

## 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].

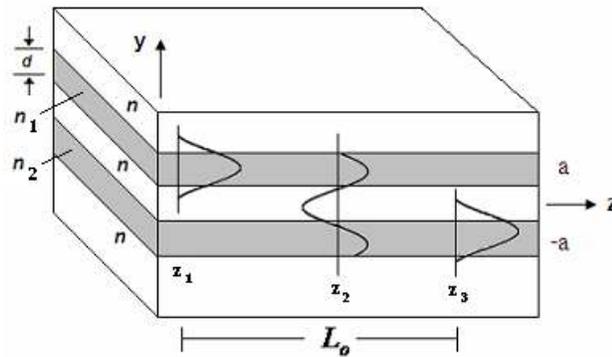


Figura 1.1. Acoplamiento entre guías de onda.

### 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].

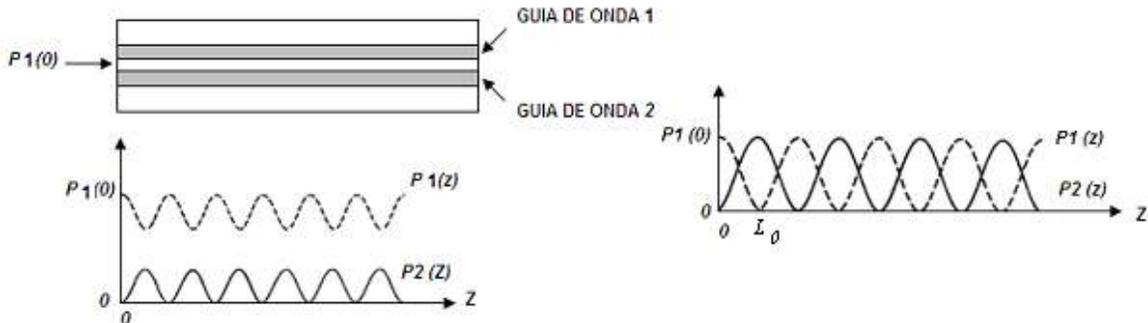


Figura 1.2. Transferencia de potencia entre guías de onda, la potencia de la guía uno se acopla periódicamente a la guía dos.

### 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.

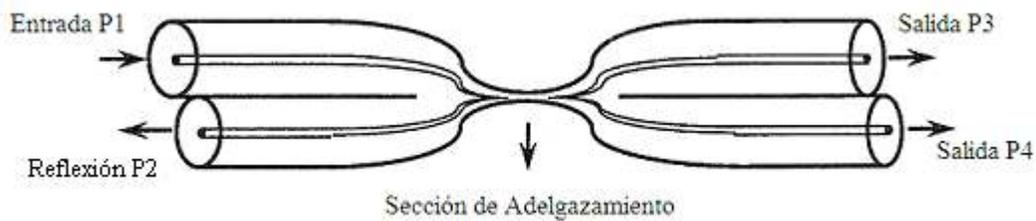


Figura 1.3. Perfil de un acoplador fusionado y adelgazado de 2x2.

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.

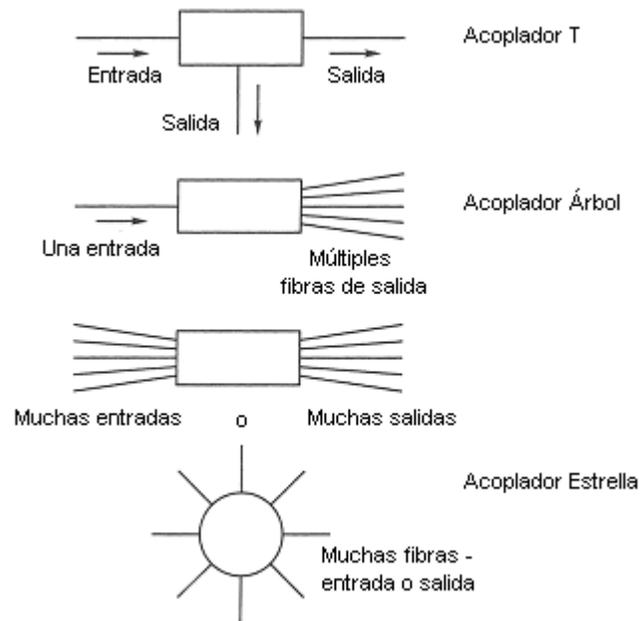


Figura 1.4. Acopladores tipo T, Árbol y Estrella

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).

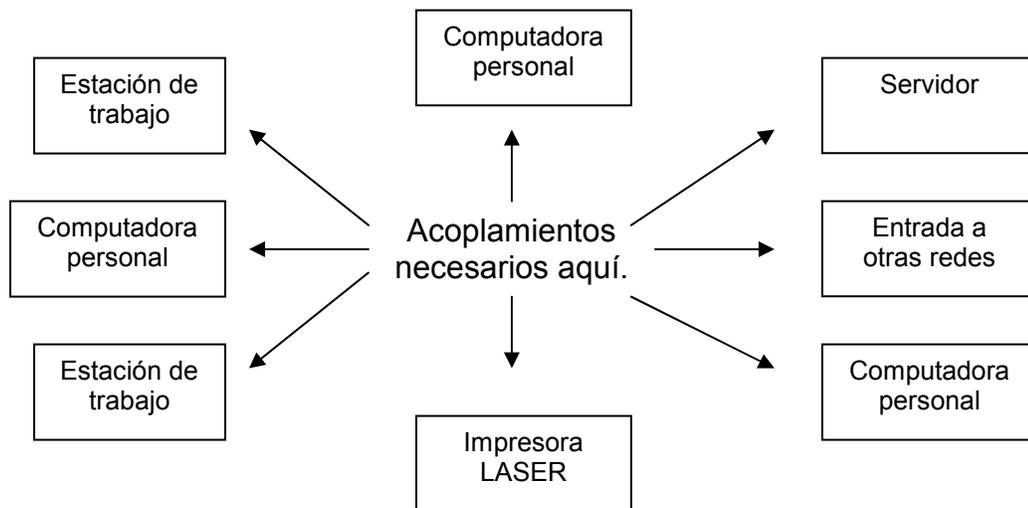


Figura 1.5. Ejemplo de una red de área local en donde se utilizan acopladores.

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  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  son enviadas a la derecha de la señal y la señal con longitud de onda  $\lambda_3$  es enviada hacia la izquierda.

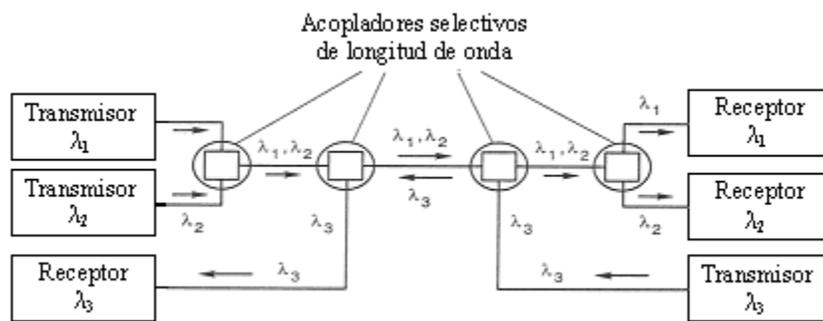


Figura 1.6. Multiplexado de señales ópticas por longitud de onda con acopladores.

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).

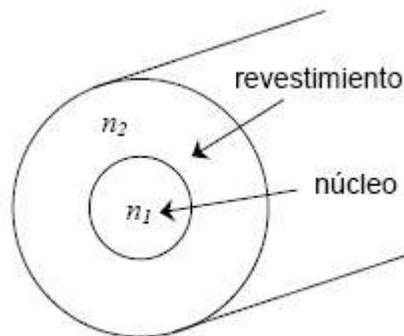


Figura 1.7. Núcleo y revestimiento de la fibra óptica ( $n_1 > n_2$ ).

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.

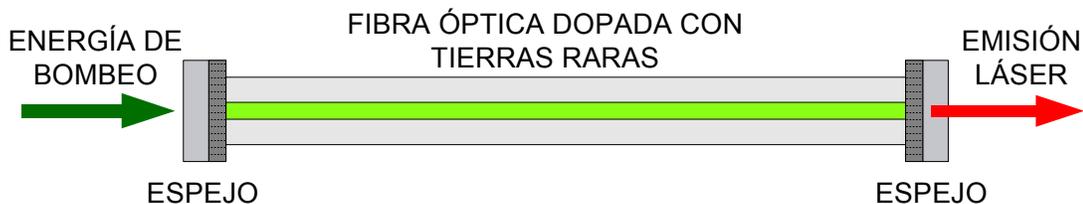


Figura 1.8. Esquema de una fibra láser.

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  $\text{Nd}^{3+}$ ), por ejemplo, las transiciones más útiles se realizan entre cuatro niveles de energía, mientras que en el erbio (ión  $\text{Er}^{3+}$ ) éstas se llevan a cabo entre tres niveles como se muestra en la figura 1.9.

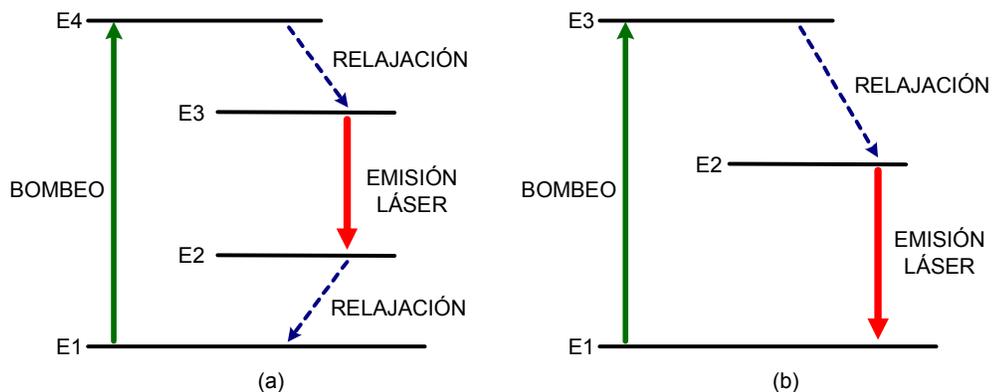


Figura 1.9. Transiciones electrónicas involucradas en la absorción y la emisión de luz (a) neodimio (ión  $\text{Nd}^{3+}$ ) (b) erbio (ión  $\text{Er}^{3+}$ ).

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).

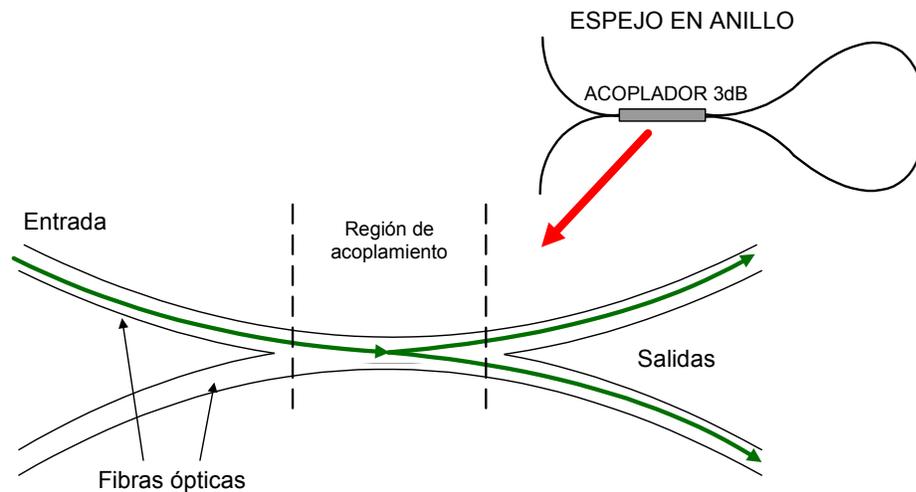


Figura 1.10. Esquema de un acoplador de fibra óptica.

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].

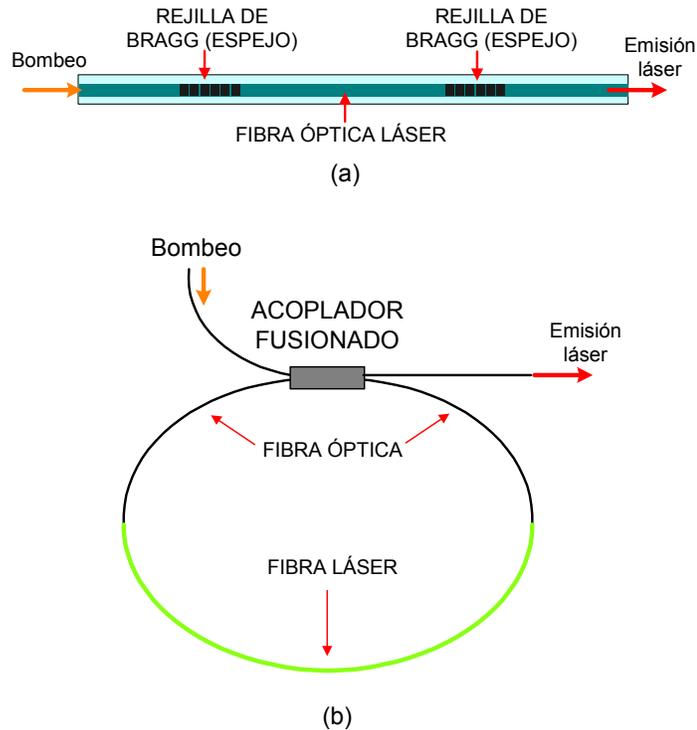


Figura 1.11. (a) Resonador Fabry-Perot. (b) Resonador en configuración de anillo.

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.