

1. ANTECEDENTES

En los últimos años los sistemas de comunicaciones han avanzado en gran medida debido a las fibras ópticas y su capacidad de transmitir grandes cantidades de señales a gran velocidad y con bajas pérdidas. Esto ha fomentado el desarrollo de nuevos dispositivos para esta tecnología como los son fuentes de luz, detectores, filtros, etc. Las fibras ópticas han sido de gran uso para la transmisión de señales ópticas y también para sensores, sistemas de iluminación y adquisición de imágenes. Dentro de los sensores se ha visto que debido a su reducido tamaño y que el material del que están hechas las fibras ópticas no reaccionan con los tejidos humanos, siendo también aptas para aplicaciones biomédicas como lo son detección de algunas bacterias, medición de pH, análisis de líquidos y otros. De esta manera, es claro que los dispositivos basados en fibras ópticas han encontrado aplicaciones importantes con gran futuro en otras áreas de la ciencia y tecnología [1].

Dentro de los diversos dispositivos de fibra óptica que existen, los acopladores de fibra son quizás los más versátiles, pues con estos se pueden realizar distintas funciones de utilidad para una gran cantidad de aplicaciones para el manejo y transformación de las señales ópticas. El desempeño y características de operación de los acopladores dependen de las propiedades ópticas del medio que los rodea. De esta manera, es posible desarrollar sensores basados en acopladores para diversos parámetros físicos y químicos. El principio de operación se basa en que el parámetro a medir debe generar cambios en el índice de refracción de la vecindad del acoplador para que esto altere las características de operación del dispositivo. Este principio puede generalizarse para otras aplicaciones, pues sólo es necesario contar con un material cuya respuesta a lo que se desea medir o detectar se manifieste como un cambio en sus propiedades ópticas.

Existen materiales con propiedades ópticas que se alteran al interactuar con luz. Un ejemplo de estos son los azobencenos, cuya fotoisomerización se conoce desde hace ya bastantes años. Al incorporar el grupo azobenceno a un polímero su fotoisomerización puede tener una variedad de respuestas y aplicaciones diversas. Ejemplos del uso de los azopolímeros son la fabricación de guías de onda con propiedades ópticas no lineales, generación de segundo armónico, movimiento mecánico activado ópticamente, grabado por relieve superficial, etc. [30].

En este trabajo se estudia de forma experimental el desempeño de acopladores de fibra óptica recubiertos con azopolímeros. En particular, se observan las variaciones en las propiedades espectrales y de polarización de estos dispositivos al irradiarlos con una señal de luz láser. Los acopladores son fabricados por medio de fusión y estirado, dejando una región muy delgada que es recubierta con azopolímero, el cual se modifica al ser excitado con luz de ciertas características cambiando sus propiedades ópticas.

OBJETIVO

Fabricar acopladores de fibra óptica con recubrimiento de azopolímeros; observar la respuesta de estos dispositivos y conocer como se afectan sus propiedades de transmisión (espectrales y de polarización) bajo el estímulo de radiación óptica y otras variables físicas. Con base en estos resultados, se identificarán aplicaciones potenciales de estos dispositivos de fibra óptica.

1.1 Principios de guías de onda

Las guías de onda son dispositivos en los que se confina la luz para poder transmitirla a lo largo de grandes distancias y con pérdidas mínimas. Esto se logra a causa de una característica de los materiales, el índice de refracción. El índice de refracción es definido como la relación de la velocidad de propagación de la luz en el

vacío (c_0) referido a la velocidad que esta tiene en un medio (c), representada por la expresión 1.1-1:

$$n = \frac{c_0}{c} \quad 1.1-1$$

Los fundamentos del confinamiento de luz en una guía de onda pueden explicarse mediante la óptica geométrica. Debido al paso del haz de luz por distintos medios con diferentes índices de refracción, esta cambia su trayectoria tal como lo expresa la ley de la refracción de Snell que se ilustra en la figura 1.1 y queda expresada por [2]:

$$n_1 \text{ sen}\theta_1 = n_2 \text{ sen}\theta_2 \quad 1.1-2$$

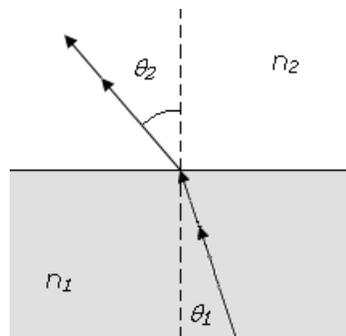


Fig. 1.1. Ley de Snell donde $n_1 > n_2$.

Bajo ciertas condiciones, es posible obtener la condición de reflexión total interna logrando contener toda la señal dentro de un solo medio y garantizar la propagación de la luz a lo largo de una guía de onda.

1.1.1 Reflexión total interna

Una fibra óptica es una guía de onda con sección transversal circular hecha de un material dieléctrico. La luz es confinada en la fibra óptica debido a la reflexión total interna, lograda mediante la diferencia de los índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento de la guía de onda (Fig. 1.2). Esto también puede describirse considerando que la luz que viaja dentro del núcleo se encuentra con un medio más

denso (índice de refracción mayor), y si incide con un ángulo lo suficientemente grande, entonces la luz se refleja totalmente hacia el núcleo [3].

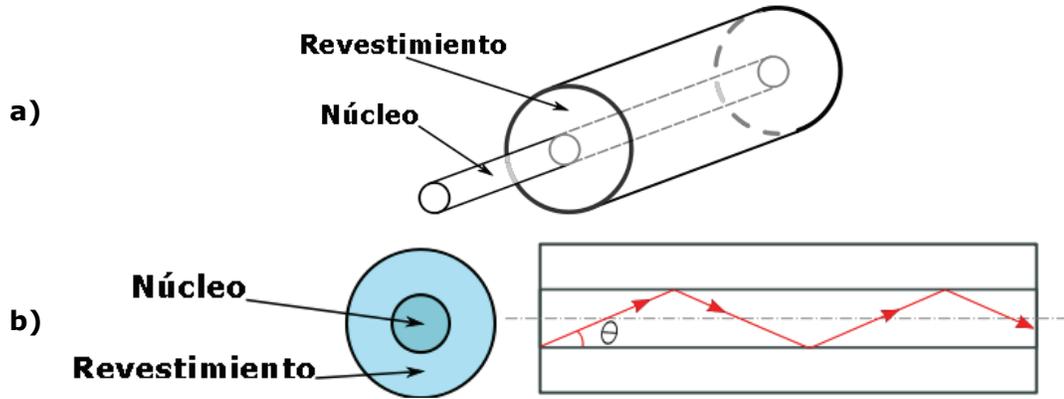


Fig. 1.2. a) Esquema de la estructura de una fibra óptica y b) propagación del haz de luz dentro de esta.

La reflexión de la luz va aumentando conforme aumenta el ángulo de incidencia hasta llegar o sobrepasar un ángulo conocido como ángulo crítico (θ_c). En estas condiciones, todo el haz de luz es reflejado en la interfaz entre los dos medios y en particular al tener incidencia con ángulo crítico, el haz transmitido se refracta a 90° de la normal a la interfaz (ver figura 1.3) [2].

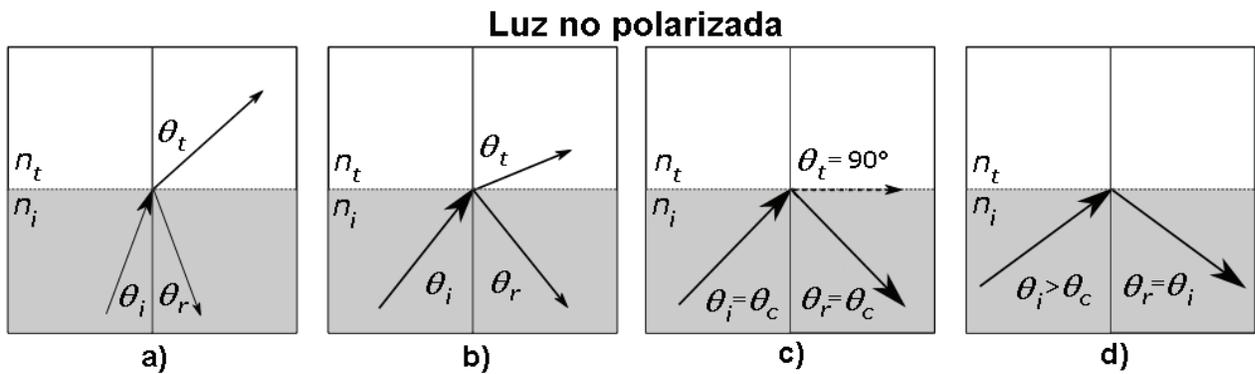


Fig.1.3. Variación de los ángulos de incidencia de un haz de luz (θ_i), de transmisión (θ_t) y de reflexión (θ_r) en la interfaz de dos materiales con distintos índices de refracción ($n_i > n_t$). a) Haz con ángulo de incidencia pequeño, b) al aumentar θ_i mayor cantidad del haz se refleja y se transmite menos, c) se alcanza el ángulo crítico y toda la señal se refleja en el medio incidente, y d) para ángulos mayores se sigue reflejando todo en el medio incidente.

La reflexión total interna en una fibra óptica depende de los índices de refracción del material con que está fabricada. En realidad el material con el que están fabricados el núcleo y el revestimiento es el mismo, pero en el caso del revestimiento, este lleva un tratamiento que hace que su índice de refracción sea menor. Esta simple condición es suficiente para que se presente la refracción total interna en determinadas longitudes de onda, que han sido calculadas para su fabricación. Aquí el haz de luz entra por uno de los extremos y es confinado a rebotar tal como se ilustra en la figura 1.2b.

1.1.2 Onda evanescente

La onda evanescente es aquella que se genera en el límite de la interfaz entre dos medios donde se refleja un haz de luz. En este tipo de ondas su intensidad decae de manera exponencial y son también definidas como ondas de frontera [2, 31]. La explicación de la onda evanescente se obtiene de la teoría electromagnética, al modelar la propagación de la luz mediante óptica de ondas. Al manejar el haz de luz como una onda electromagnética, se tiene una onda que se propaga dentro del núcleo de manera acotada extendiéndose una parte al revestimiento. La magnitud de este campo del núcleo se debe igualar en la frontera con el revestimiento y extinguirse en el infinito.

El campo evanescente aumenta conforme el modo en el que viaja la señal es mayor, debido al ángulo de incidencia del haz que se va reflejando dentro de la guía de onda. Como se puede observar en la figura 1.4, la región comprendida entre $d/2$ y $-d/2$ es el núcleo de la guía de onda con un índice de refracción n_1 y el exterior es el revestimiento con índice de refracción n_2 donde $n_1 > n_2$. En esta imagen se observa como en la frontera alcanza a pasar algo de la onda al revestimiento, debido a que el campo eléctrico es armónico no desaparece en la frontera. Algo que también se aprecia es como para modos mayores la cantidad de señal transmitida al revestimiento es mayor [4]. La onda evanescente depende de varios parámetros de la guía de onda como lo son la apertura numérica, los índices de refracción de los medios y la geometría.

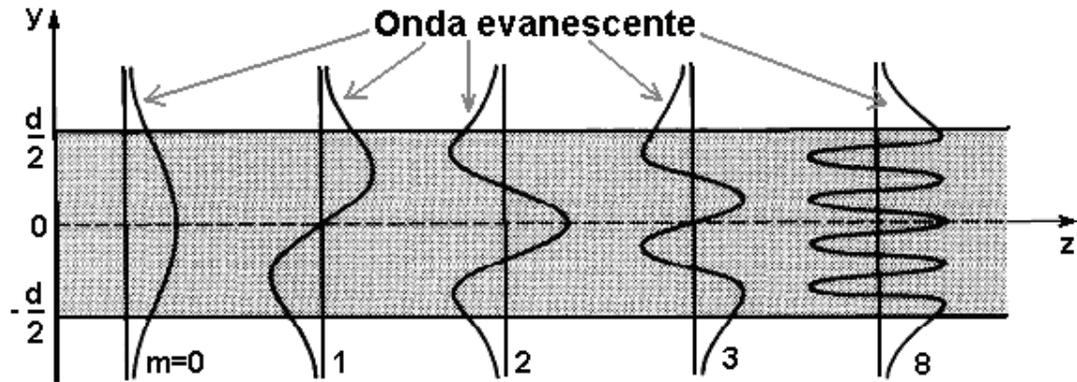


Fig.1.4. Modos de propagación en una guía de onda de cierto diámetro (d): la onda evanescente dependiente del número de modos (m) se indica para cada caso [4].

La onda evanescente interactúa con el revestimiento de la fibra óptica, siendo este el principio de funcionamiento para algunos dispositivos tales como los acopladores de fibra óptica discutidos en la siguiente sección.

1.2 Acopladores de fibra óptica

Los acopladores de guías de onda dan paso a una gran variedad de dispositivos para la manipulación de una señal óptica. Algunos ejemplos muy comunes de estos son los divisores de haces, moduladores de amplitud y multiplexores por longitud de onda. El principio de operación de los acopladores se basa en la transferencia de potencia de una guía de onda a otra a través de la onda evanescente; esto se logra al aproximar lo suficiente los núcleos de ambas guías. Entre otras cosas, este fenómeno está determinado por la distancia de separación entre los núcleos, la longitud de interacción donde se presenta el fenómeno y los índices de refracción de las guías de onda. El fenómeno de acoplamiento puede ser visto también como esparcimiento de luz, donde el campo de la guía de onda 1 se dispersa a la guía de onda 2 conforme la onda se va desplazando a lo largo del eje z . Esto se ilustra en la figura 1.5 donde L_0 es la longitud de interacción, n_1 y n_2 son los índices de refracción de los núcleos de las guías de onda y n es el índice de refracción de los revestimientos de los núcleos. La representación se sitúa en los ejes de coordenadas (x, y, z) , siendo z la dirección de propagación de la onda.

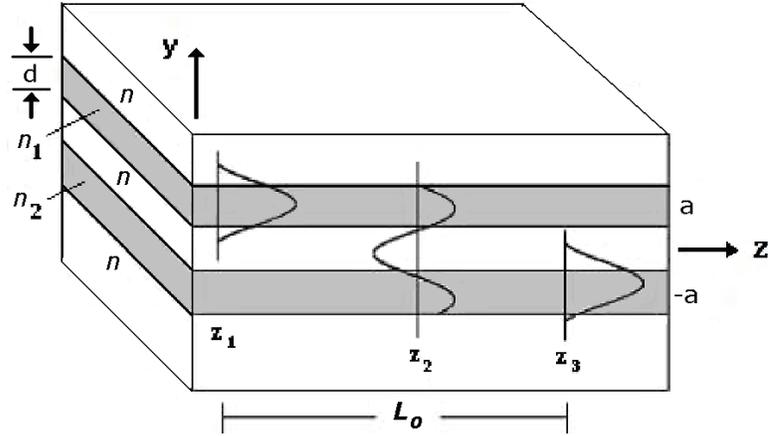


Fig. 1.5. Acoplamiento de señal entre dos guías de onda planas [5].

La transferencia de potencia entre las guías de onda puede describirse con ecuaciones diferenciales conocidas como ecuaciones de modos acoplados, dadas por las expresiones:

$$\frac{da_1}{dz} = -jC_{21} \exp(j\Delta\beta z) a_2(z) \tag{1.2-1a}$$

$$\frac{da_2}{dz} = -jC_{12} \exp(-j\Delta\beta z) a_1(z) \tag{1.2-1b}$$

Las ecuaciones de modos acoplados (u_1 y u_2) muestran la relación que existe entre la razón de cambio de las amplitudes de los modos de cada una de las guías de onda (a_1 y a_2), la diferencia de fase por unidad de longitud ($\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$) y los coeficientes de acoplamiento (C_{ij}), además de intervenir el número de onda en el espacio libre, $K_0 = 2\pi/\lambda_0$. De esta manera los coeficientes de acoplamiento quedan descritos por las ecuaciones:

$$C_{21} = \frac{1}{2} (n_2^2 - n^2) \frac{k_0^2}{\beta_1} \int_a^{a+d} u_1(y) u_2(y) dy \tag{1.2-2a}$$

$$C_{12} = \frac{1}{2} (n_1^2 - n^2) \frac{k_0^2}{\beta_2} \int_{-a-d}^{-a} u_2(y) u_1(y) dy \tag{1.2-2b}$$

Es claro en estas expresiones que la amplitud de los modos en ambas guías están ligadas, así que la razón de variación de a_1 es proporcional a a_2 y viceversa [4]. Para encontrar una solución se considera que la onda de entrada se encuentra contenida en la guía de onda 1 de tal forma que $a_1 \neq 0$, $a_2 = 0$, ya que no hay energía confinada en la guía de onda 2. Aquí el coeficiente de extinción del campo esta dado por γ y debido a que la potencia se intercambia entre las fibras periódicamente, el periodo es π/γ . Al tomar estas consideraciones es posible obtener soluciones para las amplitudes de los modos y determinar la potencia en cada guía de onda, dadas por:

$$P_1(z) = P_1(0) \left(\cos^2 \gamma z + \left(\frac{\Delta\beta}{2\gamma} \right)^2 \sin^2 \gamma z \right) \quad 1.2-3a$$

$$P_2(z) = P_2(0) \frac{|C_{12}|^2}{\gamma^2} \sin^2 \gamma z \quad 1.2-3b$$

Las expresiones anteriores se pueden simplificar si se considera que las guías de onda son idénticas, situación que es muy frecuente en aplicaciones prácticas. Dado esto se tiene que $n_1 = n_2$, $\beta_1 = \beta_2$ y $\Delta\beta = 0$, además de que por conservación de energía $C_{12} = C_{21} = C$, simplificando las soluciones a:

$$P_1(z) = P_1(0) \cos^2 Cz \quad 1.2-4a$$

$$P_2(z) = P_2(0) \cos^2 Cz \quad 1.2-4b$$

Esto indica que la transferencia de potencias es periódica entre las dos guías de onda (Fig. 1.6). Además se puede observar que es posible obtener un acoplador donde se transfiera la cantidad de potencia deseada a otra guía de onda dependiendo de la longitud de interacción. Por ejemplo, la distancia necesaria para transferir toda la potencia de una guía a otra, es conocida como distancia de transferencia ($z=L_0$); esta puede calcularse de acuerdo con [4, 5]:

$$z = L_0 = \frac{\pi}{2C} \quad 1.2-5$$

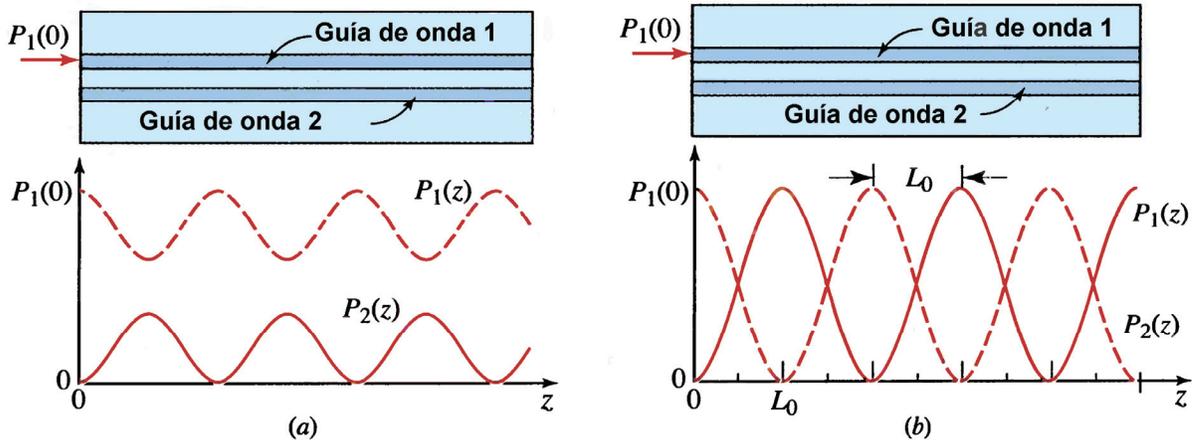


Fig. 1.6. La transferencia de potencia en: a) guías de onda diferentes y b) con guías de onda iguales [4].

Los acopladores de fibra óptica son dispositivos pasivos capaces de juntar en una sola fibra óptica señales que, al viajar con la misma longitud de onda, se propagan en fibras diferentes; también pueden utilizarse para realizar el proceso inverso, esto es, separar en dos fibras ópticas la señal proveniente de una sola. Estos dispositivos pueden ser fabricados con $N \times N$ canales de entrada y salida, respectivamente. Los acopladores pueden ser fabricados puliendo dos fibras ópticas y aproximando los núcleos, o bien entrelazando, fusionando y adelgazando las fibras mediante un proceso controlado por computadora. Los acopladores fabricados con este último método, se conocen como acopladores fusionados y son los más utilizados en aplicaciones comunes donde se emplean fibras ópticas.

En un acoplador fabricado mediante fusión se pueden utilizar N fibras ópticas a las cuales se les aplica calentamiento proveniente de una flama para que los núcleos queden unidos en una pequeña zona llamada "región de acoplamiento". En este trabajo se emplean acopladores de 2×2 los cuales son muy utilizados como divisores de haz. Un ejemplo de ellos son los acopladores de 3dB que dividen la señal de entrada un 50/50 en los dos canales de salida. Al fusionarse las dos fibras ópticas, las características geométricas y ópticas de la región de acoplamiento son las que definen la cantidad de luz que se acopla de una fibra a otra.

Los acopladores de fibra óptica tienen muchas aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones y transmisión de datos, debido a que se puede hacer la división de la potencia de una señal que viaje a través de una sola fibra óptica para así poderla distribuir a más dispositivos. Por otro lado, poseen potencial para el desarrollo de sensores, ya sea como complemento con otros dispositivos o bien como transductores ópticos utilizando materiales adecuados para una aplicación en particular.

La región de acoplamiento presenta variaciones en sus características en función del medio que la rodea, debido principalmente a que el revestimiento original de las dos fibras se convierte en el nuevo núcleo de la guía de onda después de que se realiza el proceso de fusión. De esta manera, el medio que rodea a la región de acoplamiento pasa a ser el nuevo revestimiento y su índice de refracción determina las propiedades de transmisión de la señal (coeficiente de acoplamiento, longitud de onda de operación, polarización, etc.). Al aplicar un revestimiento a la región de acoplamiento con algún tipo de polímero, debe esperarse que las características antes mencionadas sufran cambios. Además, si el polímero reacciona a cambios en alguna variable física de interés, es posible elaborar dispositivos que realicen funciones de conmutación (switches) o sensores ópticos.

1.3 Azopolímeros

Los polímeros orgánicos han sido muy estudiados por jugar un papel importante en el campo de la fotónica, almacenamiento de información, tecnología multimedia y muchos otros más. El interés en este tipo de materiales es cada vez mayor y sus aplicaciones se extienden a diversos campos. Los tipos de compuestos orgánicos que existen son muy variados y reaccionan de diversas formas a alguna perturbación o variable externa, como por ejemplo luz, temperatura, sustancias químicas, etc. Algunos de estos compuestos poseen la capacidad de absorber energía luminosa a longitudes de onda determinadas y cambiar sus propiedades debido a la absorción presentada [32, 33]. Este tipo de compuestos se conocen como cromóforos; en particular, los azobencenos son cromóforos fotosensibles y poseen la propiedad de la

fotoisomerización, misma que se manifiesta como un cambio de forma de un *isómero trans* a uno *cis* (ver figura 1.7). Al ser iluminados con luz a una longitud de onda adecuada, la estructura del azobenceno cambia y esto provoca que el índice de refracción se modifique.

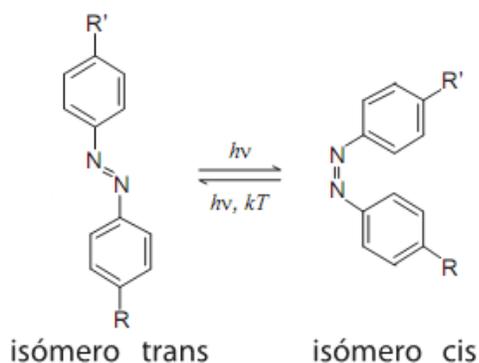


Fig. 1.7. Isómero de azobenceno y sus formas *trans* y *cis* [7].

Al excitarse con luz los azobencenos adquieren las propiedades de dicroísmo (absorción selectiva de uno de los planos de polarización) y birrefringencia (doble refracción). Al iluminar los compuestos con luz linealmente polarizada en una dirección, los azobencenos se “fotoalinean” poco a poco hasta que la mayoría de los cromóforos se alinean perpendicularmente al eje de polarización de la luz incidente (Fig. 1.8); al apagar la luz, algunos cromóforos regresan a su estado inicial, quedando alrededor de un 80% de los azobencenos orientados debido a la iluminación. Este efecto es reversible mediante algunos procesos que se mencionarán con detalle posteriormente [6].

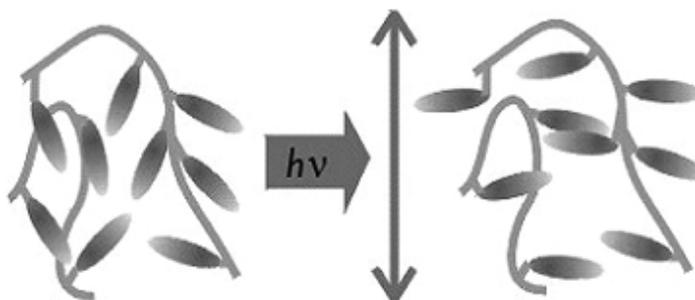


Fig. 1.8. Orientación perpendicular de las moléculas de azobenceno con respecto al eje de la luz linealmente polarizada radiada sobre el compuesto [6].

Los azobencenos tienen además otro tipo de movimiento fotoinducido, el cual se utiliza para el formado de relieves superficiales que se obtienen al radiar con un patrón de luz que varíe su intensidad y/o polarización. Con este movimiento se logra que haya un desplazamiento masivo de material, generando agrupaciones en la escala de micrómetros. Este tipo de movimiento es empleado para el almacenamiento de información, como se hace en un disco compacto (CD) (Fig. 1.9) [7].

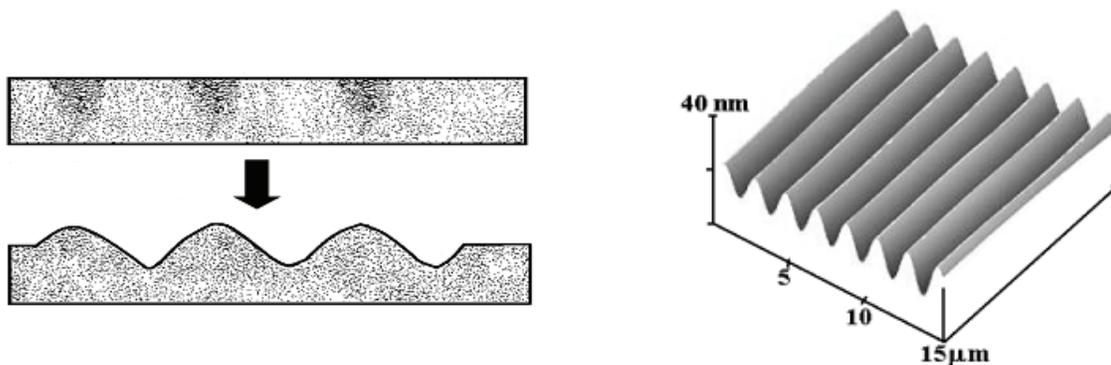


Fig. 1.9. Grabado de relieve superficial generado en azopolímeros [13, 29].

Los azobencenos son partículas muy pequeñas que son disueltas en algún solvente compatible para su uso. Para su empleo en estructuras con volumen o forma determinada, se emplea la técnica de poner los azobencenos dentro de una matriz polimérica la cual les sirve para su buen formado, cambio de sus propiedades térmicas y mecánicas y para controlar el nivel de interacción de los cromóforos. Hay varios tipos de matrices que interactúan a diferentes niveles con los azobencenos, la elección de ellas depende de la aplicación [7].

En este trabajo se pretende aplicar una capa de azopolímero sobre acopladores de fibra óptica para obtener un dispositivo que presente variaciones en sus características de transmisión en función de una señal óptica. El tipo de efecto que se espera obtener es el cambio en el índice de refracción del azopolímero al hacer incidir sobre este una señal con cierta potencia (irradiancia) óptica, provocando un cambio en las propiedades espectrales de transmisión del acoplador. Adicionalmente, se espera también generar cambios en las propiedades de polarización del acoplador utilizando azopolímeros que cambien su birrefringencia mediante el estímulo de luz polarizada.

1.4 Fibras ópticas láser

Las fibras ópticas son de gran utilidad para la transmisión de datos, sin embargo para grandes distancias se necesita de la amplificación de la señal. Esta necesidad obtuvo como respuesta las fibras ópticas dopadas con tierras raras en el núcleo. Con estas fibras ópticas especiales, conocidas como fibras láser, se tiene la capacidad de amplificar señales ópticas dentro de la fibra, además es posible también generar emisión láser. El desarrollo de este tipo de fibras ópticas ha tenido un gran impacto en las comunicaciones ópticas, ya que se evitan repetidores electrónicos que involucran mayores pérdidas en la señal transmitida y requieren también de más equipo. Las fibras láser han sido de igual manera de gran utilidad en otros campos como los son el procesamiento de materiales, sensado biológico y otros.

1.4.1 Funcionamiento

El principio de operación de un láser es la emisión de luz por medio de procesos luminiscentes empleando materiales que propicien este fenómeno. Para implementar un láser se necesita un medio activo que proporcione la ganancia, una fuente de energía externa (comúnmente llamada energía de bombeo) y un resonador óptico. En los sistemas láser de fibra óptica el medio activo es la fibra óptica dopada, siendo el erbio (Er^{3+}) uno de los elementos más utilizados como dopantes; el resonador óptico puede estar compuesto de la manera más simple colocando 2 espejos en los extremos de la fibra con el fin de generar realimentación; por último el bombeo es una fuente de energía externa que proporciona la señal que entra al resonador y excita los iones de tierras raras incorporados en el núcleo de la fibra (Fig. 1.10). Al suministrar energía de bombeo, se presentan en el medio activo fenómenos de absorción, emisión estimulada y emisión espontánea, los cuales son los más importantes para generar emisión láser.

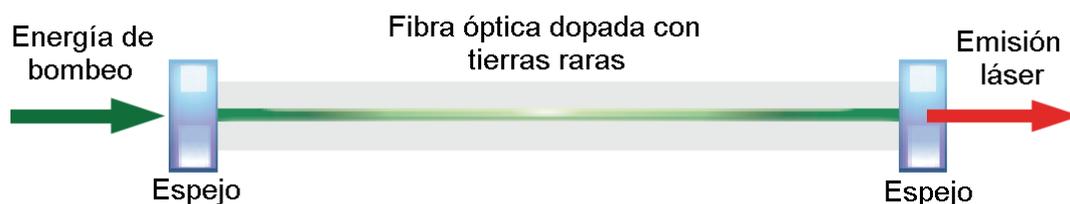


Fig. 1.10 Esquema de un láser de fibra óptica [1].

Dentro del material o medio activo, los átomos se encuentran en un estado energético bien definido, donde si hay interacción con un campo electromagnético que iguale la energía necesaria para excitar un electrón a cambiar de nivel de energía, se produce el fenómeno de absorción. Al ocurrir esto, los electrones pasan a un nivel mayor de energía ocasionando una condición conocida como inversión de población. Dado el incremento de nivel energético de los electrones, estos decaen posteriormente al pasar cierto tiempo que es característico del material y se emite un fotón (emisión espontánea); otra forma en la cual los electrones pueden bajar de nivel es debido a variaciones térmicas o vibraciones en el material. Además, si uno de los fotones que es emitido provoca que otros electrones caigan al estimularlos, se genera la emisión de más fotones (emisión estimulada). La emisión estimulada tiene como característica que todos los fotones emitidos poseen la misma fase y frecuencia que el primer fotón, obteniéndose de esta manera luz coherente [1, 8].

En la figura 1.11 podemos observar las etapas que se presentan durante el proceso de estimulación del material: el bombeo y el decaimiento de los electrones que pueden provocar emisión de luz láser. El material láser o medio activo es el que determina las longitudes de onda, niveles de energía y tiempos de decaimiento de los electrones. Asimismo, el tipo de material que se emplee como medio activo determina los niveles de energía involucrados en estas transiciones electrónicas y, de igual manera esto determina las transiciones que pueden generar la emisión de luz láser. En la figura se ejemplifican sistemas atómicos de 4 y 3 niveles, los cuales son los más representativos de la gran mayoría de materiales láser utilizados comúnmente.

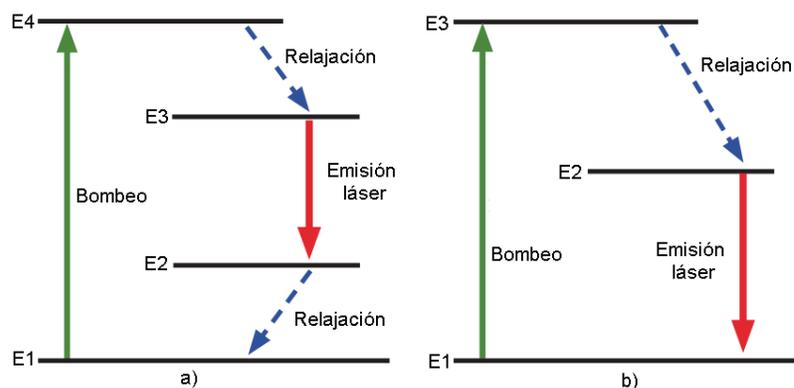


Fig. 1.11 Transiciones electrónicas en materiales láser, a) 4 niveles b) 3 niveles [1].

1.4.2 Polarización de la luz

La luz, al ser una onda electromagnética transversal, posee componentes tanto de campo eléctrico como de campo magnético, siendo estos ortogonales entre sí. La polarización está dada por la orientación del vector de campo eléctrico durante la propagación de la onda; en otras palabras, la rotación de este vector se utiliza para definir la polarización de la onda. De manera general, se pueden definir tres tipos de polarización dependiendo de las trayectorias que describa el vector de campo eléctrico; estas son (Fig. 1.12):

- Polarización lineal
- Polarización elíptica
- Polarización circular (derecha o izquierda)

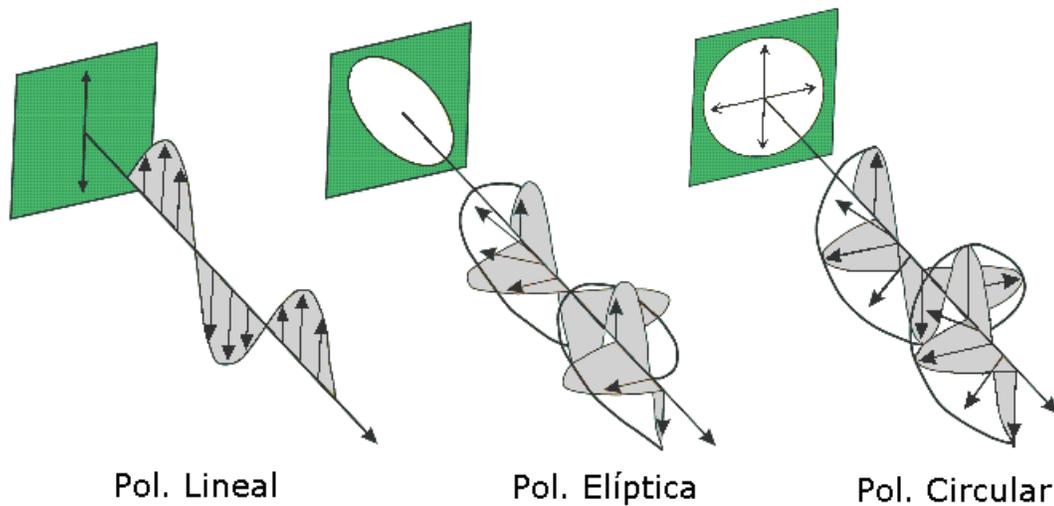


Fig. 1.12 Tipos de polarización de la luz.

La importancia de la polarización de la luz, y en general de cualquier onda electromagnética, se puede entender cuando esta interactúa con materiales. Por ejemplo, en ciertos materiales la absorción o la reflexión de la luz dependen de la polarización de la misma. Otro caso es que las antenas tengan que ser diseñadas con geometrías que sean compatibles con la polarización de la onda electromagnética a detectar. Finalmente, existen también algunos polímeros que presentan cambios estructurales únicamente al interactuar con luz polarizada de una cierta manera.

Existen varios métodos para representar la polarización, entre los que destacan la elipse de polarización, representaciones matriciales (matrices de Jones y de Muller), la esfera de Poincaré y finalmente los parámetros de Stokes. La representación a utilizar para el análisis de la propagación de luz polarizada depende de la aplicación en particular [4].

La polarización es muy importante en sistemas de fibras láser, ya que esta puede generar perturbaciones en el haz de luz láser emitido. De manera natural, las fibras ópticas generan variaciones en la polarización de la luz que viaja a través de ellas. Esta variación es ocasionada, entre otras cosas, por las imperfecciones que inevitablemente se presentan al fabricar estas guías de onda ópticas. Los factores externos e internos que cambian la polarización de la luz durante su propagación en una fibra óptica, generan variaciones en el índice de refracción y alteran la señal que viaja a través de ella [4, 8].

Los temas mencionados en este capítulo son los principios en los que se desarrolla este trabajo de investigación. Los dispositivos fabricados se basan en acopladores de fibra óptica, donde se tiene expuesta la onda evanescente al medio externo. Si se hace interactuar la onda evanescente con compuestos que cambian con estímulos ópticos, como los azobencenos, se da pauta a cambios en la luz que viaja dentro de las fibras ópticas, tanto en su espectro de emisión como en su polarización. Estos fundamentos ayudan a comprender los fenómenos que presentan en los siguientes capítulos.