



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA CON
RECUBRIMIENTOS DE AZOPOLÍMERO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

PRESENTA:

AMADO MANUEL VELÁZQUEZ BENÍTEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. JUAN HERNÁNDEZ CORDERO



MÉXICO, D.F.

Julio de 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Quisiera agradecer por su colaboración, apoyo y ayuda en alguna forma en la realización de este trabajo a:

A mis padres, Rubén y Susana, y a mi hermano Arturo, quienes siempre me han apoyado a lo largo de mi vida orientándome por el buen camino, me han ayudado en todo lo posible y enseñado muchas cosas.

Al Dr. Juan Hernández Cordero por ser un excelente asesor, gran investigador, por su constante ayuda y por ofrecerme su amistad.

A la Dra. Laura Oropeza y a Mathieu Hautefeuille del centro UNAMems, quienes estuvieron dispuestos a colaborar conmigo y gracias a sus aportaciones se concluyó este trabajo exitosamente.

A los compañeros de laboratorio: Violeta, Tamar, Natanael y Reinher, quienes hicieron amena la estadía en el laboratorio, compartieron sus experiencias conmigo y tuvieron la disposición de ayudarme.

Al Dr. Augusto García y la Dra. Celia Sánchez del CCADET por proporcionarme el equipo necesario y su ayuda en la realización de mis experimentos.

Al Dr. Ernesto Rivera y a Carolina Caicedo por brindarme su asesoría en varios temas y facilitarme material.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM por el programa de becas, instalaciones y el equipo facilitados; asimismo, a los técnicos del IIM, Omar Novelo P. y Miguel A. Canseco M., por ayudarme a analizar las muestras de mis experimentos.

Al apoyo otorgado por el proyecto PAPIIT IN116509 para este trabajo de investigación.

ÍNDICE

1 ANTECEDENTES	1
OBJETIVO.....	2
1.1 Principios de guías de onda.....	2
1.1.1 Reflexión total interna.....	3
1.1.2 Onda evanescente.....	5
1.2 Acopladores de fibra óptica.....	6
1.3 Azopolímeros.....	10
1.4 Fibras ópticas láser.....	13
1.4.1 Funcionamiento.....	13
1.4.2 Polarización de la luz.....	15
2 FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS ADELGAZADAS Y ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA	17
2.1 Descripción de la máquina y procedimiento general para fabricar acopladores de fibra óptica.....	19
2.1.1 Software OC-2010.....	23
2.2 Fabricación de fibras adelgazadas y de acopladores de fibra óptica.....	25
2.2.1 Metodología y parámetros de fabricación.....	26
2.2.2 Fibras ópticas adelgazadas.....	28
2.3 Caracterización de acopladores.....	29
2.3.1 Cambios en el índice de refracción externo.....	32
3 DEPÓSITO DE AZOPOLÍMEROS EN FIBRAS ÓPTICAS	38
3.1 Características y propiedades ópticas de los azopolímeros.....	40
3.1.1 Rojo disperso 1.....	42
3.2 Técnicas de depósito.....	44
3.2.1 Pruebas preliminares.....	44
3.3 Preparación del azopolímero y recubrimiento de las fibras ópticas.....	48
3.3.1 Molde para las muestras.....	50

4 RESPUESTA DE DISPOSITIVOS DE FIBRA ÓPTICA RECUBIERTOS CON AZOPOLÍMEROS	53
4.1 Cambios fotoinducidos en el espectro de transmisión	57
4.1.1 Fibras ópticas adelgazadas	58
4.1.2 Acopladores sobreacoplados de fibra óptica.....	59
4.1.2.1 Efectos en acopladores por variación de temperatura.....	63
4.1.3 Efectos en acopladores sin láser de escritura.....	65
4.2 Cambios fotoinducidos en polarización	66
4.2.1 Fibras ópticas adelgazadas	67
4.2.2 Acopladores sobreacoplados de fibra óptica.....	69
4.2.3 Efectos de polarización en acopladores sin láser de escritura	71
4.3 Posibles aplicaciones de los dispositivos	72
5 CONCLUSIONES.....	74
APÉNDICE A: Artículo para el 2 nd <i>Workshop on Specialty Optical Fibers and Their Applications (WSOF-2010)</i>	78
APÉNDICE B: Hoja de especificaciones de la fibra monomodal SMF-28e	83
APÉNDICE C: Hoja técnica de seguridad del Rojo Disperso 1 (DR1)	88
APÉNDICE D: Hojas de información sobre la matriz polimérica (PDMS)	94
APÉNDICE E: Planos del molde para la fabricación de dispositivos de fibra óptica recubiertos con azopolímero	103
REFERENCIAS	108

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]:

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

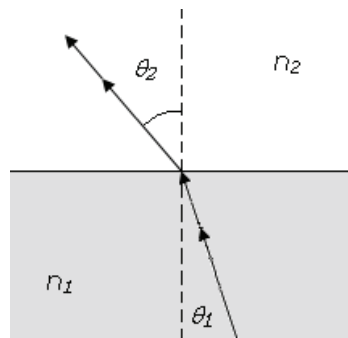


Fig. 1.1. Ley de Snell donde $n_1 > n_2$.

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].

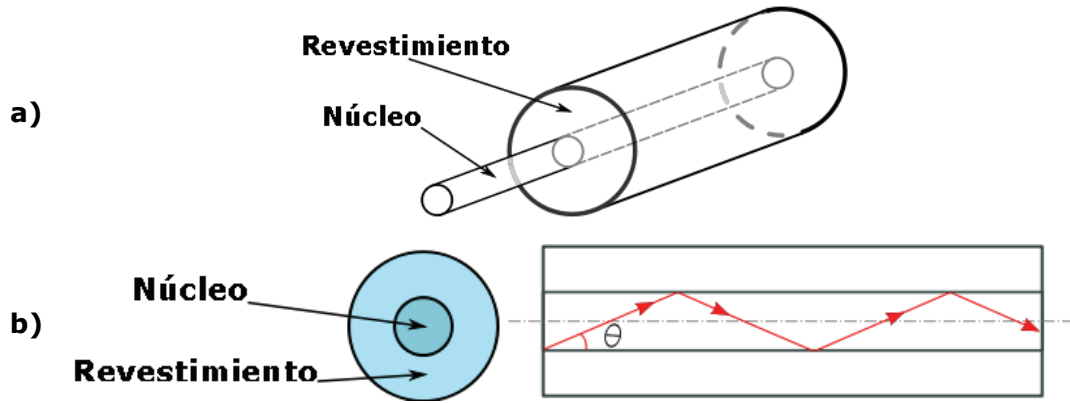


Fig. 1.2. a) Esquema de la estructura de una fibra óptica y b) propagación del haz de luz dentro de esta.

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].

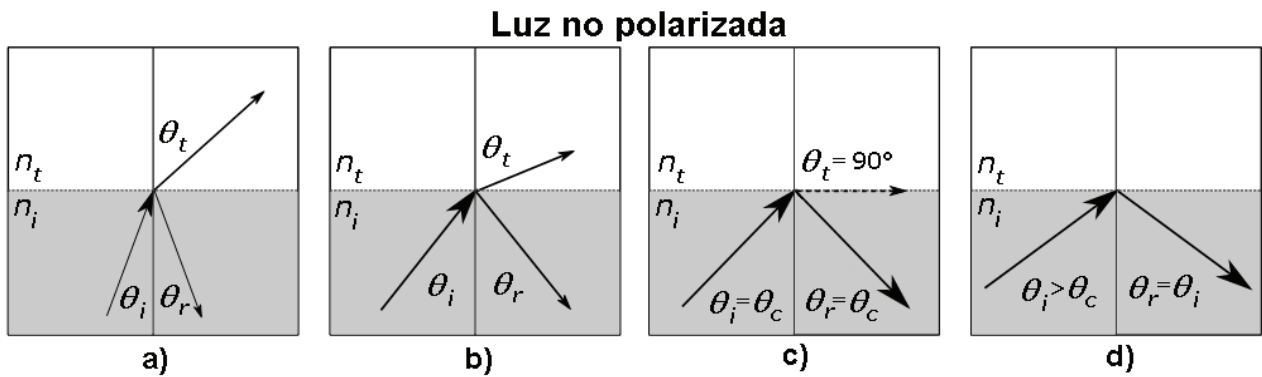


Fig.1.3. Variación de los ángulos de incidencia de un haz de luz (θ_i), de transmisión (θ_t) y de reflexión (θ_r) en la interfaz de dos materiales con distintos índices de refracción ($n_i > n_t$). a) Haz con ángulo de incidencia pequeño, b) al aumentar θ_i mayor cantidad del haz se refleja y se transmite 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.

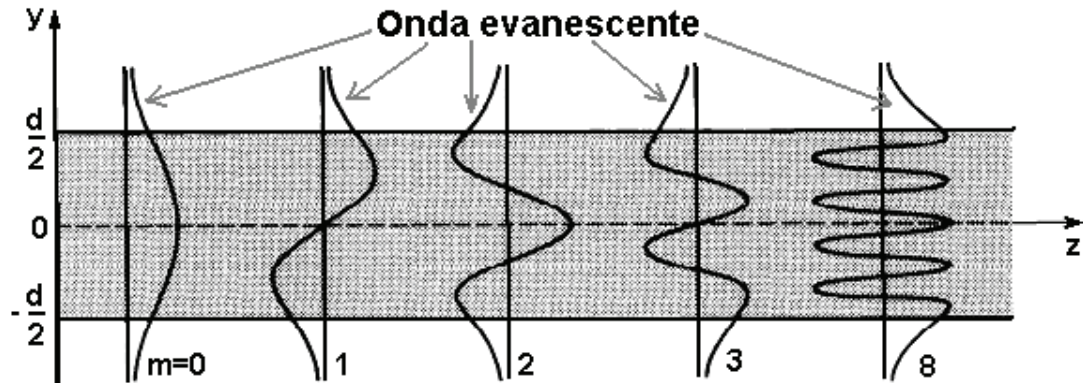


Fig.1.4. Modos de propagación en una guía de onda de cierto diámetro (d): la onda evanescente dependiente del número de modos (m) se indica para cada caso [4].

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.

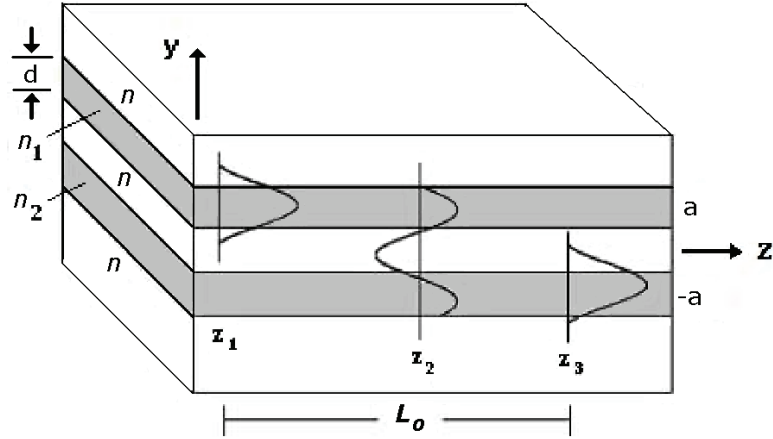


Fig. 1.5. Acoplamiento de señal entre dos guías de onda planas [5].

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

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

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

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:

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

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

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:

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

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

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]:

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

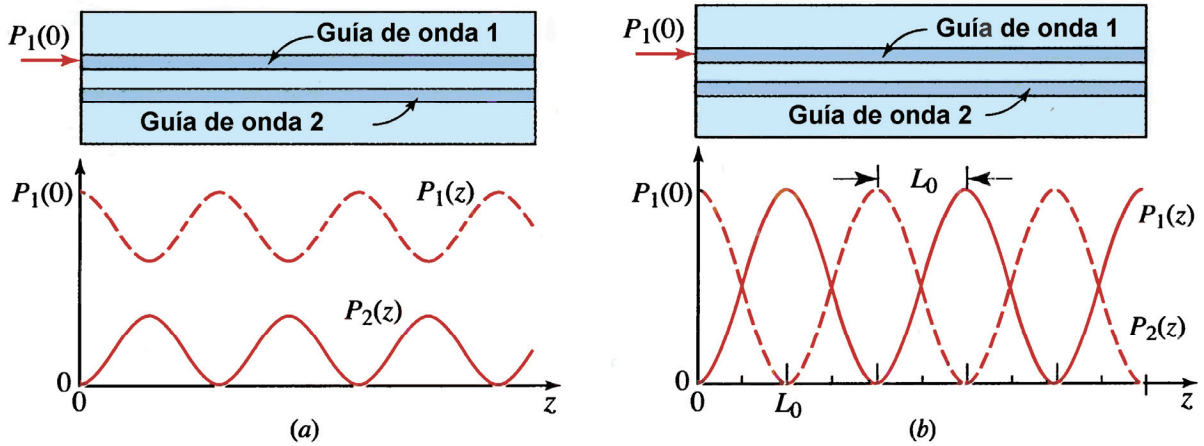


Fig. 1.6. La transferencia de potencia en: a) guías de onda diferentes y b) con guías de onda iguales [4].

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.

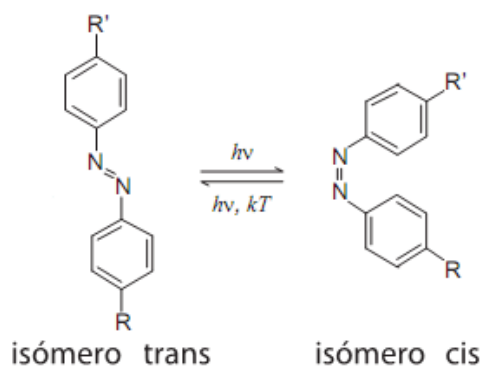


Fig. 1.7. Isómero de azobenceno y sus formas *trans* y *cis* [7].

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].

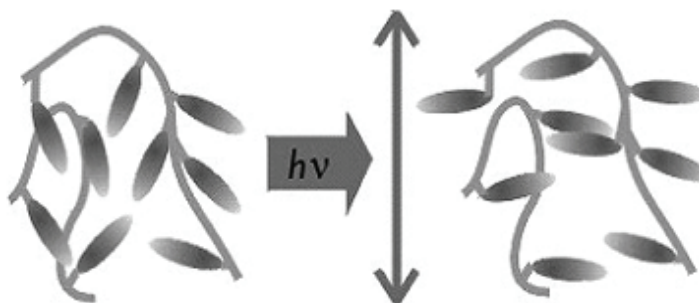


Fig. 1.8. Orientación perpendicular de las moléculas de azobenceno con respecto al eje de la luz linealmente polarizada radiada sobre el compuesto [6].

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].

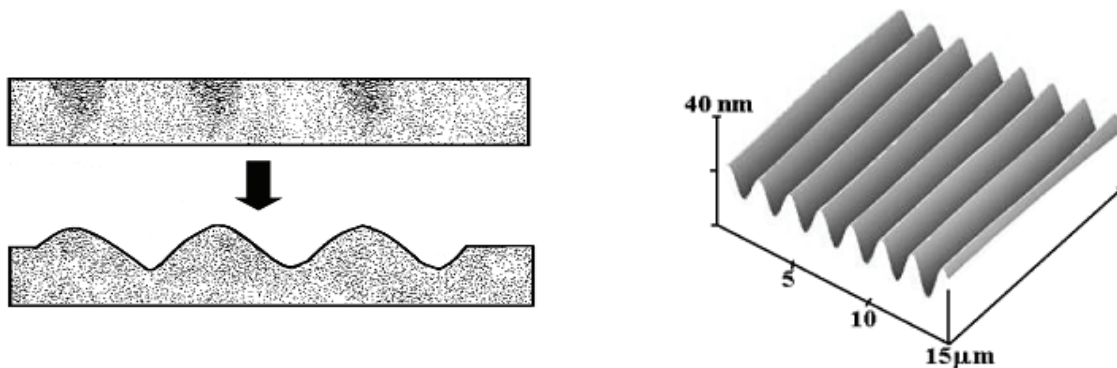


Fig. 1.9. Grabado de relieve superficial generado en azopolímeros [13, 29].

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.

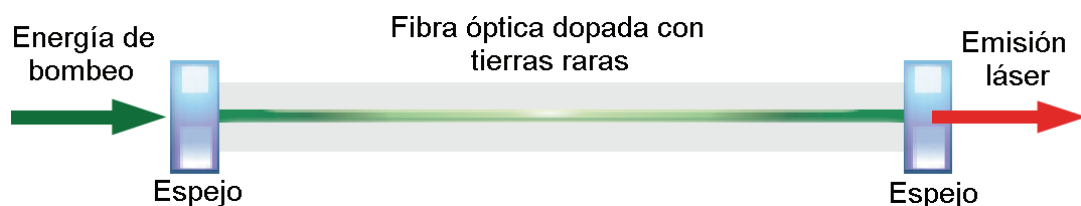


Fig. 1.10 Esquema de un láser de fibra óptica [1].

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.

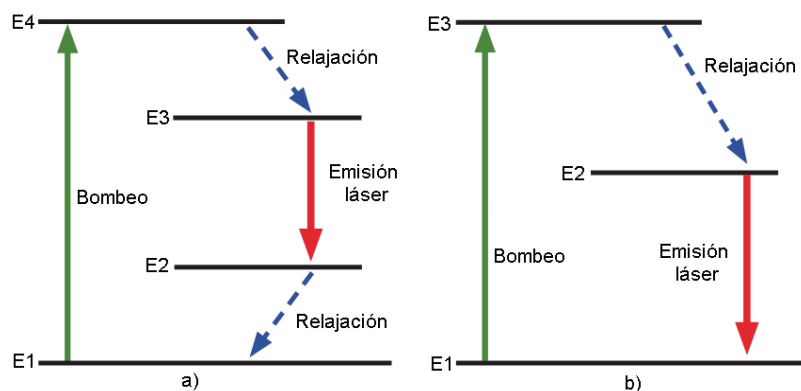


Fig. 1.11 Transiciones electrónicas en materiales láser, a) 4 niveles b) 3 niveles [1].

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)

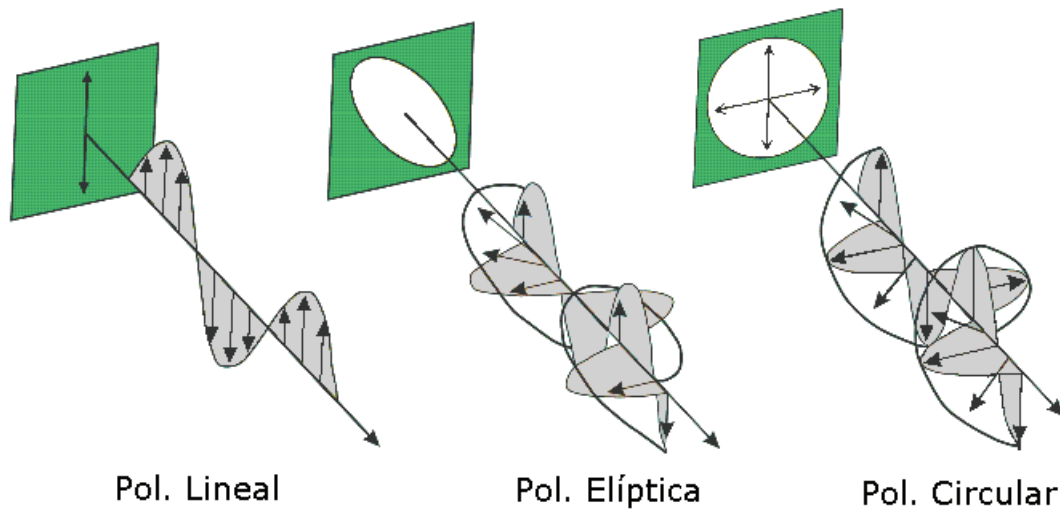


Fig. 1.12 Tipos de polarización de la luz.

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.

2. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS ADELGAZADAS Y ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA

Para los dispositivos desarrollados durante este trabajo se emplearon como base acopladores de fibra óptica fabricados por fusión y fibras ópticas adelgazadas. Los acopladores fabricados por esta técnica son el resultado de un proceso en el cual las fibras involucradas son trenzadas y después se les aplica calor para lograr que estas se fundan; las fibras se fusionan mientras son estiradas con lo cual los revestimientos de las dos fibras se convierten en el nuevo núcleo en esa región y el nuevo revestimiento es el medio ambiente.

El análisis teórico de los acopladores se puede realizar considerando las distintas regiones mostradas en la figura 2.1. La región de acoplamiento con las dos fibras fusionadas (región sombreada) se localiza en la cintura del acoplador. Los parámetros que se consideran para el estudio del acoplamiento de luz entre ambas fibras son:

- n_2 , índice de reflexión del revestimiento de la fibra óptica.
- n_3 , índice de reflexión del medio.
- Δz , región de barrido de la antorcha.
- L , longitud de elongación del acoplador.
- L_{inicial} , longitud inicial de la región de acoplamiento.
- a_0 , diámetro original de la fibra óptica.
- a_{cintura} , diámetro de la región de acoplamiento.

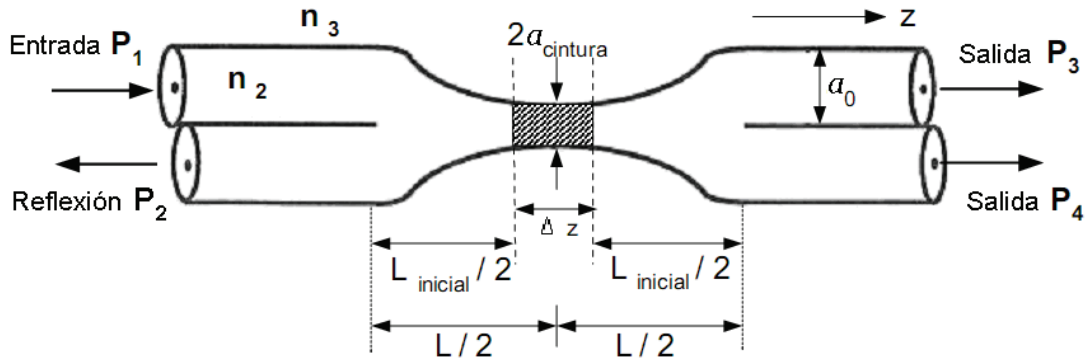


Fig. 2.1. Esquema de un acoplador de fibra óptica indicando las características empleadas para analizar el acoplamiento de luz entre ambas fibras ópticas [9].

Al fusionarse las dos guías de onda, que en este caso son las fibras ópticas, el diámetro de ambas se va reduciendo y fusionando hasta llegar a formar una sección donde casi son una sola fibra. El coeficiente de acoplamiento para estos dispositivos fabricados con dos fibras iguales está dado por la ecuación:

$$C = \frac{3\pi\lambda}{32n_2a_{cintura}^2} \frac{(L - L_{inicial})}{\left(1 + \frac{1}{V}\right)^2} \quad 2.0.1$$

El diámetro de la región de acoplamiento, $a_{cintura}$, es obtenido al estirar las fibras de su diámetro original, a_0 . La longitud de onda (λ) de la señal utilizada afecta directamente sobre C . El decremento en diámetro tiene una variación exponencial, y depende de la longitud elongada y del barrido de la antorcha [9]:

$$a_{cintura} = a_0 \exp\left(\frac{-L}{2\Delta z}\right) \quad 2.0.2$$

El número V , que determina el número de modos que puede poseer la fibra óptica, se obtiene por la siguiente expresión [4, 8]:

$$V = 2\pi a_0 \frac{\sqrt{n_2^2 - n_3^2}}{\lambda} \quad 2.0.3$$

Cabe mencionar que la longitud de onda de la señal de entrada (P_1) a la fibra, es determinante para el proceso de fabricación de los acopladores, ya que dependiendo de esta se obtienen dispositivos con diferentes características espectrales. Dejando todos los demás parámetros iguales, el coeficiente de acoplamiento será mayor para una longitud de onda mayor [9].

Para el caso de la fabricación de fibras adelgazadas el proceso se simplifica al calentar y estirar una sola fibra, teniendo un cuello donde se presenta el mismo efecto: el revestimiento de la fibra pasa a ser el núcleo de la guía de onda y el medio es el nuevo revestimiento. En estos dispositivos la idea es aumentar la interacción de la onda evanescente con el medio externo, y durante su fabricación, sólo se pueden determinar las pérdidas en la señal que viaja a través de ellos. Sin embargo, se sabe mediante el análisis de óptica de ondas que para un adelgazamiento determinado, la onda evanescente se expone más al medio externo a medida que la longitud de onda aumenta.

Para ambos dispositivos, todo el proceso de fabricación se realiza de manera que se monitorean las potencias de las señales ópticas en las fibras, observando a lo largo del proceso su comportamiento en tiempo real. Esto permite tener un mejor control para detener el proceso de acoplamiento a conveniencia, además de que se pueden evaluar las condiciones de operación para las cuales se obtienen pérdidas mínimas al fabricar los dispositivos. En este trabajo se manejaron acopladores de solo dos fibras ópticas, ya que son los más utilizados y simples de fabricar con la máquina utilizada.

2.1 Descripción de la máquina y procedimiento general para fabricar acopladores de fibra óptica.

La estación de trabajo en la que se fabricaron los acopladores de fibra óptica, brinda la posibilidad de obtener distintos porcentajes de acoplamiento entre fibras mediante un proceso de fusión entre ellas. Esta se compone de una máquina de

procedencia china, marca DOWSON, modelo OC-2012 y una computadora que monitoriza y controla a la máquina (Fig. 2.2).

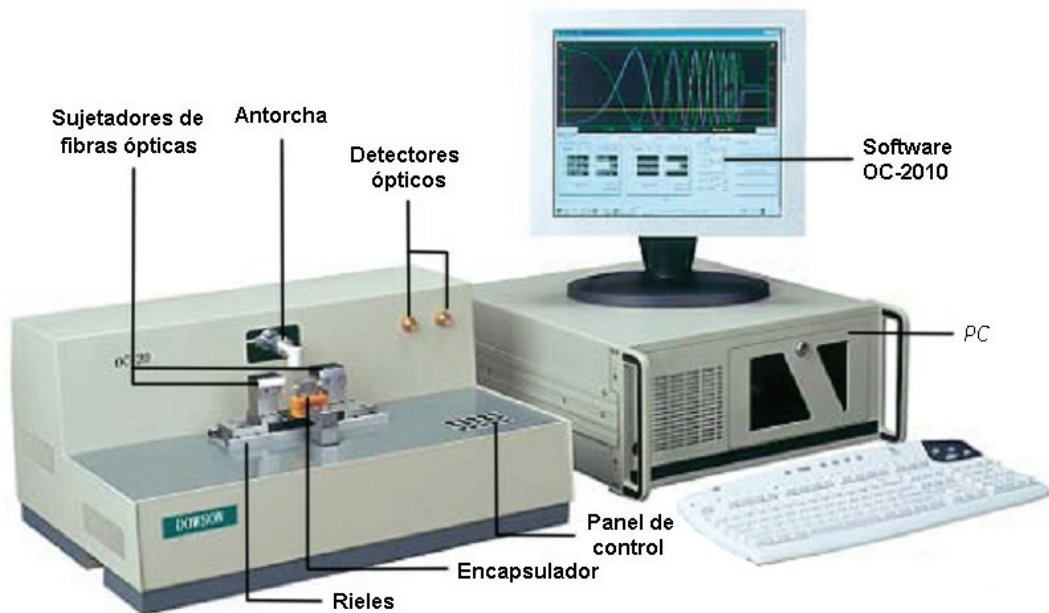


Fig. 2.2. Estación de trabajo OC-2010 [10].

La máquina se compone de los siguientes elementos:

- a) Sujetadores de fibras ópticas mediante vacío y que se desplazan sobre rieles para elongar las fibras ópticas.
- b) Antorcha para quemar hidrógeno y producir la flama para fusión.
- c) Dos detectores de potencia óptica por las cuales se monitoriza la cantidad de señal proveniente de cada fibra óptica.
- d) Encapsulador para recubrir la región de acoplamiento.
- e) Un tanque de hidrógeno de ultra alta pureza que proporciona el combustible para la flama de la antorcha.
- f) Software OC-2012 instalado en la computadora para controlar la máquina.
- g) Bomba de vacío que sirve para succionar y sujetar las fibras.

El panel de control de la máquina mostrado en la figura 2.3 controla los movimientos de esta. Las funciones de cada botón son [10]:

1. **RUN**.- comienza el proceso de fundido de las fibras.
2. **STOP**.- detiene el proceso de fundido de las fibras.
3. **HOME**.- regresa los sujetadores a la posición inicial.
4. **AMEND**.- activa la antorcha para que caliente las fibras pero sin jalarlas.
5. **FLAME UP**.- eleva la antorcha a una posición donde la flama no hace contacto con las fibras.
6. **FLAME DOWN**.- baja la antorcha hasta la posición ajustada en los parámetros de fabricación.
7. **HOLDL**.- activa el vacío en el sujetador izquierdo para detener las fibras.
8. **HOLDR**.- activa el vacío en el sujetador derecho para detener las fibras.
9. **PACK HOLD**.- activa el vacío en el encapsulador para fijar la zona fundida o adelgazada y empaquetarla.
10. **PACK UP/DOWN**.- activa el encapsulador para llevarlo a la posición establecida.
11. **PACKL**.- enciende el calentador izquierdo para secar el recubrimiento de la zona de acoplamiento.
12. **PACKR**.- enciende el calentador derecho para secar el recubrimiento de la zona de acoplamiento.

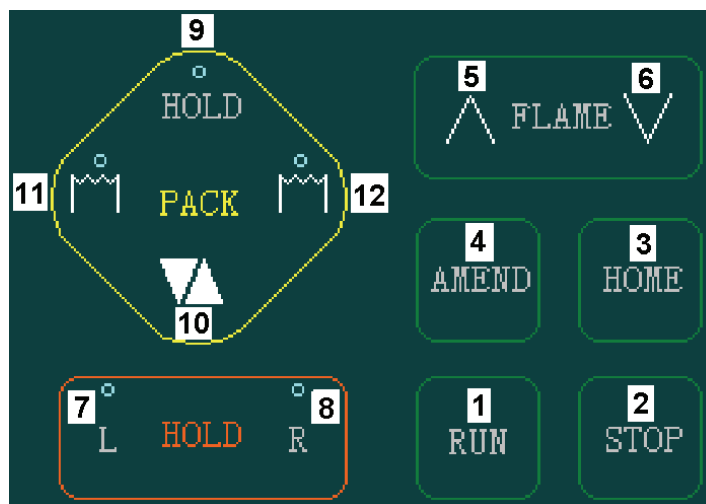


Fig. 2.3. Panel. Panel de control de la estación OC-2010 [10].

Para fabricar los acopladores, la máquina solo cuenta con 2 canales para la detección de potencia, por tal razón solo se pueden fabricar dispositivos que involucren la fusión de 2 fibras ópticas. El procedimiento para la fabricación de acopladores es como sigue:

- I.** Encender el equipo, inicializar el software y los motores.
- II.** Preparar las fibras ópticas cortando las puntas y quitando el recubrimiento de polímero en las puntas y en la zona que se fusionarán al pasar la antorcha.
- III.** Limpiar las puntas de las fibras primero con alcohol etílico y después con acetona para eliminar cualquier rastro de polvo o grasa que pueda interferir con la señal y posteriormente se cortan para introducirlas a los detectores de la máquina.
- IV.** Encender la bomba de vacío.
- V.** De igual manera que en el paso III, se limpian las zonas de las fibras que se fusionarán y se fijan ambas en uno de los sujetadores mediante la succión generada por la bomba de vacío.
- VI.** Se trenzan las fibras en la región a fundir y se fijan en el otro sujetador, cuidando que el trenzado se encuentre justo en medio de los sujetadores, que sea uniforme y que las fibras tengan buen contacto entre ellas.
- VII.** Con una fuente de luz se alimenta la entrada de la fibra que se encuentra conectada al primer detector óptico (CH1), registrando una potencia en el rango de μW .
- VIII.** Se abre la válvula de paso del hidrógeno.
- IX.** Seleccionar e ingresar en la PC los parámetros para el proceso de fabricación y dar inicio (START) al proceso.
- X.** Durante el proceso de elongación y fusión se monitorizan las potencias de salida de cada una de las fibras en el monitor de la PC observando como se da el acoplamiento de ambas, determinando hasta que punto se llevará a cabo el proceso presionando el botón STOP.
- XI.** Se cierra la válvula de paso del hidrógeno.

En el caso de una fibra adelgazada el proceso a seguir es el mismo, salvo que solamente se emplea una sola fibra óptica y por lo tanto no se efectúa un trenzado. Además en este proceso los parámetros que se introducen en el software, varían en cuanto a la zona que se calienta. Esta variación es a razón de que solo se tiene que elongar la fibra óptica sin procurar la fusión con otra. Durante el proceso de fabricación de los dispositivos, la monitorización y control se realiza mediante la PC a través del software y se pueden realizar también todas las operaciones necesarias por medio del mismo o mediante el panel de control físico de la estación de trabajo.

La instalación de la máquina, sus características detalladas, así como la alimentación eléctrica y de hidrógeno, pueden ser consultadas a fondo en trabajos anteriores [11] y en el manual del fabricante [10].

2.1.1 Software OC-2010

El software de la máquina permite el control y monitorización del proceso de fusión de las fibras, así como el registro de los datos relevantes al proceso de fabricación. Durante la elongación y fusión de las fibras, es posible registrar datos de potencia normalizada en cada fibra, pérdidas y coeficiente de acoplamiento, entre otros. Todos los datos se almacenan en archivos para su posterior análisis mediante editores de texto y hojas de cálculo.

La pantalla que se despliega al iniciar el software (Fig. 2.4), muestra en la parte superior una barra de herramientas en la cual se aprecian varias opciones mostradas a detalle en la figura 2.3. Las opciones enumeradas son las utilizadas para controlar el proceso de fabricación de los acopladores, cada una de ellas al seleccionarla abre una nueva ventana en donde se ejecuta la función.



Fig.2.3. Barra de herramientas básicas del software OC-2010.

El detalle de las opciones enumeradas se presenta a continuación:

- 0.- Se cierra la aplicación.
- 1.- Menú donde se introducen los parámetros de fabricación.
- 2.- Abre una gráfica de algún proceso guardado anteriormente.
- 3.- Se guarda el proceso que se está visualizando en el momento.
- 4.- Ajuste de parámetros de movimiento de todos los motores.
- 5.- Movimiento manual a pasos de cada motor.

En la figura 2.4 se puede apreciar que la pantalla principal del programa de control donde se muestra en la parte inferior central 6 indicadores con fondo negro. En estos indicadores se visualizan en tiempo real los datos de potencia y transferencia de la señal para ambas fibras ópticas durante el proceso de fabricación. Los indicadores P1 y P2 muestran la potencia de la señal de los canales 1 y 2, respectivamente; el indicador P0 es la potencia inicial registrada en el canal 1 antes de comenzar el proceso de fabricación, misma que se utiliza también para normalizar las potencias registradas durante la fabricación del acoplador. El indicador CR (del inglés "Coupling Ratio") muestra el coeficiente de acoplamiento entre las dos fibras, mientras que el indicador de EL (del inglés "Excess Loss") denota las pérdidas totales en referencia con la potencia inicial de entrada, P0.

Los datos mostrados en los indicadores ya mencionados, son dibujados en la gráfica de la pantalla mostrada en la figura 2.4. El gráfico de estos datos permite observar como se va desarrollando el proceso durante la fusión y elongación de las fibras. Todos estos datos registrados se trazan en *dB* en función del tiempo (horas:minutos:segundos). Es posible obtener estas mismas gráficas en función de la longitud de elongación, siendo de utilidad para estimar posteriormente las dimensiones de los dispositivos fabricados.

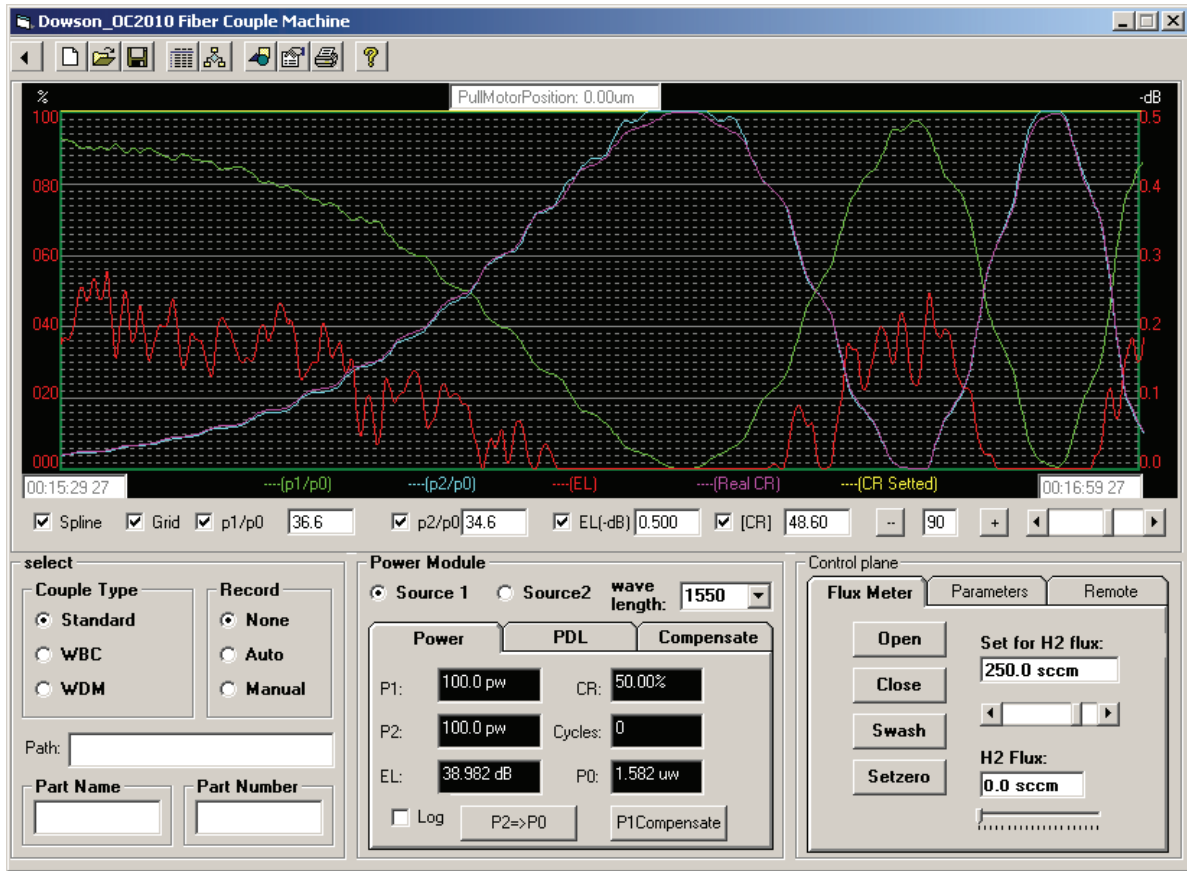


Fig. 2.4. Pantalla del software OC-2010.

2.2 Fabricación de fibras adelgazadas y de acopladores de fibra óptica

Las fibras ópticas adelgazadas y los acopladores utilizados para este trabajo se fabricaron con fibra óptica monomodal estándar SMF-28e. La señal de entrada a la fibra óptica conectada al canal uno de la máquina, fue proporcionada por una fibra láser sintonizable en longitud de onda ensamblada en el laboratorio. El arreglo esquemático de este sistema láser se muestra en la figura 2.5.

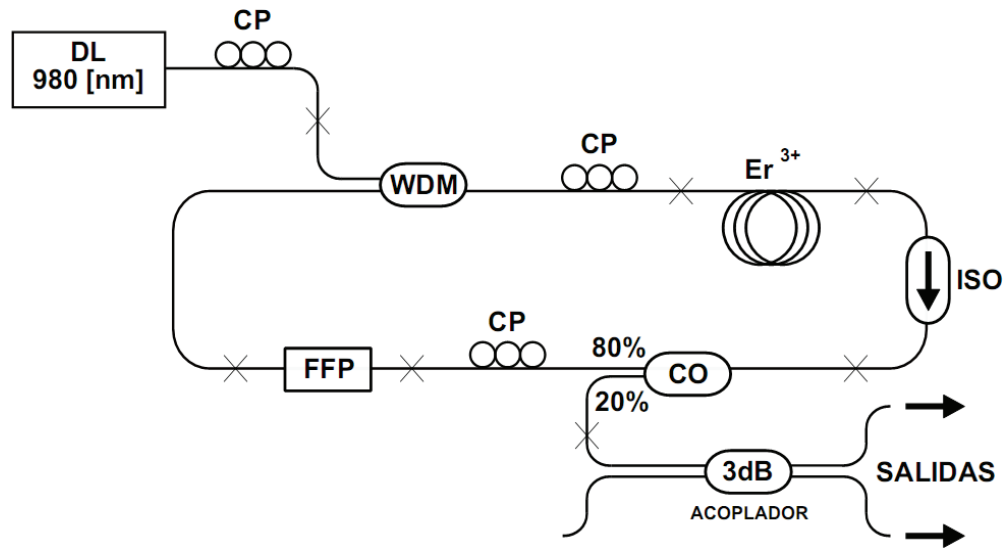


Fig. 2.5. Diagrama de la fibra láser sintonizable utilizada para fabricar acopladores (la simbología utilizada en la figura se detalla en el texto).

La fibra láser sintonizable emplea para su funcionamiento una fuente de alimentación para regular la temperatura y corriente suministrada al diodo láser (DL). Este es un láser semiconductor que emite una señal de salida de 980 *nm* empleada como energía de bombeo para la fibra láser de erbio. El segmento de fibra dopada con erbio (Er^{3+}) proporciona la ganancia del láser en anillo en la región espectral de 1550 *nm*. Para que la luz generada en el anillo viaje en una sola dirección, se utiliza un aislador óptico (ISO), sirviendo también para bloquear la señal de 980 *nm* que no ha sido absorbida por la fibra de erbio. El anillo incluye un filtro sintonizable de Fabry Perot, el cual cambia su longitud de onda de operación al aplicarle un voltaje; dentro del anillo también se incluyen controladores de polarización (CP), para ajustar la polarización del haz generado dentro del mismo. Finalmente, la salida de la fibra láser sintonizable se toma de un acoplador (CO) con un coeficiente de acoplamiento de 80/20.

2.2.1 Metodología y parámetros de fabricación

Los parámetros de fabricación que se ajustan en el software, son los que determinan el acoplamiento entre las dos fibras ópticas, así como las pérdidas en las fibras adelgazadas.

Los parámetros más relevantes son:

1. Flujo de hidrógeno, el cual determina la temperatura de calentamiento de las fibras.
2. Altura de la antorcha con respecto a las fibras.
3. Elongado inicial para tensar las fibras sin aplicar calor.
4. Velocidad de elongación de las fibras durante el proceso.
5. Longitud y velocidad de barrido de la antorcha.

Estos parámetros mencionados arriba definen características importantes del acoplador, como lo es su velocidad de fabricación. Por otro lado, estos mismos parámetros determinan las pérdidas, el diámetro de la zona de acoplamiento y longitud del acoplador; asimismo, la región de acoplamiento adquiere sus propiedades y determina como serán las señales a la salida del acoplador. Los parámetros adecuados para el proceso de fabricación se definen en relación a la mínima cantidad de pérdidas al fabricar un dispositivo, y son característicos de la fibra óptica a utilizar para fabricar los dispositivos.

Los parámetros con los que se lograron fabricar fibras adelgazadas y los acopladores de manera exitosa se determinaron de manera experimental. Se utilizaron como base los trabajos anteriores realizados por alumnos en esta misma estación de trabajo [5, 11], obteniéndose acopladores con bajas pérdidas y de una manera repetible. De igual manera, fue posible fabricar fibras adelgazadas con pérdidas muy bajas, mismas que se reportarán en las siguientes secciones de este capítulo. Los parámetros de fabricación empleados se listan en la tabla 2.1. Hay que recordar que estos parámetros de fabricación sólo son válidos para el tipo de fibra óptica utilizada (SMF-28e), ya que el hacer uso de otro tipo de fibra requerirá realizar el proceso de calibración mencionado anteriormente.

Tabla 2.1. Parámetros de fabricación para las fibras adelgazadas y los acopladores.

PARÁMETRO	ACOPLADOR	F. ADELGAZADA
Flujo de hidrógeno (H ₂)	250.0 [sccm]	250.0 [sccm]
Altura de la antorcha	3.0 [mm]	2.75 [mm]
Estirado inicial de las fibras	0.0 [mm]	0.0 [mm]
Velocidad de jalado	0.02 [mm/s]	0.02 [mm/s]
Desplazamiento de barrido de la antorcha	3.0 [mm]	6.0 [mm]
Velocidad de barrido de la antorcha	5.0 [mm/s]	5.0 [mm/s]

Algo que también es importante mencionar es el trenzado de las fibras y su fijado en la máquina. Se intentaron varias posiciones y número de vueltas entre las fibras, pero la manera en la que resultó ser más efectiva y arrojó menos pérdidas al momento de fusionarse fue haciendo un trenzado en el cual una de las fibras le da 2 ½ vueltas a la otra. Para el posicionamiento se fijó primero en el segundo sujetador (situado a la derecha y más cercano a los detectores) el CH2 y después el CH1, haciendo el trenzado entre las fibras y colocando por lo tanto en el primer sujetador (situado a la izquierda y que da hacia la fuente de luz) primeramente el CH1 y posteriormente el CH2, como se ilustra en la figura 2.6.



Fig. 2.6. Trenzado de fibras ópticas para el proceso de fusión.

2.2.2 Fibras ópticas adelgazadas

Las fibras adelgazadas se fabrican para exponer de manera más pronunciada la onda evanescente al medio externo. Con esto se obtiene un dispositivo que tiene la capacidad de cambiar su transmisividad al deformarse o al cambiar el índice de refracción del medio que lo rodea. La ventaja de estos dispositivos es que las pérdidas

son bajas, son más fáciles de fabricar y que pueden ser más robustos que un acoplador.

En la figura 2.7 se muestra una curva típica obtenida en el proceso de fabricación de una fibra óptica adelgazada. Las pérdidas registradas para estos dispositivos están dentro de un rango de 0.3 y 0.4 dB , lo cual es aceptable para el desarrollo de dispositivos de fibra óptica.

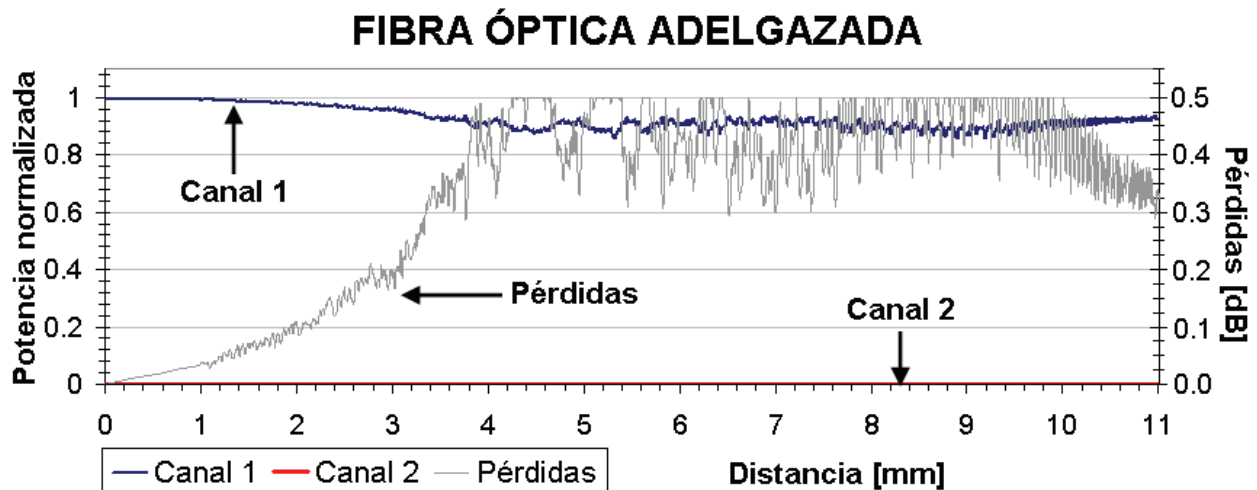


Fig. 2.7. Curva de potencia obtenida de la fabricación de una fibra adelgazada. Se muestran las pérdidas obtenidas en el dispositivo durante su fabricación. El canal 2 al no tener señal presenta una potencia nula.

2.3 Caracterización de acopladores

Al fabricar los acopladores de fibra óptica se presenta una transferencia de la señal entre las fibras. La figura 2.8 muestra una curva típica de transferencia de potencia obtenida durante el proceso de fabricación de estos dispositivos. Inicialmente, la señal proveniente del láser sintonizable se alimenta a la fibra conectada al canal 1, donde al presentarse el proceso de elongación y fusión, la potencia comienza a transferirse al canal 2. El proceso de acoplamiento se repite de manera cíclica, siendo la razón de que se registren diversos ciclos de transferencia de potencia entre ambas fibras. Típicamente, la fabricación de acopladores se basa en

detener el proceso antes de que la potencia se transfiera por completo a la fibra del canal 2. Sin embargo, para este trabajo se utilizaron acopladores con más ciclos de transferencia de potencia, debido a que estos son más sensibles a los cambios en el índice de refracción del medio externo. Este tipo de acopladores se conocen como acopladores sobre acoplados.

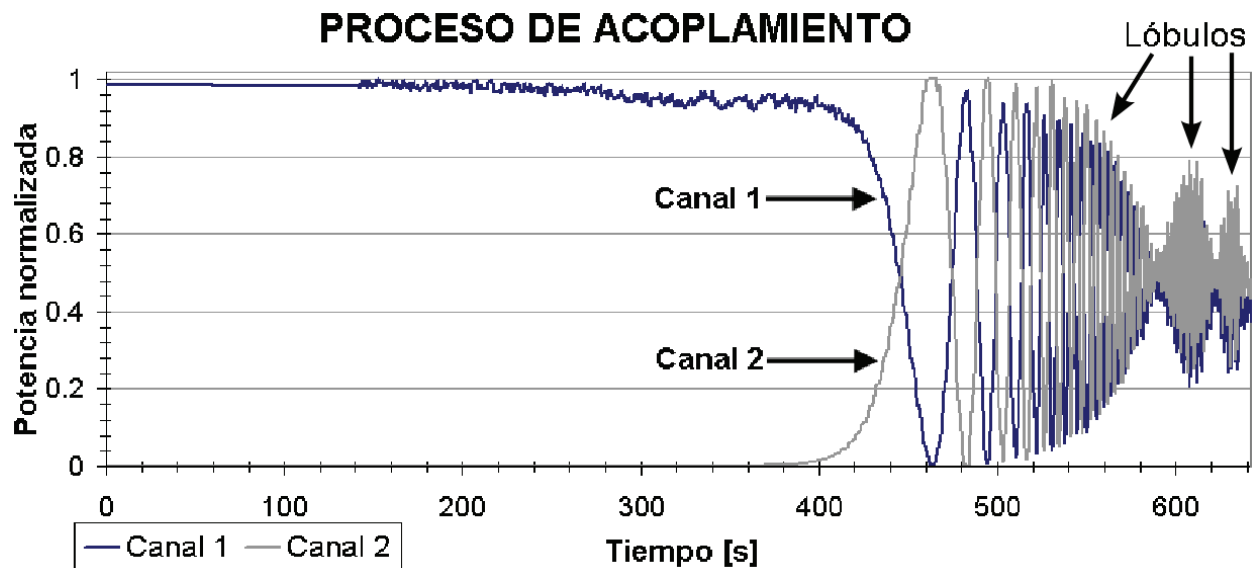


Fig. 2.8. Curva de transferencia de potencia de un acoplador de fibra óptica sobre acoplado.

Al fabricar acopladores sobreacoplados se continúa registrando ciclos de transferencia de la señal óptica entre las dos fibras. Cuando la región de acoplamiento se hace más delgada, estos ciclos de transferencia se van agrupando en lóbulos, como se puede apreciar en la figura 2.8. Los lóbulos son la envolvente de la curva de transferencia de potencia y se obtienen al extender el tiempo del proceso de elongación y fusión. La ventaja que se obtiene al tener un mayor número de lóbulos (esto es, más ciclos de transferencia de potencia) es que la sensibilidad de la región de acoplamiento se incrementa, aunque las pérdidas de señal aumentan y la resistencia mecánica del dispositivo es muy baja debido a que la elongación de las fibras es grande.

La cantidad de lóbulos obtenidos en los acopladores determina la presencia de bandas espectrales en las propiedades de transmisión del dispositivo (Fig. 2.9).

Mientras mayor sea el número de ciclos de transferencia de potencia, se tendrá una mayor selectividad en longitud de onda y el ancho espectral será menor. Además, para longitudes de onda más grandes se registrarán mayores pérdidas al ser la región de acoplamiento muy delgada y no poder confinar la onda. Otra característica de los acopladores sobreacoplados es que la potencia de las bandas es complementaria en cada uno de los canales, es decir, cuando la potencia en un canal es mínima, en el otro canal será máxima.

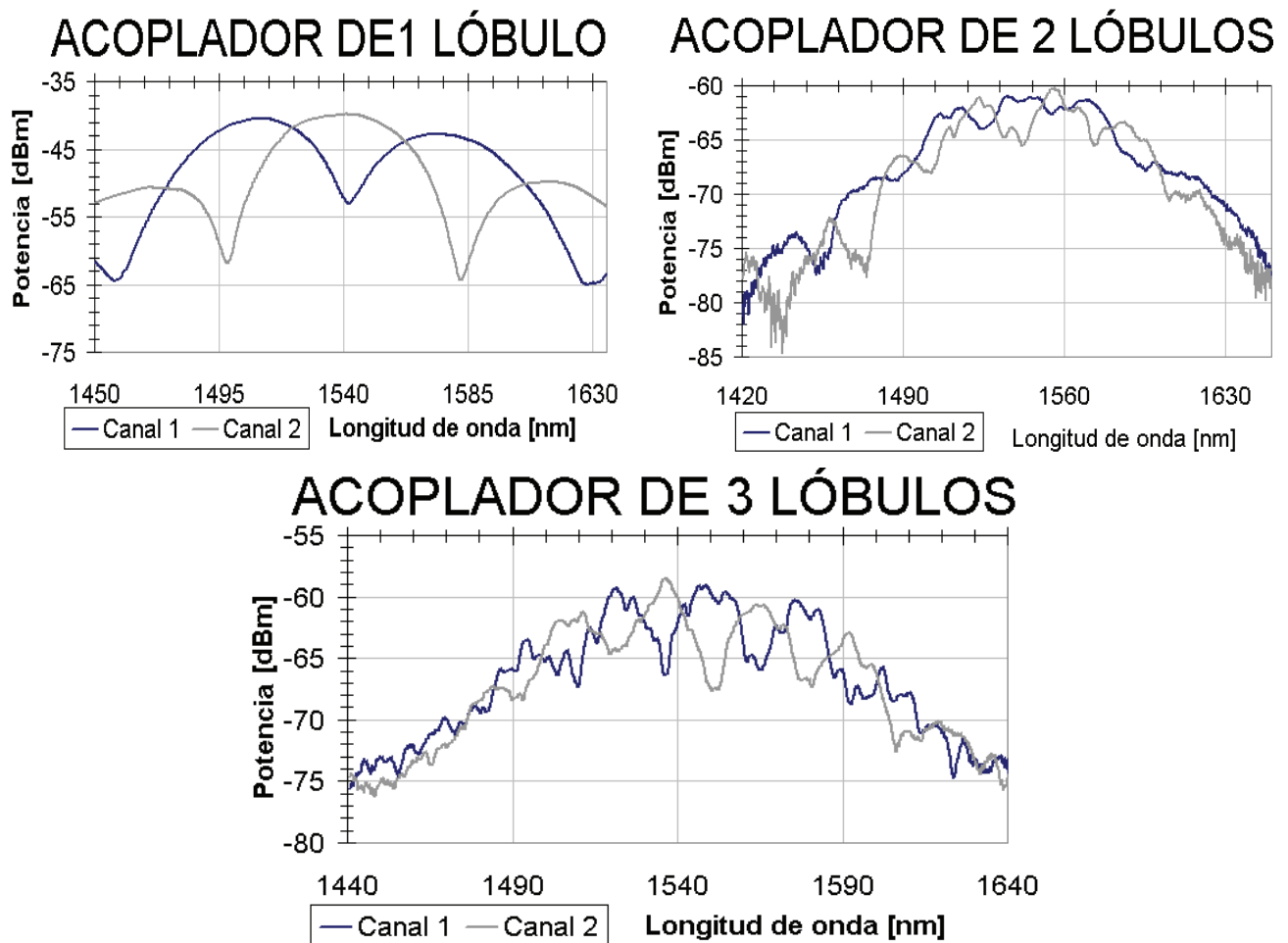


Fig. 2.9. Bandas espectrales en acopladores sobreacoplados según su número de lóbulos.

El mayor problema al incrementar el número de lóbulos es el del adelgazamiento, ya que es sumamente complicado manipular el acoplador una vez terminado el calentamiento y elongado. El solo hecho de desmontar el acoplador de la

máquina involucra un gran riesgo de fractura del dispositivo; asimismo, el recubrirlo con alguna sustancia requiere de cuidados especiales.

2.3.1 Cambios en el índice de refracción externo

Como ya se comentó debido a la elongación, los diámetros tanto del núcleo como del revestimiento en las fibras ópticas se ven disminuidos de manera proporcional. El adelgazamiento en la región de acoplamiento es tal, que el núcleo de la fibra óptica deja de ser el medio por donde se propaga la onda y el revestimiento funge como núcleo de la guía de onda.

La potencia de salida del acoplador depende del medio que lo rodea, específicamente de su índice de refracción. Estudios sobre esto ya han sido realizados en otros trabajos [9]; la figura 2.10 muestra la curva de potencia a la salida de un acoplador en función del índice de refracción externo. En este caso, el acoplador tiene las siguientes características: $a_{\text{cintura}} = 5.3586 \mu\text{m}$, longitud de estirado de 40 mm , barrido de la antorcha de 6.35 mm , índice de refracción del núcleo $n_1 = 1.461$, índice de refracción del revestimiento $n_2 = 1.458$. La longitud de onda de operación empleada es $\lambda = 1300 \text{ nm}$. En la figura se puede ver claramente que conforme cambia el índice del medio externo la potencia de salida varía. Nótese que cuando el índice de refracción del medio externo (n) es mayor al del revestimiento de la fibra, la onda ya no se guía en la región de acoplamiento.

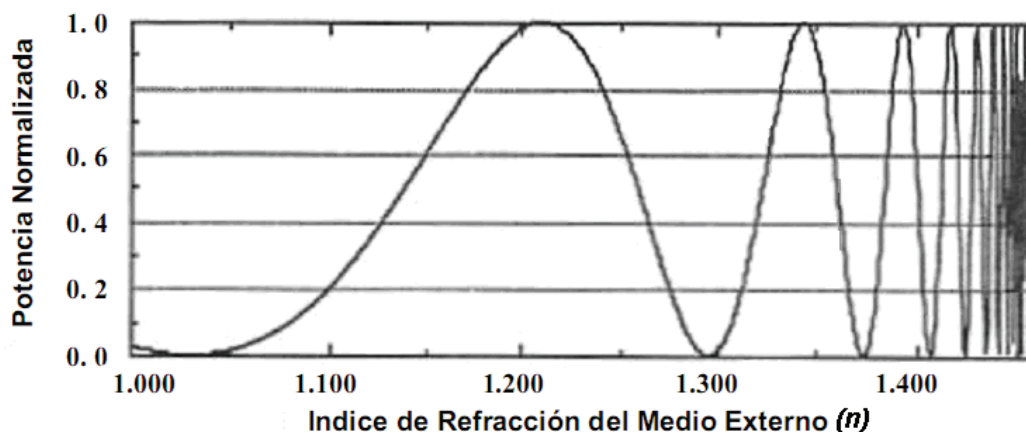


Fig. 2.10. Curva de potencia en función del índice de refracción del medio externo (n) [9].

Para caracterizar los acopladores se utilizó un diodo emisor de luz o LED (por sus siglas en inglés "Light Emitting-Diode") que cuenta con salida acoplada a fibra óptica, con ancho espectral mayor de 100 nm y cuyo espectro de emisión se muestra en la figura 2.11. Las propiedades espectrales de los dispositivos fabricados se obtuvieron al registrar la transmisividad en un analizador de espectros ópticos u OSA, por sus siglas en inglés ("Optical Spectrum Analyzer") (Fig. 2.12). Además, fue posible registrar las variaciones en estos espectros de transmisión al aplicar perturbaciones en la región de acoplamiento de los dispositivos, o bien, al cambiar el índice de refracción externo.

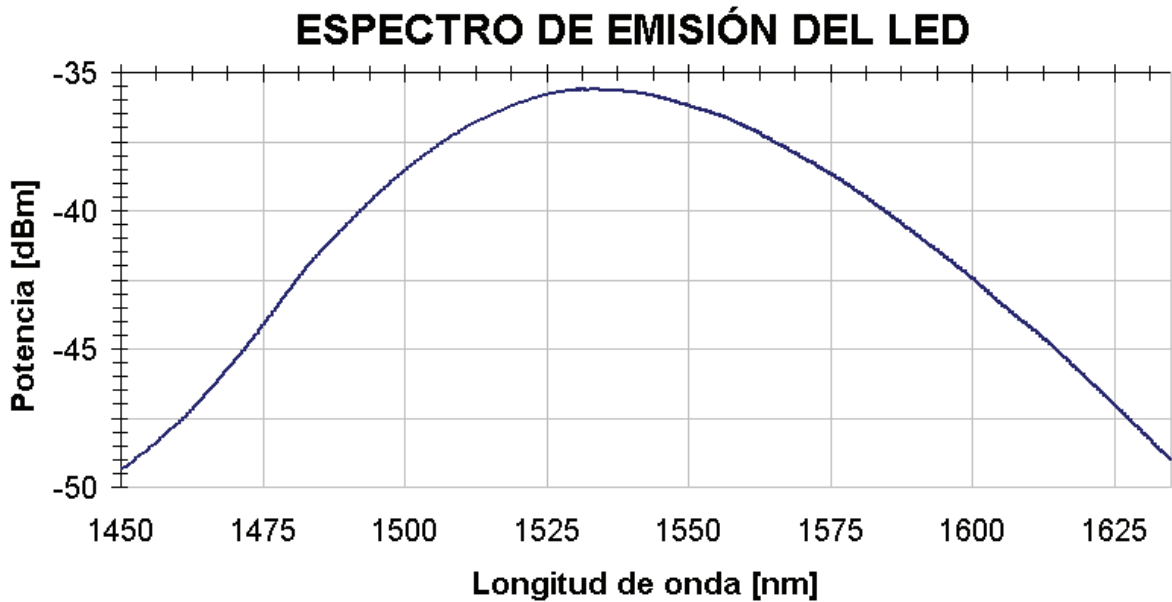


Fig.2.11. Espectro de emisión del LED.

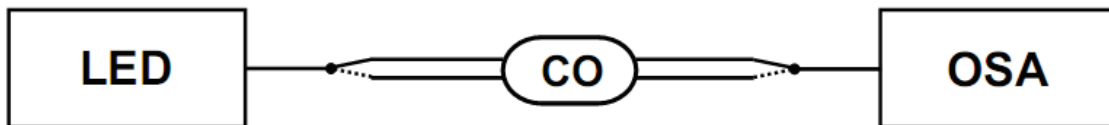


Fig. 2.12. Esquema de caracterización de acopladores (CO) de fibra óptica.

La obtención del espectro de transmisión se realizó empleando en las fibras de entrada una fuente de luz (LED) y detectando la señal en las fibras de salida con un analizador de espectros ópticos (OSA).

Los efectos al cambiar el índice de refracción externo se muestran en la figura 2.13. Cuando el medio externo es aire, el cual tiene un índice de refracción de 1.00029 ó 1 para fines prácticos, se obtiene un espectro característico de transmisión de los dispositivos. Al ser introducido el acoplador en agua, cuyo índice de refracción es aproximadamente 1.333, el espectro de transmisión se modifica como también aprecia en la misma figura. El índice de refracción del agua cambia al variar la temperatura, viéndose reflejado en las propiedades de transmisión del acoplador. Para observar esto, se registraron espectros de transmisión calentando el agua con el acoplador dentro de este líquido [34]. Al cambiar el índice de refracción del agua, el espectro de transmisión del acoplador se modifica también originando variaciones en las bandas espectrales de transmisión, variando la amplitud de la señal. La figura 2.14 muestra varios espectros registrados al incrementar la temperatura del agua desde 25 °C hasta 70 °C.

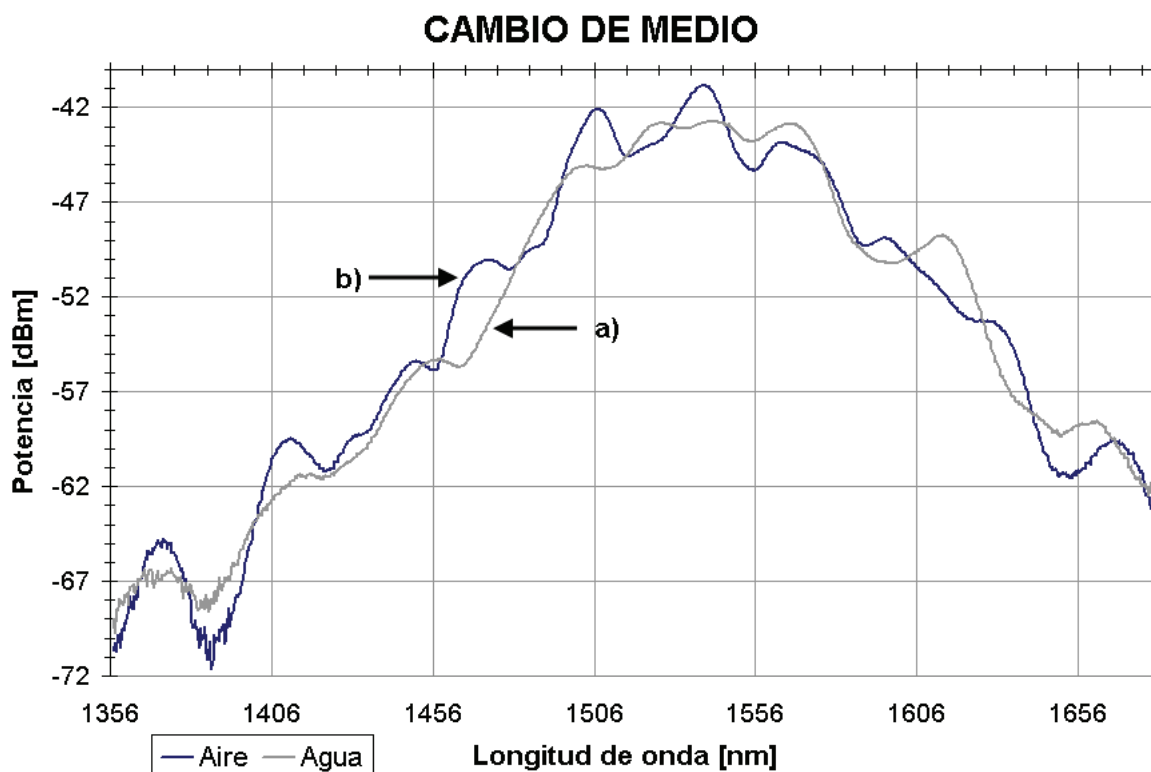


Fig. 2.13. Espectro de transmisión de un acoplador (2 lóbulos) con distintos medios externos: a) aire y b) agua.

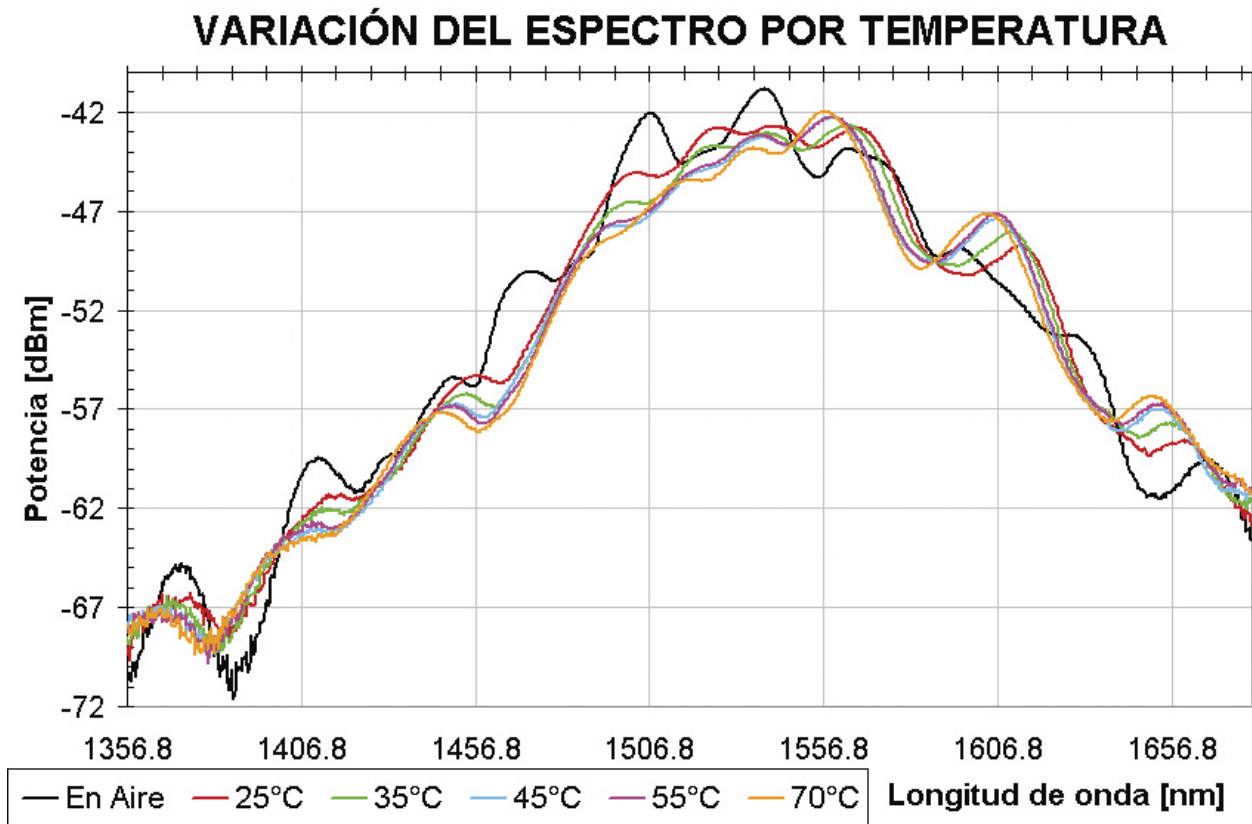


Fig. 2.14. Variación del espectro de transmisión de un acoplador para distintas temperaturas del medio externo (agua).

Otra prueba que se realizó con los acopladores para probar su sensibilidad a variaciones en el medio externo consistió en perturbar la región de acoplamiento. Una vez sumergido el acoplador dentro de agua se inyectaron pequeñas burbujas de aire debajo de esta región para que hicieran contacto con el dispositivo. La interacción de las burbujas con el acoplador genera cambios localizados en el índice de refracción, además de inducir pequeñas deformaciones en la región adelgazada.

En la figura 2.15 se puede apreciar como es que al liberar una ráfaga de burbujas provenientes de una jeringa delgada, se generan varios pulsos en el espectro de transmisión del acoplador. Las perturbaciones se registran sobre la envolvente del espectro y al cesar las burbujas este regresa a su estado original. Para fines comparativos, se incluyen en la gráfica los espectros registrados cuando el acoplador tiene como medio exterior el aire, agua a temperatura ambiente (25 °C) y las perturbaciones debido a las burbujas.

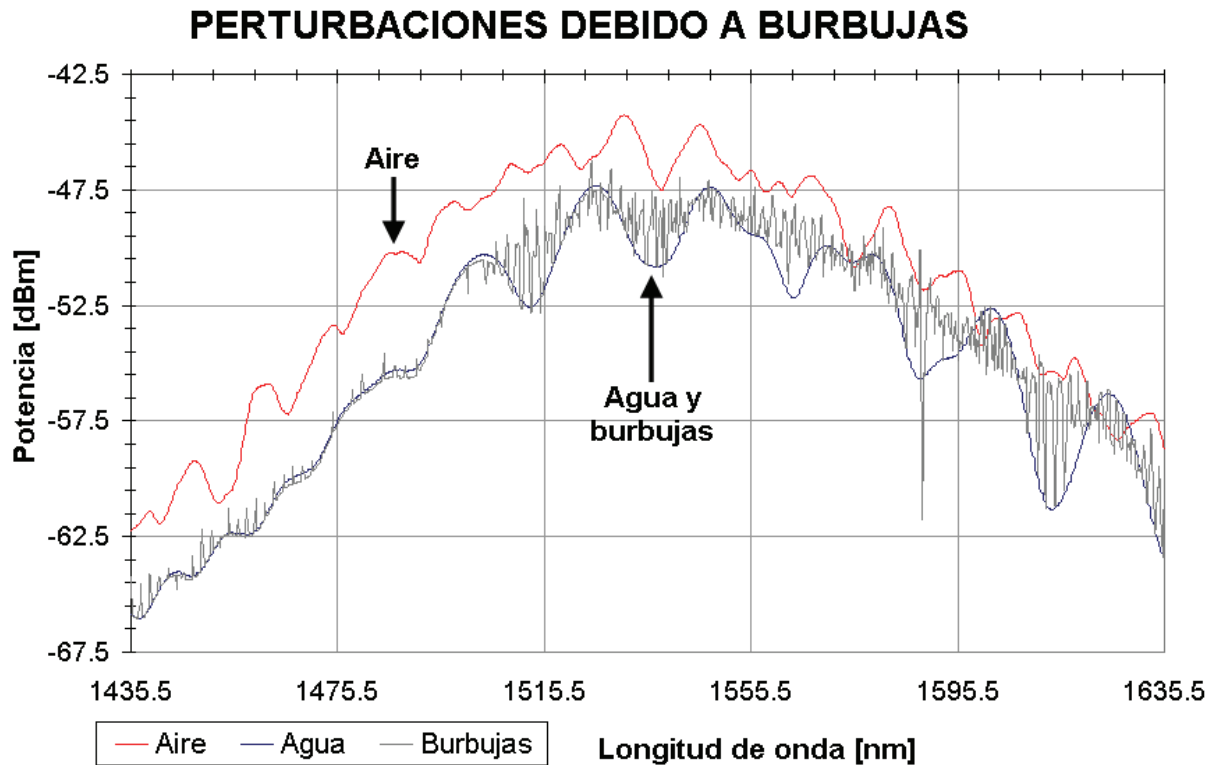


Fig. 2.15. Perturbaciones en el espectro de transmisión de un acoplador debidas a la interacción con burbujas de aire.

En la figura 2.16 se muestra un acercamiento en una región del espectro donde se pueden apreciar mejor los pulsos generados por la interacción con las burbujas. Las señales de perturbación generadas son muy angostas y la frecuencia con la que se presentan se atribuye a la velocidad con la que fueron liberadas las burbujas. Estos cambios en el espectro pueden deberse a deformaciones inducidas en la región de acoplamiento por las burbujas, o bien, por la diferencia de índice de refracción entre el aire y el agua. De esta manera se muestra que los dispositivos fabricados son útiles para detectar perturbaciones en la vecindad de la región de acoplamiento.

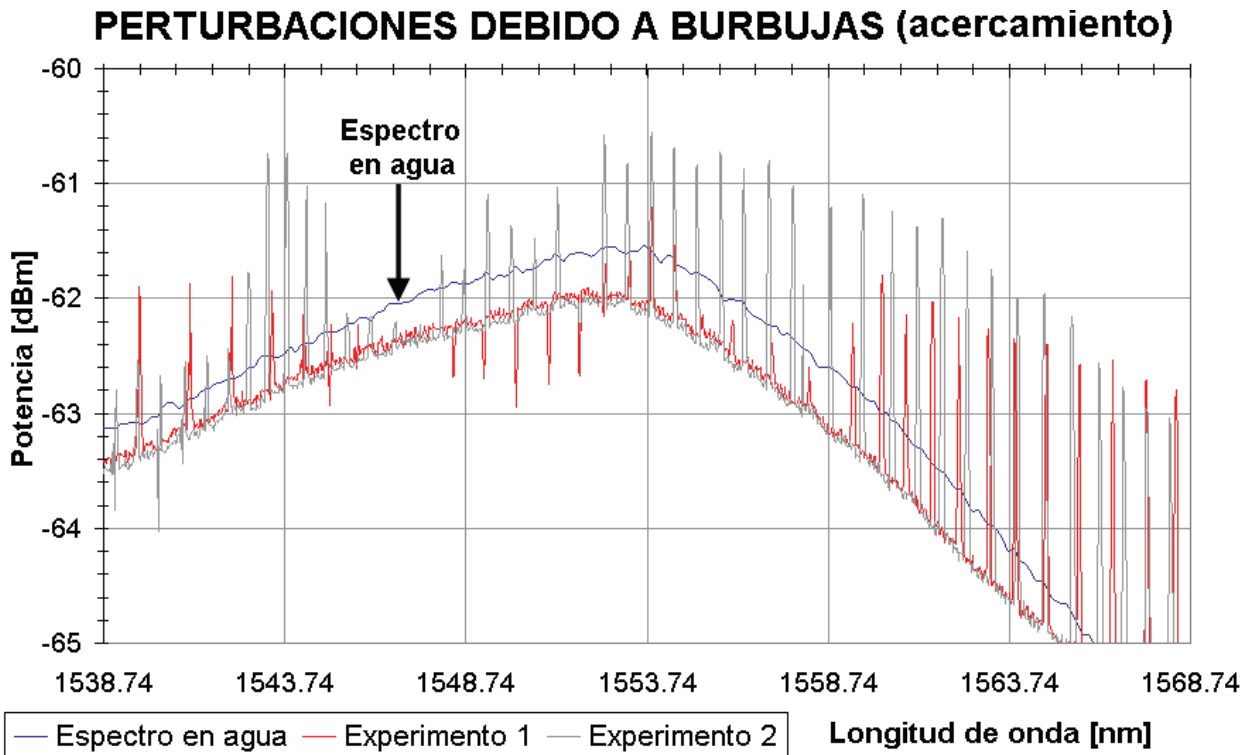


Fig. 2.16. Detalle del espectro de transmisión de un acoplador sumergido en agua al interactuar con burbujas de aire.

Como conclusión, en este capítulo se presentó el trabajo realizado para la fabricación de los dispositivos de fibra óptica (fibras adelgazadas y acopladores) y se obtuvieron los parámetros de fabricación óptimos para cada caso obteniendo bajas pérdidas. Se observó que la región de acoplamiento siempre interactúa con el medio externo, teniendo la capacidad de responder a las variaciones de este, de tal manera que los dispositivos cambiarán su respuesta en la medida de los cambios que presente el medio externo. Si el medio consiste en alguna sustancia o compuesto que presente alguna variación ante un cierto estímulo, como en el caso de los azobencenos tratados en el siguiente capítulo, las propiedades de estos dispositivos tendrán una respuesta característica dada por sus componentes.

3. DEPÓSITO DE AZOPOLÍMEROS EN FIBRAS ÓPTICAS

Los azobencenos son compuestos foto-activos que poseen en su estructura química dos anillos fenilo unidos por un doble enlace nitrógeno-nitrógeno ($-N=N-$), conocido como grupo azo. A esta estructura base se puede incorporar en los extremos otros grupos funcionales para modificar sus propiedades químicas (como el color) y su comportamiento al interactuar con otros compuestos.

Los azobencenos han sido empleados ampliamente como colorantes orgánicos desde hace bastantes años, un ejemplo de esto es su aplicación como tintes para fibras textiles [12]. Sin embargo, el estudio y aplicación de estos se extendió a otras áreas a mediados del siglo XX, al encontrar que presentaban fotoisomerización trans-cis. A partir de 1980 se comienzan a desarrollar trabajos con azobencenos contenidos en matrices poliméricas, o bien azopolímeros que presentan también el efecto de fotoisomerización. Este efecto se manifiesta al hacer incidir sobre el azopolímero luz linealmente polarizada, provocando que las moléculas se alineen perpendicularmente al eje de polarización de la luz. Esta interacción de la luz con el azopolímero induce birrefringencia y dicroísmo en este tipo de materiales, cualidad que los hace interesantes para diversas aplicaciones [6]. Uno de los azobencenos más básicos y con bastante disponibilidad comercial es el rojo disperso 1 o DR1, por sus siglas en inglés ("Disperse Red 1").

El uso de polímeros como matriz representa una opción para el manejo de los azobencenos, teniendo ventajas para formar películas delgadas con estos materiales. Además, la combinación de polímeros con azobencenos ofrece flexibilidad molecular, estabilidad de respuesta y buena reproducibilidad en su fabricación. La matriz polimérica también brinda aportaciones en las propiedades mecánicas y térmicas. El

incorporar los azobencenos dentro de matrices poliméricas puede ser un proceso general y simple o específico y elaborado, dependiendo de los materiales y aplicaciones.

Uno de los métodos para incorporar azobencenos en matrices poliméricas es el llamado huésped-anfitrión (en inglés "guest-host"). Este método consiste en simplemente añadir el azobenceno, ya sea puro o disuelto en algún solvente compatible con él, dentro de la matriz polimérica que sirve como anfitrión. En este caso no se presenta tipo alguno de interacción entre el azobenceno y el polímero, así que este último simplemente aloja al primero. Otro método más elaborado es la síntesis de polímeros funcionalizados covalentemente, donde las moléculas de azobencenos se fijan a las cadenas del polímero, generándose una mayor respuesta y menos pérdidas ópticas. Sin embargo, los inconvenientes que presenta este tipo de síntesis son un mayor costo y complejidad en su fabricación que al utilizar el método de huésped-anfitrión. Finalmente, también se puede lograr la incorporación de los azobencenos en una matriz polimérica utilizando polímeros con cadena supramolecular, estos utilizan enlaces no covalentes donde los azobencenos se acoplan espontáneamente a las cadenas del polímero. En este último tipo de cadenas se crean lazos que tienen una simplicidad de fabricación similar al método de huésped-anfitrión, además de la eficiencia de respuesta de los polímeros funcionalizados covalentemente [7]. Los tres tipos de interacción que se logran con los métodos mencionados entre la matriz polimérica y el azobenceno se muestran en la figura 3.1.

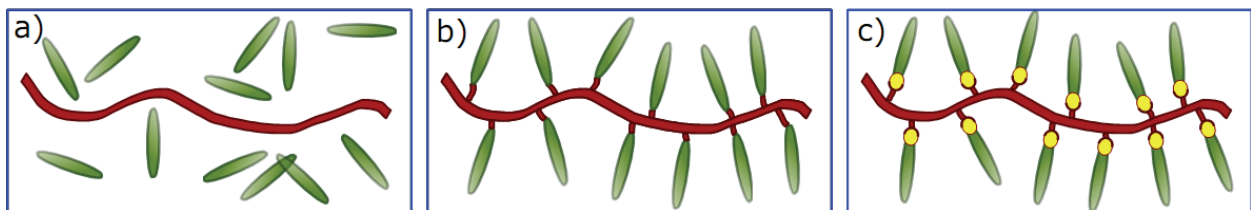


Fig. 3.1. Métodos de contención de azobencenos dentro de una matriz polimérica: a) huésped-anfitrión, b) polímeros funcionalizados covalentemente y c) polímero con cadena supramolecular.

3.1 Características y propiedades ópticas de los azopolímeros

El cambio que presentan los azobencenos en su estructura ante un estímulo de luz, es la transición del isómero *trans* al *cis*. El tiempo durante el cual pueden permanecer en su forma *cis* antes de regresar a la forma *trans* (que es la termodinámicamente más estable), se conoce como tiempo de vida. Los azobencenos se pueden clasificar en tres categorías basándose en su efecto fotoquímico. Estas categorías son:

1. Los azobencenos no sustituidos o de bajo momento bipolar, que son las moléculas que simplemente se denominan "azobencenos". El tiempo de vida del isómero *cis* es largo, de minutos a horas.
2. Los "aminoazobencenos" donde el tiempo de vida del isómero *cis* es más corto, del orden de minutos.
3. Los "pseudostilbenos", donde el isómero *cis* posee un tiempo de vida muy corto, del orden de segundos a picosegundos. Pertenecen a esta categoría azobencenos que contienen grupos donador-aceptor.

Los azopolímeros presentan tres tipos de movimientos fotoinducidos que son originados al ser irradiados con luz linealmente polarizada [6, 13]. El primer movimiento es la fotoisomerización *trans-cis* del azobenceno. Este se origina cuando los isómeros del azobenceno, *trans* y *cis*, absorben luz a diferentes longitudes de onda; la longitud de onda de absorción máxima de los azobencenos depende de su estructura química. Al irradiar los azobencenos con luz linealmente polarizada, se provoca la isomerización en la cual se da el cambio de un isómero *trans* a uno *cis*. Este cambio no se conserva por tiempos prolongados, debido a que el isómero *cis* es muy inestable y el cambio se revierte fácilmente, inclusive por efectos térmicos. La velocidad de fotoisomerización en azobencenos de bajo momento bipolar es muy lenta (de minutos a horas). Cuando los azobencenos son sustituidos con grupos donador-aceptor, sucede que las bandas de absorción de los isómeros se superponen y se logra una isomerización reversible (*trans-cis-trans*). Además, la fotoisomerización se

mantiene mientras se excite con luz polarizada y puede también obtenerse una velocidad de respuesta muy rápida (hasta del orden de picosegundos) [6, 7].

El segundo movimiento es el fotoalineamiento. En una película amorfa de azopolímero las moléculas tienden a estar en posiciones aleatorias. Este movimiento se genera al iluminar la muestra con la luz linealmente polarizada, los grupos azobenceno que tienen una componente paralela al eje de polarización de la luz, se moverán de forma paulatina hasta llegar a tener una alineación perpendicular al eje de la luz. El fotoalineamiento genera que todos los grupos alcancen una orientación perpendicular a la polarización del haz de luz (con excepción de los grupos que ya se encuentran orientados de esta manera, ya que se vuelven inertes). Los efectos producidos por este tipo de movimiento son la birrefringencia y el dicroísmo, los cuales se pueden borrar mediante la iluminación de una fuente de luz polarizada circularmente o al calentar las muestras por arriba de su temperatura de transición vítrea (T_g). El ciclo del cambio de orientación en las moléculas se muestra en la figura 3.2, donde se observa la excitación de las moléculas de azobenceno al encender el láser de escritura, que como consecuencia da origen a la birrefringencia. Una vez que todas las moléculas se encuentran orientadas en la misma dirección se obtiene la máxima birrefringencia. En la figura puede observarse también que al retirar la fuente de luz polarizada, algunas moléculas regresan a su orientación inicial, pero la mayoría de ellas permanece en la orientación perpendicular. Las moléculas que conservaron el cambio retoman una orientación aleatoria al iluminar el azopolímero con la fuente polarizada circularmente (o al calentar por encima de la T_g), de modo que la birrefringencia desaparece [6, 7].

Por último, el tercer movimiento es el de cantidades masivas del material polimérico, a escalas macroscópicas. En este caso al modular la intensidad de luz sobre las diferentes zonas de la superficie iluminada, se origina isomerización asimétrica (debido a los gradientes de interferencia de la luz y su campo eléctrico). Al iluminar de esta manera, se provoca que el material polimérico migre y se creen relieves de grabado superficial del orden de μm^3 . Dicho efecto solo se puede eliminar

por acción térmica al calentar por encima de la T_g , ya que en este caso no surte efecto el borrado óptico al iluminar con una fuente de luz polarizada circularmente.

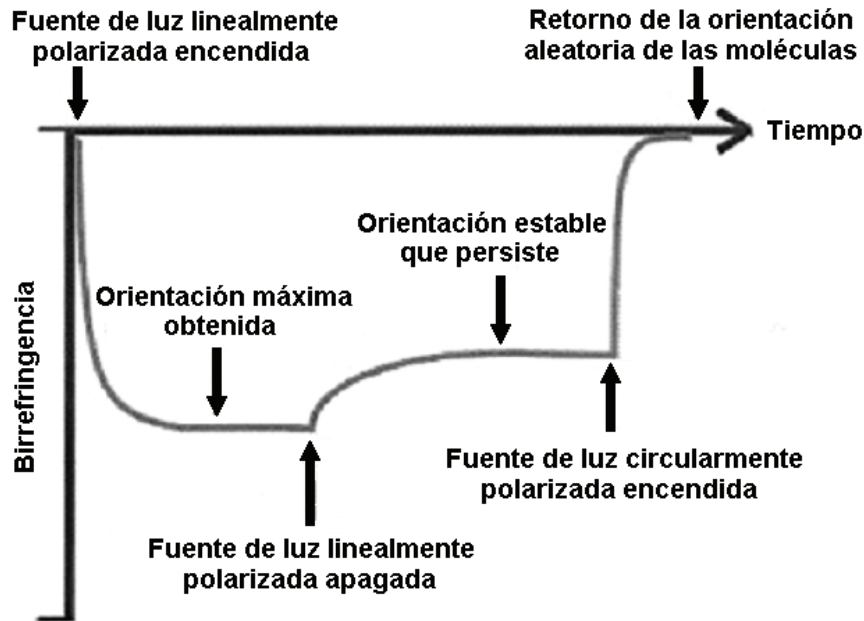


Fig. 3.2. Ciclo de la birrefringencia de los azobencenos [6].

Los movimientos de fotoisomerización y fotoalineamiento son útiles para su uso con fibras ópticas adelgazadas y acopladores de fibra óptica [14, 15, 16]. Los efectos originados en los azopolímeros al irradiarlos con luz linealmente polarizada, interaccionan con la onda evanescente de la fibra óptica y alterando las propiedades de transmisión de la misma.

3.1.1 Rojo disperso 1

El azobenceno empleado para la realización de este trabajo fue el rojo disperso 1 (DR1), el cual es un colorante azoico (Fig. 3.3). Las razones por las que se utilizó este azobenceno, son porque es fácil de conseguir y es empleado por muchos grupos de investigación como punto de partida para el estudio de efectos ópticos basados en azobencenos. Dado que ha sido usado de manera extensa, existen varios reportes acerca de su comportamiento al ser mezclado con varias matrices poliméricas y al ser irradiado con luz láser bajo distintas condiciones de iluminación.

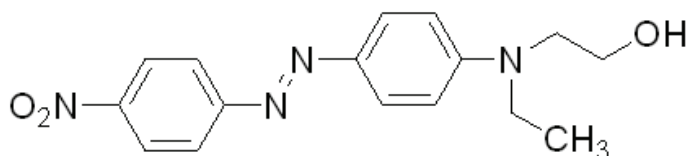


Fig. 3.3. Estructura química del rojo disperso 1.

Las características generales del DR1 empleado son las siguientes:

- Fórmula química: $C_{16}H_{18}N_4O_3$
- Peso molecular: 314.34 [g/mol]
- Contenido de tinte: 95 %
- Temperatura de fusión: (160 – 162) [°C]
- Longitud de onda de máxima absorción ($\lambda_{m\acute{a}x.}$)
disuelto en tetrahidrofurano (THF): 489 [nm]

La gráfica del espectro de absorción de UV-Vis obtenida del DR1 utilizado en este trabajo se muestra en la figura 3.4. En esta gráfica la curva mayor indica el rango de longitudes de onda dentro del espectro de luz visible, región donde se tiene que iluminar para generar cambios fotoinducidos en el azobenceno. El equipo utilizado para obtener esta gráfica es el espectrómetro de UV-Visible UNICAM UV300.

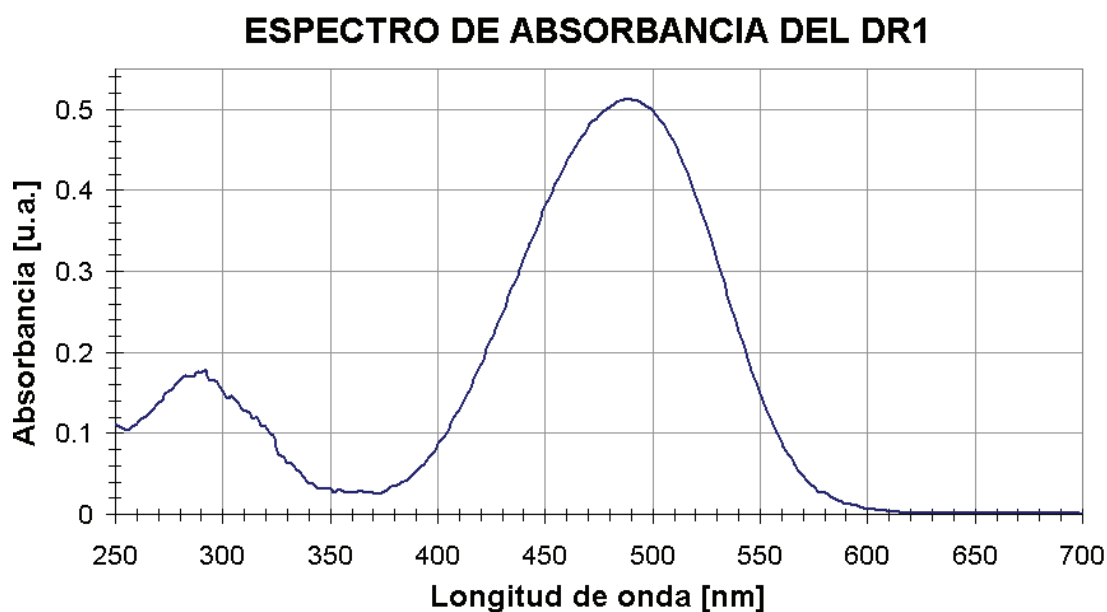


Fig. 3.4. Espectro de absorción del DR1 disuelto en THF.

3.2 Técnicas de depósito

Para el estudio y manejo de azopolímeros se necesita conformar la muestra de alguna manera que se pueda manipular de forma sencilla (sin requerir de equipo especial). La técnica empleada es seleccionada de acuerdo con la aplicación a la que esté enfocada la muestra.

Para depositar capas delgadas de azopolímeros se utiliza el proceso de *spin coating*. Este proceso consiste en depositar el compuesto sobre un plato giratorio y por efecto de la fuerza centrífuga se forma una película uniforme del compuesto [35]. Esta técnica es empleada para la formación de películas delgadas sobre superficies planas o dentro de las cavidades de moldes. Sin embargo, esta no es muy adecuada para recubrir los dispositivos de fibra óptica, debido a la extensión de las fibras y la fragilidad de la sección adelgazada (al estar girando las fibras estas pudieran colisionar con algo y fracturarse).

Otras técnicas utilizadas para el conformado de azopolímeros son: moldeo por vaciado o por inyección. Para este trabajo se utilizó el moldeo por vaciado, empleando un molde abierto en donde solo se vierte el compuesto sobre las cavidades del molde y se deja solidificar. Una vez que solidifica el compuesto se procede a desmoldar la muestra.

3.2.1 Pruebas preliminares

Los primeros intentos para adherir azobencenos a las fibras ópticas, consistieron en diluir en algún solvente el azobenceno y después sumergir la punta de una fibra para ver si había adherencia del azobenceno al evaporarse el solvente. Los solventes utilizados fueron diclorometano, THF y cloroformo, empleando los azocompuestos DIREN-PEG 2, 4 y 6 [13]. Sin embargo, no se logró una buena adherencia sobre el SiO₂ (material del que está fabricada la fibra óptica empleada), además de que en las partes donde se lograba formar una capa del compuesto esta resultaba ser muy frágil y quebradiza (Fig. 3.5).

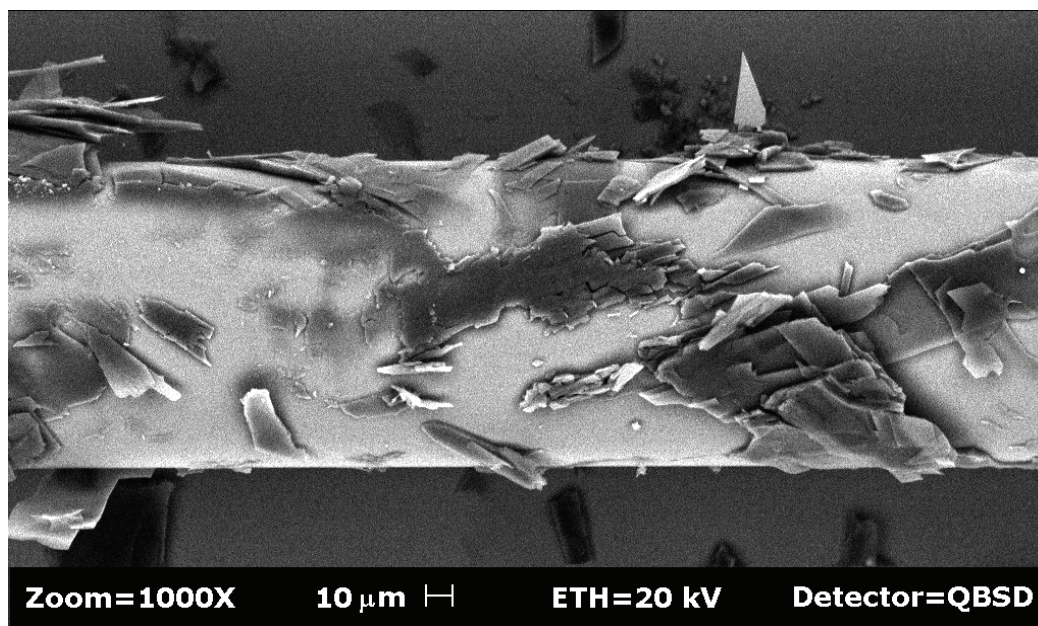


Fig. 3.5. Fibra óptica con DIREP-PEG-4 disuelto en THF.

El mismo procedimiento se probó con fibras adelgazadas y acopladores, para ver cual era el efecto de adherencia sobre muestras con un diámetro menor. Mediante microscopía electrónica de barrido ("SEM", por sus siglas en inglés) se observó la adherencia de los azobencenos en este tipo de muestras; dos fotografías de estas pruebas se muestran en la (Fig. 3.6). Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios puesto que no se logró un recubrimiento uniforme de las fibras, además de que resultó ser muy quebradizo y delgado. Posteriormente se realizaron pruebas adicionales dando un tratamiento a la fibra óptica con estearato de potasio, empleado para asegurar la adherencia en superficies lisas de los azocompuestos; sin embargo, los resultados fueron similares.

Debido a que no hay una buena adherencia ni formado de los azobencenos sobre la fibra óptica, se optó por introducirlos en una matriz polimérica para lograr una mejor retención y uniformidad en el recubrimiento. Por facilidad se utilizó el método de huésped-anfitrión para incorporar los azobencenos en la matriz polimérica. Como se mencionó anteriormente, este método es muy fácil de realizar dentro del laboratorio ya que sólo se tiene que agregar a un polímero el azobenceno, ya sea disuelto en un

solvente o en estado puro; esto se mezcla de manera homogénea y se deja que polimerice, obteniendo así un "azobenceno dispersado en una matriz polimérica".

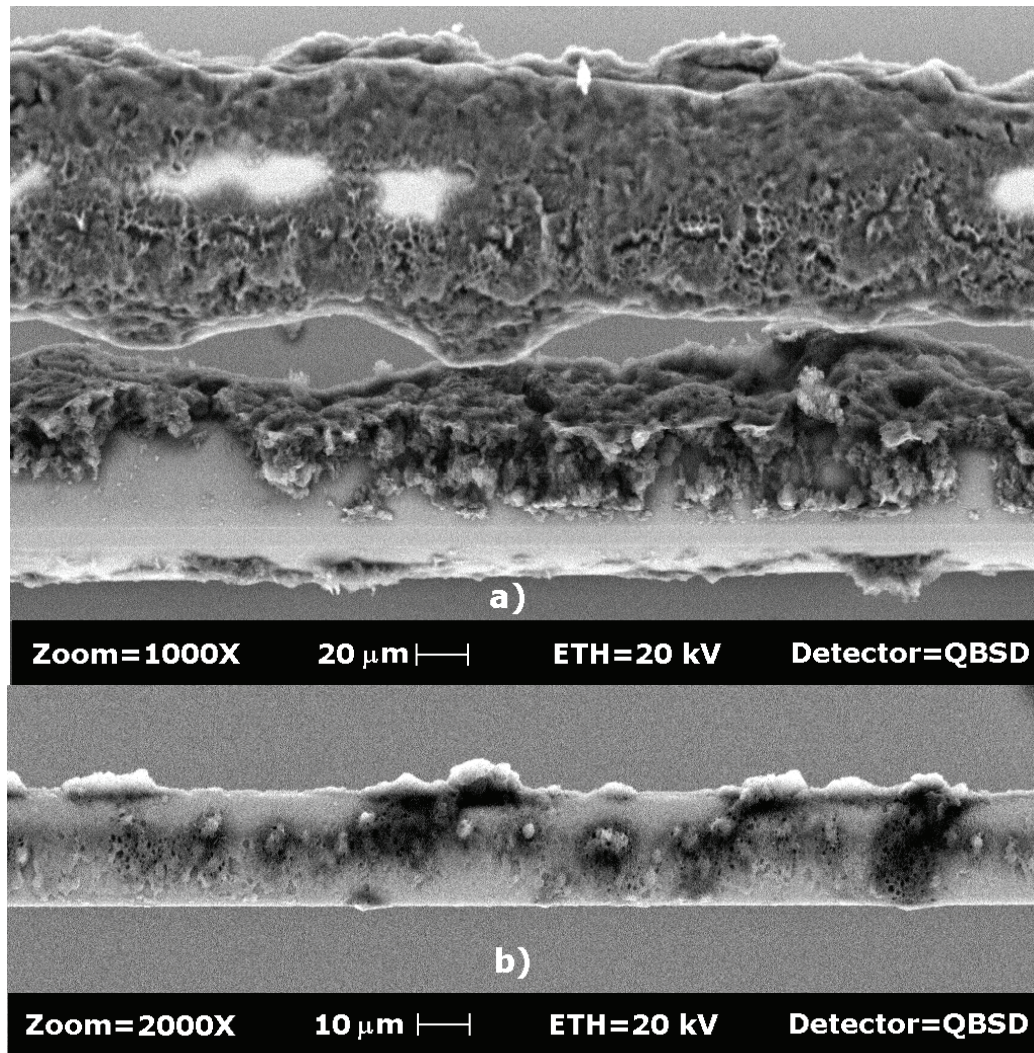


Fig. 3.6. Acoplador de fibra óptica recubierto con DIREN-PEG-4: a) zoom 100X antes de llegar a la región de acoplamiento, b) zoom 2000X en la región de acoplamiento.

Dentro de las matrices poliméricas reportadas en trabajos previos para el estudio de efectos fotoinducidos en azocompuestos, se encuentran el poli (metil metacrilato) (PMMA), el poliestireno (PS), sol-gel, polivinil pirrolidona (PVP), polivinil acetato (PVA) y algunos derivados [7, 16, 17, 18, 19, 20]. De estos polímeros los más empleados son el PMMA, el PS y el sol-gel; sin embargo, como se puede apreciar en la tabla 3.1, los índices de refracción del PMMA y el PS son más altos que el índice del

SiO₂ (dióxido de silicio). Un índice de refracción mayor implica que recubrir dispositivos de fibra óptica (fibras adelgazadas o acopladores) con estos materiales generaría pérdidas muy altas, pues la onda evanescente se acoplaría por completo al recubrimiento polimérico y se fugaría por este mismo. Por otro lado, los recubrimientos con sol-gel requieren demasiado tiempo para solidificar, incrementando el tiempo y la complejidad para fabricar los dispositivos.

Un polímero que presenta una fuerte adhesión al SiO₂ es el polidimetil siloxano (PDMS), que es un elastómero transparente. El PDMS es un material fácil de preparar, no tóxico y que ha sido utilizado como complemento para aplicaciones con fibras ópticas y fabricación de dispositivos ópticos como guías de onda. Por otro lado, el PDMS posee un índice de refracción menor que el de la fibra óptica y este decrece al aumentar la temperatura [21, 22, 23]. Por estas razones se decidió utilizar el PDMS como matriz polimérica para contener los azobencenos.

Tabla 3.1. Índices de refracción de materiales.

Material	Índice de refracción (<i>n</i>)
Fibra óptica	1.458
PMMA	1.4893
PS	1.5894
PDMS	1.42 – 1.43

El PDMS utilizado es el Sylgard 184 y se escogió como matriz para el DR1 porque es un material cuya preparación es sencilla, puede ser conformado en diferentes geometrías y es transparente a la luz visible [22]. Esta última característica es muy importante para permitir el paso de la luz para la excitación de las moléculas de azobenceno. Este polímero se divide en dos sustancias líquidas, una base y un agente de curado (catalizador), que al combinarse producen un polímero sólido pero flexible.

Las características del PDMS relevantes para este trabajo son las sig. [36]:

● Viscosidad:	3900 [mPa*s]
● Conductividad térmica:	4.3×10^{-4} [cal / cm*s*°C]
● Temperatura de transición vítrea (Tg):	-125 [°C]
● Color:	transparente

Las características, propiedades, formas de preparación y tiempos de polimerización del PDMS se pueden consultar en la hoja de especificaciones del mismo, incluida dentro del apéndice en este trabajo.

3.3 Preparación del azopolímero y recubrimiento de las fibras ópticas

La técnica empleada para la obtención del compuesto PDMS-DR1 fue preparar primero la matriz polimérica y disolver por separado el azobenceno con un solvente. Ambas soluciones fueron posteriormente mezcladas y vertidas sobre las fibras ópticas, para dejarse secar a temperatura ambiente [20]. La metodología que se siguió para el recubrimiento de fibras ópticas con PDMS-DR1, es la siguiente:

- Se realizó la mezcla del PDMS en un vaso de precipitados con una relación en peso de 10:1 en sus compuestos base/agente de curado, respectivamente. Esta relación es la sugerida por el fabricante.
- Se revolvió a mano la mezcla de PDMS hasta obtener una mezcla homogénea.
- Se pesó el DR1 para tener una relación con el PDMS en peso de 1:10, respectivamente.
- Se disolvió el DR1 en THF, agregando lo suficiente para que se disolviera el azobenceno y obtener un líquido totalmente homogéneo. Posteriormente se agregó al PDMS y se mezcló uniformemente.
- La mezcla se puso en un degasificador durante un periodo de 5 a 10 *min* para remover las burbujas de aire. Estas burbujas pueden causar efectos ópticos no deseados y por lo tanto deben ser minimizadas.

- Se vertió la mezcla sobre un molde que contenía a las fibras ópticas y se dejó polimerizar (solidificar). El proceso de solidificación puede acelerarse al incrementar la temperatura mientras se polimeriza; pero en este caso, todas las muestras fabricadas se solidificaron a temperatura ambiente.

Cabe mencionar que al incorporar un azobenceno en una matriz polimérica, el índice de refracción de este último aumenta [24]. Para este caso el valor del índice de refracción continúa siendo menor que el índice de refracción de la fibra óptica, ya que aún se detecta señal a la salida de la fibra. Para caracterizar el azopolímero se obtuvo el espectro de absorbancia de la mezcla PDMS-DR1. Este espectro de absorbancia se obtuvo con el espectrómetro de UV-Visible SHIMADZU UV1600. Como se puede observar en la figura 3.7, la longitud de onda donde se presenta máxima absorción dentro del rango de luz visible, se mantiene casi igual a la registrada con las muestras del DR1 solo. Comparando los espectros de absorción del DR1 solo y de la mezcla PDMS-DR1, se puede observar que incorporar el DR1 en la matriz de PDMS genera un ensanchamiento en la curva de absorción del azobenceno. Aunque ambos espectros fueron obtenidos con equipos distintos, es evidente que en el caso del PDMS-DR1 el pico de absorbancia tiene un ancho espectral más grande que el que se obtiene únicamente con el DR1. Esto representa una ventaja al tener una mayor posibilidad para iluminar el azopolímero y lograr la fotoisomerización, teniendo una mayor absorción en distintas longitudes de onda.

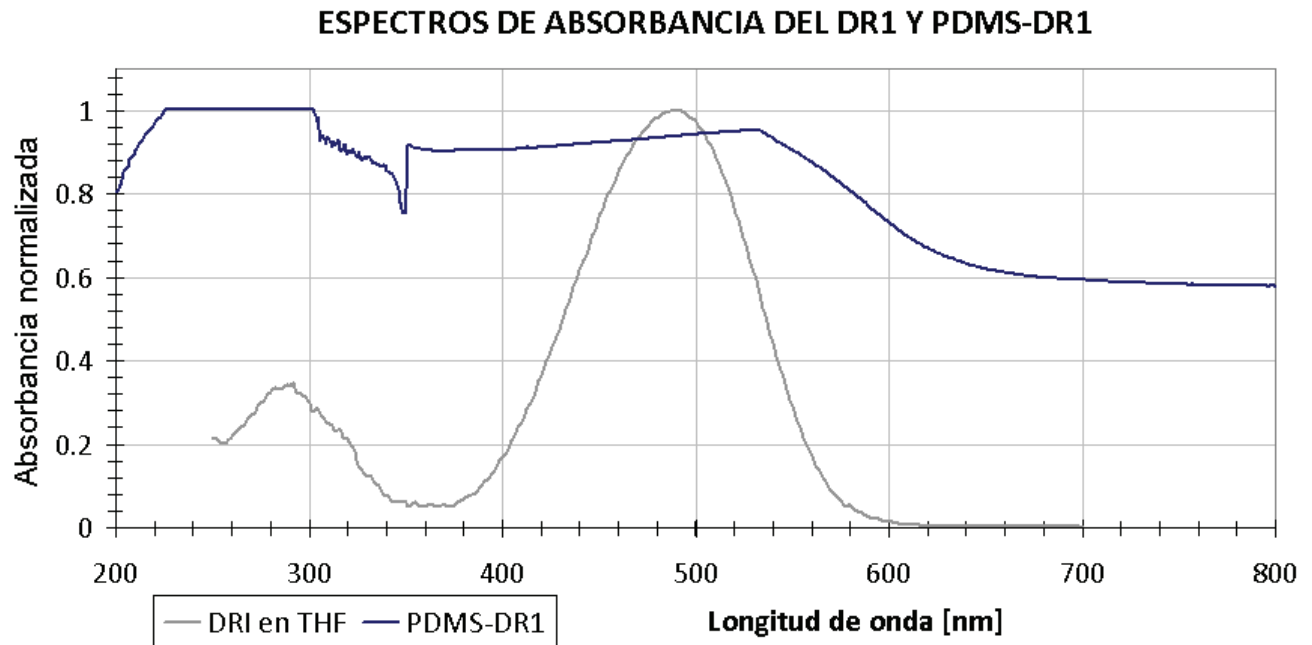


Fig. 3.7. Comparación de los espectros de absorción del azopolímero PDMS-DR1 con respecto al del DR1 disuelto en THF.

3.3.1 Molde para las muestras

Los primeros dispositivos fabricados con fibras adelgazadas y acopladores fueron fijados sobre portaobjetos de vidrio con una de sus caras ranurada longitudinalmente, siendo el canal de 1 *mm* de diámetro aproximadamente. Una vez colocados los dispositivos en las ranuras, estas fueron rellenas con el compuesto PDMS-DR1. También se fabricó un molde con cavidades rectangulares con tres distintas profundidades para lograr distintos espesores de recubrimiento. Este molde se fabricó con el propósito de obtener recubrimientos más delgados, uniformes, donde las muestras no quedaran adheridas a la misma cavidad, se pudieran tener varias fibras en el mismo molde y lograr un mejor sujetado de los dispositivos. El molde fue fabricado con teflón (politetrafluoretileno o PTFE) para lograr un fácil desmolde. Para sujetar las fibras se pusieron dos grapas en los extremos del molde, estas se fijan con imanes cilíndricos de neodimio (7.85 *mm* de diámetro y 3.2 *mm* de altura) ubicados en la placa del molde, mientras que en las grapas se colocaron pivotes de acero AISI 1020; de esta manera, se tiene un mecanismo que sujeta las fibras con una presión adecuada para los experimentos (Fig. 3.8). La única limitante al trabajar con este

molde es que se debe trabajar por debajo de los 90 °C, debido a que esta es la temperatura máxima de operación de los imanes. Las dimensiones del molde se encuentran en los planos contenidos en el apéndice de este mismo trabajo.

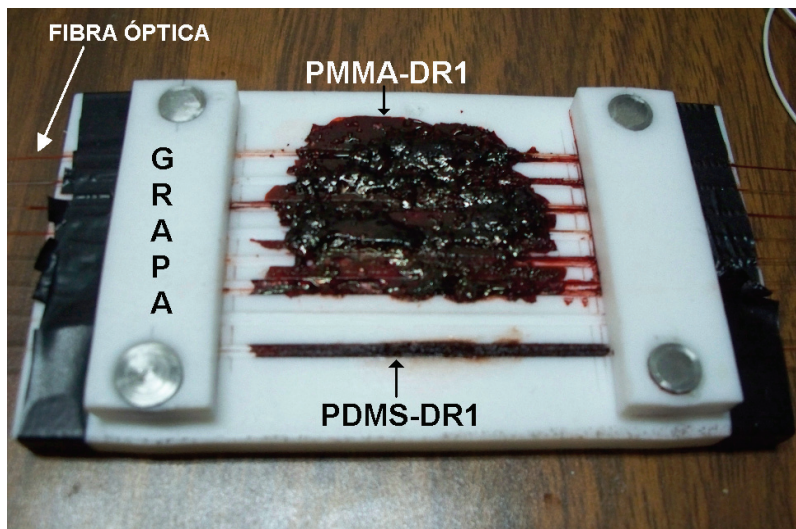


Fig. 3.8. Molde de teflón para el formado de azopolímeros.

En la figura 3.9 se presenta la imagen de una muestra empleando un acoplador de fibra óptica recubierto con el azopolímero preparado, obtenida con SEM. Es claro que en este caso se obtiene un recubrimiento uniforme de azopolímero al solo verter la mezcla sobre las fibras ópticas. Se observa que el PDMS es una matriz adecuada para incorporar azobencenos y recubrir dispositivos de fibra óptica; las razones son que cuenta con un índice de refracción adecuado, su adherencia a fibras de SiO₂ es buena y puede emplearse de manera simple a estos dispositivos.

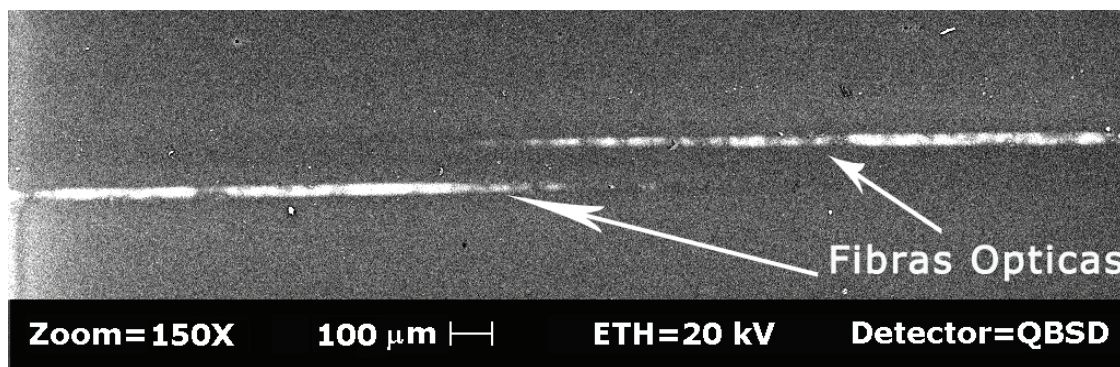


Fig. 3.9. Superficie de recubrimiento de acoplador de fibra óptica con PDMS-DR1.

El utilizar el PDMS como matriz polimérica, da paso a que las moléculas de DR1 no permanezcan orientadas permanentemente debido a la iluminación por luz láser linealmente polarizada. Esto es a causa de que el PDMS posee una Tg ubicada muy por debajo de la temperatura ambiente, de -125 °C. Esto indica que las moléculas del DR1 tienen mucha libertad de movimiento dentro de la matriz, ya que los cambios de fotoisomerización y fotoalineamiento inducidos sólo se mantendrán mientras se iluminen las muestras. Por lo tanto al dejar de iluminar, los efectos fotoinducidos serán revertidos debido a la temperatura ambiente.

Los compuestos realizados de PDMS-DR1 no solidificaron por completo, resultando en una especie de gel rojizo bastante espeso. Este resultado en el PDMS se atribuye a la inserción del DR1 y al solvente empleado, los cuales de alguna manera afectaron su estructura y propiedades de polimerización.

En este capítulo se obtuvo un compuesto que reacciona a estímulos ópticos, basado en un azobenceno (DR1) contenido dentro de una matriz polimérica (PDMS). Este compuesto es utilizado para recubrir los dispositivos de fibra óptica (fibras adelgazadas y acopladores) e inducir movimientos fotoinducidos en las moléculas de DR1. El objeto de esto es que los cambios generados en el azobenceno, al interactuar con la onda evanescente, modifiquen la señal que viaja dentro de la fibra óptica. La excitación de los dispositivos y su respuesta son analizadas en el siguiente capítulo.

4. RESPUESTA DE DISPOSITIVOS DE FIBRA ÓPTICA RECUBIERTOS CON AZOPOLÍMEROS

En la actualidad existen varios tipos de dispositivos que emplean fibra óptica, con una gran diversidad de aplicaciones y apoyados en distintas áreas de la tecnología. Dentro del área de las comunicaciones y desarrollo de sensores la polarización de la luz es muy importante, ya que a través de los cambios en esta se pueden determinar variables o señales de interés. Dentro de los dispositivos que existen actualmente para provocar cambios de polarización, se pueden encontrar algunos cuyo funcionamiento es muy básico, un ejemplo son aquellos que emplean la técnica de oprimir y deformar la fibra para provocar cambios en la birrefringencia y así modificar la polarización de la luz. Existen otros que su principio es más complejo y funcionan con base en efectos electro-ópticos y son empleados en "switches" de polarización, controladores y sintetizadores, por nombrar algunos [1].

Controlar la polarización es también de interés en sistemas láser de fibra óptica, cuyo funcionamiento se mencionó en el capítulo 1. Estos sistemas pueden adoptar varias configuraciones según sea su conexión, una es la configuración en anillo donde la realimentación se da de la fibra de salida a la fibra de entrada, y encontrándose dentro del anillo la fibra dopada con tierras raras (por ejemplo, una fibra dopada con erbio) (Fig. 4.1). La salida láser resultante proporciona una señal con alta ganancia en potencia y ancho espectral muy estrecho. La principal característica que presenta este arreglo es que al existir realimentación se adquiere una mayor sensibilidad a los cambios físicos dentro del resonador, teniendo la posibilidad de detectar cambios pequeños de manera amplificada. La polarización de la luz es muy importante dentro de la configuración en anillo, ya que al ajustarla es posible seleccionar o sintonizar la

longitud de onda a la cual emite el láser de fibra óptica, repercutiendo también en la ganancia en potencia [25].

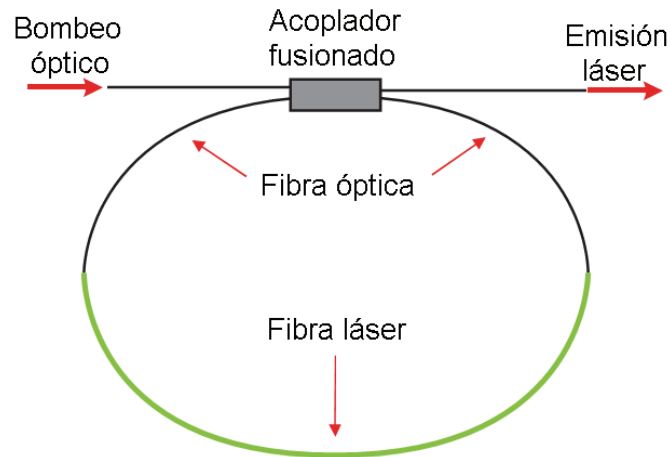


Fig. 4.1. Resonador óptico en configuración anillo.

Los dispositivos fabricados para este trabajo consisten en fibras ópticas adelgazadas y acopladores de fibra óptica, ambos recubiertos con azopolímeros, los cuales presentan cambios muy pequeños en birrefringencia [17, 26, 27]. Debido a esta razón al alimentar los dispositivos con una fuente de luz sencilla como lo es el LED utilizado para la caracterización de los acopladores, no se puede realizar la detección de los cambios al excitar los azopolímeros. Sin embargo, al situar los dispositivos dentro de un arreglo en anillo se tiene una amplificación en la respuesta, lo cual facilita la visualización de los cambios fotoinducidos. El arreglo construido para este propósito es el mostrado en la figura 4.2.

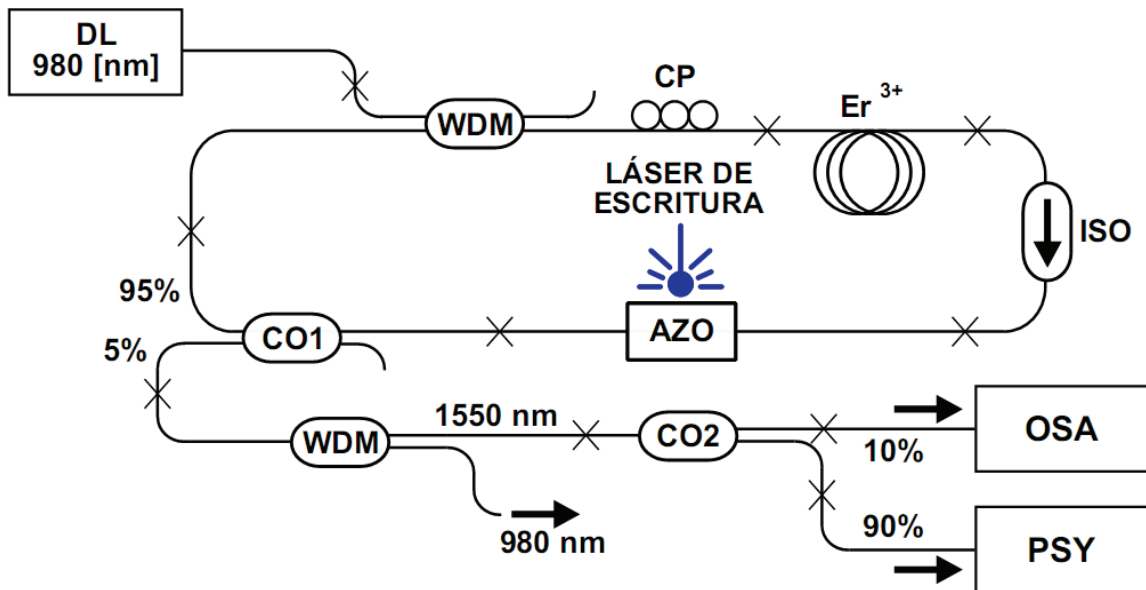


Fig. 4.2. Arreglo en configuración anillo para la prueba de dispositivos con azopolímero (la simbología utilizada en la figura se detalla en el texto).

El arreglo utiliza un diodo láser (DL) que emite a una longitud de onda de 980 nm , este láser semiconductor emplea para su funcionamiento una fuente de alimentación para regular su temperatura y la corriente que se le suministra. La señal proveniente del DL es enviada a un multiplexor por división de onda (WDM), que tiene la función de juntar las señales de 980 nm y de 1530 nm , esta última señal es generada dentro del arreglo. Una de las salidas de este WDM se conecta a un controlador de polarización (CP), que sirve para ajustar manualmente la polarización. Posteriormente se encuentra la fibra dopada con erbio (Er^{3+}) formada por dos tramos: 1 m de fibra que mantiene la polarización y 80 cm de fibra altamente dopada de erbio que da mayor amplificación de señal; esta fibra genera emisión láser en una longitud de onda de 1530 nm . Después se halla un aislador óptico (ISO) cuya función es permitir que la luz generada dentro del anillo viaje en una sola dirección, además de bloquear la señal de 980 nm no absorbida por la fibra de erbio. A continuación se conecta el dispositivo fabricado con azopolímero (AZO), que es iluminado por una fuente externa de luz (láser de escritura) para inducir cambios en la birrefringencia. Finalmente para cerrar el anillo se tiene un acoplador (CO1) con coeficiente de acoplamiento 95/5, la terminal empleada para cerrar el anillo es la de 95 % y el 5 % restante se utiliza para medir la señal de salida.

La señal generada en el anillo es introducida a otro WDM, que tiene la función de separar las señales de 980 nm y la de 1550 nm , esto con la finalidad de filtrar la señal de salida y sólo detectar longitudes de onda cercanas a 1550 nm . Para poder detectar la señal, esta se divide mediante un acoplador (CO2), detectando el 10 % de la potencia con un analizador de espectros óptico (OSA) y el 90% de la potencia con un analizador de polarización (PSY), empleados para registrar el espectro y la polarización de la señal de salida. Las conexiones de todos elementos se realizaron empleando conectores angulados (representados por las cruces) para evitar reflexiones de señal que pudiesen generar efectos de interferencia óptica.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el proceso para generar la birrefringencia en los azopolímeros comienza con las moléculas de DR1 en una orientación inicial aleatoria. Al iluminar las muestras, las moléculas se orientan en dirección perpendicular a la polarización del láser de escritura (las moléculas que ya poseían una orientación perpendicular no se ven afectadas), donde al retirar el láser de escritura algunas moléculas quedarán orientadas y otras regresarán a su posición original; estos estados se ilustran en la figura 4.3) [7, 17]; esta reacción depende de la libertad que otorgue la matriz polimérica. La excitación de los azopolímeros (PDMS-DR1) que recubren a los dispositivos de fibra óptica, se realiza mediante luz linealmente polarizada proveniente del láser de escritura que incide directamente sobre las muestras.

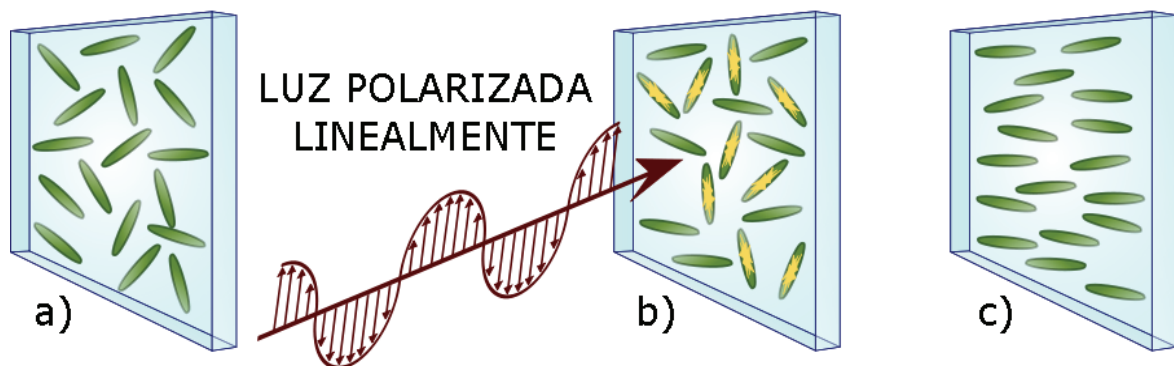


Fig. 4.3. Orientación de las moléculas al iluminarlas con el láser de escritura, a) moléculas orientadas en direcciones aleatorias, b) al incidir el láser de escritura orienta las moléculas de forma perpendicular a su orientación y c) moléculas orientadas.

Para asegurar que la polarización del láser de escritura fuera lineal, se empleó un polarizador Glan-Thompson [4] a la salida de este. Los láseres empleados para excitar las moléculas de DR1 fueron dos:

- Láser pulsado de Nd:YAG a 15 Hz, longitud de onda de 532 nm (verde) y potencia de 0 - 15 mJ. Su ángulo de incidencia sobre las muestras fue de 60°. Este láser fue acoplado a una fibra óptica multimodal y a la salida de esta se colocó el polarizador para garantizar una polarización lineal.
- Láser de estado sólido de onda continua, longitud de onda de 475 nm (azul) y potencia de 20 mW. Su ángulo de incidencia sobre las muestras fue de 50°. Este láser posee una salida polarizada linealmente, por lo que al girar el polarizador de Glan-Thompson se presenta atenuación de la señal. Esta variación de la potencia a la salida se aprecia en la gráfica mostrada a continuación (Fig. 4.4):

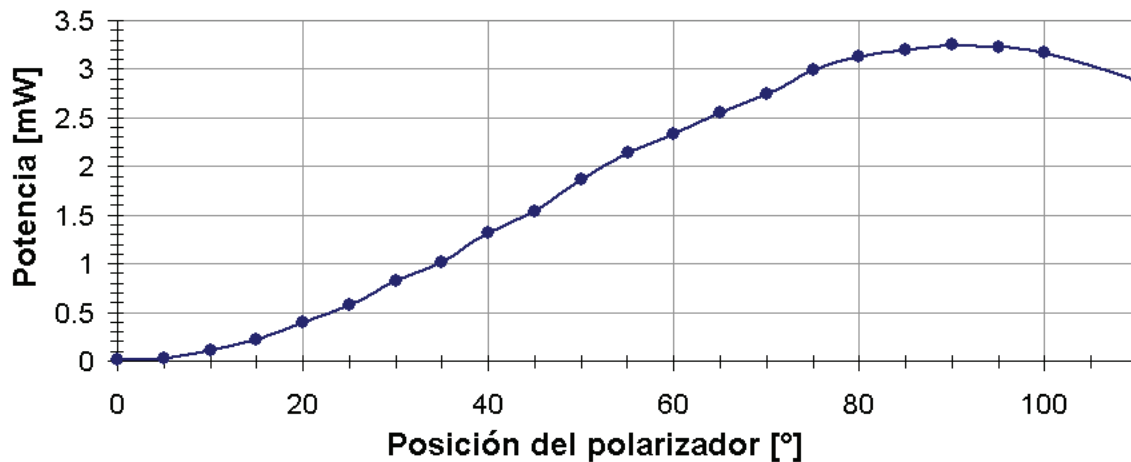


Fig. 4.4. Salida de la potencia del láser azul al pasar por un polarizador de Glan-Thompson.

4.1 Cambios fotoinducidos en el espectro de transmisión

El ajuste en la longitud de onda de la señal emitida en arreglos de anillo se realiza generalmente mediante algún tipo de filtro dentro del resonador. Un ejemplo de estos dispositivos son los filtros de Fabry Perot. Los dispositivos fabricados en este trabajo al estar situados dentro del arreglo de fibra óptica en anillo, tienen la

capacidad de seleccionar la longitud de onda de emisión láser generada al cambiar la polarización de la señal que viaja dentro del anillo.

Un factor que afecta directamente el espectro de transmisión en los dispositivos creados, es el índice de refracción del compuesto PDMS-DR1, este material al cambiar con la temperatura, afecta la amplitud de la señal [23, 24]. Los efectos en el espectro de transmisión al excitar los azopolímeros depositados sobre fibras ópticas adelgazadas y acopladores de fibra óptica son estudiados a continuación.

4.1.1 Fibras ópticas adelgazadas

Las fibras ópticas adelgazadas empleadas se fabricaron con 10 mm de elongación obteniendo pérdidas en el rango de 0.3 a 0.4 dB. Sin embargo, al recubrirlas con PDMS-DR1 presentaron pérdidas mayores, alrededor de 3 dB debido al índice de refracción del azopolímero. En la figura 4.5 se puede observar como es que el espectro de la emisión láser cambia al introducir el dispositivo recubierto con azopolímero, a causa de las pérdidas que este introduce. La amplitud del espectro no es muy estable, pero esto es debido a inestabilidades propias del arreglo y no es de gran relevancia para las mediciones. Los cambios fotoinducidos originados en los dispositivos se ven reflejados en la longitud de onda de emisión del sistema láser.

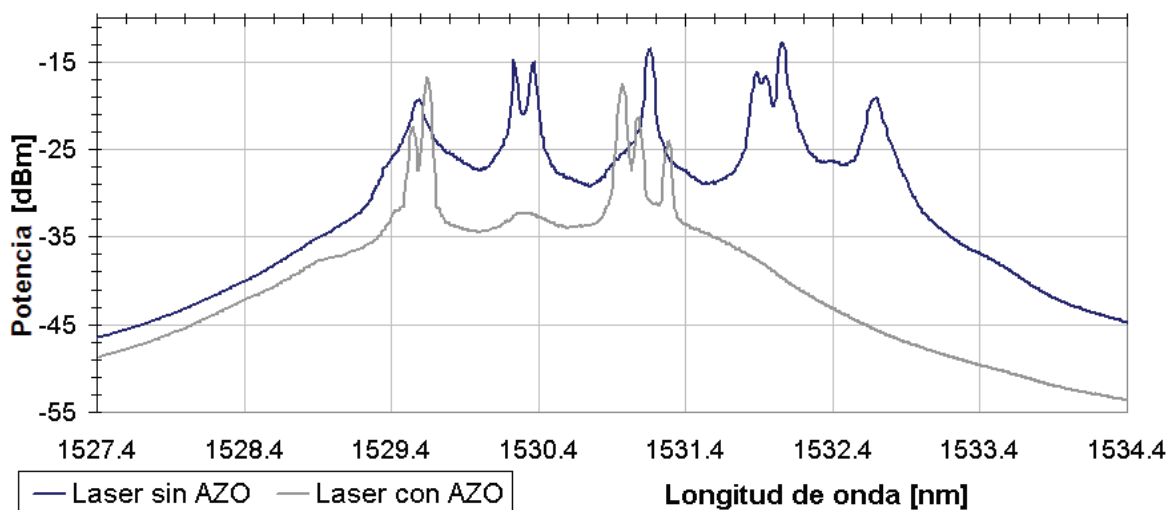


Fig. 4.5. Pérdidas en el espectro de emisión del arreglo al poner una fibra adelgazada con azopolímero.

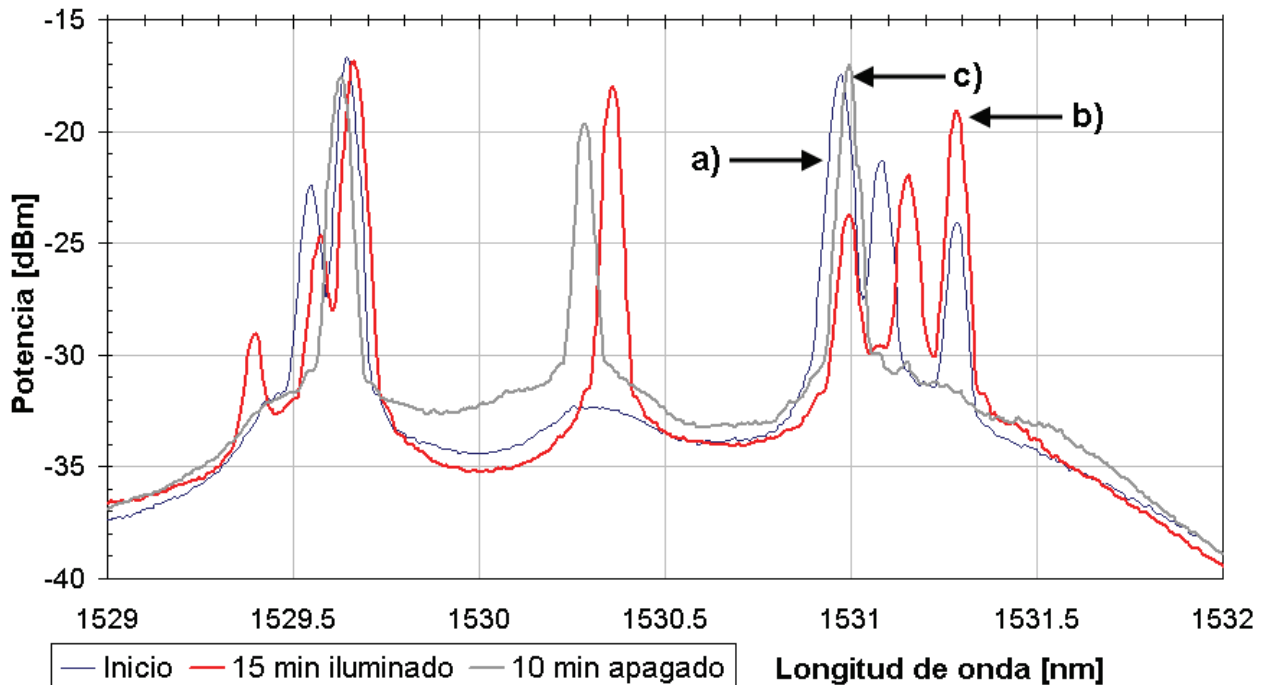


Fig. 4.6. Cambios en el espectro de emisión al iluminar con un láser de escritura de 532 nm , a) posición inicial, b) posición después de iluminar con el láser de escritura durante 15 min y c) posición después de 10 min de haber apagado el láser de escritura.

Los cambios en los dispositivos fueron registrados tras iluminar quince minutos utilizando el láser verde de escritura a máxima potencia. Los cambios generados en el espectro de emisión no son muy evidentes, pero sí se presenta un desplazamiento en las regiones espectrales donde se genera la emisión láser. Al apagar el láser de escritura también se registraron cambios en el espectro volviendo a cambiar su posición, aunque no regresó totalmente a su estado inicial (Fig. 4.6).

4.1.2 Acopladores sobreacoplados de fibra óptica

Los acopladores de fibra óptica son elementos muy sensibles a los cambios físicos y en transmisión de señal. Esta sensibilidad se debe a dos factores: primero a que requieren una mayor elongación, y segundo porque al involucrar dos fibras se presentan en la señal efectos de división en potencia y en longitud de onda. Como ya se vio en el capítulo dos de este trabajo, los acopladores sobreacoplados, dependiendo del número de lóbulos con que se fabriquen, presentan bandas en su espectro de transmisión que determinan la transmisividad del dispositivo en función de la longitud

de onda. La cantidad de luz transmitida en cada una de estas bandas espectrales depende de la polarización, razón por la cual al variar la birrefringencia es posible ajustar la cantidad de luz que se transmite a través de estos dispositivos. Este principio es utilizado para desarrollar un "switch" al variar la polarización dentro del anillo, pues de esta manera se puede seleccionar la longitud de onda dentro del resonador.

Para los dispositivos fabricados en este trabajo se emplearon acopladores sobreacoplados de uno y dos lóbulos, para conseguir una señal con suficiente potencia y poder generar emisión láser dentro del anillo. Los acopladores sobreacoplados de más lóbulos presentan pérdidas muy elevadas, razón por la cual no fue posible utilizar acopladores de tres o más lóbulos. Como se puede ver en la figura 4.7, los cambios en el espectro de transmisión de los acopladores de fibra óptica presentan pérdidas muy altas al ser recubiertos con el PDMS-DR1. Las pérdidas al introducir los dispositivos dentro del láser de fibra óptica se muestran en la figura 4.8, donde se observa que las pérdidas en los acopladores son mucho mayores en comparación con las pérdidas para el caso de las fibras adelgazadas.

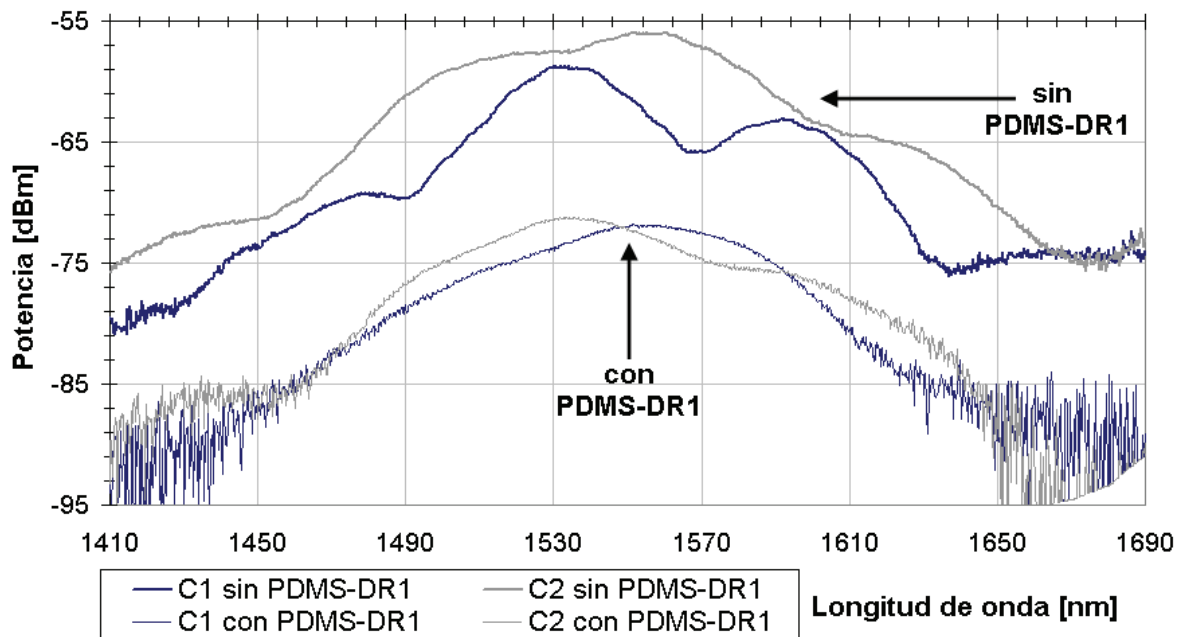


Fig. 4.7. Cambio en el espectro de transmisión en un acoplador de un lóbulo al recubrirlo con el azopolímero PDMS-DR1. C1 es el canal uno y C2 es el canal dos.

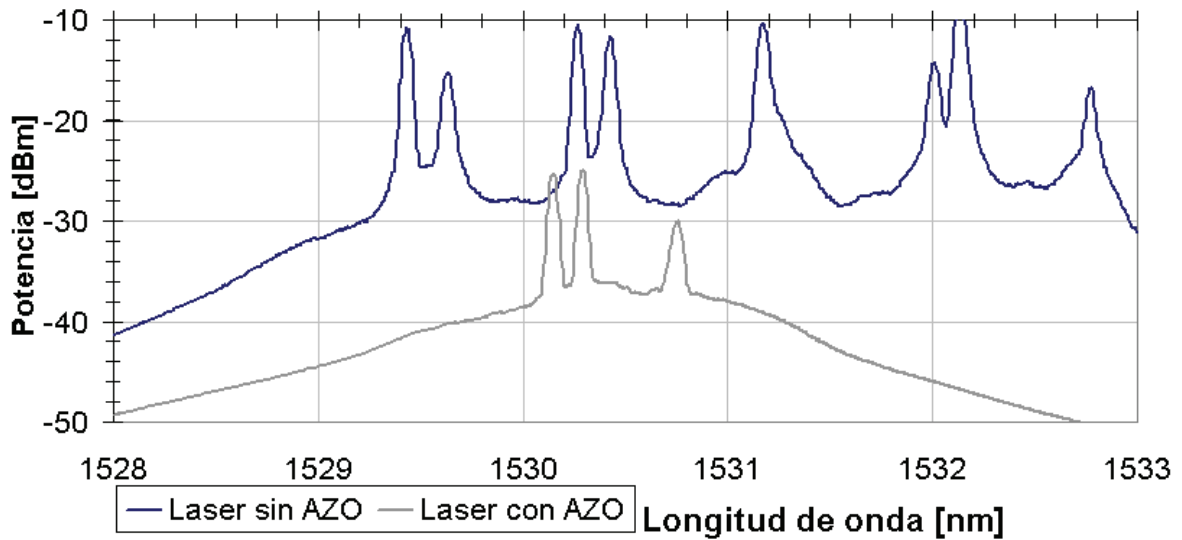


Fig. 4.8. Pérdidas en el espectro de emisión del láser de fibra óptica al insertar el dispositivo.

Los dispositivos fueron iluminados con los dos láseres de escritura (azul y verde) y en ambos casos se logró generar cambios en el espectro de emisión. Para estos eventos primero se estableció una polarización determinada y asociada a esta se tenía una longitud de onda de emisión en el láser de fibra óptica. Posteriormente se iluminaron con el láser de escritura y al generarse birrefringencia se modificaba la polarización, efecto que ocasionaba un corrimiento en la longitud de onda de emisión (Fig. 4.9). Otro efecto que se observó, fue que al iluminar las muestras se originaba mayor amplitud en ciertas longitudes de onda al ir cambiando la polarización (Fig. 4.10).

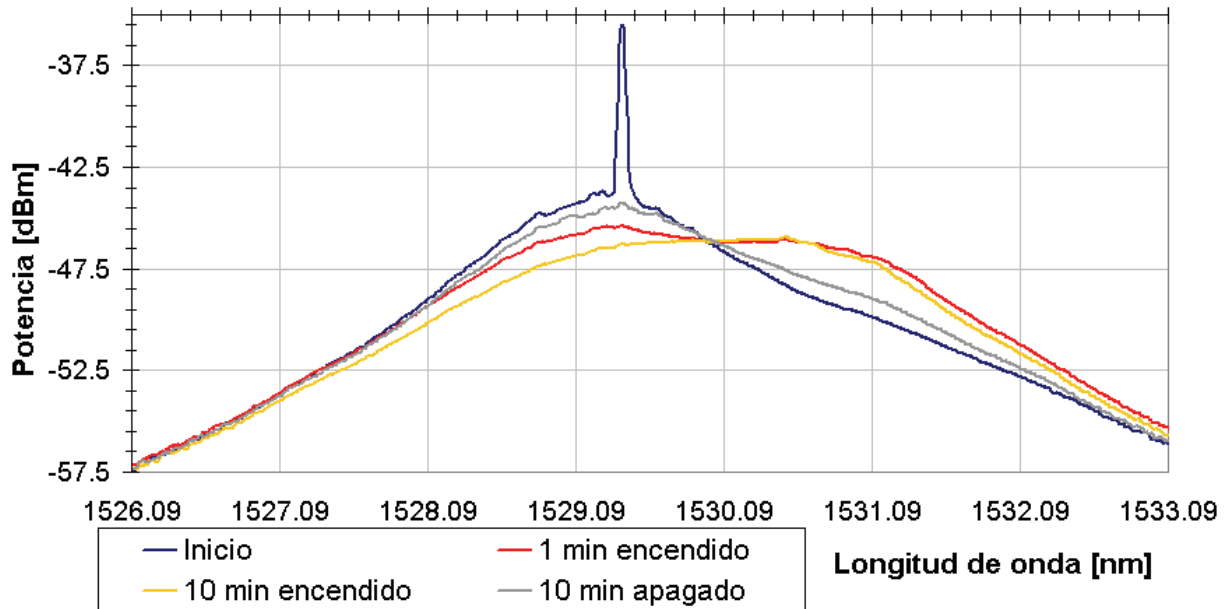


Fig. 4.9. Cambios de longitud de onda en el espectro de emisión en el láser de fibra óptica con acoplador de fibra óptica y azopolímero.

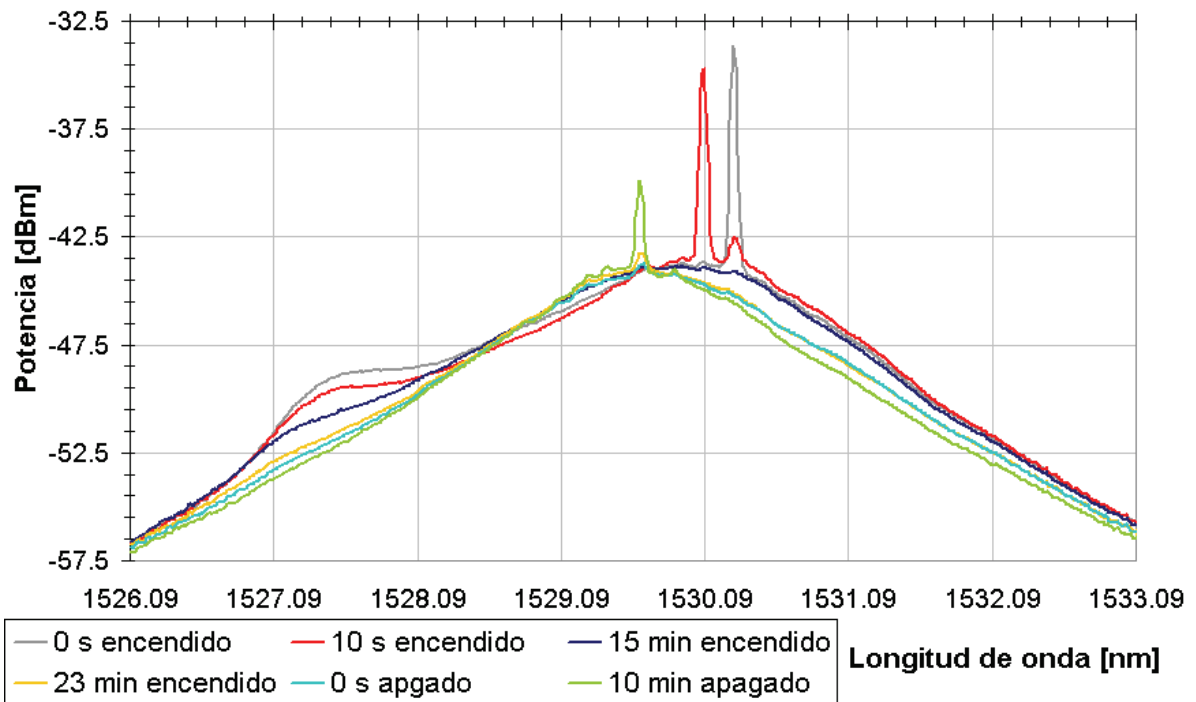


Fig. 4.10. Cambios de ganancia en el espectro de emisión del láser de fibra óptica con acoplador de fibra óptica con azopolímero.

Al dejar de iluminar con el láser de escritura se observó que algunas veces el espectro de emisión del láser de fibra óptica casi regresa a su posición original. En el

caso de la figura 4.9 se dejó de producir emisión láser al cambiar la polarización, esto debido a las altas pérdidas, pero al retirar el láser de escritura el espectro no retornó exactamente a su posición inicial y no fue posible obtener de nuevo emisión láser. En el último ejemplo (Fig. 4.10), se muestra el caso donde la polarización permaneció en el estado inducido por la iluminación con el láser de escritura, así que los cambios generados en el espectro permanecieron aún después de dejar de iluminar con el láser de escritura.

Los cambios registrados en el espectro de emisión no son de gran magnitud (el corrimiento de longitud de onda es de un par de nanómetros como máximo) y debido a inestabilidades del arreglo en anillo no se tenía una longitud de onda estable, lo cual también dificultó la medición de los cambios fotoinducidos. Los tiempos y potencias de radiación sobre los dispositivos no pudieron caracterizarse de manera confiable, ya que bajo las mismas condiciones de iluminación la respuesta no resultaba igual en una misma muestra. Este problema se atribuye a la baja T_g de la matriz, pues esta no proporciona mucha estabilidad y no se asegura que las moléculas de DR1 permanezcan en una orientación bien definida. Aunado a esto, al ser el PDMS una nueva matriz para contener azobencenos, no se tiene caracterizado el compuesto y los comportamientos son difíciles de establecer; sin embargo, en el caso en que se empleó el láser azul para iluminar las muestras se registraron cambios para todas las potencias obtenidas, según la posición del polarizador empleado. Esto implica que los cambios fotoinducidos pueden generarse incluso con niveles de potencia bajos para el láser de escritura.

4.1.2.1 Efectos en acopladores por variación de temperatura

El coeficiente termo-óptico (dn/dT) del PDMS es negativo, aproximadamente de $-1 \times 10^{-4} K^{-1}$ [23] lo cual indica que al incrementarse la temperatura su índice de refracción disminuye. Las propiedades del PDMS se ven afectadas por el proceso al cual es sometido pero, en principio, al calentar las muestras el espectro de transmisión se modifica al bajar el índice de refracción. Este efecto se demostró en el capítulo dos al introducir un acoplador en agua e incrementar su temperatura.

Uno de los dispositivos recubierto con azopolímero fue sometido a cambios de temperatura, para ser específico se utilizaron las resistencias para encapsular que posee la máquina que fabrica los acopladores. Haciendo uso de un LED como fuente de luz, se registraron los cambios en el espectro de transmisión asociados a cada temperatura, obteniendo de esta manera las variaciones en el espectro del dispositivo en función de la temperatura. Los cambios pueden apreciarse en las figuras 4.11 y 4.12 al calentar el dispositivo y después dejarlo enfriar, respectivamente.

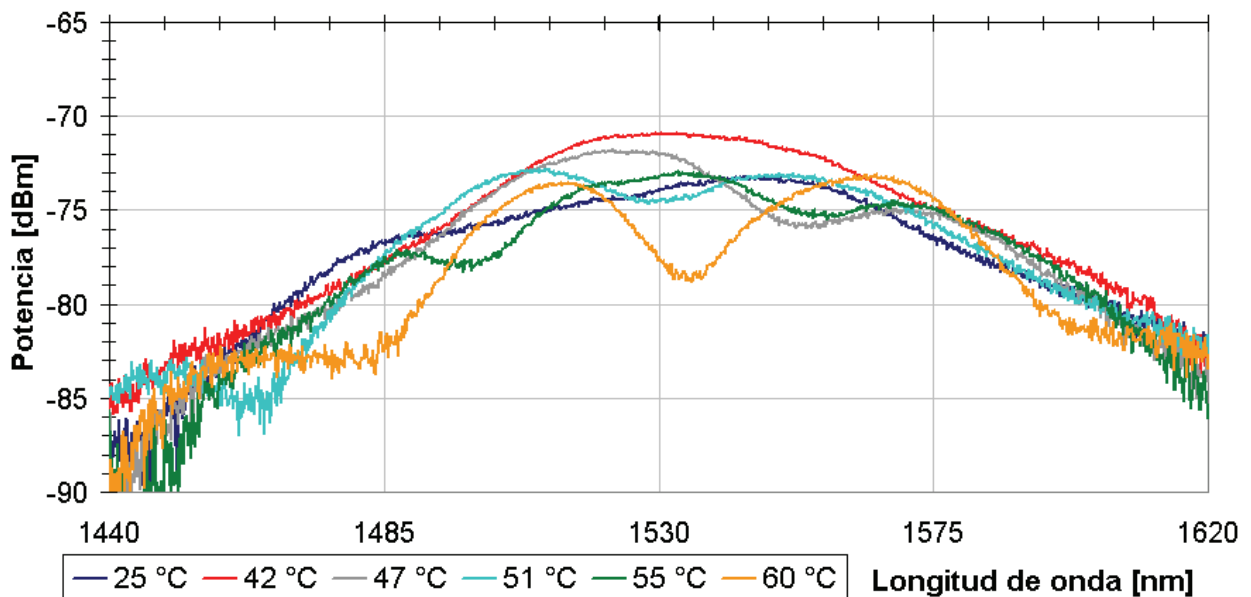


Fig. 4.11. Modificación de bandas espectrales en dispositivo al incrementar la temperatura.

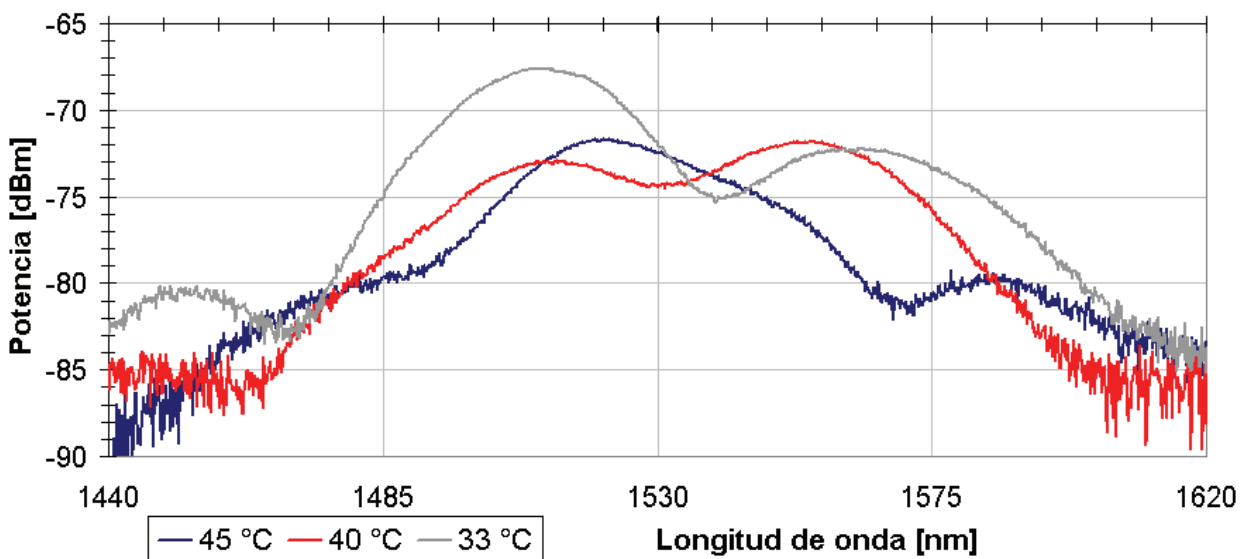


Fig. 4.12. Modificación de bandas espectrales en dispositivo al disminuir la temperatura.

En las gráficas donde se muestra el cambio de la señal de acuerdo con la variación de temperatura, se puede observar que hay grandes cambios con pequeñas variaciones de temperatura. Esto es más evidente al comparar estos datos con los obtenidos al utilizar en agua como medio externo e incrementar su temperatura. En un principio el espectro de transmisión casi no presenta bandas espectrales, pero al incrementarse la temperatura se aprecia que estas se definen mejor. Sin embargo, al enfriarse el dispositivo permanece alterado en su espectro de transmisión, tal alteración se atribuye al proceso al cual se somete la matriz polimérica. Al calentar el dispositivo el índice de refracción disminuye, obteniendo pérdidas menores y así las bandas espectrales adquieren una mejor definición. Todo esto muestra que la respuesta de los dispositivos es muy sensible a las propiedades ópticas del material (índice de refracción) y la temperatura en la que se trabaja.

4.1.3 Efectos en acopladores sin láser de escritura

Al estar preparando y ajustando el equipo para realizar los experimentos se presentó un fenómeno inesperado. Este fenómeno consiste en que al activar el DL de bombeo, se registró una respuesta similar a la obtenida cuando se excitan los dispositivos con el láser de escritura (Fig. 4.13). En este caso el proceso de excitación se atribuye a efectos térmicos originados por la señal del láser de fibra (1530 nm). Este cambio se registró varias veces al suministrar corriente al DL y apagarlo. Al ser mayor la potencia de bombeo, el cambio se presentaba de manera más rápida hasta llegar a un punto en donde se saturaban las moléculas y ya no se presentaba más este cambio sin importar la potencia empleada. Al calentar las muestras, las moléculas se relajaban y se reorientaban de forma aleatoria volviendo a presentarse este fenómeno.

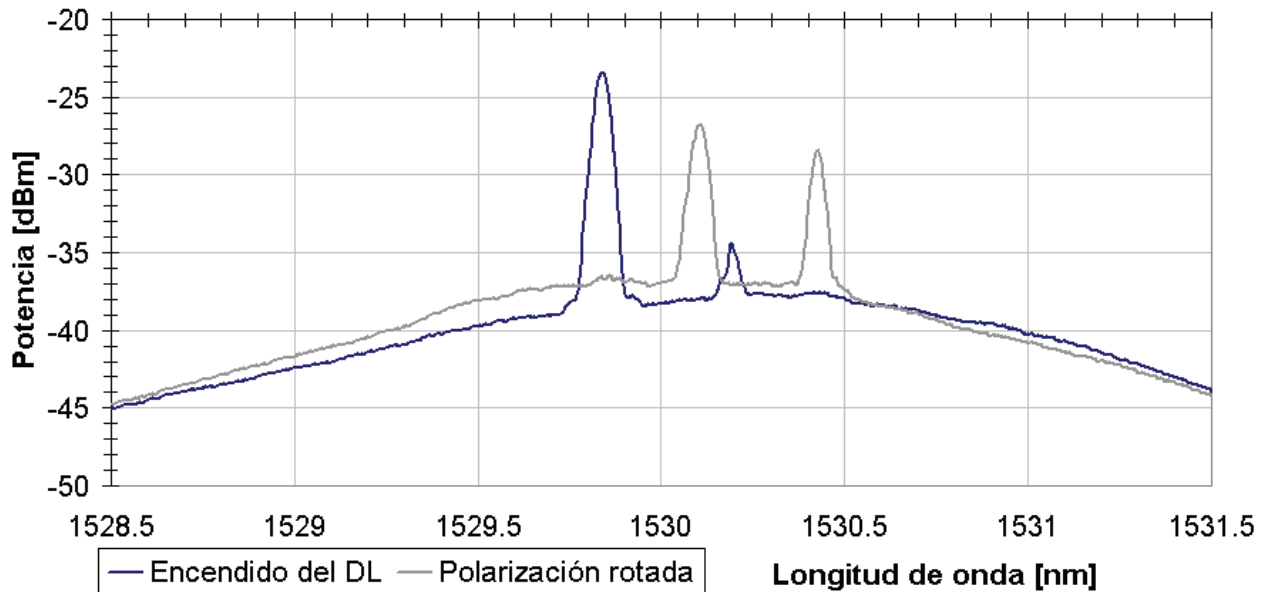


Fig. 4.13. Cambio en el espectro debido al proceso de excitación mediante la señal de 1530 nm generada en el arreglo en anillo de fibra óptica.

Este tipo de cambios representan una variable importante a considerar al utilizar los dispositivos fabricados con estos azopolímeros. Los efectos producidos en estos casos deben ser estudiados más a fondo para contrarrestar este efecto y que no interfiera con la respuesta generada debido al láser de escritura.

4.2 Cambios fotoinducidos en polarización

Los cambios en la polarización de la señal que viaja dentro de las fibras ópticas en una sección adelgazada, son generados por cualquier cambio del medio externo debido a la interacción de la onda evanescente con este. Al radiar los azobencenos con un haz de luz láser linealmente polarizado y en una longitud de onda en la cual presente absorbancia, se generará birrefringencia. Esta, en efectos de la polarización de la luz, provoca un desplazamiento de un estado de polarización hacia otro, hasta llegar a un punto en el cual las moléculas de azobenceno se encuentran todas alineadas perpendicularmente a la polarización del láser de escritura. Al retirar el láser de escritura, las moléculas generalmente retornan a su estado original después de

cierto tiempo, el cual depende del proceso de fabricación de la muestra, sus propiedades y factores del medio ambiente, como lo es la temperatura.

Los efectos causados por la birrefringencia fotoinducida en los diferentes dispositivos se analizaron mediante la esfera de Poincaré [4], donde cada punto sobre la esfera representa una polarización. Este método gráfico para visualizar la polarización de la luz es adecuado para observar qué tipo de respuesta generan los dispositivos fabricados.

4.2.1 Fibras adelgazadas

En estos dispositivos los cambios siempre se generaron después de cierto tiempo de iluminarlos con el láser de escritura. La figura 4.14 ilustra cómo es que la polarización del láser de fibra óptica cambia después de radiar las muestras durante un cierto tiempo. Al comenzar a registrarse el cambio en polarización, esta se desplaza de manera muy rápida hasta alcanzar un estado fijo. Posteriormente al apagar el láser de escritura, para algunos casos se observó que inmediatamente la polarización regresaba casi a su estado inicial siguiendo la misma trayectoria. Los cambios al emplear fibras adelgazadas siempre tuvieron el mismo comportamiento en cuanto al tiempo de respuesta, tardando minutos en presentarse.

En otras ocasiones al excitar los dispositivos y cambiar la polarización, esta no regresaba a su estado original al apagar el láser de escritura (Fig. 4.15). Esto se atribuye a que la matriz empleada no está caracterizada para este tipo de aplicaciones. Uno de los factores que muy probablemente influya en este tipo de respuesta es el fenómeno de excitación sin utilizar el láser de escritura mencionado en las secciones anteriores. Este es un efecto térmico que muy probablemente genera inestabilidades en la matriz polimérica.

El analizador de estados de polarización, cuenta con un software para representar gráficamente la polarización de la señal mediante la esfera de Poincaré (PolaView versión 3.0). Este software dibuja una traza en color azul para representar

los estados de polarización que caen en la parte frontal de la esfera y la traza en rojo es para los estados representados en la parte posterior de la esfera.

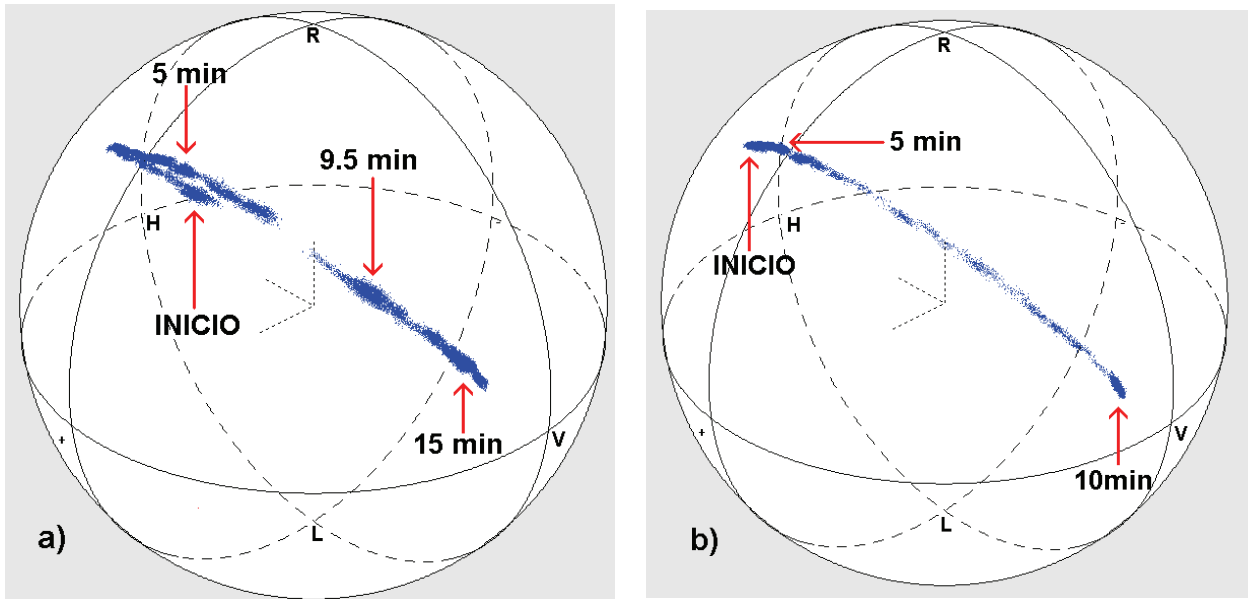


Fig. 4.14. Trazas del cambio en la polarización de la luz al emplear una fibra adelgazada con PDMS-DR1, a) durante 15 minutos de iluminación con luz láser linealmente polarizada, b) regreso de la polarización al apagar el láser de escritura.

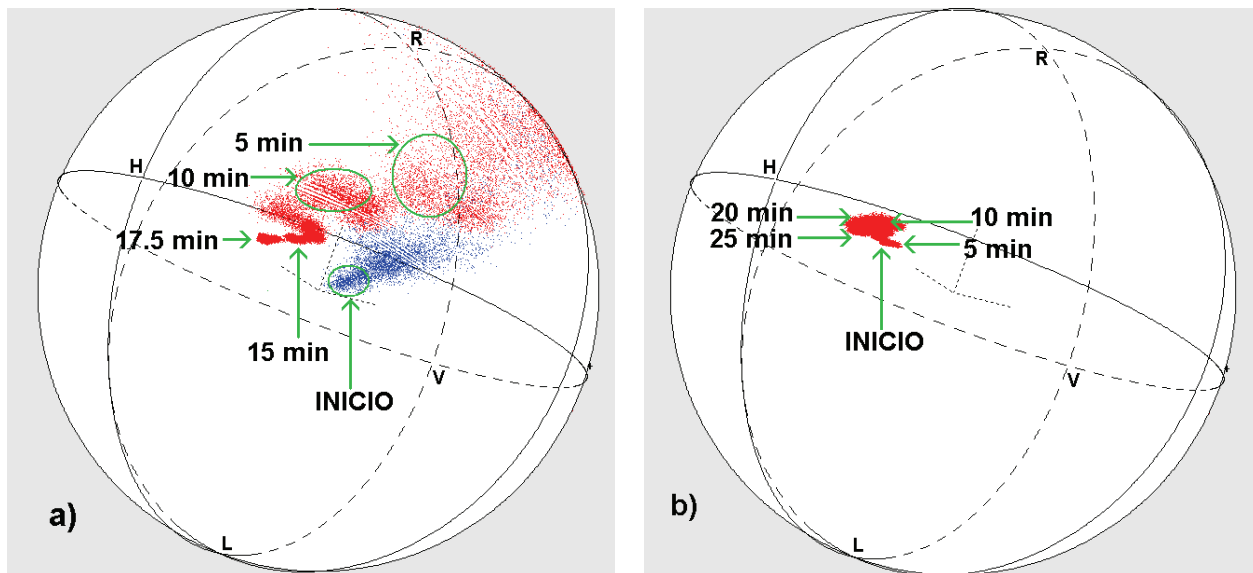


Fig. 4.15. Otro ejemplo del cambio de la polarización al emplear una fibra adelgazada con PDMS-DR1, a) durante 17.5 minutos de iluminación con luz láser de escritura, b) la polarización se mantiene en el estado alcanzado al iluminarlo y no retorna al estado inicial.

El cambio en la polarización del láser de fibra óptica se genera por la reorientación de las moléculas del DR1, la cual es inducida por el láser de escritura. La nueva orientación de las moléculas de DR1 es perpendicular a la polarización del láser de escritura, donde las moléculas permanecerán en esa posición mientras se encuentre encendido el láser de escritura. Debido a la gran libertad que otorga la matriz polimérica (PDMS) a las moléculas del azobenceno, estos cambios pueden ser revertidos casi en su totalidad.

4.2.2 Acopladores sobreacoplados de fibra óptica

Los cambios en polarización de los dispositivos basados en acopladores sobreacoplados de fibra óptica, son similares a los que se generan en las fibras adelgazadas. Sin embargo, en este caso el tiempo que tardaba en presentarse el desplazamiento de la polarización y su velocidad de rotación fueron muy variados. El tiempo de respuesta para que la polarización se moviera llegó a ser inmediato y en algunos casos tardó varios minutos. El retorno a la polarización inicial fue de forma más rápida, aunque al igual que con fibras adelgazadas hubo casos en los que la polarización no regresaba a su estado inicial. Cuando se presentaba un retorno al estado inicial de polarización, este era en el instante de retirar el láser de escritura, si no había retorno de la polarización, esta permanecía en el estado fotoinducido. En la figura 4.16 se aprecia un cambio muy rápido de la polarización justo al encender el láser de escritura; de igual manera, el retorno al estado original de polarización se presenta justo al momento de apagar el láser de escritura, regresando a una posición muy cercana a la inicial. Como contraparte, en la figura 4.17 se aprecia un cambio igual de rápido, pero la polarización continúa desplazándose durante varios minutos y al retirar el láser de escritura, esta permanece en ese estado sin retornar a su posición original.

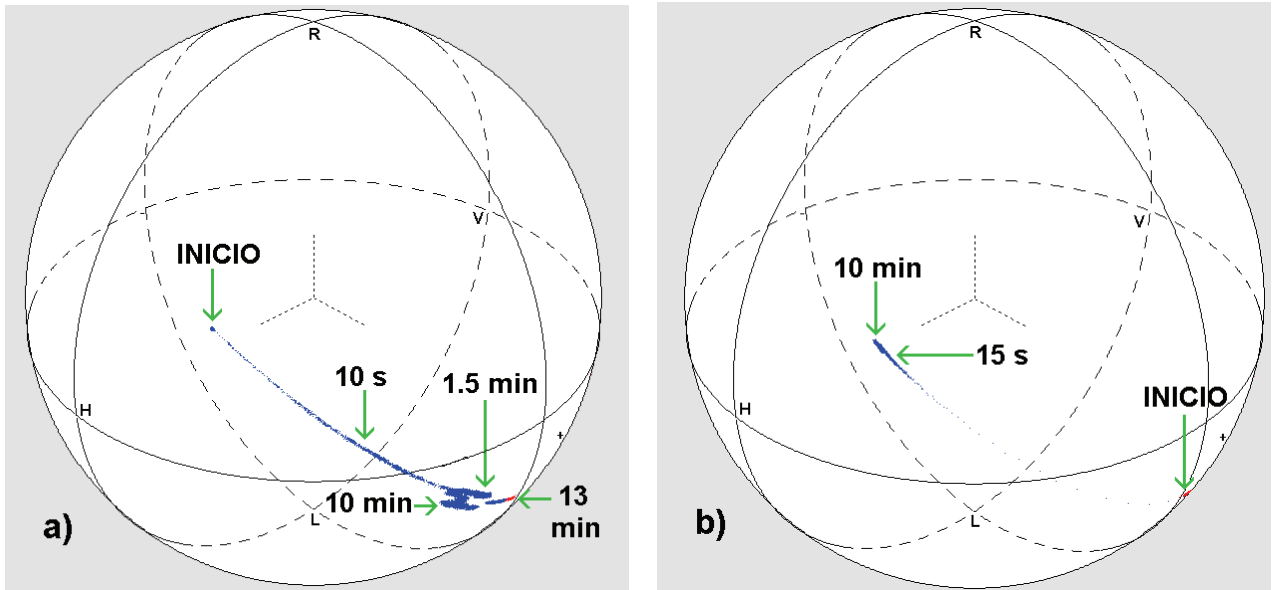


Fig. 4.16. Trazas de la rotación de la polarización utilizando un acoplador sobreacoplado de fibra óptica con PDMS-DR1, a) durante 13 minutos de iluminación con el láser de escritura, b) regreso de la polarización al apagar el láser de escritura.

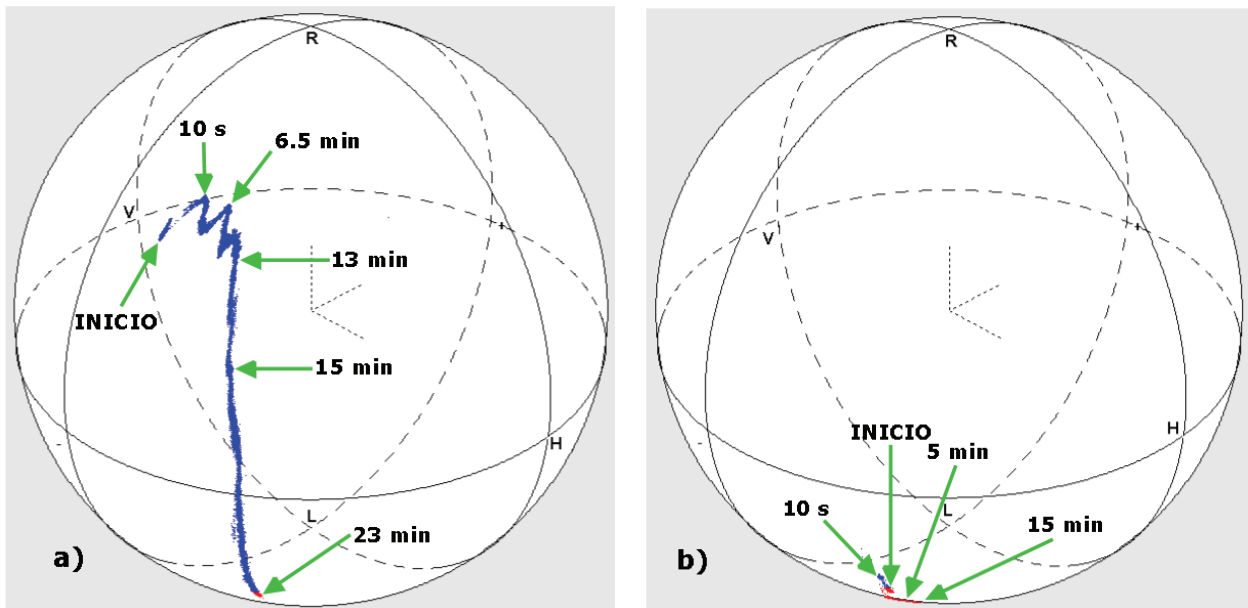


Fig. 4.17. Otro ejemplo de la rotación de la polarización utilizando un acoplador sobreacoplado de fibra óptica con PDMS-DR1, a) durante 23 minutos de iluminación con el láser de escritura, b) en este caso la polarización no regresa a su posición inicial.

La magnitud de los cambios depende mucho de la polarización ajustada manualmente mediante el controlador de polarización (CP) dentro del arreglo en anillo.

Esto se observa si se toma el caso en donde para una polarización dada hubo un cambio fotoinducido en polarización y se presentó el retorno a la polarización inicial (como el registrado en el evento de la figura 4.15); posteriormente se generó un cambio fotoinducido empleando otra polarización, la cual se logra variando la posición del controlador de polarización en el láser de fibra óptica. De esta manera se obtuvo un cambio de menor magnitud pero con igual velocidad y comportamiento (Fig. 4.18).

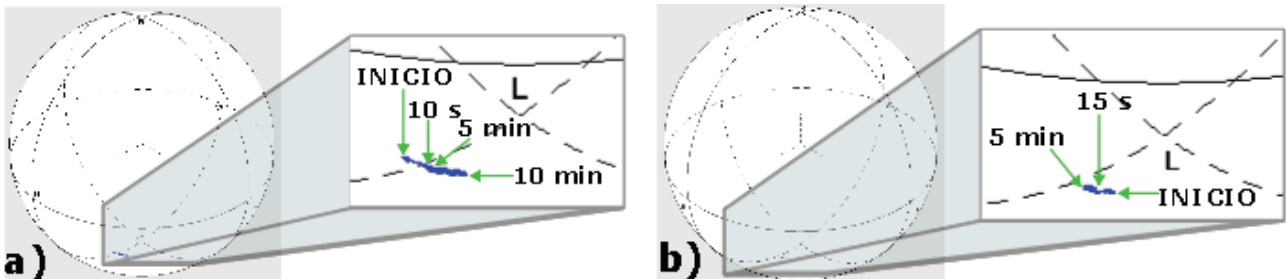


Fig. 4.18. Trazas de la rotación de la polarización utilizando un acoplador sobreacoplado de fibra óptica con PDMS-DR1 en menor magnitud, a) durante 10 minutos de iluminación con el láser de escritura, b) regreso de la polarización al apagar el láser de escritura.

4.2.3 Efectos de polarización en acopladores sin láser de escritura

Como ya se mencionó anteriormente, al no iluminar con el láser de escritura y suministrar corriente al diodo láser también se presentaron cambios en la polarización. Su respuesta es similar a la registrada empleando el láser de escritura, por lo que se puede evaluar mediante la esfera de Poincaré. Los tiempos y amplitudes de respuesta se encuentran en un rango muy amplio (de segundos a minutos), pero llegan a un estado de estabilidad después de permitir el paso de la señal que viaja dentro de la fibra en anillo por algunos minutos (Fig. 4.19).

De esta manera la onda evanescente expuesta en la sección adelgazada de las fibras, de alguna manera provoca cierta excitación en el compuesto creado de PDMS-DR1, lo cual puede ocurrir por efectos térmicos. Este efecto no siempre se registró al activar el diodo láser, por lo que la polarización de la luz que viaja dentro del arreglo de anillo debe de influir en la respuesta.

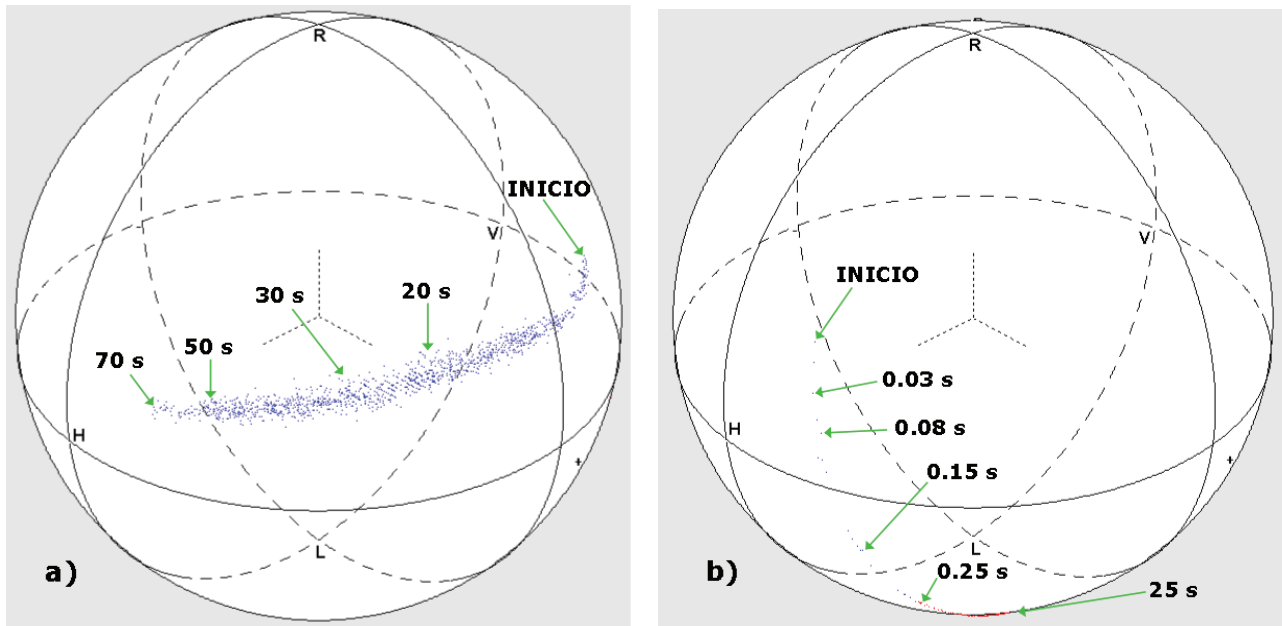


Fig. 4.19. Trazas de la rotación de la polarización utilizando un acoplador sobreacoplado de fibra óptica con PDMS-DR1 por efectos de la señal que viaja a través de la fibra al encender el diodo láser que alimenta el arreglo en anillo (sin láser de escritura), a) con una corriente de 400 *mA* y b) con una corriente de 360 *mA* y polarización distinta.

4.3 Posibles aplicaciones de los dispositivos

Los dispositivos fabricados y probados son expuestos a una gran cantidad de variables físicas y de factores durante su fabricación, los cuales alteran sus propiedades y por consiguiente su respuesta. Para su empleo como sensores, el rango de aplicaciones es muy variado debido a las alteraciones producidas en el medio externo que rodea la sección adelgazada de las fibras ópticas. Los cambios en el medio externo pueden ser desde variaciones del índice de refracción dependiendo de la temperatura (para el cual se observó bastante sensibilidad) hasta la detección de factores químicos por su interacción con los azopolímeros, y así alterar la señal que viaja dentro de la fibra óptica.

La aplicación más inmediata de los dispositivos creados en este trabajo, que requiere de perfeccionamiento, es para fabricar rotadores o "switches" de polarización. Dado que se han reportado tiempos de activación de picosegundos en azopolímeros,

existe la posibilidad de lograr una respuesta rápida. Esto sería de gran interés en el campo de las telecomunicaciones y procesamiento de señales ópticas.

Los materiales a emplear como matriz pueden ser muy variados y con distintas propiedades. De la misma manera, hay una gran variedad de azobencenos con distintas características. Esto ofrece una gran cantidad de combinaciones para formar azopolímeros, brindando un gran número de respuestas las cuales pueden ser empleadas para reaccionar ante alguna variable definida y así obtener sensores para distintos usos. Un ejemplo de esto es la utilización de azobencenos contenidos en celulosa, obteniéndose así un compuesto que reacciona a cambios de pH [28].

La preparación de los azopolímeros comprende bastantes factores como lo son el índice de refracción de la matriz polimérica y su T_g , el proceso de fabricación que comprende los solventes, temperatura de curado y tratamientos especiales (como lo puede ser con UV o plasma). Otro aspecto muy importante es la selección del azopolímero para reaccionar a estímulos determinados; por lo tanto, es cuestión de seleccionar la combinación adecuada para los fines deseados.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se logró la fabricación de acopladores de fibra óptica y fibras ópticas adelgazadas de una manera repetible y con pérdidas bajas. Este proceso requiere de un manejo cuidadoso al situar las fibras ópticas porque de esto depende la obtención de dispositivos con pérdidas bajas. Los acopladores poseen características espectrales que dependen de su longitud de elongación; con esto es posible obtener varios efectos interesantes debido a la onda evanescente que se expone al medio ambiente en la región de acoplamiento. La fabricación de los acopladores sobreacoplados se logró de manera exitosa hasta con cuatro lóbulos. En este sentido, una de las aportaciones de este trabajo es el establecimiento de una metodología clara para fabricar acopladores con bajas pérdidas de manera repetible.

Se logró comprobar que los efectos fotoinducidos de los azobencenos pueden tener aplicaciones en el campo de la fotónica. Cuando el azobenceno se incorpora en una sección adelgazada de las fibras ópticas es posible modificar la polarización de la señal óptica que viaja dentro de la fibra utilizando luz láser linealmente polarizada. El desarrollo de dispositivos con estas características involucró un proceso de investigación multidisciplinario, ya que esta es una aplicación para los azobencenos en la cual no se tenían antecedentes. Durante el desarrollo de este trabajo de investigación se observaron múltiples variables que afectan los resultados de los dispositivos creados (solvente, matriz, azobenceno, temperatura, concentración, depósito, etc.). El utilizar un azobenceno que ha sido empleado anteriormente para generar birrefringencia fotoinducida fue de gran utilidad para limitar el número de variables desconocidas en los experimentos. De esta manera, la parte más importante para lograr que los dispositivos funcionaran fue quizás la elección de una matriz

polimérica adecuada para alojar a los azobencenos, además de presentar buena adherencia con la fibra óptica.

Al emplear el PDMS como matriz se incursionó en un tema nuevo ya que casi no hay reportes al respecto, tomando en cuenta que el PDMS es un polímero que en los últimos años ha demostrado ser una buena alternativa para varias aplicaciones. Las propiedades del PDMS permitieron el funcionamiento de los dispositivos al poseer baja T_g y no permitir que la reorientación de las moléculas fuera permanente, pudiendo regresar así a la alineación inicial. Este material parece ser una buena alternativa para emplear en aplicaciones ópticas teniendo un gran potencial por sus propiedades. Aunque por otro lado, se presentaron efectos interesantes y no esperados al presentar distintos comportamientos de la respuesta que abren más temas de estudio.

Para el perfeccionamiento de los dispositivos los parámetros a tomar en consideración son en un principio el azobenceno y sus características de excitación, ya que existen una gran variedad de ellos y poseen reacciones muy variadas e interacción con bastantes sustancias. Posteriormente en cuanto a la matriz, se debe seleccionar una que tenga el índice de refracción, T_g , dureza y absorción adecuadas para su empleo. En este caso, el PDMS funcionó de manera adecuada para recubrir guías de ondas en su combinación como revestimiento de la fibra óptica.

Otro aspecto importante es el relacionado con la detección de la birrefringencia fotoinducida. En general, los reportes en donde se utilizan azobencenos se requiere de montajes ópticos complicados y con potencias relativamente altas (hasta 700 mW/cm^2 para lograr grabado superficial en relieve y 12 mW para la generación de birrefringencia). Hasta la fecha, esta parece ser la única manera de cuantificar la birrefringencia fotoinducida en estos materiales. En este sentido, la utilización del arreglo en anillo de fibra óptica proporcionó un método para detectar muy bien la respuesta de los dispositivos, e incluso es una excelente alternativa para caracterizar los cambios inducidos en ellos. Para los alcances de este trabajo, el empleo de la fibra láser en configuración de anillo permitió observar en los dispositivos los cambios generados en la polarización del láser generados por la birrefringencia fotoinducida. Un

análisis detallado de estos experimentos permitiría generalizar esta metodología para poder cuantificar la birrefringencia inducida en los dispositivos creados o similares por el láser de escritura.

La fabricación del compuesto PDMS-DR1 se realizó de manera muy sencilla, solamente agregando los reactivos y mezclándolos; esta es una facilidad que otorga el método de huésped-anfitrión para la preparación de los azopolímeros. No fue necesario de un cuidado extremo en la preparación de los dispositivos. Al obtener la mezcla esta simplemente se vertió sobre las fibras que estaban montadas en el molde, logrando un recubrimiento que no era del todo uniforme. Si los recubrimientos se hicieran con películas delgadas y uniformes, se obtendrían mejores resultados al estar mejor recubierta la zona adelgazada de la fibra óptica.

Los mejores resultados obtenidos muestran un cambio en la polarización de manera muy veloz y reversible al apagar el láser de escritura. Estos resultados se repitieron inmediatamente al prender y apagar la fuente de luz, lo cual muestra que este tipo de dispositivos pueden operar de manera adecuada bajo ciertas condiciones. Los tiempos registrados para que se presentara la fotoisomerización al irradiar los dispositivos con el láser de escritura, fueron en un rango muy amplio, desde 10 s hasta 10 min. Si se mejora el compuesto de PDMS-DR1 logrando que solidifique completamente, se obtendrán dispositivos más estables, resistentes y duraderos (esto por la fragilidad de la sección adelgazada de las fibras), lo cual se puede lograr al lograr un encapsulado inmediato de las fibras adelgazadas o los acopladores justo después de su fabricación.

Se probó también que los láseres de longitudes de onda cercanas a la longitud de onda de absorbancia máxima del azobenceno empleado funcionan muy bien para generar cambios fotoinducidos. Se observó que para distintas polarizaciones de la señal que viaja dentro de la fibra óptica la respuesta varía manteniendo el láser de escritura fijo, lo cual indica que se tiene mucha libertad para inducir cambios en la polarización si se mueve el láser de escritura logrando que las moléculas se orienten en distintas direcciones. Este efecto en combinación con ajustes en la polarización de

la señal que viaja dentro de la fibra puede también ser otra línea de trabajo a explorar en trabajos futuros.

Algo que es de suma importancia es el modo de detectar los cambios fotoinducidos en los dispositivos que generan birrefringencia al excitar las moléculas de DR1. La birrefringencia se manifiesta principalmente en la polarización de la luz, por lo que los cambios en el espectro de la señal no son muy notorios. Debido a esto, la forma de detectar los cambios generados en los dispositivos se realizaron mediante el analizador de estados de polarización; las ilustraciones mostradas en el capítulo cuatro muestran como es que los cambios son mayores en la polarización. Para la caracterización de la respuesta de los dispositivos creados, el análisis se simplifica mucho obteniendo los cambios en cuanto a la polarización de la señal; esto es debido a que si se realizara detectando los cambios en el espectro, se necesitaría de un equipo con una resolución muy grande y que el espectro de emisión del arreglo utilizado, fuera demasiado estable.

APÉNDICE A:

Artículo para el 2nd *Workshop on Specialty Optical
Fibers and Their Applications (WSOF-2010)*

Optically controlled all-fiber polarization rotator

Amado M. Velázquez Benítez^a, Juan Hernández-Cordero^b

Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM,

Apdo. Postal 70-360, Cd. Universitaria, México, D.F., 04510, México

ABSTRACT

We demonstrate an all-fiber polarization rotator optically activated based on polymer-azobenzene complexes via guest-host system. The azo compound (Disperse Red 1) was incorporated in a polymeric matrix (PDMS), which was used as coatings for tapered optical fibers and fused tapered couplers. These devices were then incorporated in a fiber ring laser cavity and the optically induced birefringence was monitored via changes in the polarization state of the fiber laser output and emission spectra. We present experimental results showing that this polymer coated devices could provide a simple means for developing optically controlled polarization switches.

Keywords: azobenzene, DR1, ring laser cavity, birefringence, polarization, rotator, PDMS, photoinduced

1. INTRODUCTION

Polarization in optical fibers is of interest for a wide variety of applications such as optical communications and fiber optic sensors. To date, there are several options available for controlling the polarization of light confined in waveguides; a simple example for optical fibers is polarization control through twisting, which modifies the birefringence and the polarization of the light changes due to an elasto-optically induced optical activity¹. Polarization rotation and control can also be achieved through electro-optic effects and these are currently the preferred choice for developing polarization switches, controllers and synthesizers. However, there are other interesting materials such as organic polymers that have not been fully exploited for these purposes. As an example, in aromatic molecules such as azobenzenes, birefringence and dichroism can be optically induced through photoisomerization, where the molecules are reoriented due to the change from *trans-cis* form. This orientation is obtained when linearly polarized laser light illuminates the azobenzene and the molecules become oriented perpendicular to the light polarization. The power and wavelength of the laser beam, called write beam, determines the response of the azo molecules; azobenzene's molecular relaxation occurs upon switching off the write beam and some of the molecules return to their original orientation².

Azobenzenes can be deposited as thin films on glass or they can also be incorporated into a polymeric matrix. The guest-host method is the simplest and least expensive way of incorporating chromophores such as azobenzenes into a polymeric matrix³. Some waveguides have been fabricated using the guest-host method since well-defined shapes of different thickness can be created using a mold where the azopolymer solidifies⁴. In this work, we demonstrate a fiber optic polarization rotator based on tapered fibers and fiber couplers with azopolymer coatings. The guest-host technique was used for the fabrication of the coatings used on the neck section of the tapered fibers; these devices were then incorporated into a ring laser cavity and the photo-induced birefringence was monitored upon analyzing the polarization of the fiber laser output. Results show that a write beam can effectively change the birefringence of the coated devices and hence provide polarization rotation of the fiber laser beam.

2. EXPERIMENTS

The most commonly used polymeric matrices for azobenzenes as hosts, are poly(methyl methacrylate) (PMMA) and polystyrene (PS)^{2,5,6}. However, in our experiments, we used poly(dimethylsiloxane) (PDMS) due to its adhesion to SiO₂⁷. The azobenzene used as guest was Disperse Red 1 (DR1, Fig. 1.b) purchased from Sigma-Aldrich; no further purification process was done before incorporating the DR1 into the host matrix.

^a Email: amadovelb@gmail.com

^b Email: jhcordero@iim.unam.mx

Fig. 1.a shows a tapered device coated with the DR1-PDMS system uniformly. The PDMS samples were prepared using Sylgard 184 (Dow Corning) and the mixture ratio of base/curing agent was 92%/8% in weight. DR1 was dissolved in THF and then added to the PDMS in a ration PDMS/DR1 = 91%/9% in weight. The mixture was next poured onto a glass substrate used as a mold for the polymer and for placing the couplers and the tapered fibers. Finally, the coated devices were heated at 80°C for 4 hours and left for drying at room temperature.

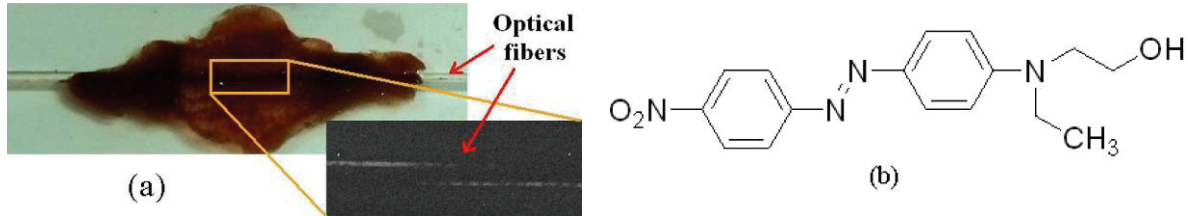


Fig. 1. (a) Photograph and scanning electron microscopy (SEM) image of a coated tapered fibers (DR1-PDMS), (b) structure of DR1.

Birefringence changes in the coated samples were monitored using the fiber ring laser shown in Fig. 2. The coated fiber devices were placed inside the cavity and the output of the fiber laser was monitored with an Optical Spectrum Analyzer (OSA, Agilent 86140B) and a polarization analyzer (General Photonics, PolaFlex, PSY-101). Changes of birefringence in the fiber devices were induced with a linearly polarized laser beam (NEW WAVE, Nd:YAG 532 nm, 0-15 mJ; Solid state CW laser, 475 nm, 20 mW) and the incident power on the samples was adjusted by means of a Glan-Thompson polarizer (not shown in the figure). The samples were measured to have high power losses owing to the refractive index of the polymer matrix. Nonetheless, the ring fiber laser provided enough gain to overcome the losses and laser oscillation was achieved with both devices, tapered fibers and fiber couplers placed within the cavity. Changes in the birefringence of DR1 have been reported to be small ², thus, placing these devices within a fiber laser cavity provides a simple means for registering small changes in birefringence.

Experiments were carried out irradiating the coated devices with the write beam. The initial state of polarization of the fiber laser output was fixed upon adjusting the intra-cavity polarization controllers. Once the write beam was turned on, the polarization of the fiber laser output was continuously monitored with the polarization analyzer. The trajectories on the Poincaré sphere of the polarized output due to photoisomerization in time were recorded until a steady state was reached. After that, the write beam was then turned off and the polarization was registered in the same manner during the relaxation process.

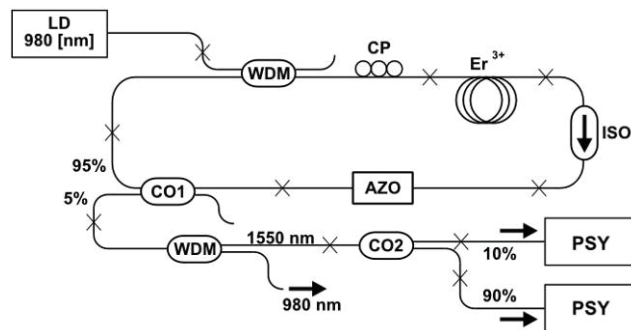


Fig. 2. Optical arrangement used for measuring changes in birefringence. LD-Laser diode, PC-Polarization controller, Er³⁺-Erbium doped fiber, CO1-coupler 95/5, CO2-Coupler 90/10, WDM-wavelength-division multiplexing, ISO-Isolator, OSA-Optical spectrum analyzer, AZO- DR1/PDMS, PSY-Polarization analyzer

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Typical results for an azopolymer coated fiber taper are shown in Fig. 3. In this case, the sample is a single tapered fiber illuminated with the Nd:YAG laser with an angle of incidence of 45° with respect to the optical axis of the fiber. The write laser was set at low power (approximately 200 nW) passing thru a polarizer before reaching the sample. After 15 minutes of turning the write beam on, we observed changes in the polarization of the fiber laser output. The trajectory on the Poincaré sphere recorded with the PSY (Fig. 3a) clearly shows that the polarization of the output beam

changes after turning the write beam on. After 15 minutes, no further changes in birefringence are obtained, and the polarization of the fiber laser output remains stable. After resetting the trace on the sphere the write beam was turned off and the polarization returned along the same trajectory to a polarization state close to that registered initially (Fig. 3b). The effects of turning off the write beam manifests faster than the changes in birefringence registered during the turn on process. While turning the write beam on leads to molecular alignment within the azopolymer, turning the beam off allows for molecular relaxation of the azopolymer and the polarization output of the fiber laser tends to return to its original state after 10 minutes.

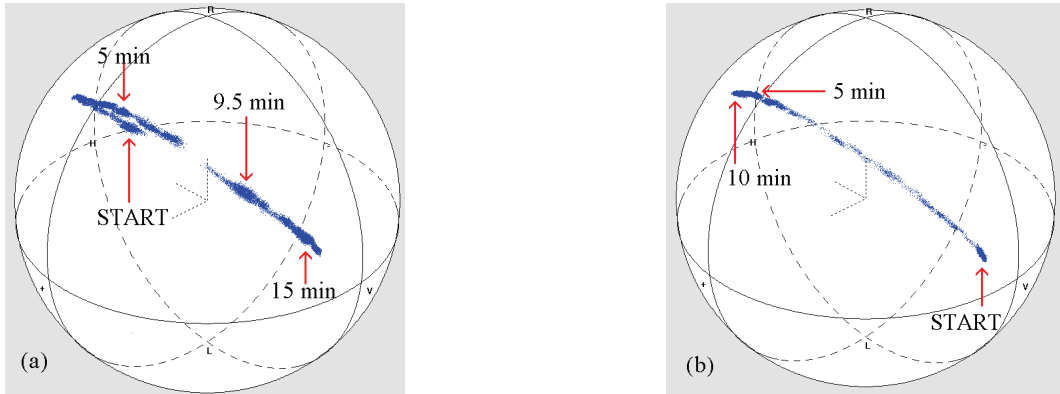


Fig. 3. Traces of polarization rotation results for a single tapered optical fiber, a) during 15 minutes of linearly polarized light, b) return of the polarization when the writing laser is turned off

Similar experiments were carried out with a highly overcoupled coupler (HOCC) coated with the azopolymer. In this case we used a write laser beam from a solid state laser (475 nm, maximum output power 20 mW); the registered polarization traces are shown in Fig. 4. Almost at the same moment that the write beam impinges the device, the polarization started to change rapidly. For this device, we also recorded changes in the output spectrum of the fiber laser, these are shown in Fig. 5. As can be seen from the figure, the optically induced birefringence ceases laser emission, owing to changes in the optimal intra-cavity birefringence adjusted previously. Upon turning the write beam off the output polarization returned to along the same trajectory very close to its original position. Notice that laser emission is not achieved again after the write beam is turned off, indicating that the final polarization state is not exactly the initial one. Nonetheless, the ASE registered in the spectra does show that the birefringence tends to return to its original state.

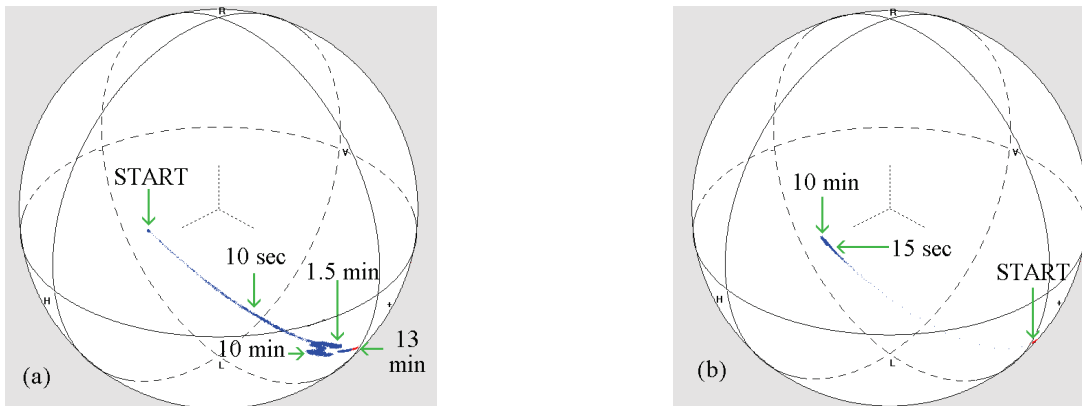


Fig. 4. Traces of polarization rotation results for a highly overcoupled fused optical fiber coupler, a) during 10 minutes of linearly polarized light, b) return of the polarization when the writing laser is turned off.

Previous works using the guest-host technique to incorporate azobenzenes into polymer matrices rely on PS or PMMA, however, their use as coatings for fiber devices is not practical due to their high refractive index. To our knowledge, the use of PDMS as a host matrix for azobenzenes has not been reported yet for fiber optic devices, and our results show promising results for developing all-fiber optically controlled polarization devices. Furthermore, this host

matrix offers other attractive properties like softness, which could be useful for developing fiber optic devices based on bending induced by light ⁸, besides the relation base/curing agent bring different viscosity and hardness giving the chance of apply it for different areas and uses, so there is a good field of study and characterization.

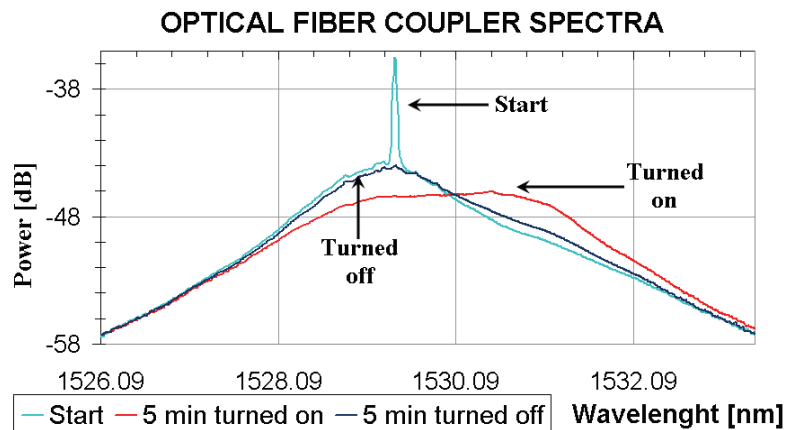


Fig. 5. Spectra of the fiber ring laser cavity with azopolymer.

4. CONCLUSIONS

We have demonstrated azopolymer based fiber optic devices. Tapered optical fibers and fused optical fiber couplers were coated with azobenzene and PDMS compounds and changes in birefringence due to photoisomerization by irradiation of linearly polarized laser light, were obtained. These devices were incorporated in a fiber ring laser cavity and the photo-induced birefringence was monitored through changes in the polarization state of the fiber laser output. These promising results may lead to the development of all-fiber optically driven polarization rotators and switches upon optimizing the polymeric compounds.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Laura Oropeza, Mathieu Hautefeuille, Ernesto Rivera and Miguel A. Canseco for invaluable technical support and useful discussions. This work was supported by DGAPA-UNAM through grant PAPIIT-IN116509.

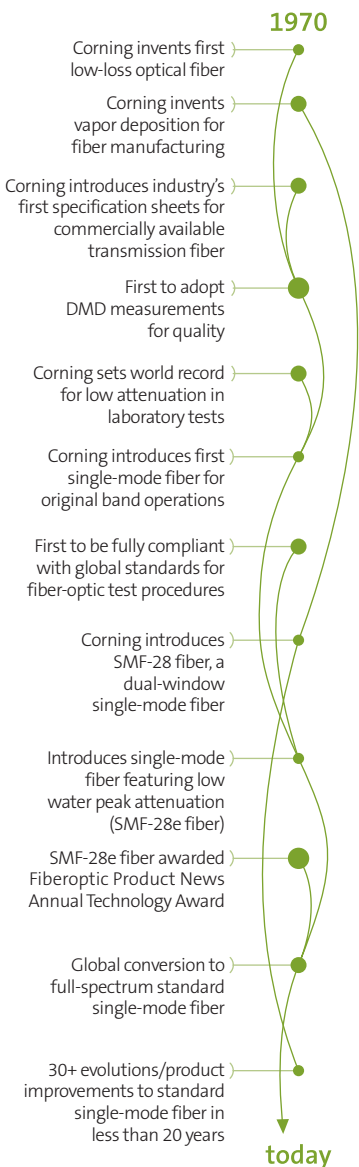
REFERENCES

- [1] R. Ulrich, A. Simon, "Polarization optics of twisted single-mode fibers," *Applied Optics*, Vol. 18, Issue 13, pp. 2241-2251 (1979).
- [2] Mendonça C. R., Misoguti L., Andrade A. A., Yamaki S. B., Dias V. D., Atvars T. D. Z., Oliveira Jr. O. N. "Photoinduced birefringence in di-azo compounds in polystyrene and poly(methyl methacrylate) guest-host systems," *OM* 30 216–221, p.p 216-221 (2007).
- [3] Priimägi A., [Polymer-azobenzene complexes: from supramolecular concepts to efficient photoresponsive polymers], Doctoral dissertation, TKK Dissertations 183, Espoo, 1-40 (2009).
- [4] Balakrishnan M., Klein E. J., Diemeer M. B. J., Driessen A., Faccini M., Verboom W., Reinhoudt D. N., Leinse A., "Fabrication of an electro-optic polymer microring resonator," *IEEE/LEOS Benelux Chapter*, 73-76 (2006).
- [5] Kitaoka K., Si J., Mitsuyu T., Hirao K., "Photoinduced highly efficient second-harmonic generation in azo-dye-doped thick films," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39 (Part 2, No.4B), pp. L 363–L 365 (2000).
- [6] Barada D., Fukida T., Sumimura H., Iitoh M., Yataga T., "Orientational stability of azobenzene-containing materials in polarization recording," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 47 (No. 2), pp. 1203–1207 (2008)
- [7] Hn J. M., Han J. W., Chun J. Y., Ok C. H., Seo D. S., "Novel encapsulation method for flexible organic light-emitting diodes using poly(dimethylsiloxane)," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 47 (No. 12), pp. 8986-8987 (2008).
- [8] Yu Y., Nakano M., Ikeda T., "Directed bending of a polymer film by light," *NATURE*, Vol. 425, p. 145 (2003).

APÉNDICE B:

Hoja de especificaciones de la fibra monomodal
SMF-28e

Corning® SMF-28e® Optical Fiber Product Information



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 (Categories A, B, C & D)
 - IEC Specifications 60793-2-50 Type B1.3
 - TIA/EIA 492-CAAB
 - Telcordia's GR-20
 - ISO 11801 OS2
- * 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, an ITU-T G.652.D-compliant 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 $+85^\circ\text{C}$

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: opticalfibres@corning.com
Please specify the fiber type, attenuation
and quantity when ordering.

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_d)	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 nm $\leq \lambda \leq$ 1625 nm

λ = Operating Wavelength

Cladding Non-Circularity

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

Corning Incorporated
www.corning.com/opticalfiber

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

Ph: 607-248-2000

Email: cofic@corning.com

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.

©2007, Corning Incorporated

APÉNDICE C:

Hoja técnica de seguridad del Rojo Disperso 1
(DR1)

1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DE LA COMPAÑÍA

Nombre del producto : Disperse Red 1

Referencia : 344206
Marca : Aldrich

Compañía : Sigma-Aldrich Quimica, S.A. de C.V.
Parque Industrial Toluca 2000
Calle 6 Norte No. 107
50200 TOLUCA
MEXICO

Teléfono : +5218000075300
Fax : +5218007129920
Teléfono de Urgencia :

2. COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

Sinónimos : N-Ethyl-N-(2-hydroxyethyl)-4-(4-nitrophenylazo)aniline

Formula : $C_{16}H_{18}N_4O_3$

Peso molecular : 314.34 g/mol

No. CAS	No. CE	No. Indice	Concentración
2-[Ethyl[4-[(4-nitrophenyl)azo]phenyl]amino]ethanol			
2872-52-8	220-704-3	-	-

3. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS**Revisión de la Emergencia****Peligros OSHA**

Sensibilizador por contacto con la piel

HMIS Classification**Health Hazard:** 2**Flammability:** 0**Physical hazards:** 0**Clasificación NFPA****Peligro para la salud:** 2**Fuego:** 0**Peligro de Reactividad:** 0**Efectos potenciales para la Salud****Inhalación** Puede ser nocivo si se inhala. Puede provocar una irritación en el tracto respiratorio.**Piel** Puede ser nocivo si es absorbido por la piel. Puede provocar una irritación de la

Ojos
Ingestión

piel.
Puede provocar una irritación en los ojos.
Puede ser nocivo si es tragado.

4. PRIMEROS AUXILIOS

Consejo general

Consultar un médico. Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio. Retire a la persona de la zona peligrosa.

Si es inhalado

Si aspiró, mueva la persona al aire fresco. Si no respira, administrar respiración artificial. Consultar un médico.

En caso de contacto con la piel

Eliminar lavando con jabón y mucha agua. Consultar un médico.

En caso de contacto con los ojos

Lávese a fondo con agua abundante durante 15 minutos por lo menos y consulte al médico.

Si es tragado

Nunca debe administrarse nada por la boca a una persona inconsciente. Enjuague la boca con agua. Consultar un médico.

5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

Características inflamables

Punto de ignición sin datos disponibles

Temperatura de ignición sin datos disponibles

Medios de extinción adecuados

Usar agua pulverizada, espuma resistente al alcohol, productos químicos secos o dióxido de carbono.

Equipo de protección especial para el personal de lucha contra incendios

Si es necesario, usar equipo de respiración autónomo para la lucha contra el fuego.

6. MEDIDAS EN CASO DE LIBERACIÓN ACCIDENTAL

Precauciones personales

Utilícese equipo de protección individual. Evite la formación de polvo. Evitar respirar el polvo. Asegúrese una ventilación apropiada.

Precauciones para la protección del medio ambiente

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

Métodos de limpieza

Recoger y preparar la eliminación sin originar polvo. Guardar en contenedores apropiados y cerrados para su eliminación.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Manipulación

Evítese la formación de polvo y aerosoles.

Debe disponer de extracción adecuada en aquellos lugares en los que se forma polvo. Disposiciones normales de protección preventivas de incendio.

Almacenamiento

Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado.

Conservar en un lugar seco.

8. CONTROLES DE LA EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN PERSONAL

No contiene sustancias con valores límites de exposición profesional.

Protección personal

Protección respiratoria

Donde el asesoramiento de riesgo muestre que los respiradores purificadores de aire son los apropiados, usar máscara de polvo tipo N95 (EEUU) o tipo P1 (EN 143) Usar respiradores y componetes testados y aprobados bajo los standards gubernamentales apropiados como NIOSH (EEUU) o CEN (UE)

Protección de las manos

Manipular con guantes.

Protección de los ojos

Gafas de seguridad

Protección de la piel y del cuerpo

Elegir una protección para el cuerpo según la cantidad y la concentración de la sustancia peligrosa en el lugar de trabajo.

Medidas de higiene

Manipular con las precauciones de higiene industrial adecuadas, y respetar las prácticas de seguridad. Lávense las manos antes de los descansos y después de terminar la jornada laboral.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Aspecto

Estado físico	polvo
Color	violeta oscuro

Datos de Seguridad

pH	sin datos disponibles
Punto de fusión	160 - 162 °C (320 - 324 °F)
Punto de ebullición	sin datos disponibles
Punto de ignición	sin datos disponibles
Temperatura de ignición	sin datos disponibles
Límite de explosión, inferior	sin datos disponibles
Límite de explosión, superior	sin datos disponibles
Solubilidad en agua	sin datos disponibles

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad en almacén

Estable bajo las condiciones de almacenamiento recomendadas.

Materias que deben evitarse

Oxidantes

Productos de descomposición peligrosos

Productos de descomposición peligrosos formados en condiciones de incendio. - Óxidos de carbono, óxidos de nitrógeno (NOx)

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Toxicidad aguda

sin datos disponibles

Irritación y corrosión

sin datos disponibles

Sensibilización

Pueden provocar una reacción alérgica de la piel.

Exposición crónica

IARC: No component of this product present at levels greater than or equal to 0.1% is identified as probable, possible or confirmed human carcinogen by IARC.

ACGIH: No se identifica ningún componente de este producto, que presente niveles mayores que o el igual a 0,1% como cancerígeno o como carcinógeno potencial por la ACGIH.

NTP: En este producto no se identifica ningún componente, que presente niveles mayores que o iguales a 0.1%, como agente carcinógeno conocido o anticipado por el (NTP) Programa Nacional de Toxicología.

OSHA: No se identifica ningún componente de este producto, que presente niveles mayores que o el igual a 0,1% como cancerígeno o como carcinógeno potencial por la (OSHA) Administración de Salud y Seguridad Ocupacional.

Signos y Síntomas de la Exposición

Según nuestras informaciones, creemos que no se han investigado adecuadamente las propiedades químicas, físicas y toxicológicas.

Efectos potenciales para la Salud

Inhalación Puede ser nocivo si se inhala. Puede provocar una irritación en el tracto respiratorio.

Piel Puede ser nocivo si es absorbido por la piel. Puede provocar una irritación de la piel.

Ojos Puede provocar una irritación en los ojos.

Ingestión Puede ser nocivo si es tragado.

Información Adicional

RTECS: KL0320000

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Informaciones sobre eliminación (permanencia y degradabilidad)

sin datos disponibles

Efectos ecotoxicológicos

sin datos disponibles

Información complementaria sobre la ecología

sin datos disponibles

13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN

Producto

Observar todos los reglamentos estatales y locales sobre la protección del medio ambiente. Para la eliminación de este producto, dirigirse a un servicio profesional autorizado. Disolver o mezclar el producto con un solvente combustible y quemarlo en un incinerador apto para productos químicos provisto de postquemador y lavador.

Envases contaminados

Eliminar como producto no usado.

14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

DOT (US)

Not dangerous goods

IMDG

Not dangerous goods

IATA

Not dangerous goods

15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

Peligros OSHA

Sensibilizador por contacto con la piel

DSL Estado

Todos los componentes de este producto están en la lista canadiense DSL.

SARA 302 Componentes

SARA 302: Este material no contiene productos químicos sujetos a los requisitos reportados por SARA Título III, sección 302.

SARA 313 Componentes

SARA 313: Este material no contiene ningún componente químico con los conocidos números CAS que exceden el umbral de los niveles reportados (De Minimis) establecidos por SARA título III, sección 313.

SARA 311/312 Peligros

Peligro Agudo para la Salud

Massachusetts Right To Know Componentes

No hay componentes sujetos al Acta de Derecho a Saber de Massachusetts.

Pennsylvania Right To Know Componentes

2-[Ethyl[4-[(4-nitrophenyl)azo]phenyl]amino]ethanol	No. CAS 2872-52-8	Fecha de revisión
---	----------------------	----------------------

New Jersey Right To Know Componentes

2-[Ethyl[4-[(4-nitrophenyl)azo]phenyl]amino]ethanol	No. CAS 2872-52-8	Fecha de revisión
---	----------------------	----------------------

Prop. 65 de California Componentes

Este producto no contiene ningún producto químico conocido en el estado de California por provocar cáncer, defectos de nacimiento o otros perjuicios.

16. OTRA INFORMACIÓN

Otra datos

APÉNDICE D:

Hojas de información sobre la matriz polimérica
(PDMS)

Información sobre los Encapsulantes de Silicona

Dow Corning[®]

Las Siliconas y la Electrónica

La protección segura y a largo plazo de circuitos y componentes electrónicos sensibles se ha vuelto muy importante en muchas de las aplicaciones electrónicas delicadas y especializadas de hoy en día. Las siliconas funcionan como aislantes dieléctricos duraderos, barreras contra contaminantes ambientales y como protección contra el impacto y la absorción de la vibración en un amplio rango de temperaturas y humedad.

Además de mantener sus propiedades físicas y eléctricas sobre un amplio rango de condiciones, las siliconas son resistentes a la degradación con ozono y radiación ultravioleta, poseen buena estabilidad química y están disponibles en una gran variedad de formas útiles como recubrimientos conformables, encapsulantes y adhesivos. Con su amplio rango de productos de uso general y especializados, Dow Corning le ofrece una selección de materiales para todas sus necesidades.

DESCRIPCIÓN

Los encapsulantes de silicona *Dow Corning*[®] se presentan en kits de dos componentes líquidos compuestos de:

Proporción de la mezcla (en peso o volumen)	Componentes (presentación)
1:1	Parte A/Parte B
10:1	Base/Agente de curado

Cuando los componentes líquidos se mezclan completamente, la mezcla se cura a un elastómero flexible adecuado para su uso en la protección de elementos electrónicos y eléctricos. Los encapsulantes de silicona *Dow Corning* se curan sin reacción exotérmica a una velocidad constante independiente del grosor de la sección o del grado de confinamiento. Los elastómeros de silicona *Dow Corning* no necesitan proceso de pos-curado y pueden ser utilizados inmediatamente después de la terminación del programa de curado en un rango de temperatura -45 a 200°C (-49 a 392°F). Algunos materiales han sido clasificados por Underwriters Laboratories y cumplen con especificaciones militares. Los encapsulantes de silicona estándares requieren un tratamiento de la superficie con imprimación además de una limpieza a fondo para adherirse, mientras que los encapsulantes de silicona sin imprimación sólo necesitan una limpieza de la superficie.

Encapsulantes de silicona

Tipo

Elastómero de silicona bicomponente

Estado físico

Líquido fluido que cura a un elastómero flexible

Propiedades especiales

Velocidad de curado constante, independiente del grosor de la sección o del grado de confinamiento; el rango de uso es de -45 a 200°C (-49 a 392°F) y no requiere proceso de pos-curado.

Usos principales

Protección de dispositivos electrónicos y eléctricos

Producto	Descripción	Características
Encapsulantes de silicona		
<i>Sylgard</i> [®] 160 Elastómero de silicona	Bajo costo; buena conductividad térmica	Dos componentes; proporción de mezcla 1:1, curado a temperatura ambiente o curado rápido por calor; encogimiento mínimo; curado no exotérmico; sin solventes o subproductos de curado; reparable; buenas propiedades dieléctricas; curado en profundidad; elastómero flexible.
<i>Sylgard</i> [®] 165 Elastómero de silicona	Curado rápido; bajo costo; buena conductividad térmica	
<i>Sylgard</i> [®] 170 Elastómero de silicona	Baja viscosidad	
<i>Sylgard</i> [®] 170 Elastómero de silicona de curado rápido	Curado rápido; baja viscosidad	
<i>Dow Corning</i> [®] 96-082 A y B Encapsulante	Muy baja viscosidad; de combustión lenta; no se funde; autoextinguible; vida prolongada de la mezcla; útil en amplio rango de temperaturas	
<i>Sylgard</i> [®] 182 Elastómero de silicona	Transparente; vida prolongada de la mezcla; curado por calor	Dos componentes; proporción de mezcla 10:1; encogimiento mínimo; curado no exotérmico; sin solventes o subproductos de curado; curado en profundidad; reparable; buenas propiedades dieléctricas; elastómero flexible.
<i>Sylgard</i> [®] 184 Elastómero de silicona	Transparente; curado a temperatura ambiente o curado rápido por calor	
<i>Sylgard</i> [®] 186 Elastómero de silicona	Transparente; curado a temperatura ambiente o curado rápido por calor; alta resistencia al desgarre	
<i>Dow Corning</i> [®] 3-6121 Elastómero encapsulante	Desempeño a temperaturas por debajo de -65°C (-85°F); transparente; alta resistencia al desgarre y a la tracción; curado a temperatura ambiente y curado rápido por calor; alto índice de refracción	
Encapsulantes de silicona sin imprimación		
<i>Sylgard</i> [®] 275 Elastómero de silicona	Excelente adhesión sin imprimación; curado por calor; elastomérico	Dos componentes; proporción de mezcla 1:1, encogimiento mínimo; curado no exotérmico; sin solventes o subproductos de curado; reparable; buenas propiedades dieléctricas.
<i>Dow Corning</i> [®] 3-6642 Adhesivo termoconductor	Excelente conductividad térmica; autoimprimado; líquido de baja viscosidad; elastomérico	
<i>Dow Corning</i> [®] 3-8264 Adhesivo de silicona sin imprimación	Excelente adhesión sin imprimación; curado por calor; elastomérico	
<i>Dow Corning</i> [®] 567 Encapsulante de silicona sin imprimación	Curado por calor; adhesión sin imprimación; elastomérico	

Producto	Usos Principales	Métodos de aplicación	Curado ^{1,2}
Encapsulantes de silicona			
<i>Sylgard</i> [®] 160 Elastómero de silicona	Aplicaciones aislantes generales: generadores, conexiones, sensores, controles industriales, transformadores, amplificadores resistencias de alto voltaje, interruptores	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; mezcla y aplicación automatizada; mezclado manual.	24 horas a 25°C (77°F) 10 minutos a 100°C (212°F) 5 minutos a 150°C (302°F)
<i>Sylgard</i> [®] 165 Elastómero de silicona		Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; mezcla y aplicación automatizada.	5 minutos a 25°C (77°F)
<i>Sylgard</i> [®] 170 Elastómero de silicona		Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; mezcla y aplicación automatizada; mezclado manual.	24 horas a 25°C (77°F) 20 minutos a 70°C (158°F) 15 minutos a 85°C (185°F) 10 minutos a 100°C (212°F)
<i>Sylgard</i> [®] 170 Elastómero de silicona de curado rápido		Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; mezcla y aplicación automatizada.	10 minutos a 25°C (77°F)
<i>Dow Corning</i> [®] 96-082 A y B Encapsulante	Aplicaciones que requieren una impregnación a fondo que sólo es posible con una resina de muy baja viscosidad.	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; mezcla y aplicación automatizada; mezclado manual.	30 minutos a 150°C (302°F)
<i>Sylgard</i> [®] 182 Elastómero de silicona	Aplicaciones generales de aislantes: generadores, conexiones, sensores, controles industriales, transformadores, amplificadores resistencias eléctricas de alto voltaje, interruptores; adhesivos y encapsulantes para células solares; adhesivos para el proceso de circuitos integrados guiado por rayos.	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 10:1 en peso o volumen; mezcla y aplicación automatizada; mezclado manual.	45 minutos a 100°C (212°F) 20 minutos a 125°C (257°F) 10 minutos a 150°C (302°F)
<i>Sylgard</i> [®] 184 Elastómero de silicona			~48 horas a temperatura ambiente 45 minutos a 100°C (212°F) 20 minutos a 125°C (257°F) 10 minutos a 150°C (302°F)
<i>Sylgard</i> [®] 186 Elastómero de silicona			~48 horas a temperatura ambiente 30 minutos a 100°C (212°F) 15 minutos a 150°C (302°F)
<i>Dow Corning</i> [®] 3-6121 Elastómero encapsulante			~48 horas a temperatura ambiente 20 minutos a 100°C (212°F) 10 minutos a 150°C (302°F)
Encapsulantes de silicona sin imprimación			
<i>Sylgard</i> [®] 275 Elastómero de silicona	Para aplicaciones que requieren encapsulantes con buena adhesión sin imprimación y bajas temperaturas de curado.	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; se puede usar mezcla y aplicación automatizada o manual.	45 minutos a temperatura ambiente <5 minutos a 80°C (176°F)
<i>Dow Corning</i> [®] 3-6642 Adhesivo termoconductor	Para aplicaciones que requieren encapsulantes de alta conductividad térmica y buena adhesión sin imprimación.	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; se puede usar mezcla y aplicación automatizada o manual. Nota: Refrigerar este producto para garantizar su vida útil.	20 minutos a 100°C (212°F) 5 minutos a 150°C (302°F)
<i>Dow Corning</i> [®] 3-8264 Adhesivo de silicona sin imprimación	Para aplicaciones que requieren encapsulantes con buena adhesión sin imprimación y bajas temperaturas de curado.	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; se puede usar mezcla y aplicación automatizada o manual.	150 minutos a 70°C (158°F) 30 minutos a 115°C (239°F)
<i>Dow Corning</i> [®] 567 Encapsulante de silicona sin imprimación	Para aplicaciones de encapsulación con adhesión sin imprimación de bajo costo.	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; se puede usar mezcla y aplicación automatizada o manual.	90 minutos a 100°C (212°F) 60 minutos a 125°C (257°F) 15 minutos a 150°C (302°F)

¹ Estos datos fueron obtenidos con muestras de 50-100 gramos de un lote típico y pueden ser usados para la estimación inicial de los tiempos de curado. El tiempo de curado puede variar levemente entre lotes y puede variar según la masa térmica de sus componentes y de su curva de calentamiento. Se recomienda efectuar una prueba preliminar para confirmar el curado adecuado para su aplicación.

² Para los productos de adhesión sin imprimación, el tiempo de curado está basado en el tiempo necesario para alcanzar la dureza. Para alcanzar la adhesión completa puede ser necesario mantener la temperatura de curado por un período más prolongado.

PROPIEDADES TÍPICAS

Estos valores no sirven para preparar especificaciones

Producto	Proporción de la mezcla	Color	Viscosidad en centipoise o mPa*s	Dureza Shore A	Peso Especifico	Tiempo de trabajo a temperatura ambiente	Adhesión sin imprimación, cizallamiento			Conductividad térmica		Coeficiente lineal de expansión térmica, $\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ o ppm	Vida útil a partir de la fecha de fabricación a temperatura ambiente, en meses
							psi	MPa	kgf/cm ²	Vatio-metro- $^\circ\text{K}$	cal/cm ² • segundo $^\circ\text{C}$		
Encapsulantes de silicona													
Sylgard™ 160 Elastómero de silicona	1:1	Gris	8775	60	1,57	30 min	NA	NA	NA	0,58	1,4x10 ⁻³	240	18
Sylgard™ 165 Elastómero de silicona	1:1	Gris	5000	52	1,57	<2 min	NA	NA	NA	0,58	1,4x10 ⁻³	230	18
Sylgard™ 170 Elastómero de silicona	1:1	Gris oscuro a negro	2900	40	1,37	15 min	NA	NA	NA	0,40	9,6x10 ⁻⁴	270	24
Sylgard™ 170 Elastómero de silicona de rápido curado	1:1	Gris oscuro a negro	2850	42	1,37	<5 min	NA	NA	NA	0,40	9,6x10 ⁻⁴	-	18
Dow Corning® 96-082 A y B Encapsulante	1:1	Negro	1100	31	1,21	14 días	NA	NA	NA	0,30	7,2x10 ⁻⁴	285	12
Sylgard™ 182 Elastómero de silicona	10:1	Transparente	3900	50	1,03	>8 horas	NA	NA	NA	0,18	4,3x10 ⁻⁴	310	24
Sylgard™ 184 Elastómero de silicona	10:1	Transparente	3900	50	1,03	>2 horas	NA	NA	NA	0,18	4,3x10 ⁻⁴	310	24
Sylgard™ 186 Elastómero de silicona	10:1	Traslúcido	65.000	24	1,12	2 horas	NA	NA	NA	0,2	4,8x10 ⁻⁴	330	12
Dow Corning® 3-6121 Elastómero encapsulante	10:1	Traslúcido	25.000	30	1,13	2 horas	NA	NA	NA	0,18	4,3x10 ⁻⁴	290	18
Encapsulantes de silicona sin imprimación													
Sylgard™ 275 Elastómero de silicona	1:1	Gris	2100	40	1,37	<15 min	230	1,6	16,2	0,45	1,1x10 ⁻³	NA	6
Dow Corning® 3-6642 Adhesivo termoconductor	1:1	Gris	5100	82	2,21	0,5 horas	470	3,2	33,0	1,00	2,4x10 ⁻³	180	8 a <5 $^\circ\text{C}$ (41 $^\circ\text{F}$)
Dow Corning® 3-8264 Adhesivo de silicona sin imprimación	1:1	Negro	2900	45	1,32	5 horas	385	2,6	27,0	0,35	8,4x10 ⁻⁴	290	9
Dow Corning® 567 Encapsulante de silicona sin imprimación	1:1	Negro	1500	45	1,24	>3 días	140	1,0	9,8	0,30	7,2x10 ⁻⁴	300	24

Para los autores de especificaciones: obtenga copias de las Especificaciones de Ventas de Dow Corning para estos productos y utilícelas como base de sus especificaciones. Las especificaciones de ventas se pueden obtener en las Oficinas de Ventas o de Servicio al Cliente de Dow Corning.

Producto	Certificación UL		Especificación militar		Rigidez dieléctrica		Constante dieléctrica a 100 Hz	Constante dieléctrica a 100 kHz	Resistividad volumétrica, ohm-cm	Factor de disipación a 100 Hz	Factor de disipación a 100 kHz
	Clasificación por inflamabilidad	Índice de temperatura UL, Eléctrica / mecánica, °C	Especificación	Tipo, Clase, Grupo	voltio/ mil	kV/ mm					
<i>Sylgard</i> TM 160 Elastómero de silicona	94 V-0	105/105	NA	NA	530	20,9	3,30	3,20	1,0x10 ¹⁵	0,01	0,002
<i>Sylgard</i> TM 165 Elastómero de silicona	94 V-0	105/105	NA	NA	530	20,9	3,30	3,20	1,0x10 ¹⁵	0,01	0,002
<i>Sylgard</i> TM 170 Elastómero de silicona	94 V-0	170/170	MIL-PRF-23586F (Grado B2)	Tipo I, Clase II, QPL	480	18,9	3,17	3,16	3,1x10 ¹³	0,003	<0,001
<i>Sylgard</i> TM 170 Elastómero de silicona de curado rápido	94 V-0	170/170	NA	NA	530	20,9	2,97	2,90	1,4x10 ¹⁵	0,005	<0,001
<i>Dow Corning</i> [®] 96-082 A y B Encapsulantes	94 V-0	170/170	NA	NA	500	19,7	3,14	3,12	9,5x10 ¹⁴	0,0055	<0,001
<i>Sylgard</i> TM 182 Elastómero de silicona	94 V-1	130/130	MIL-I-81550C	Tipo II, QPL	540	21,2	2,65	2,65	1,2x10 ¹⁴	0,0005	<0,001
<i>Sylgard</i> TM 184 Elastómero de silicona	94 V-1	130/130	MIL-I-81550C	Tipo I, QPL	540	21,2	2,65	2,65	1,2x10 ¹⁴	0,0005	<0,001
<i>Sylgard</i> TM 186 Elastómero de silicona	94 HB	140/140	NA	NA	450	17,7	2,93	2,87	1,1x10 ¹⁴	0,0012	<0,001
<i>Dow Corning</i> [®] 3-6121 Elastómero encapsulante	NA	NA	NA	NA	415	16,3	2,92	2,92	1,4x10 ¹⁴	0,01	<0,001
<i>Sylgard</i> TM 275 Elastómero de silicona	94 V-0	105/105	NA	NA	480	18,9	3,31	3,00	6,4x10 ¹⁴	0,087	0,006
<i>Dow Corning</i> [®] 3-6642 Adhesivo termoconductor	94 V-0	105/105	NA	NA	440	17,3	-	4,20	1,1x10 ¹³	-	0,0013
<i>Dow Corning</i> [®] 3-8264 Adhesivo de silicona sin imprimación	NA	NA	NA	NA	545	21,4	3,11	3,05	3,5x10 ¹⁴	0,007	<0,001
<i>Dow Corning</i> [®] 567 Encapsulante de silicona sin imprimación	94 V-0	105/105	MIL-PRF-23586F (Grado B2)	Tipo I, Clase IV, QPL	520	20,5	2,85	2,79	1,0x10 ¹⁴	0,008	0,002

MODO DE EMPLEO

Mezcla – 1:1 / Parte A:Parte B

Los encapsulantes de silicona 1:1 *Dow Corning* se presentan en dos componentes que no requieren que sean del mismo lote. La proporción de la mezcla 1:1 en peso o volumen simplifica el proceso. Para asegurarse de que la distribución del filler es uniforme, los componentes A y B deben ser homogenizados completamente antes de ser combinados en una mezcla 1:1. Cuando están completamente mezclados, la mezcla de los líquidos de parte A y B debe tener una apariencia uniforme. La presencia de estrías de color más claro o de marmolado indica una mezcla incompleta que puede resultar en un curado incompleto.

Debido a las características de curado rápido de algunos encapsulantes incluidos en esta hoja de datos, se debe usar equipo automatizado para mezcla y aplicación. En aplicaciones sensibles al atrapado de aire, se debe efectuar la extracción de aire al vacío a una presión de 710 a 760mm Hg.

Mezcla –10:1/Base:Agente de curado

Los encapsulantes de siliconas 10:1 *Dow Corning* se presentan en dos componentes, la base y el agente de curado de lotes iguales, que son mezclados en una proporción en peso de 10 partes de base a una parte de agente de curado. Luego de mezclar completamente la base y el agente de curado, se agita ligeramente la mezcla para disminuir la introducción de aire. Se deja asentar la mezcla durante 30 minutos antes de verterla para eliminar el aire que se pueda haber incorporado durante el mezclado. Si aún se encuentran burbujas de aire presente, se recomienda la extracción de aire al vacío. Desgasifique en un envase que sea por lo menos cuatro veces el volumen de líquido para permitir la expansión del material. El aire atrapado en la mezcla se puede extraer al vacío a una presión de 710 a 760mm Hg.

GUÍA DE SELECCIÓN DE LA IMPRIMACIÓN

Estos valores no se deben utilizar en la preparación de especificaciones.

Imprimación o Promotor de adhesión de <i>Dow Corning</i> [®]	Punto de inflamación, °C (°F)	Contenido de volátiles orgánicos (VOC) gramos/litro ⁴	Propiedades especiales	Para ser usado sobre	Para ser usado con	Ejemplos de productos de silicona
P5200 Transparente ¹	32 (90)	110/705		Mayoría de los metales, vidrio, cerámicas y algunos plásticos	Curado por adición de dos componentes pigmentados	160, 165, 170
1200 Transparente	17 (63)	748				
1200 Rojo	17 (63)	774	Coloreado para fácil identificación			
P5200 Rojo ²	32 (90)	110/705				
1204	15 (59)	774		Mayoría de los metales, vidrio y cerámicas	Todos los de un solo componente con curados en alcohol	3140, 3145, 838, 3-1753
P5204 ³	18 (64)	205/591				
1205	5 (41)	861	Forma película	Mayoría de los plásticos	Todos	
3-6060	37 (99)	780	Mejora la resistencia a la inhibición	Mayoría de los plásticos y metales	Todos los de dos componentes, curados por adición	182, 184, 186
92-023	-4 (25)	678				
<i>Sylgard</i> [®] Prime Coat Recubrimiento de imprimación	-3 (27)	687				

¹ P5200 Transparente es una alternativa de bajo VOC al 1200 Transparente.

² P5200 Rojo es una alternativa de bajo VOC al 1200 Rojo.

³ P5204 es una alternativa de bajo VOC a 1204.

⁴ El valor más bajo de VOC es para estados y distritos donde la administración de la calidad del aire ha reconocido la ausencia de VOC en metilsiloxanos volátiles.

Continúe la aplicación de presión hasta que el líquido se expanda, se asiente a su volumen original y deje de burbujear. Esto puede llevar de 15 minutos a dos horas dependiendo de la cantidad de aire introducido durante el mezclado. Para obtener los mejores resultados en el curado, se debe usar equipo de vidrio o metal durante el mezclado. Durante la mezcla, la agitación debe ser suave para evitar la introducción de aire en exceso.

Vida de la mezcla/ Tiempo de trabajo

La reacción de curado comienza con el proceso de mezclado. Inicialmente, el curado es evidente por el incremento gradual de la viscosidad, seguido por la gelificación y la conversión a un elastómero sólido. La vida de la mezcla se define como el tiempo necesario para que la viscosidad se duplique después de que las partes A y B (la base y el agente de curado) se mezclan. Refiérase a la vida útil de la mezcla para cada encapsulante de silicona.

Proceso y curado

Los encapsulantes de silicona *Dow Corning* que están bien mezclados se puede verter o aplicar directamente al recipiente donde van a ser curados. Se debe tomar precauciones para minimizar la incorporación de aire. Cuando sea práctico se debe verter o aplicar el encapsulante al vacío, especialmente si los componentes siendo encapsulados poseen espacios. Si no se puede usar esta técnica, la unidad debe ser extraída al vacío después de que el encapsulante de silicona es vertido o aplicado.

Los encapsulantes de silicona *Dow Corning* pueden ser curados a temperatura ambiente (25°C/77°F) o por calor. El curado de los encapsulantes que se curan a temperatura ambiente se puede acelerar con calor para obtener un curado rápido. Las condiciones ideales de curación para cada producto se encuentran en la Tabla de Selección de Productos.

PREPARACIÓN DE SUPERFICIES

En aplicaciones donde se requiere adhesión, es necesario el uso de imprimación para los encapsulantes de silicona. Vea la Guía de selección de imprimación para elegir la imprimación adecuada para cada producto. Para obtener los mejores resultados, la imprimación debe ser aplicada en una capa muy fina y uniforme y seguida de una limpieza. Después de la aplicación debe dejarse secar bien al aire antes de aplicar el elastómero de silicona. Instrucciones adicionales para el uso de la imprimación se puede encontrar en la literatura de *Dow Corning* “Como usar las Imprimaciones y Promotores de adhesión de *Dow Corning*” (“How To Use *Dow Corning* Primers and Adhesion Promoters”) (Forma No. 10-366) y en las hojas de información específicas de cada imprimador.

RANGO ÚTIL DE TEMPERATURAS

Para la mayoría de las aplicaciones, los elastómeros de siliconas se pueden utilizar en el rango de temperaturas de -45 a 200°C (-49 a 392°F) por períodos prolongados de tiempo. Sin embargo, a ambos extremos del espectro de temperaturas, el comportamiento de los materiales y su desempeño en algunas aplicaciones puede tornarse compleja y requerir otras consideraciones.

Para el desempeño a bajas temperaturas, el ciclo térmico a condiciones como -55°C (-67°F) puede ser posible pero el desempeño debe ser verificado para todas sus piezas y el armado. Los factores que pueden tener influencia en el desempeño son la configuración y la sensibilidad de los componentes, la velocidad de enfriamiento y los períodos de detención y la historia de temperaturas previa. Existen productos especializados que incluyen *Dow Corning*® 3-6121 Elastómero encapsulante que puede desempeñarse a temperaturas por debajo de -65°C (-85°F).

En el extremo de temperaturas altas, la durabilidad del elastómero de silicona curado es dependiente del tiempo y la temperatura. Como es de esperarse, a medida que sube la temperatura, se acorta la vida útil que le queda al material.

COMPATIBILIDAD

Ciertos materiales, productos químicos, agentes de curado y plastificantes pueden inhibir el curado de los encapsulantes de silicona *Dow Corning*. Los más comunes son:

- Organoestaño y otros compuestos organometálicos
- Caucho de silicona con catalizador de organoestaño
- Azufre, polisulfuros, polisulfonas u otros materiales con azufre
- Aminas, uretanos u otros materiales con aminas
- Plastificantes de hidrocarburos no saturados
- Algunos residuos de flujo de soldadura

Si existe una duda con respecto a que un sustrato o material pueda causar la inhibición del curado, se recomienda efectuar una prueba de compatibilidad a menor escala para verificar si es apropiado para el uso deseado. La presencia de un líquido o de producto sin curar en la interfase entre el material en cuestión y el gel curado indica la incompatibilidad y la inhibición del curado.

FACILIDAD DE REPARACIÓN

Durante la fabricación de elementos electrónicos y eléctricos es frecuente el deseo de rescatar o reclamar unidades dañadas o defectuosas. Para la mayoría de los materiales aislantes y encapsulantes rígidos que no son de silicona, el retiro o el acceso es difícil o imposible sin causar un daño excesivo a los circuitos internos. Los encapsulantes de silicona *Dow Corning* pueden ser removidos selectivamente con relativa facilidad, sin necesidad de reparos o cambios y el área reparada es encapsulada de nuevo con más producto.

Para remover los elastómeros de silicona simplemente recórtelos con una cuchilla afilada y remueva el material no deseado del área a ser reparada. Es mejor quitar los pedazos de elastómero que se encuentran adheridos a sustratos y circuitos raspando mecánicamente y este proceso puede ser facilitado con la aplicación de Fluidos OS *Dow Corning*®.

Antes de aplicar más material encapsulante a un elemento en reparación, raspe la superficie del encapsulante curado con papel abrasivo y enjuague con un solvente adecuado. Esto mejorará la adherencia y le permite al material reparado integrarse a la matriz del encapsulante existente. No se recomienda el uso de la imprimación de silicona Prime Coat para la adherencia entre productos de silicona.

ALMACENAMIENTO Y VIDA ÚTIL

La vida útil está indicada en la etiqueta del producto como la fecha de vencimiento (“Use By”).

Para obtener los mejores resultados, los encapsulantes de silicona *Dow Corning* deben ser almacenados a temperaturas por debajo de 25°C (77°F). Se deben tomar precauciones especiales para evitar que estos productos entren en contacto con la humedad. Los envases deben mantenerse cerrados herméticamente con un mínimo de aire. Los envases que estén parcialmente llenos deben ser purgados con aire seco u otros gases inertes como el nitrógeno.

Información adicional sobre almacenamiento especial o instrucciones de manipulación estarán impresas en los envases del producto.

LIMITACIONES

Estos productos no se prueban ni se califican como adecuados para uso médico o farmacéutico.

ENVASES

En general, los encapsulantes de silicona en mezclas de proporción 1:1 de *Dow Corning* se presentan en envases de peso neto de 0,45 kg, 3,6 kg, 18 kg y 200 kg (1, 8, 40 y 440 libras). Los encapsulantes de silicona en mezclas de proporción 10:1 de *Dow Corning* se presentan en envases de peso neto de 0,5 kg, 5 kg, 25 kg y 225 kg (1,1, 11, 55 y 495 libras). Las opciones de envases pueden variar con el producto. Por más detalles sobre opciones en los envases, usted puede consultar el Servicio a Clientes de *Dow Corning*.

INFORMACIÓN DE SEGURIDAD

NO SE INCLUYE LA INFORMACIÓN SOBRE LA SEGURIDAD DEL PRODUCTO, QUE SE PRECISA PARA SU USO SEGURO. ANTES DE MANEJARLO, LEA LAS HOJAS DE DATOS DE SEGURIDAD DEL PRODUCTO Y DEL MATERIAL, LAS ETIQUETAS DEL ENVASE PARA OBTENER INFORMACIÓN REFERENTE A SU USO SEGURO, LOS RIESGOS FÍSICOS Y RELACIONADOS CON LA SALUD. PUEDE SOLICITAR LA HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL MATERIAL A SU REPRESENTANTE LOCAL DE VENTAS O DISTRIBUIDOR DE DOW CORNING O ESCRIBIENDO AL SERVICIO AL CLIENTE DE DOW CORNING.

INFORMACIÓN DE GARANTÍA – POR FAVOR LEER CON ATENCIÓN

La información que aquí se ofrece es de buena fe y se cree que es precisa. Sin embargo, dado que las condiciones y métodos de utilización de nuestros productos están más allá de nuestro control, dicha información no debe utilizarse como sustituto de las pruebas preliminares por parte del cliente, ya que son esenciales para garantizar que los productos de Dow Corning son plenamente seguros, eficaces y satisfactorios para la aplicación prevista. La única garantía que ofrece Dow Corning se limita a que el producto cumple con las especificaciones de venta de Dow Corning vigentes en el momento del envío. La única solución del usuario debido al incumplimiento de la garantía se limita al reembolso del precio de compra o al reemplazo de todo producto que se haya demostrado que es diferente a lo garantizado. Dow Corning declina específicamente cualquier otra garantía expresa o implícita para un propósito particular o de valor comercial, a menos que Dow Corning provea una garantía específica por escrito y firmada, de adecuación a una determinada aplicación. Dow Corning declina expresamente toda responsabilidad por daños fortuitos o indirectos. Las sugerencias de uso no deben considerarse como incitación para infringir alguna patente.



*LE AYUDAMOS A
INVENTAR EL FUTURO.™*

www.dowcorning.com

Dow Corning y Sylgard son marcas registradas de Dow Corning Corporation.

LE AYUDAMOS A INVENTAR EL FUTURO es una marca registrada de Dow Corning Corporation.

©2001 Dow Corning Corporation. Todos los derechos reservados.

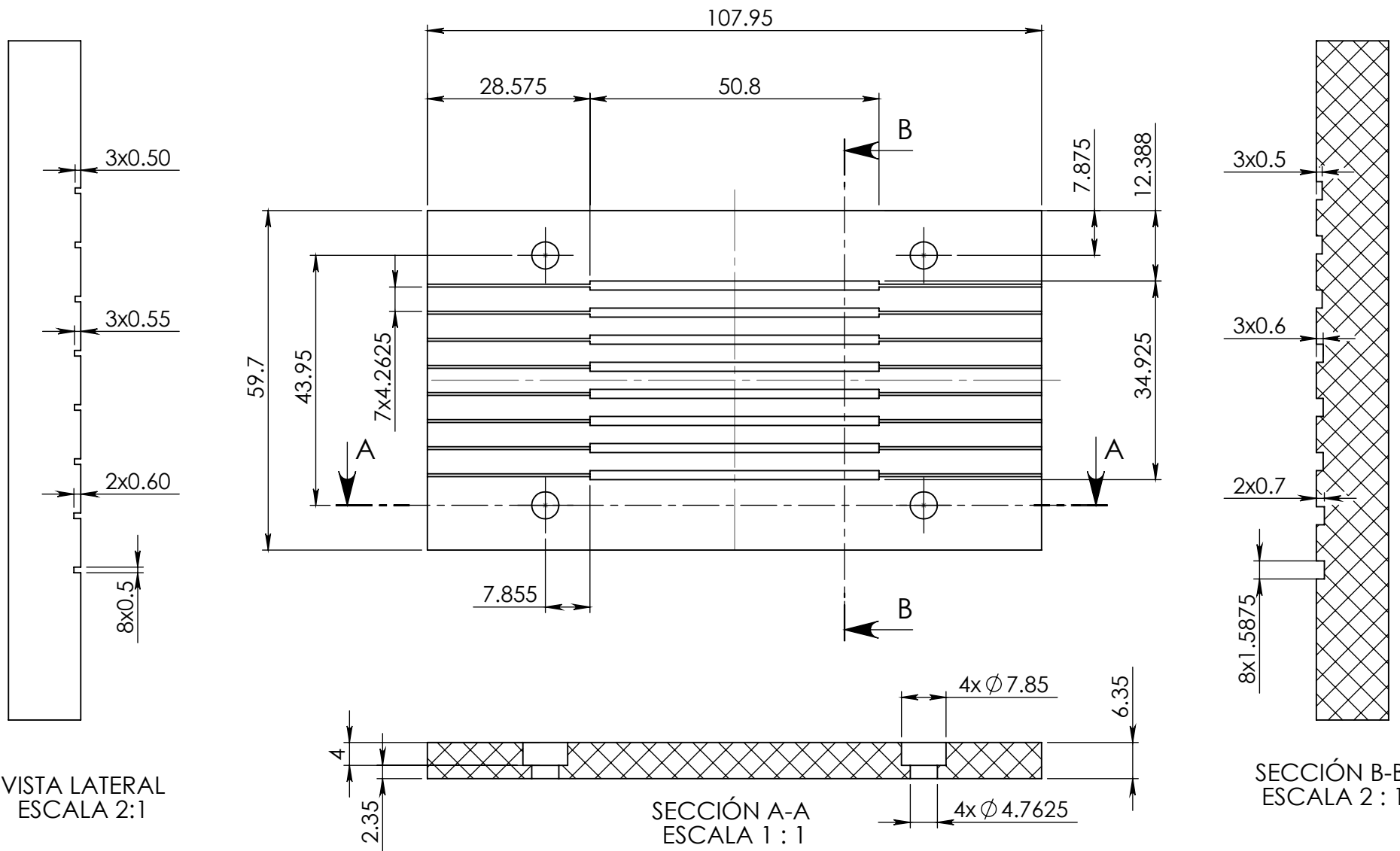
Impresos en E.E.U.U.

FPH 25714

Forma No. 10-898C-05

APÉNDICE E:

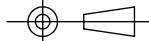
Planos del molde para la fabricación de dispositivos
de fibra óptica recubiertos con azopolímero

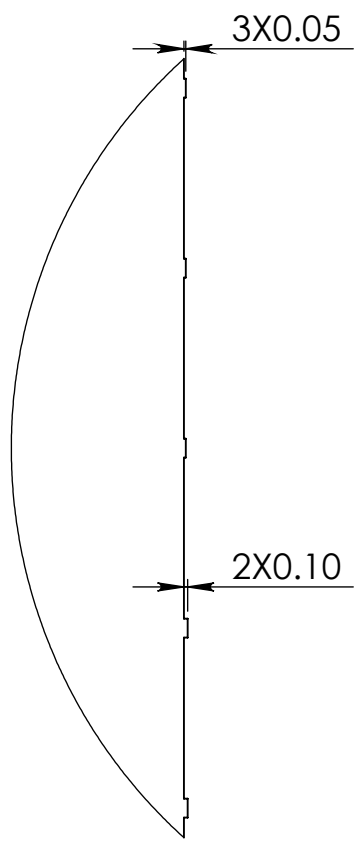


VISTA LATERAL
ESCALA 2:1

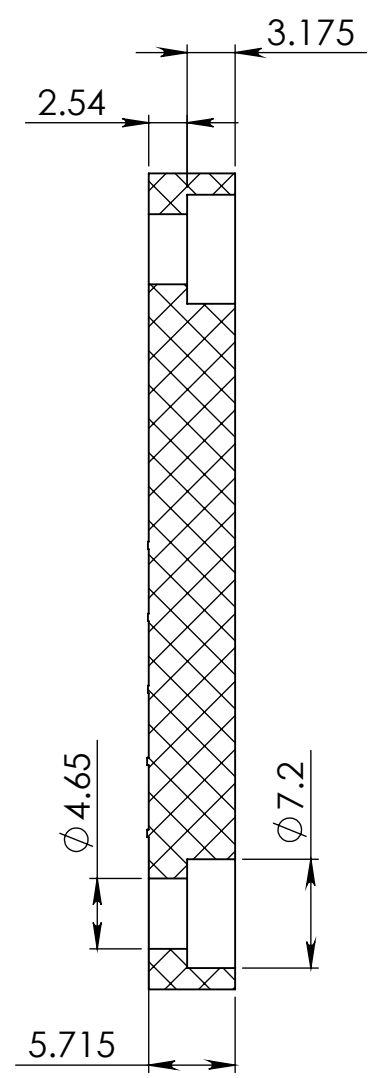
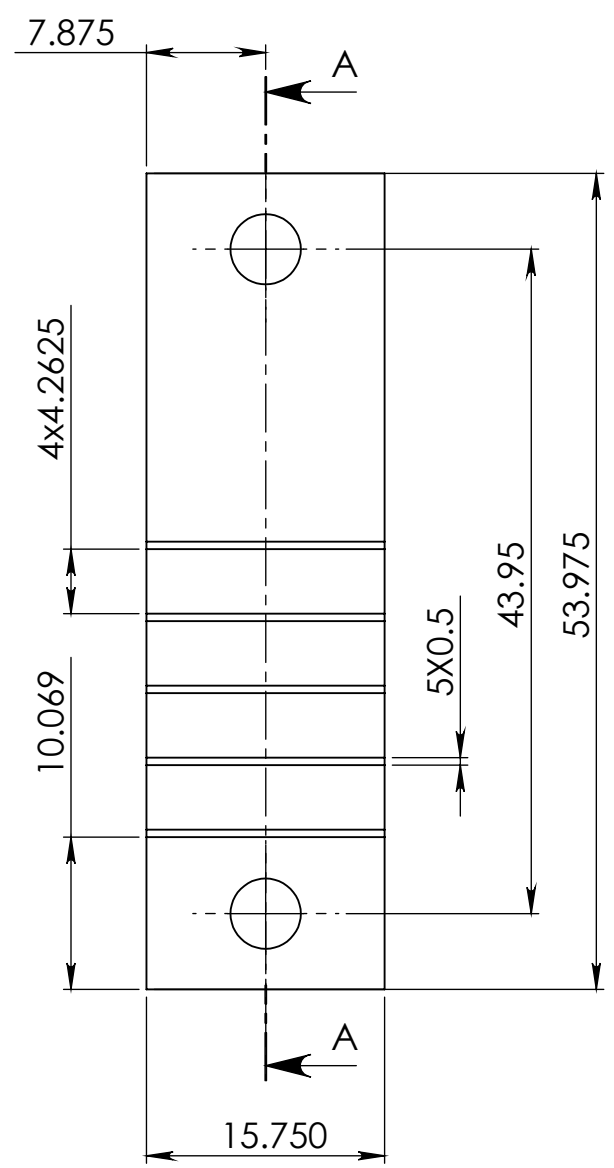
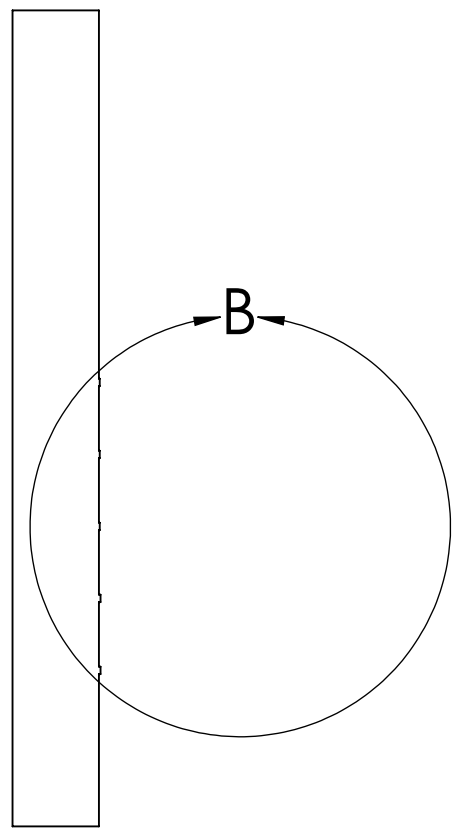
SECCIÓN A-A
ESCALA 1:1

SECCIÓN B-B
ESCALA 2:1

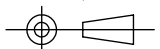
Material: PTFE		Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez		Fecha Junio 2010	
Escala: 1:1		Acot.: mm.		Cant.: 1	
		Base acanlada Molde para recubrimiento de acopladores de fibra óptica		Revisó: JHC	
				Tamaño: Carta	
PLANO A					

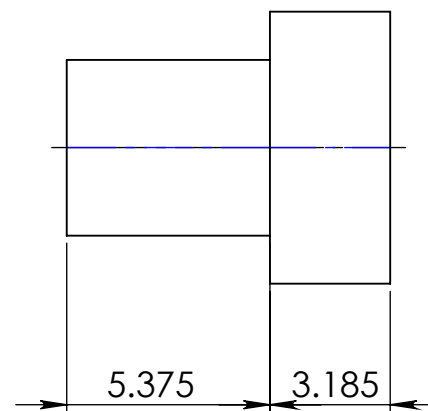
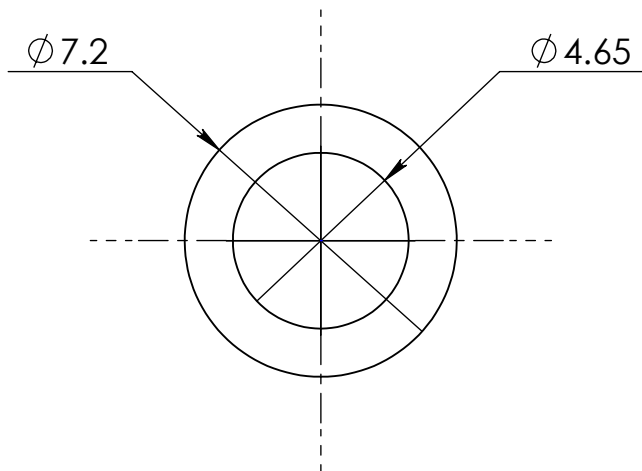


DETALLE B
ESCALA 5 : 1

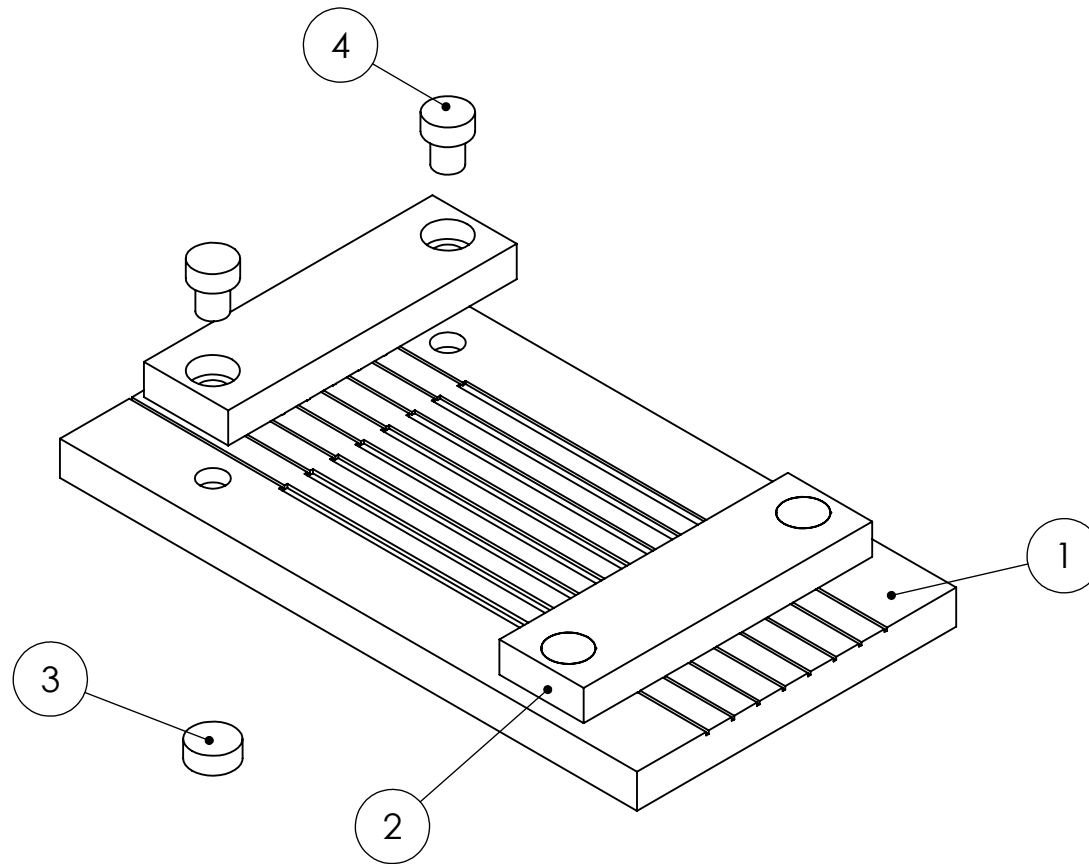


SECCIÓN A-A

Material: PTFE		Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez		Fecha Junio 2010	
Escala: 2:1		Acot.: mm.		Grapas de sujeción Molde para recubrimiento de acopladores de fibra óptica	
		Cant.: 2 Revisó: JHC			
				Tamaño: Carta	
				PLANO B	



Material: Acero AISI 1020		Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez		Fecha Junio 2010	
Escala: 5:1		Acot.: mm.		Cant.: 4	
		Perno de sujeción de grapa Molde para recubrimiento de acopladores de fibra óptica		Revisó: JHC	
				Tamaño: Carta	
				PLANO C	



NÚMERO	ELEMENTO
1	Base acanalada
2	Grapa sujetadora
3	Imán de neodimio
4	Perno de sujeción

Material: PTFE, neodimio, acero AISI 1018	Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez	Fecha Junio 2010
Escala: 1:1	Acot.: mm.	Cant.: 1
<p style="text-align: center;">Ensamble de molde</p> <p style="text-align: center;">Molde para recubrimiento de acopladores de fibra óptica</p>		Revisó: JHC
		Tamaño: Carta
		PLANO D

REFERENCIAS

- [1] Sandra Pascual Vázquez y Juan Hernández Cordero, "Fibras ópticas láser: cómo cocinar vidrio para generar luz," *Materiales Avanzados*, 2007, Núm. 9, 5-14.
- [2] E. Hetch, "Óptica," Addison Wesley, 3ª edición, España, 2000.
- [3] Neil Ardley, Robert Matthews, "Física: material, átomos, energías," Círculo de Lectores S.A., España, 1985.
- [4] B. Saleh, M. Teich; "Fundamentals of Photonics," Wiley Interscience, 2007.
- [5] Noguerón Galicia Dámaris, "Fibras ópticas láser en configuración de anillo con acopladores sobre-acoplados," Tesis de licenciatura, UNAM, México, 2008.
- [6] E. Rivera, T. García, R. Salazar y J. Dircio; "Los azopolímeros: materiales inteligentes con respuesta a la luz," *Bol. Soc. Quím. Méx.*, 24-34, 2008.
- [7] Arri Priimägi, "Polymer-azobenzene complexes: from supramolecular concepts to efficient photo responsive polymers" Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, TKK-DISS-2648, HSE Print, Helsinki 2009.
- [8] Juan Hernández Cordero; "Apuntes de Introducción a la Fotónica," UNAM, 2010.
- [9] M. Chen "Highly Overcoupled Optical Fiber Fused Tapered Couplers and their Applications," PhD Thesis, Providence: Brown University, 1995.
- [10] Shanghai Dowson Communication Co., "OC-2010 Optical Coupler Manufacturing System Operational Manual," 2003.
- [11] Adan Ismael Gutierrez Estrada, "Fabricación de acopladores fusionados de fibra óptica," Tesina de licenciatura, UNAM, México, 2008.
- [12] Alan E. Tonelli, C. Maurice Balik, Mohan Srinivasarao, "Improving Textiles with Cyclodextrins," NTC Project: M06-NS02, NCSU, E.U.A., 2008.

-
- [13] Q. Carolina Caicedo Cano, "Síntesis y caracterización de nuevos azocompuestos líquido-cristalinos, que contienen dos unidades de azobenceno unidas por una cadena flexible de oligoetilenglicol" Tesis de maestría, IIM, UNAM, México, 2008.
- [14] S. Ahmadi Kandjani, R. Barille, S. Dabos-Seignon, J.-M. Nunzi, E. Ortyl, S. Kucharski, "Multistate polarization addressing using one single beam in an azo polymer film," *Optics Letters*, Vol. 31, Issue 12, pp. 1923-1923, (2006).
- [15] E. Rivera, Ma. del Pilar Carreón-Castro, R. Salazar, G. Huerta, C. Becerril, L. Rivera, "Preparation and characterization of novel grafted polyethylene based azo-polymers bearing oligo(ethylene glycol) spacers," *Elsevier, Polymer* 48, 3420-3428, 2007.
- [16] J. Ki Kim, Y. Jung, B. Ha Lee, K. Oh, C. Chun, D. Kimb, "Optical phase-front inscription over optical fiber end for flexible control of beam propagation and beam pattern in free space," *Optical Fiber Technology* 13, 240–245, 2007.
- [17] C. R. Mendonça, L. Misoguti, A. A. Andrade, S. B. Yamaki, V. D. Dias, T. D. Z. Atvars, O. N. Oliveira Jr, "Photoinduced birefringence in di-azo compounds in polystyrene and poly(methyl methacrylate) guest–host systems," *Optical Materials* 30, 216–221, 2007.
- [18] A. Priimägi, F. J. Rodríguez, M. Kauranen, O. Ikkala, "Enhanced photoinduced birefringence in polymer–dye complexes: hydrogen bonding makes a difference," *Appl. Phys. Lett.* 90, 121103, 2007.
- [19] S. Choi, K. R. Kim, K. Oh C. M. Chun, M. J. Kim, S. J. Yoo, and D. Y. Kim, "Interferometric inscription of surface relief gratings on optical fiber using azo polymer film," *Appl. Phys. Lett.* volumen 3, número 6, 2003.
- [20] Kenji Kitaoka, Jinhai Si, Tsuneo Mitsuyu, and Kazuyuki Hirao, "Photoinduced Highly Efficient Second-Harmonic Generation in Azo-Dye-Doped Thick Films," *Jpn. J. Appl. Phys., Part2, No. 4B, Vol. 39*, pp. L 363–L 365, 2000.
- [21] Jeong-Min Han, Jin-Woo Han, Ji-Yun Chun, Chul-Ho Ok, and Dae-Shik Seo, "Novel Encapsulation Method for Flexible Organic Light-Emitting Diodes *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 47, No. 12, pp. 8986–8988, 2008.
- [22] A. Santiago-Alvarado, S. Vázquez-Montiel, "Propiedades físico-químicas de membranas PDMS empleadas en lentes líquidas," *Sociedad Mexicana de*

-
- Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales, Superficies y Vacío 22(3), pp. 61-66, 2009.
- [23] Lina He, Yun-Feng Xiao, Jiangang Zhu, Sahin Kaya Ozdemir, and Lan Yang, "Oscillatory thermal dynamics in high-Q PDMS-coated silica toroidal microresonators," OSA, Vol. 17, OPTICS EXPRESS 9571, No. 12, 2009.
- [24] Shuizhu Wu, Fang Zeng, Hai Wang, Weilong She, Zhigang Cai, "Thermooptical Properties of Poly(methyl methacrylate)-Based Azobenzene Composites," J. Appl. Polym. Sci. 89, pp. 2374-2377, 2003.
- [25] Steve Yao, "Polarization in Fiber Systems: Squeezing out More Bandwidth," The Photonics Handbook®, Laurin Publishing, 2003.
- [26] Daisuke B., Takashi F., Hiroshi S., Masahide I., and Toyohiko Y., "Orientational Stability of Azobenzene-Containing Materials in Polarization Recording," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No., pp. 1203-12072, 2008.
- [27] A. Rodríguez, G. Vitrant, P. A. Chollet and F. Kajzar, "Photochromic properties of azo dye polymer thin films: evidence of an additional reversible mechanism of molecular behaviour," Revista Mexicana de Física 52 (2), pp. 135-138, 2006.
- [28] Gerhard J. Mohr, Otto S. Wolfbeis, "Optical sensors for wide pH range based on azo dyes immobilized on a novel support," Elsevier, Analytica Chimica Acta 292, pp. 41-48, 1994.
- [29] referencia de imagen: V. Zucolotto, P. J. Strack, F. R. Santos, D. T. Balogh, C. J. L. Constantino, C. R. Mendonça, O. N. Oliveira Jr., "Molecular engineering strategies to control photo-induced birefringence and surface-relief gratings on layer-by-layer films from an azopolymer," Elsevier, Thin Solid Films 453-454, pp. 110-113, 2004.
- [30] "Aplicaciones de azopolímeros"
<http://www.beamco.com/applications-2.htm>
- [31] "Onda evanescente," Consulta: Noviembre 2009
<http://www.andrew.cmu.edu/user/dcprieve/Evanescence%20waves.htm>
- [32] "Cromóforo," Consulta: Diciembre 2009
<http://es.thefreedictionary.com/cromóforo>
-

- [33] "Cromóforo," Consulta: Diciembre 2009
<http://es.wikipedia.org/wiki/Cromóforo>
- [34] "Variación del índice de refracción del agua con temperatura,"
Consulta: Noviembre 2009
<http://www.philiplaven.com/p20.html>
- [35] "Spin coating," Consulta: Enero 2010
http://www.cpmt.org/mm/pkglab/theory/spin_theory.html
http://en.wikipedia.org/wiki/Spin_coating
- [36] "PDMS Tg," Consulta: Abril 2010
<http://www.dowcorning.com/content/sitech/sitechms/>