparación, en estos experimentos se utilizó también un acoplador sobre-acoplado de un lóbulo. Los espectros de transmisión más representativos obtenidos con este acoplador durante el proceso de evaporación de la gota de alcohol etílico se muestran en la figura 4.5. La gráfica original antes de colocar una gota de alcohol etílico es la gráfica (a) en la cual se observa que el láser opera en longitudes de onda. Al colocar la gota de alcohol (gráfica b) se observan las variaciones de potencia en las distintas bandas espectrales en las que opera el láser; puede observarse que durante el proceso de evaporación hay disminución de potencia de algunas longitudes de onda (gráfica c, d). Al finalizar el proceso de evaporización, puede observarse que las bandas de transmisión a las longitudes de onda iniciales reaparecen (gráfica e), sin embargo, las líneas de emisión láser en la región central del espectro no se recuperan. No obstante, al realizar ajustes en el controlador de polarización dentro del anillo, es posible obtener nuevamente las longitudes de onda originales (figura f).

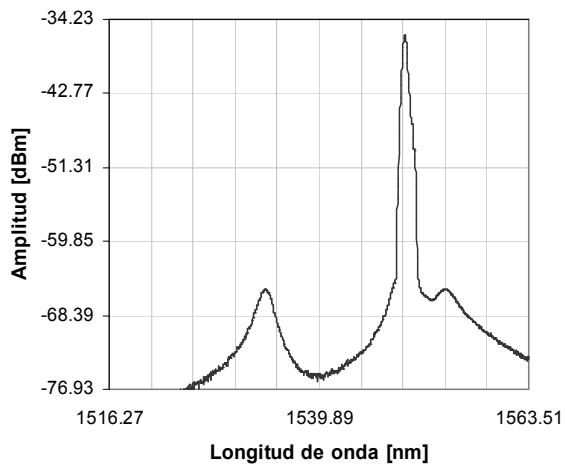
Los cambios espectrales observados con esta configuración indican que las pérdidas que se generan durante el proceso de evaporación dependen de la polarización. Es por esto que el espectro puede ajustarse mediante el controlador de polarización, pues los residuos de alcohol sobre la región de acoplamiento no tienen una distribución uniforme. De esta manera, cuando la luz pasa por esta región sufre pérdidas que dependen de la polarización, y los ajustes en el controlador de polarización permiten seleccionar orientaciones en las que las pérdidas son mínimas.



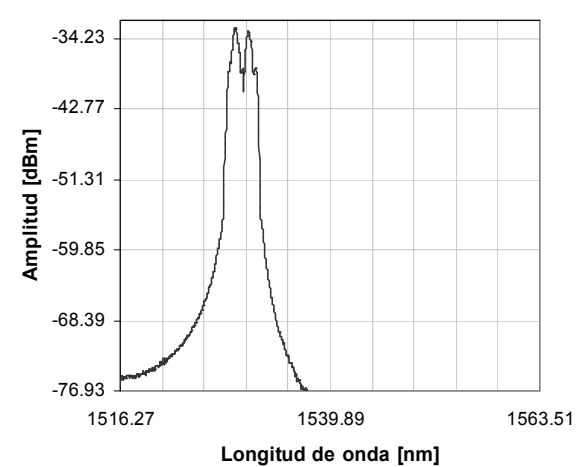
(a)



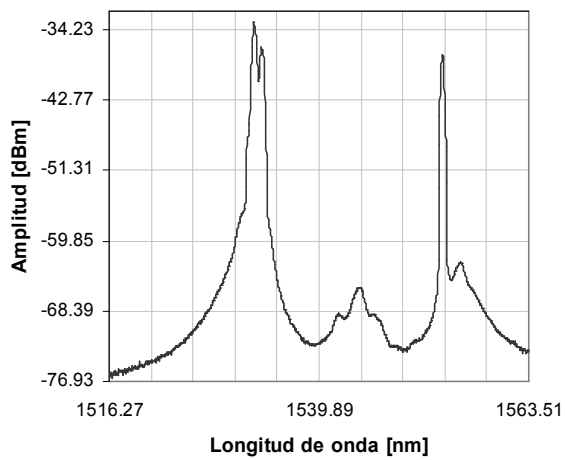
(b)



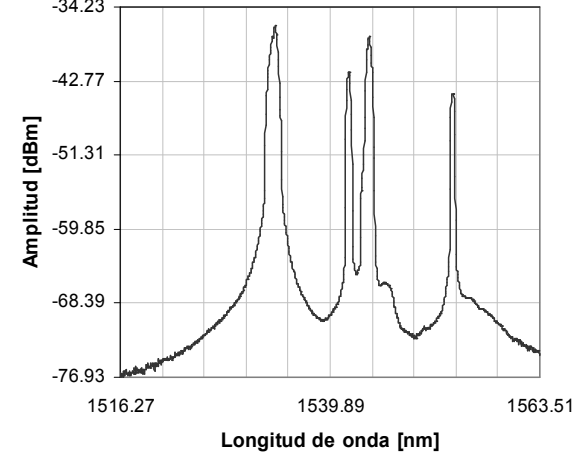
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.5. Espectros obtenidos para un acoplador sobre-acoplado de un lóbulo, durante el proceso de evaporación del medio externo (alcohol etílico).

En la figura 4.6 se muestran los espectros de transmisión más representativos obtenidos con el láser en anillo utilizando acopladores sobre-acoplados de dos (a) y tres lóbulos (b). La gráfica en color negro representa el espectro original, en color azul se muestra el espectro obtenido al colocar alcohol etílico y en color rojo se muestra el espectro al final del proceso de evaporación. Comparando los espectros sin alcohol, podemos notar que el rango espectral de operación del láser se va reduciendo en función del número de lóbulos del acoplador. Podemos ver que mientras mayor sea el número de lóbulos del acoplador sobre-acoplado, la región espectral de operación será más angosta (ver figuras 4.5a y 4.6). Esto influye también en las características de las líneas de emisión láser que pueden generarse dentro de cada banda de transmisión. Nótese, por ejemplo, que para el acoplador de tres lóbulos pueden observarse más de dos líneas de emisión láser tratando de operar dentro de la banda de transmisión (figura 4.6b), mientras que para el acoplador de un lóbulo se generan únicamente hasta dos líneas láser por banda (figura 4.5a). Esto se debe a que la energía proporcionada por la fibra de erbio se concentra en una región espectral más estrecha para un acoplador más selectivo, y esto permite generar múltiples longitudes de onda en una región espectral más angosta. Sin embargo, las líneas de emisión son menos estables mientras más cercanas sean estas longitudes de onda, pues el erbio no puede operar de manera estable bajo estas condiciones. Estas características se resaltarán con más detalle en las conclusiones.

Durante el proceso de evaporación se generan variaciones de potencia y desplazamiento de las regiones espectrales de operación para ambos tipos de acopladores. Podemos notar que el desplazamiento espectral no es el mismo en ambos casos: mientras que para el acoplador de dos lóbulos el espectro se recorre hacia la izquierda (figura 4.6a), el acoplador de tres lóbulos muestra desplazamiento espectral hacia la derecha (figura 4.6b). Esta característica indica que en ambos casos el láser trata de operar en la región de mayor ganancia, esta región está a longitudes de onda menores para el acoplador de dos lóbulos, mientras que para el acoplador de tres lóbulos la región de desplazamiento es

hacia longitudes de onda mayores. En general, las pérdidas inducidas por el cambio en el índice de refracción generarán cambios en la longitud de onda de operación del láser hacia regiones espectrales en donde la ganancia supere a las pérdidas.

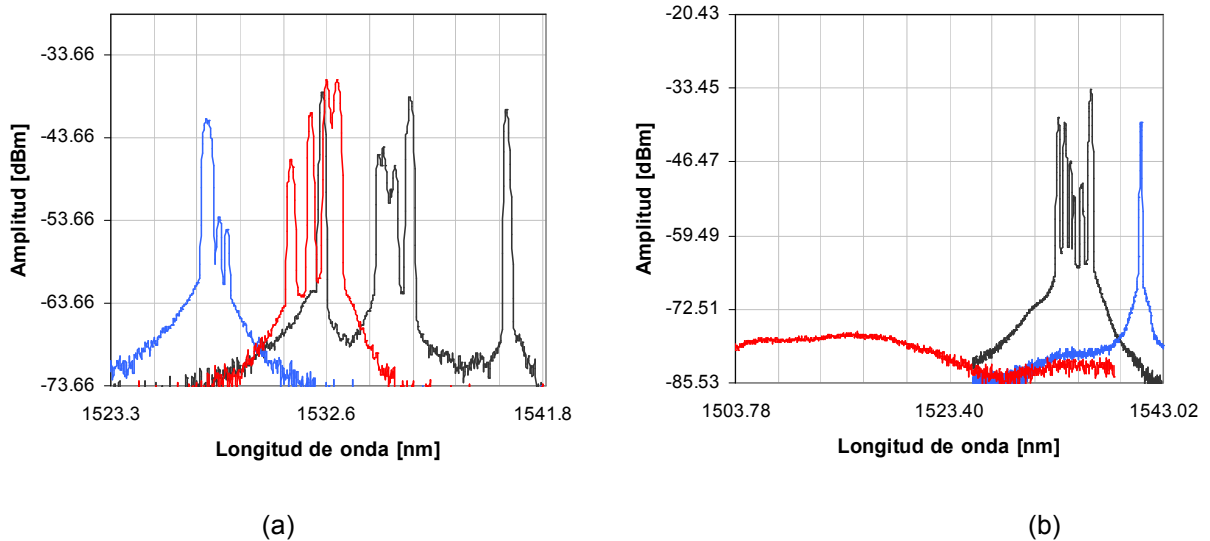


Figura 4.6. Espectros registrados durante el proceso de evaporación del medio externo: (a) acoplador sobre-acoplado de dos lóbulos, (b) acoplador sobre-acoplado de tres lóbulos.

Si comparamos los cambios espectrales observados para anillo abierto con los obtenidos con el anillo cerrado (figuras 4.3, 4.5 y 4.6), podemos observar que las variaciones en el espectro son más evidentes cuando el anillo se encuentra cerrado. En general, los sistemas láser son muy sensibles a las pérdidas dentro del resonador, y este tipo de comportamiento concuerda con esta característica. Por ejemplo, los ajustes en el controlador de polarización del láser en anillo con acopladores de dos y tres lóbulos no permiten recuperar el espectro original al final del proceso de evaporación. Nótese que para el acoplador de tres lóbulos, ni siquiera es posible volver a generar emisión láser después de que el proceso de evaporación ha concluido. Esto indica que si se utiliza esta configuración, los cambios en el índice de refracción en la región de acoplamiento pueden detectarse con mayor facilidad debido a que el láser es más sensible a las pérdidas. Esto puede verse como un incremento en la sensibilidad a los cambios en el medio externo.

En la figura 4.7 se ilustra el cambio en la potencia con respecto al tiempo normalizado a la salida de la fibra 1. Se puede observar que la potencia a la salida de la fibra sufre mayores cambios en el acoplador de tres lóbulos, y en ningún caso se logra obtener la potencia original de salida (sin alcohol). Comparando los cambios de potencia de estas configuraciones con los registrados para anillo abierto (figura 4.4) podemos ver que en ambos casos, los acopladores con mayor número de lóbulos presentan más sensibilidad a los cambios en el índice de refracción. Al finalizar el proceso de evaporación, para la configuración en anillo abierto es posible obtener valores de potencia a la salida similares a los registrados originalmente; sin embargo, esto no se logra con el anillo cerrado. Puede notarse también que los cambios en la potencia de salida son más marcados en este último caso, resaltando de nuevo la sensibilidad de los sistemas láser a las pérdidas dentro del resonador. Dentro de las conclusiones se presentarán sugerencias de como pueden utilizarse estos resultados en el desarrollo de sensores.

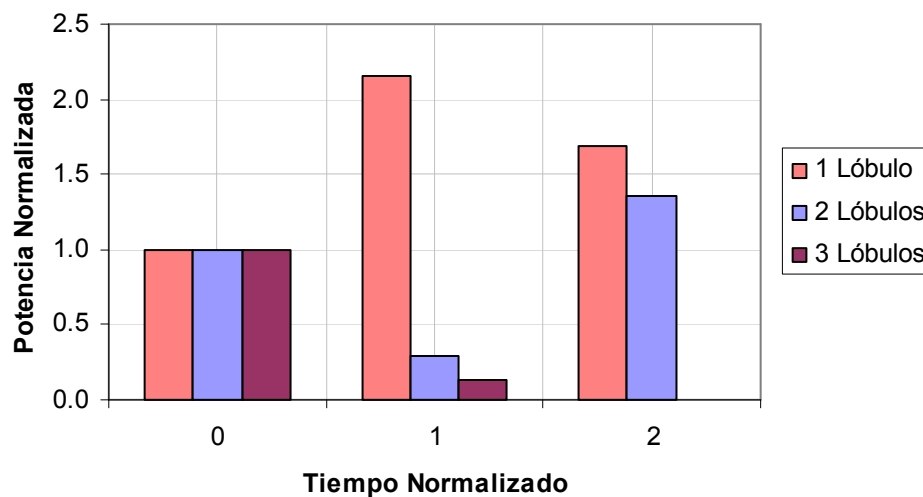


Figura 4.7. Potencia normalizada a la salida de una de las fibras de tres acopladores con diferente número de lóbulos, durante el proceso de evaporación del alcohol.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el estudio experimental de las características espectrales de acopladores sobre-acoplados de fibra óptica. El método utilizado para la fabricación de estos acopladores fue el método de fusión, para lo cual se utilizó una estación de trabajo computarizada que permite un alto grado de automatización y control del proceso. Se optimizaron los parámetros de operación de la estación de trabajo, de tal manera que los dispositivos fabricados presentaran pérdidas ópticas bajas al calentar y adelgazar simultáneamente las fibras. La ventaja de utilizar la técnica de fusión para fabricar acopladores es que puede controlarse adecuadamente la geometría de la sección de acoplamiento, con lo cual se puede modificar las características espectrales del dispositivo cambiando el índice de refracción del medio que lo rodea. La característica principal de un acoplador sobre-acoplado es que la transferencia de potencia es cíclica, y conforme se va adelgazando más, los ciclos de transferencia de potencia son más marcados. Además, pueden generarse cambios en la amplitud de la potencia óptica que se transmite a través del acoplador.

Se utilizaron dos tipos de fuente de luz para fabricar acopladores sobre-acoplados: un LED y una fibra láser de erbio sintonizable. El LED tiene un ancho espectral muy amplio por lo que el acoplamiento entre las fibras se presentará idealmente dentro de todo este rango espectral; en la práctica, el ancho espectral se reduce un poco debido a los cambios que sufre la guía de onda durante el proceso de elongación. Los acopladores que se fabricaron con este tipo de fuente de luz son de banda ancha, esto es, el acoplamiento de luz entre las fibras se genera de igual manera a varias longitudes de onda. Las características espectrales de este tipo de acoplador dependen de la elongación de las fibras, pues al estar más delgadas las fibras el acoplamiento será más selectivo debido a que la guía de onda se hace más estrecha.

El uso de un sistema de fibra láser durante el proceso de fabricación de los acopladores permite obtener dispositivos con mayor selectividad espectral. El acoplamiento de luz entre las fibras se lleva a cabo únicamente a la longitud de onda en la que trabaje el láser, y mientras más delgadas se hagan las fibras, se comenzarán a generar las bandas espectrales de transmisión, permitiendo detectar con mayor sensibilidad los cambios en la potencia óptica. A pesar de que el acoplamiento se lleva a cabo a una longitud de onda, cuando se observan las gráficas de caracterización espectral se observan bandas de transmisión a distintas longitudes de onda, esto es debido a que la potencia a la salida de las fibras son funciones periódicas sinusoidales, lo que indica que las bandas de transmisión presentarán este comportamiento. Como se comentó a lo largo de este trabajo los detectores ópticos de la estación de trabajo aceptan un rango amplio de longitudes de onda de la potencia óptica recibida, por tal motivo cuando se utiliza como fuente de luz un LED, los detectores ópticos reciben un ancho espectral muy amplio dentro del cual se registran las variaciones en potencia. Cuando se hace un acoplamiento de 3 dB éste se presentará a todas las longitudes de onda registradas por el detector obteniéndose un acoplador de banda ancha. Por otro lado, si se utiliza como fuente de luz un láser sintonizable, el ancho espectral es limitado, haciendo más fácil la detección de los cambios en la potencia óptica debido al cambio en la geometría de la región de acoplamiento y puede así obtenerse un acoplador sobre acoplado con mucho más ciclos de transferencia de potencia.

Con la finalidad de comparar los espectros de transmisión de los acopladores al variar el diámetro de la región de acoplamiento, se fabricaron acopladores de uno, dos y tres lóbulos. Por facilidad, los lóbulos se definieron de acuerdo con la reducción de la envolvente de las curvas de transferencia de potencia y, en general, mientras mayor sea el número de lóbulos mayor será el adelgazamiento de las fibras en la región de acoplamiento. Cada lóbulo incluye varios ciclos de transferencia de potencia y con los parámetros de fabricación utilizados fue posible fabricar acopladores con más de 100 ciclos. Las

propiedades espectrales del acoplador dependen de la elongación total a la que se someten las fibras durante el proceso de fabricación. Para los tres casos que se analizaron, se compararon las pérdidas de transmisión que se generan durante el proceso de elongación y se observó que éstas se generan mayoritariamente al inicio del proceso y posteriormente se estabilizan al pasar el primer lóbulo. Esto indica que las mayores pérdidas se obtienen cuando se realiza la primera etapa de acoplamiento, y se debe a que al inicio del proceso de elongación se presenta el cambio más drástico en la geometría de la fibra óptica. Después de pasar el primer lóbulo de las curvas de transferencia de potencia, el cambio en la geometría es mucho más adiabático y las pérdidas se mantienen en un valor prácticamente constante. En general, los dispositivos fabricados presentaron pérdidas adecuadas para su uso en resonadores de fibra óptica: las pérdidas en exceso máximas registradas fueron de 3.76 dB. Las pérdidas de inserción máximas registradas al final del proceso de fabricación fueron de aproximadamente 7 dB, para acopladores de 3 dB. Estas pérdidas pueden ser reducidas si se modifican los parámetros de fabricación de la estación de trabajo (flujo de hidrógeno, altura de la antorcha, elongación inicial de la fibras, velocidad de jalado, desplazamiento y velocidad de la antorcha) con el fin de generar una deformación más adiabática en la fibra.

Con la caracterización espectral de los acopladores sobre-acoplados se observó que a mayor número de lóbulos (ciclos de transferencia de potencia) existen más bandas espectrales de transmisión, así como también hay una mayor selectividad en longitud de onda. Esto se debe a que la región de acoplamiento se hace más delgada, provocando que las longitudes de onda mayores se vuelvan más susceptibles a salir del confinamiento de la guía de onda. Como se vio en el capítulo tres, el coeficiente de acoplamiento depende del número V , y éste a su vez depende de la longitud de onda y del diámetro del cuello del acoplador. Para elongaciones grandes, el número V se hace muy pequeño, y la transferencia de potencia entre las fibras presentará oscilaciones muy rápidas.

La dependencia del acoplamiento de luz en función del índice de refracción se estudió variando el medio externo a la región de acoplamiento. Como puede verse en la descripción teórica de los acopladores, para que exista acoplamiento entre las fibras el índice de refracción del revestimiento siempre debe ser mayor al índice de refracción del medio externo. La sensibilidad de los distintos acopladores a los cambios en el medio externo se estudió depositando una gota de alcohol etílico en la región de acoplamiento. El cambio en las características espectrales y de transmisión de potencia en los acopladores se registró durante el proceso de evaporación del alcohol. Se observaron cambios espectrales en distintas proporciones para cada tipo de acoplador, así como también se registraron cambios durante el proceso de evaporación del alcohol etílico. Ambas características indicaron que los acopladores con mayor número de ciclos son más sensibles, y esto nuevamente tiene que ver con la definición del número V . Éste tiene una dependencia proporcional con el índice de refracción y si el índice de refracción del revestimiento es menor al índice de refracción del medio externo el número V se modifica. Esto a su vez afecta al coeficiente de acoplamiento y la potencia a la salida de las fibras, de tal manera que el acoplador deja de guiar la luz.

Una de las utilidades que se les puede dar a este tipo de acopladores es para implementar resonadores en anillo para sistemas láser de fibras. En esta configuración el acoplador sobre-acoplado determina las longitudes de onda que circulan dentro del anillo para ser amplificadas y generar emisión láser. Se trabajó con dos tipos de configuraciones para observar con más detalle las ventajas que presenta un resonador en anillo al depositar una gota de alcohol etílico. En anillo abierto los resultados son similares a utilizar un LED, y son útiles para determinar la región de operación del sistema láser de fibra. Al cerrar el anillo genera emisión láser a las longitudes de onda en las que las pérdidas son mínimas. En ambos casos (anillo abierto y anillo cerrado) se observó que existe una mayor sensibilidad a cambios en el índice de refracción del medio externo mientras mayor sean los ciclos de transferencia de potencia del acoplador. De acuerdo con los resultados

experimentales se puede también concluir que los residuos de alcohol afectan permanentemente el coeficiente de acoplamiento, y por lo tanto, se afectan también las condiciones de confinamiento de luz de la guía de onda que se forma en la región del cuello del acoplador.

En la configuración anillo cerrado se observó que las variaciones en el espectro de transmisión son más evidentes que en las configuraciones anteriores. Además, el rango espectral de operación de la fibra láser se reduce aún más de lo que se observa en las pruebas de anillo abierto; asimismo, el rango espectral de emisión se reduce a medida que el número de lóbulos del acoplador aumenta. Para el acoplador de tres lóbulos se presentaron más de dos líneas de emisión láser tratando de operar dentro de la banda de transmisión. En general, los sistemas láser son muy sensibles a las pérdidas dentro del resonador, y es por esto que los cambios en el índice de refracción en la región de acoplamiento pueden detectarse con mayor sensibilidad. Para el erbio en particular es complicado operar en longitudes de onda múltiples, ya que si éstas se encuentran muy cercanas intercambiarán la energía entre ellas dificultando la estabilización de la emisión láser en una sola región espectral [7]. Por otro lado, si las longitudes de onda se encuentran más separadas, el láser podrá estabilizarse en una o más regiones espectrales de manera más fácil. Ésta es una característica de los sistemas láser que utilizan fibra de erbio, y se logró observar experimentalmente pues en los acopladores de uno y dos lóbulos se llegan a ver más líneas de emisión que en el acoplador de tres lóbulos.

En ambas configuraciones se encontró que las pérdidas generadas durante el proceso de evaporación del alcohol dependen de la polarización, las cuales pueden ajustarse mediante un controlador de polarización. Estas pérdidas generadas se deben a que los residuos de alcohol sobre la región de acoplamiento no tienen una distribución uniforme. Un punto importante es que se fabricaron varios acopladores sobre-acoplados y las características espectrales y

los efectos de los cambios en el índice de refracción observados en todos los casos fueron bastante repetibles.

En suma, se logró observar que la potencia a la salida de los acopladores depende de la longitud de onda, del índice de refracción del medio alrededor de la región de acoplamiento y de la polarización de la luz. Estas características pueden utilizarse para desarrollar aplicaciones de filtrado, seleccionando un rango de longitudes de onda que pueden pasar por el acoplador. Asimismo, los acopladores pueden usarse como multiplexores/demultiplexores de longitud de onda transmitiendo múltiples señales en diferentes longitudes de onda y acoplándolas selectivamente de una fibra a otra. Pueden también usarse como atenuadores dividiendo la potencia entre múltiples salidas según se desee. Finalmente, con los experimentos realizados es fácil ver que los acopladores pueden usarse también como sensores, mediante la modificación del índice de refracción del medio externo al acoplador. Nótese que para todos los ejemplos anteriores, una vez fabricados los acopladores con sus respectivas características, es necesario un encapsulado adecuado para aislar los cambios no deseados.

La utilidad de este tipo de acopladores con su respectivo aislante ha sido estudiada en trabajos previos, uno de ellos es construir un reflector de fibra láser con un acoplador fusionado, en el cual se utiliza el efecto termo-óptico para cambiar la dependencia espectral de la intensidad del radio acoplado [8][9]. El acoplador fue encapsulado con silicón de resina, cuyo índice varió según la temperatura experimental, los resultados obtenidos se basan en el cambio del índice de refracción a los cambios de temperatura del silicón, observándose variaciones espectrales de la fibra óptica láser utilizada. Otra aplicación interesante que se puede dar para este tipo de acopladores es en biosensores ópticos en la cual se puede llegar a detectar un cambio de fase, longitud de onda, amplitud o polarización de la luz en respuesta al cambio físico generado en la especie que se desee estudiar (virus, bacterias, células) [10].

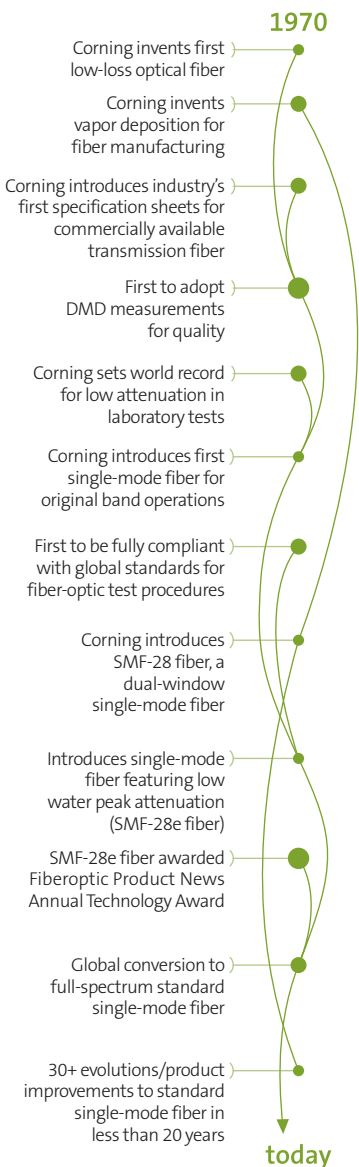
Al concluir esta tesis y al analizar los resultados se puede ver que la estación de trabajo podría utilizarse para fabricar sensores biológicos si los acopladores pueden encapsularse con los materiales adecuados. Evidentemente, las pruebas para este tipo de aplicaciones tienen que ser más rigurosas que las que se desarrollaron en este trabajo, aunque los resultados fueron útiles para mostrar el principio de operación. De esta forma, este trabajo representa un precedente para el desarrollo de sensores biológicos utilizando acopladores sobre-acoplados de fibra óptica.

APÉNDICE

Corning® SMF-28e® Optical Fiber Product Information



Optical Fiber



Evolving Networks Now

At Corning Optical Fiber, we are continually pushing single-mode fiber to new performance levels. Building on our leadership position in the optical fiber industry, Corning is evolving our already formidable products to meet customer requirements like never before. As the first manufacturer to upgrade standard single-mode fiber worldwide, we're providing our customers with greater value today and in the future. Corning® SMF-28e® optical fiber is:

- * Corning's standard single-mode fiber offering, delivering optimized capability, network design flexibility and confidence in long-term performance
- * The world's most widely demanded full-spectrum fiber
- * In compliance with or exceeding the industry's most stringent requirements, including:
 - ITU-T G.652 (all tables)
 - IEC Specifications 60793-2-50 Type B1.3
 - TIA/EIA 492-CAAB
 - Telcordia's GR-20
- * The industry leader in comprehensive standard single-mode fiber specifications

As Corning's premier standard single-mode fiber, SMF-28e fiber is one in a long line of optical innovations. Corning SMF-28e optical fiber is expanding the capability of the world's most dynamic metropolitan and access networks.

Building on a Solid Foundation

Corning SMF-28e fiber has the same reliability, splicing performance and easily strippable coating that customers have trusted in Corning® SMF-28® fiber, the long-standing industry benchmark for quality and performance. SMF-28e fiber offers enhanced capabilities and specifications, while providing full compatibility and interoperability with legacy standard single-mode networks.

Our 30 years of experience are reflected in this evolution of standard single-mode fiber, which not only meets and exceeds the highest industry standards, but also provides an excellent combination of optical, environmental, dimensional and mechanical specifications.

Confidence for Today and the Future

SMF-28e fiber is optimized for metropolitan and access networks that support all broadband applications. SMF-28e fiber has been a qualified product offering since 2001 and has been successfully deployed in communications networks worldwide, proving its performance capabilities in diverse applications.

As the ideal fiber choice for rapidly growing and dynamically changing metropolitan and access networks, SMF-28e fiber provides immediate value to the customer. It is one of the easiest fibers to handle and install because of its world-class geometry, CPC® coating technology and bending specifications. Additionally, its full-spectrum capability enables flexible network designs, increases fiber capacity and prepares network infrastructures for emerging technologies and architectures.

Corning® Optical Fiber – The Measure of Trust

Corning's Service Advantage

Corning Optical Fiber delivers the world's most comprehensive package of innovative products and services, including:

- * Worldwide sales support and door-to-door customer service
- * Full range of fibers and special order capabilities
- * Specialized support from technical experts
- * Extensive fiber delivery capabilities with proven success rates
- * Real-time, Web-based customer information
- * Dedicated account support for our long-term supply customers
- * Fiber support services and technical information for end-customers

At Corning Optical Fiber, we strive to provide the best possible customer service and technical support – before, during and after the sale. As a customer, you'll benefit from our established and extensive support infrastructure that's ready to meet your specific needs.

Corning's Product Advantage

Our enhanced, dual acrylate CPC® coatings provide excellent protection. Designed to be mechanically stripped, with an outside diameter of 245 µm, they are optimized for many single- and multi-fiber cable designs, including loose tube, ribbon, slotted core and tight buffer cables.

Corning is committed to product excellence and meeting the evolving needs of our customers. As updates to fiber characteristics or performance specifications become available, they will be posted on the Corning Optical Fiber website at www.corning.com/opticalfiber

Optical Specifications

Fiber Attenuation

Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value* (dB/km)
1310	0.33 – 0.35
1383**	0.31 – 0.35
1550	0.19 – 0.20
1625	0.20 – 0.23

*Maximum specified attenuation value available within the stated ranges.

**Attenuation values at this wavelength represent post-hydrogen aging performance.

Alternate attenuation offerings available upon request.

Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1285 – 1330	1310	0.03
1525 – 1575	1550	0.02

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α .

Macrobend Loss

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550	≤ 0.05
50	100	1310	≤ 0.05
50	100	1550	≤ 0.05
60	100	1625	≤ 0.05

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1310	≤ 0.05
1550	≤ 0.05

Cable Cutoff Wavelength (λ_{ccf})

$$\lambda_{ccf} \leq 1260 \text{ nm}$$

Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD (μm)
1310	9.2 ± 0.4
1550	10.4 ± 0.5

Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm \cdot km)]
1550	≤ 18.0
1625	≤ 22.0

Zero Dispersion Wavelength (λ_0): $1302 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1322 \text{ nm}$

Zero Dispersion Slope (S_0): $\leq 0.089 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$

Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)
PMD Link Design Value	$\leq 0.06^*$
Maximum Individual Fiber	≤ 0.2

*Complies with IEC 60794-3: 2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%), September 2001.

The PMD link design value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD_Q). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled. Corning's fiber specification supports network design requirements for a 0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ maximum PMD.

Dimensional Specifications

Glass Geometry

Fiber Curl	$\geq 4.0 \text{ m}$ radius of curvature
Cladding Diameter	$125.0 \pm 0.7 \mu\text{m}$
Core-Clad Concentricity	$\leq 0.5 \mu\text{m}$
Cladding Non-Circularity	$\leq 0.7\%$

Coating Geometry

Coating Diameter	$245 \pm 5 \mu\text{m}$
Coating-Cladding Concentricity	$< 12 \mu\text{m}$

Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation 1310 nm, 1550 nm & 1625 nm (dB/km)
Temperature Dependence	-60°C to $+85^\circ\text{C}^*$	≤ 0.05
Temperature Humidity Cycling	-10°C to $+85^\circ\text{C}^*$ up to 98% RH	≤ 0.05
Water Immersion	$23^\circ \pm 2^\circ\text{C}$	≤ 0.05
Heat Aging	$85^\circ \pm 2^\circ\text{C}^*$	≤ 0.05
Damp Heat	85°C at 85% RH	≤ 0.05

*Reference temperature = $+23^\circ\text{C}$

Operating Temperature Range: -60°C to $+85^\circ\text{C}$

Mechanical Specifications

Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile stress ≥ 100 kpsi (0.7 GPa)*.

*Higher proof test levels available.

Length

Fiber lengths available up to 50.4* km/spool.

*Longer spliced lengths available.

Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Core Diameter	8.2 μm
Numerical Aperture	0.14 <i>NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.</i>
Zero Dispersion Wavelength (λ_0)	1313 nm
Zero Dispersion Slope (S_0)	0.086 ps/(nm ² •km)
Refractive Index Difference	0.36%
Effective Group Index of Refraction (N_{eff})	1310 nm: 1.4677 1550 nm: 1.4682
Fatigue Resistance Parameter (N_A)	20
Coating Strip Force	Dry: 0.6 lbs. (3N) Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)
Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns Pulse Width)	1310 nm: -77 dB 1550 nm: -82 dB
Individual Fiber Polarization Mode Dispersion	0.02 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

Formulas

Dispersion

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) \approx \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}),$$

for $1200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1625 \text{ nm}$

λ = Operating Wavelength

Cladding Non-Circularity

$$\text{Cladding Non-Circularity} = \left[1 - \frac{\text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}} \right] \times 100$$

How to Order

Contact your sales representative, or call the Optical Fiber Customer Service Department:

Ph: 607-248-2000 (U.S. and Canada)
+44-1244-287-437 (Europe)

Email: opticalfibers@corning.com

Please specify the fiber type, attenuation and quantity when ordering.

Corning Incorporated www.corning.com/opticalfiber

One Riverfront Plaza
Corning, NY 14831
U.S.A.

Ph: 800-525-2524 (U.S. and Canada)
607-786-8125 (International)

Fx: 800-539-3632 (U.S. and Canada)
607-786-8344 (International)

Email: cocic@corning.com

Europe

Ph: 00 800 6620 6621 (U.K., Ireland, Italy, France, Germany, The Netherlands, Spain and Sweden)

+1 607 786 8125 (All Other Countries)

Fx: +1 607 786 8344

Asia Pacific

Australia
Ph: 1-800-148-690
Fx: 1-800-148-568

Indonesia
Ph: 001-803-015-721-1261
Fx: 001-803-015-721-1262

Malaysia
Ph: 1-800-80-3156
Fx: 1-800-80-3155

Philippines
Ph: 1-800-1-116-0338
Fx: 1-800-1-116-0339

Singapore
Ph: 800-1300-955
Fx: 800-1300-956

Thailand
Ph: 001-800-1-3-721-1263
Fx: 001-800-1-3-721-1264

Latin America

Brazil
Ph: 000817-762-4732
Fx: 000817-762-4996

Mexico
Ph: 001-800-235-1719
Fx: 001-800-339-1472

Venezuela
Ph: 800-1-4418
Fx: 800-1-4419

Greater China

Email: GCCofic@corning.com

Beijing
Ph: (86) 10-6505-5066
Fx: (86) 10-6505-5077

Hong Kong
Ph: (852) 2807-2723
Fx: (852) 2807-2152

Shanghai
Ph: (86) 21-3222-4668
Fx: (86) 21-6288-1575

Taiwan
Ph: (886) 2-2716-0338
Fx: (886) 2-2716-0339

Corning, SMF-28, SMF-28e and CPC are registered trademarks of Corning Incorporated, Corning, N.Y.

Any warranty of any nature relating to any Corning optical fiber is only contained in the written agreement between Corning Incorporated and the direct purchaser of such fiber.

©2004, Corning Incorporated

REFERENCIAS

- [1] M. Chen, Tesis “Highly Overcoupled Optical Fiber Fused Tapered Couplers and their Applications”, Tesis Doctoral, Brown University, 1995.
- [2] Jeff Hecht, Understanding Fiber Optics, Ed. E. Sams Publishing, 2a ed., Indianapolis, Indiana 1993.
- [3] Sandra Pascual Vázquez y Juan Hernández Cordero, “Fibras ópticas láser: cómo cocinar vidrio para generar luz” *Materiales Avanzados*, No. 9, pp. 5-14, 2007.
- [4] Juan Hernández Cordero, “Aplicaciones de Optoelectrónica en Medicina: Guía de onda” Semestre 2006-2.
- [5] Piero O. Roche Aparicio, Gustavo A. Piña García, “Efectos birrefringentes en fibras ópticas láser con resonadores de anillo”, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2006.
- [6] Fiber Optic Coupler Definitions. Alliance Fiber Optic Products AFOP Couplers, WDMs, Splitters [en línea], Inc. REV.A 8/02, [consulta: 07 de octubre 2008]. Disponible en <www.afop.com>.
- [7] Digonnet, Michel J.F., Rare–Earth–Doped Fiber Lasers and Amplifiers, Ed. Marcel Decker, 2a ed., USA, 2001.
- [8] Colin A. Millar, Ian D. Miller, David B. Mortimore, James Ainslie, Paul Urquhart. “Fibre laser with adjustable fibre reflector for wavelength tuning and variable output coupling”, *IEE Proceedings*, Vol. 135, No.4, 1988.

[9] V. A. Kozlov, R. L. Shubochkin, A. Kotze, E. Wetjen, A. L. G. Carter, H. Kung, D. A. Brown, T. F. Morse, "Technique for continuous tuning of optical fiber lasers," *Applied Optics*, vol. 37, pp. 4897- 4901, 1998.

[10] Mehrab Mehrvar, Chris Bis, Jenő M. Scharer, Murray Moo, John H. Luong. "Fiber-Optic Biosensors – Trends and Advances", *Analytical sciences*, Vol. 16, 2000.