



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA– SISTEMAS ELECTRÓNICOS

SENSOR BASADO EN RECUBRIMIENTOS MICRO-ESTRUCTURADOS PARA REJILLAS
DE DIFRACCIÓN ÓPTICA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ANABEL MARTÍNEZ GAYTÁN

TUTORA PRINCIPAL

DRA. LAURA ADRIANA OROPEZA RAMOS - Facultad de Ingeniería

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE, 2013



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Rodríguez Cuevas Jorge
Secretario: Dr. Perez Alcázar Pablo Roberto
Vocal: Dra. Oropeza Ramos Laura Adriana
1^{er.} Suplente: Dr. Hernández Cordero Juan Arnaldo
2^{d o.} Suplente: Dra. Mejía Uriarte Elsi Violeta

Lugar donde se realizó la tesis:

México, D.F.

TUTORA DE TESIS:

DRA. LAURA ADRIANA OROPEZA RAMOS

FIRMA

A mi familia, los amo mucho.

Agradecimientos

Ante todo a mi familia: a mis padres, Martha y Abel, a mis hermanas, Gladys y Mabel y a mis pequeños ángeles Eileen, Brenda y Gael a quiénes amo por todo su apoyo, su paciencia y sus enseñanzas .

Así mismo quiero agradecer enormemente a mi tutora de tesis, Dra. Laura Oropeza Ramos, por la formación, el apoyo, el tiempo y la oportunidad de realizar este proyecto.

Al Dr. Juan Hernández Cordero a quien igualmente agradezco la formación, el apoyo y sus consejos brindados durante toda esta etapa de mi formación.

A mi jurado, por sus consejos y el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

Al M.I. Jorge Soto Olmos por su disponibilidad para asesorarme y guiarme en el desarrollo de este proyecto.

A mis profesores y todos mis compañeros de laboratorio, por su apoyo, opiniones e ideas aportadas a este trabajo.

A todos mis amigos y personas que han estado día a día acompañándome de forma incondicional en este camino llamado vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por financiar esta investigación a través del proyecto 153353 de título “Plataforma micro-estructurada BioMEMS para estudio de cultivo y co-cultivo de cardiomiocitos”

Al Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyTDF) por el financiamiento parcial de esta investigación con el proyecto PINV11-17 de título “Desarrollo de plataformas micro-estructuradas BioMEMS para estudio de cultivo cardíaco”.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM por la beca de conclusión de estudios de maestría otorgada con el proyecto IN114013 de título “Estudio de los efectos hidrodinámicos de sistemas microfluídicos de perfusión en la actividad de cardiomiocitos cultivados en micro-chips”, y también por el financiamiento parcial otorgado con el proyecto IN102112.

A la UNAM y a la DGEP por el apoyo otorgado para concluir mis estudios de posgrado.

Resumen

Sensor basado en recubrimientos micro-estructurados para rejillas de difracción óptica viii

Abstrac

Sensor based on micro-structures coatings for optical diffraction gratings ix

Capítulo 1**Estado del arte en sensores basados en rejillas de fibra óptica**

1.1 Introducción	2
1.2 Estado del arte en sensores basados en rejillas de fibra óptica	3
1.3 Métodos tradicionales de fabricación de rejillas de fibra de periodo corto y largo	4
1.3.1 Rejillas de fibra de período largo de nueva generación	7
1.3.2 Rejillas de Período Largo de Inducción Mecánica	10
1.4 Sensores embebidos en materiales compuestos	10
1.5 Microestructuras de polímero y fibras ópticas	11
1.6 Justificación	13
1.7 Objetivo General	14
1.7.1 Objetivos específicos	14

Capítulo 2**Principios de sensores basados en rejillas de difracción óptica**

2.1 Sensores Ópticos	16
2.1.2 Sensores basados en fibra óptica	16
2.2 Principios físicos de Fibra óptica	18
2.2.1 Propagación de la luz en fibras ópticas	20
2.2.2 Parámetros de las fibras ópticas	22

2.2.3 Mecanismos de atenuación en fibras ópticas	22
2.2.4 Clasificación de fibras ópticas: monomodo y multimodo	24
2.2.5 Método para incrementar la sensibilidad a cambios en el medio externo de las fibras ópticas	26
2.3 Rejillas de período largo (RFPL)	28

Capítulo 3

Fabricación y caracterización del dispositivo de RFPL

3.1 Pruebas preliminares	31
3.2 PDMS: propiedades físicas y mecánicas	32
3.2.1 Litografía suave y fotograbado	33
3.3 Fabricación de moldes metálicos de canales profundos	34
3.3.1 Caracterización topográfica de moldes	35
3.4 Caracterización de la forma geométrica de la FOA	37
3.5 Resultados de pruebas preliminares con rejillas externas	37
3.6 Pruebas para determinar la longitud de la RFPL	38
3.7 Método para encapsular la FOA en un paso	42
3.8 Respuesta a cambios de temperatura	45
3.9 Procedimiento de fabricación en dos pasos	47
3.10 Procedimiento de fabricación en dos pasos con prensas de sujeción	51

Capítulo 4

Conclusiones y análisis de resultados

4.1 Análisis de resultados	59
4.2 Resumen de procedimientos y observaciones	60
4.3 Conclusiones	62

4.4 Trabajo a futuro	64
APÉNDICE A. MANUSCRITO PRESENTADO EN EL CONGRESO DE ÓPTICA Y FOTÓNICA DE LATINOAMÉRICA (LAOP 2012)	66
APÉNDICE B. HOJA DE DATOS DE LA FIBRA MONOMODAL SMF-128-e	69
APÉNDICE C. HOJA DE DATOS DE PDMS (SYLGARD 184)	73
APÉNDICE D. MICROGRAFÍAS DEL DISPOSITIVO CAPTURADAS CON MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO	75
 BIBLIOGRAFÍA	 78
 Índice de figuras	
Figura 1.1 Distribución de sensores de fibra óptica	3
Figura 1.2 Esquema de una rejilla inscrita en el núcleo de una fibra óptica	4
Figura 1.3 Técnica basada en interferometría para fabricar rejillas de Bragg en el núcleo de fibras ópticas	5
Figura 1.4 Método de máscara de fase para grabar una rejilla óptica en el núcleo de una fibra	6
Figura 1.5 Representación esquemática de la técnica “punto a punto” para la inscripción de rejillas ópticas	7
figura 1.5 Diagrama de una fibra tipo D	
Figura 1.7 Sección transversal de fibras ópticas monomodo y de cristal fotónico	8
Figura 1.8 Técnica para grabar rejillas de difracción en fibras micro-estructuradas utilizando un láser de femtosegundo	9
Figura 1.9 Vista lateral de una RFPL inducida por una micra-rejilla externa	10
Figura 1.10 Sensor basado en Rejillas de Bragg recubierto con PDMS	11
Figura 1.11 Arreglo experimental de rejillas fabricadas con PDMS y fibra óptica y su espectro de transmisión	12
Figura 2.1 Diagrama conceptual de un sistema óptico de sensado	16

Figura 2.2 Tipo de sensores (extrínsecos e intrínsecos)	17
Figura 2.3 Rayo de luz incidente en la frontera de la interfaz entre dos medios de diferente índice de refracción y su relación con el ángulo de incidencia dado por la Ley de Snell	18
Figura 2.4 Diagrama que indica el ángulo crítico q_c para la reflexión total interna de luz	19
Figura 2.5 Vista de la sección transversal de una fibra óptica	19
Figura 2.6 Profundidad de penetración del campo evanescente en la interfaz núcleo-revestimiento	21
Figura 2.7 Pérdidas en fibra óptica	23
Figura 2.8 Principales efectos que producen atenuación en una fibra óptica. 24	24
Figura 2.9 Clasificación de las fibras ópticas de acuerdo al perfil del índice de refracción del núcleo y los modos de propagación	25
Figura 2.10 Esquema que muestra las partes de una fibra adelgazada	27
Figura 2.11 Diagrama de la estación Dowson OC-2010	27
Figura 2.12 Principio de operación de una rejilla de fibra óptica	28
Figura 3.1 Proceso de obtención de la réplica de PDMS mediante litografía suave	35
Figura 3.2 Proceso para la fabricación de molde metálico.	35
Figura 3.3 Caracterización de los microcanales del molde metálico con el equipo Polytec MSA-400. 36	36
Figura 3.4 Equipo para obtener el perfil geométrico de la fibra óptica con el Microscopio Dino-Lite	37
Figura 3.5 Espectro de transmisión de una rejilla externa fabricada con el molde de metal	38
Figura 3.6. a) Procedimiento de fabricación. b) Réplica con fibra embebida. 39	39
Figura 3.7. a) Procedimiento de fabricación. b) Réplica con fibra embebida. 40	40
Figura 3.8 Diseño de molde con canales guía.	
Figura 3.9 Método de fabricación del dispositivo con fibra óptica embebida y micrografías de la fibra óptica embebida en la estructura de polímero	42
Figura 3.10 Espectros producidos de la fibra embebida antes y después de desmoldar	43

Figura 3.11 Diseño del nuevo molde de mayor área, para embeber las áreas desprotegidas de la FOA	43
Figura 3.12 Utilización del nuevo diseño de molde metálico en el proceso de fabricación	44
Figura 3.13 Espectros obtenidos durante el procedimiento de fabricación	45
Figura 3.14 Arreglo experimental para verificar la respuesta ante cambios de temperatura	
Figura 3.15 Espectros de transmisión en respuesta a variaciones de temperatura (sensibilidad)	46
Figura 3.16 Micrografías del dispositivo	47
Figura 3.17 Procedimiento de fabricación sin prensas	48
Figura 3.18 Micrografías del dispositivo	48
Figura 3.19 Dispositivo con dos fibras embebidas para minimizar los esfuerzos mecánicos al desmoldar	48
Figura 3.20 Dispositivo con canales cóncavos y su espectro de transmisión	50
Figura 3.21 Método en dos partes y su espectro de en el molde y con variación de canales	51
Figura 3.22 Respuesta a cambios de temperatura del dispositivo	52
Figura 3.23 Ajuste lineal para obtener la sensibilidad de los picos 1, 2 y 3	53
Figura 3.24 Repetibilidad en la señal para el pico 3	53
Figura 3.25 Respuesta del dispositivo a cambios en el índice de refracción	54
Figura 3.26 Comportamiento del cambio de la longitud de onda con metanol	55
Figura 3.27 Comportamiento del cambio de la longitud de onda con metanol.	56

Resumen

Sensor basado en recubrimientos micro-estructurados para rejillas de difracción óptica

Las rejillas de fibra óptica de periodo largo (RFPL) son dispositivos que se caracterizan por tener un tamaño pequeño, ser ligeros e inmunes a la interferencia electromagnética y gracias a esto son utilizados en diversos campos de investigación, ya sea como filtros, en el área de las comunicaciones, o como sensores de parámetros físicos en distintas áreas como lo es la industria civil, aeroespacial y la médica, entre otras. En este trabajo de tesis se presenta la caracterización de una rejilla de periodo largo (RFPL) para sensado de parámetros físicos, tales como la temperatura e índice de refracción, y además, se muestra el principio para el sensado de desplazamiento. Esta rejilla óptica es inducida mediante una micro-estructura construida con micro-canales, la cual es fabricada de Polidimetilsiloxano (PDMS). El PDMS que es un polímero altamente usado en aplicaciones biotecnológicas debido a que una de sus características es que no es tóxico, además de que, al ser un material ópticamente transparente, ofrece la posibilidad de ser integrado con sistemas ópticos, que actualmente han permitido un amplio desarrollo en la investigación médica.

En la micro-estructura diseñada en este trabajo se encapsula una fibra óptica, previamente adelgazada con el fin de incrementar la sensibilidad que tiene al medio que la rodea. Para construir este dispositivo se utiliza una técnica de bajo costo y que no se requiere de cuarto limpio para realizarla y es conocida como litografía suave. Durante este trabajo se identificaron diversos problemas producidos principalmente por la ruptura de la fibra óptica adelgazada al momento de desprender la micro-estructura de PDMS del molde o bien, al manipular el dispositivo, por este motivo se desarrollaron diversos métodos para encapsular la fibra óptica sin que ésta se fracturara o se rompiera, con el propósito de obtener un dispositivo robusto. Los métodos desarrollados para la fabricación y el arreglo experimental se presentan y se describen en este trabajo, así como la caracterización del micro-dispositivo y el análisis de resultados obtenidos con cada uno de ellos. La importancia de este tipo de desarrollos es que pueden ser utilizados para ser incorporados en sistemas más complejos como lo son los sistemas Lab-On-a-Chip.

Abstract

Sensor based on micro-structures coatings for optical diffraction gratings

Long Period Fiber Gratings (LPFG) have been used in several technological applications. Some advantages of this kind of devices is that they are small and they are immune to electromagnetic interference. Various types of LPFGs have been designed and demonstrated as gain-flattening filters for optical fiber amplifiers and sensors for measuring temperature, pressure, strain, and refractive index. This allowed incorporate them in different areas such as aerospace, civil and medical industry. In this work, we present the characterization of a LPFG induced by a micro-grating made of Polydimethylsiloxane (PDMS), which is an useful material in biotechnology applications. Being is a nontoxic and transparent material; it has been incorporated in optical systems contributing to biomedical developments.

In the micro-structured design proposed in this work, a tapered optical fiber is embedded in order to increment the sensitivity to environmental changes. The micro-grating is fabricated using a soft lithography technique, which is a low cost fabrication method and does not require a cleanroom to manufacturing the LPFG. An embedded tapered optical fiber (TOF) micro-structured polymeric device was successfully fabricated to induce a LPFG, however, we identify some problems due the frailty of the TOF. We implemented different methods to embed the TOF in the polymeric device, and we describe these methods and the experimental set-up. We also show the characterization and measurement analysis for this micro-device. The importance of these devices is that they can be used as part more complex arrangements such as Lab-On-a-Chip systems.

Capítulo 1

Estado del arte en sensores basados en rejillas de fibra óptica

RESUMEN

En este capítulo se recopila información de los avances que han surgido en los últimos años en sensores basados en fibras ópticas, principalmente aquéllos basados en rejillas de difracción y se presentan algunos métodos convencionales de fabricación y algunas de las ventajas y aplicaciones de estos dispositivos.

1.1 Introducción

En la actualidad, el uso de la tecnología se ha incrementado aceleradamente. Basta con observar a nuestro alrededor la gran cantidad de dispositivos en los que estamos inmersos y los cuales forman parte de nuestra vida cotidiana, permitiéndonos tener una mayor comodidad en nuestras diversas actividades, o bien, incluso mejorando nuestra calidad de vida.

El desarrollo de sistemas ópticos para comunicaciones ha sido un impulsor importante en diversas áreas de la ciencia y la tecnología. Un ejemplo claro de esto son las fibras ópticas, ideadas originalmente como un medio para transmitir señales ópticas en sistemas de comunicaciones, las cuales han resultado así mismo de gran utilidad para el desarrollo de sensores [1], [2], y, aunque al principio su utilización era altamente costosa, poco a poco han abierto paso para ser utilizadas en aplicaciones industriales disminuyendo los costos de producción de ésta. Como ejemplo, el costo de la fibra óptica en 1979 se encontraba alrededor de 20 USD/m y los costos decrecieron hasta 0.10 USD/m [3]. Así mismo, se fueron presentado avances de manera continua, desarrollándose a la par sistemas opto-electrónicos, lo cual abrió al mercado una gran cantidad de dispositivos que hoy en día se utilizan de forma cotidiana (impresoras láser, ratones ópticos, lectores de código de barras) entre los que destacan precisamente los sensores de fibra óptica [4].

Entre las ventajas de utilizar sensores basados en fibra óptica (FO) se tienen las siguientes [5–7]:

- Pueden operar en condiciones de temperaturas extremas y dada su inmunidad a interferencias electromagnéticas son apropiados para utilizarse cerca de fuentes de alta tensión.
- Debido al carácter dieléctrico de la fibra, carecen de los problemas derivados de la puesta a tierra o descargas eléctricas.
- Son dispositivos que pueden ser livianos y pequeños, facilitando su aplicación en la industria aeroespacial y automotriz.
- Varios transductores pueden ser monitoreados en una sola fibra brindando capacidades de multiplexión.

1.2 Estado del arte en sensores basados en rejillas de fibra óptica

Las fibras ópticas han aportado enormemente al desarrollo de sensores en distintos campos. Actualmente se fabrican componentes basados en rejillas de fibra óptica, tales como láseres y amplificadores de fibra óptica, filtros ópticos, multiplexores ópticos, ruteadores de longitud de onda, etc. [8] y su uso permite construir sensores de diversas variables físicas de interés como son la temperatura, la tensión, el índice de refracción, entre otros [9–11]. Estos sensores ocupan hoy en día un gran porcentaje en el desarrollo de dispositivos ópticos, tal como se puede observar en la figura 1.

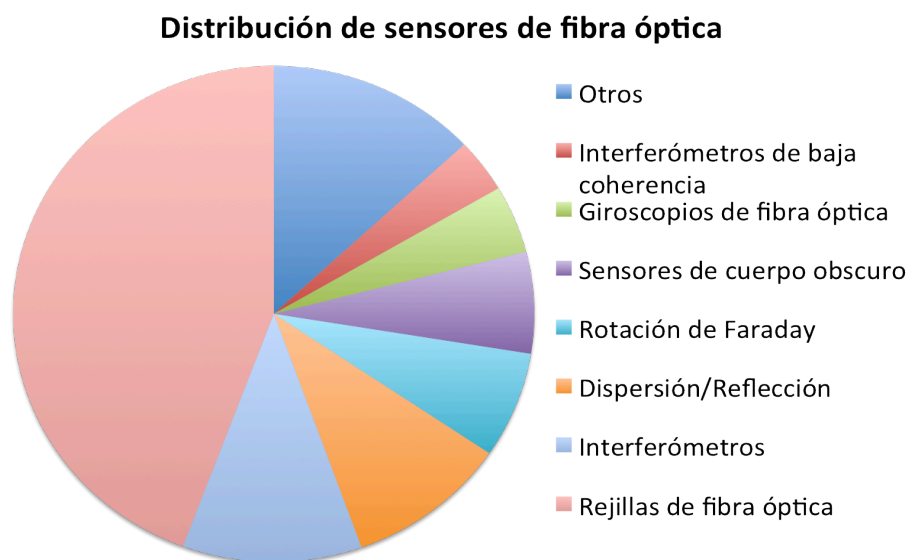


Figura 1.1 Distribución de sensores basados en fibra óptica de acuerdo a la tecnología empleada. Gráfica adaptada de [2].

Este tipo de sensores basan su funcionamiento en el monitoreo de los cambios en la longitud de onda mediante rejillas, la cual puede definirse como una modulación periódica del índice de refracción del núcleo de una fibra óptica mono modo (propagación de la luz en un solo modo)[12], [13]. Debido a esta modulación, las rejillas son capaces de realizar funciones tales como reflexión, dispersión y filtrado del campo electromagnético de manera eficiente y con baja atenuación [14].

Las aplicaciones que se las ha dado a este tipo de sensores basados en fibras ópticas son diversas y van desde las telecomunicaciones hasta utilizadas en ciencias médicas [7][11][15][16].

1.3 Métodos tradicionales de fabricación de rejillas de fibra de periodo corto y largo

Las rejillas en fibra óptica surgen a partir del descubrimiento de la fotosensibilidad característica de las fibras ópticas, el cual es un efecto en el que se produce un cambio permanente en el índice de refracción en el núcleo de la fibra óptica cuando éste es expuesto a una luz con una longitud de onda y una intensidad característica que depende del material del núcleo de la fibra. Aunque al principio se observó este fenómeno sólo en fibras dopadas con germanio, posteriormente se demostró que también afecta a fibras dopadas con otro tipo de dopantes [17]. La figura 1.2 muestra el esquema de una fibra óptica con rejilla en el núcleo.

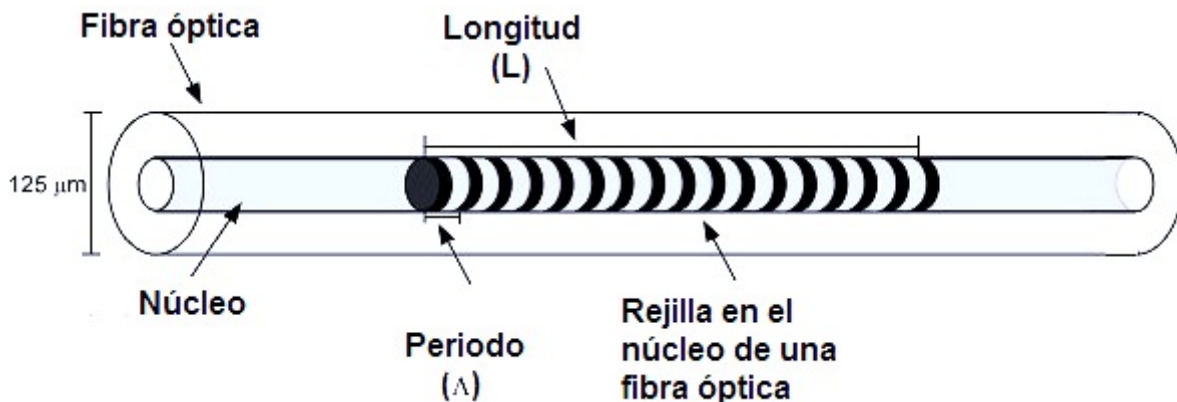


Figura 1.2 Esquema de una fibra óptica con rejilla periódica fabricada en el núcleo.

El método más común para la fabricación de rejillas de fibra óptica consiste en utilizar fibras ópticas dopadas con germanio. La rejilla de fibra de periodo largo (RFPL) se forma en la fibra óptica al hacer incidir luz ultravioleta en algunos puntos del núcleo de la fibra, lo que produce en forma permanente variaciones periódicas en el índice de refracción. Las técnicas de fabricación de las rejillas de fibra óptica, que funcionan tanto para rejillas de Bragg como para RFPL, han sido tema de mucha investigación, derivada de las aplicaciones en comunicaciones y sensado, y entre las principales técnicas se encuentran aquéllas que utilizan interferometría, mascarilla de fase y grabado punto a punto.

El método basado en interferometría, cómo su nombre lo indica, utiliza un interferómetro en el que un haz de luz UV es dividido en dos haces que posteriormente son recombinados utilizando dos espejos para formar un patrón de interferencia que es proyectado sobre la fibra fotosensible induciendo una modulación permanente en el índice de refracción de la fibra (figura 1.3)[18].

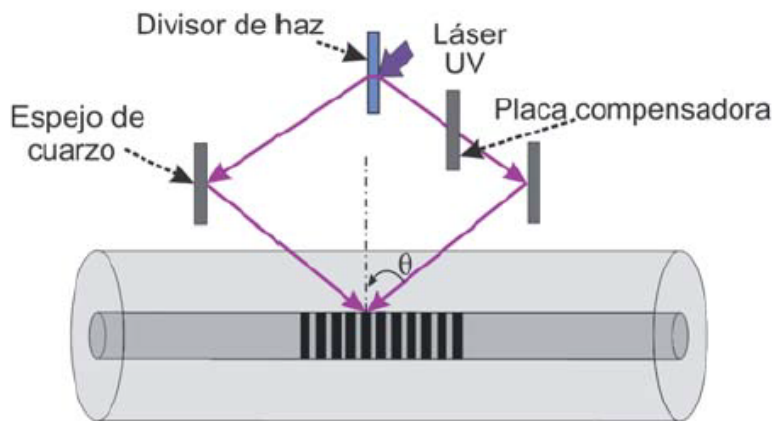


Figura 1.3 Técnica basada en interferometría para fabricar rejillas de Bragg en el núcleo de fibras ópticas (figura tomada de [19]).

La longitud de onda de Bragg de la rejilla que se graba con este método se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\lambda_B = \frac{n_{eff} \lambda_{uv}}{\sin(\frac{\theta}{2})} \tag{1.1}$$

Donde λ_B es la longitud de onda de Bragg y n_{eff} es el índice de refracción efectivo del modo (los modos de una fibra se explica más adelante en el capítulo 2) en la fibra. De la ecuación 1.1 se observa que la longitud de onda de Bragg puede variarse cambiando la longitud de onda de grabado o el ángulo entre los dos haces, lo cual represente la principal ventaja de este método [20].

La técnica de máscara de fase emplea un elemento óptico difractivo en los órdenes $m=0$ y $m=+1$ este dispositivo tiene surcos grabados periódicamente con profundidad constante, se le conoce como mascarilla de fase y modula espacialmente el haz de UV que se inscribe la fibra óptica. El periodo se escoge de tal manera que cuando el haz de luz UV incide sobre la mascarilla de fase, el orden cero se abate a un valor menor al 3% de la

potencia transmitida, mientras que para el rayo difractado de los órdenes $m=\pm 1$ alcanza un valor mayor al 35% de la potencia transmitida. En el campo cercano a la mascarilla de fase se forma un patrón de franjas generado por la interferencia entre los órdenes de difracción $m=\pm 1$. La fibra se coloca justo detrás de la mascarilla de fase, haciendo contacto directo o bien, colocándola muy cerca de ella. El patrón de interferencia foto-imprime una modulación en el índice de refracción del núcleo (figura 1.4) [20][21].

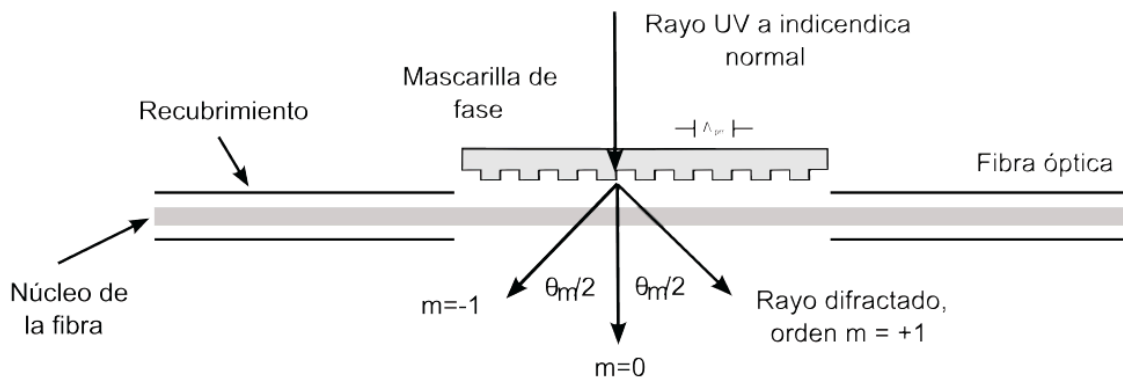


Figura 1.4 Método de máscara de fase para grabar una rejilla óptica en el núcleo de una fibra (figura tomada de [20]).

La longitud de onda de Bragg (λ_B) de la rejilla grabada con este método está dada por la expresión:

$$\lambda_B = \Lambda_{pm} n_{eff} \quad (1.2)$$

Donde λ_B es la longitud de onda de Bragg, Λ_{pm} es el período de la mascarilla de fase y n_{eff} es el índice de refracción efectivo del modo de la fibra. Una ventaja con este método es que reduce la complejidad del sistema de fabricación de las rejillas ya que sólo utiliza un elemento, la mascarilla de fase.

La técnica punto a punto consiste en inducir cambios en el índice de refracción, correspondientes a los planos de la rejilla, uno tras otro a lo largo del núcleo de la fibra. Un solo pulso de luz UV atraviesa una máscara que contiene una rendija y posteriormente se enfoca con una lente hacia el núcleo desde un costado. La sección irradiada cambia su índice de refracción. Para continuar con el procedimiento la fibra se traslada una distancia L,

correspondiente al periodo de la rejilla, en dirección paralela al eje de la fibra (figura 1.5). El proceso se repite hasta que se forma la estructura completa sobre el núcleo.

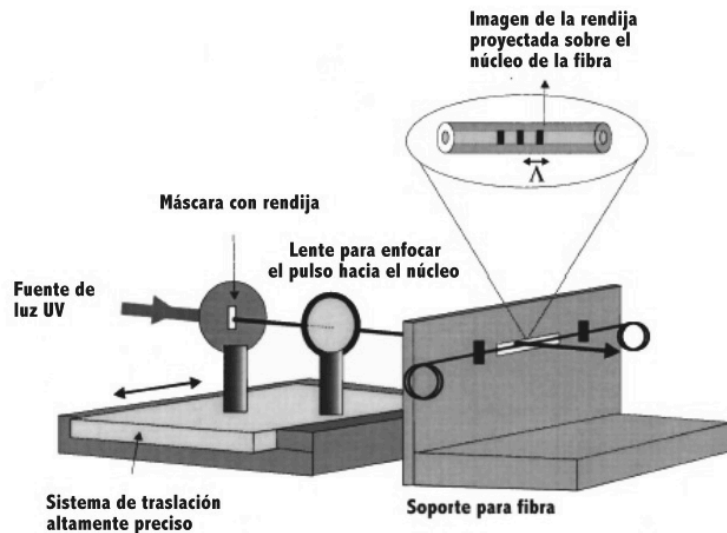


Figura 1.5 Representación esquemática de la técnica “punto a punto” para la inscripción de rejillas ópticas (figura editada de [18]).

Una de las ventajas que se consiguen con esta técnica es que se tiene gran flexibilidad para cambiar los parámetros de la rejilla, tales como su longitud, su período y la respuesta espectral (rejillas de período variable). Como desventajas se tiene que es un método tardado y que se requiere que el sistema de traslación sea altamente preciso.

1.3.1 Rejillas de fibra de período largo de nueva generación

Las RFPL representan una de las plataformas tecnológicas de rejilla de fibra más prometedoras para ser empleadas en un gran número de aplicaciones químicas debido a su sensibilidad intrínseca a los cambios en el medio externo [22]. Para incrementar y explotar esta propiedad se han realizado pruebas sobre fibras ópticas de nueva generación como lo son las fibras ópticas D y las llamadas fibras de cristal fotónico.

Las fibras tipo D son llamadas así debido a que su sección transversal tiene la forma de la letra “D”. En este tipo de fibras, el núcleo se encuentra a una distancia mas corta del lado plano de la “D” que se forma, por lo cual, el

campo electromagnético en el núcleo se encuentra más expuesto al medio en comparación con las fibras monomodales, por lo que su sensibilidad es mayor. Una fibra tipo D se muestra en la figura 1.6.

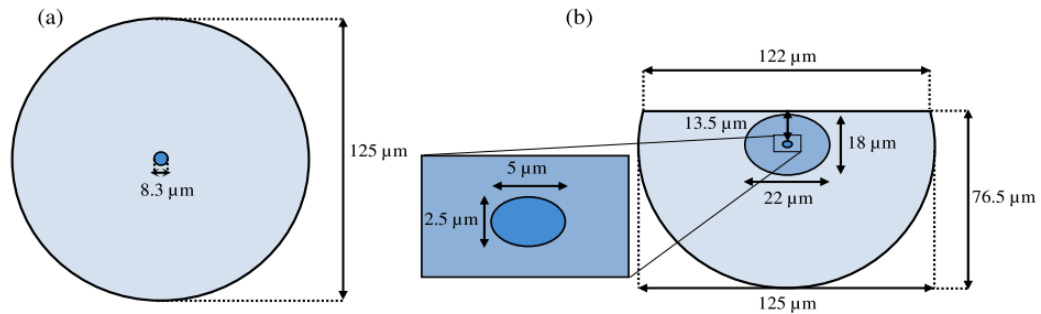


Figura 1.6 Sección transversal de **a)** una fibra estándar SMF **b)** una fibra tipo D (figura tomada de [21]).

El grabado de la rejilla en una fibra tipo D, se pueden realizar empleando tanto los métodos interferométricos como los de máscara de fase y sus aplicaciones son diversas principalmente en el área de sensado. Por ejemplo, se han empleado como sensores de campo magnético [23], para detectores de humedad [24] y de agua [25], entre otros.

Otra tecnología que se ha desarrollado son las fibras de cristal fotónico o FCF, que están hechas de sílice y se caracterizan por tener en su estructura un arreglo de agujeros de aire, distribuidos periódicamente, rodeando al núcleo, el cual puede ser sólido o de aire, como se muestra en la figura 1.7.

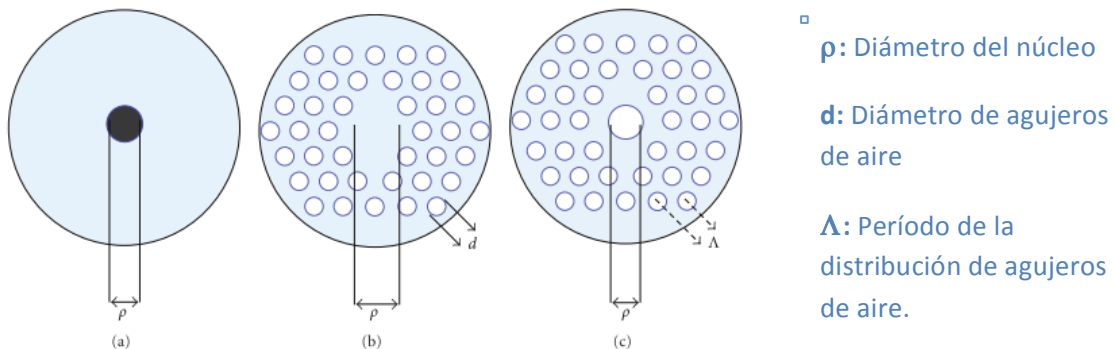


Figura 1.7 Sección transversal de fibras ópticas (este tipo de fibras se presentan en el capítulo 2). a) Fibra monomodo con núcleo de óxido de silicio dopado. b) Fibra micro-estructurada con núcleo sólido óxido de silicio. c) Fibra micro-estructurada con núcleo de aire (figura tomada de [26]).

Los agujeros en las FCF recorren toda la longitud de la fibra y su disposición se basa en dos principios fundamentales para guiar la onda: el primero es conocido como reflexión total interna modificada o bien M-TIR, que es análogo al fenómeno de reflexión total interna en las fibras estándar, y el segundo es producido por el fenómeno de banda fotónica prohibida (PBG). Este es un fenómeno análogo al de banda prohibida en semiconductores [27]; es decir, para que este efecto se produzca, se debe tener una estructura con una distribución de agujeros con un periodo y radio definido, que en conjunto con el tipo de material se pueden modificar cuando se diseña para generar bandas en los que no habrá propagación de la luz a longitudes de onda específicas, con lo cual se tiene un mayor control para guiar la luz.

La primera rejilla grabada mediante efecto fotoquímico en FCF fue desarrollada en 1999, utilizando un núcleo dopado con Ge y la técnica común de exposición al láser UV para generar los cambios en el índice de refracción, tal como se realiza en fibras estándar. Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, las FCF típicas no son fotosensibles, ya que están hechas de sílice puro (el cual es transparente a región espectral UV), por ello se fueron desarrollando nuevas técnicas para lograr la modificación del índice de refracción, entre las que destacan la inscripción mediante: tratamiento de calor a través de un láser de CO₂, aplicando la descarga de un arco eléctrico [22], o bien utilizando un láser de femtosegundos (figura 1.8) [28]. El desarrollo de este tipo de dispositivos representa una plataforma prometedora para el desarrollo de sensores bioquímicos, de temperatura, de esfuerzo, etc.

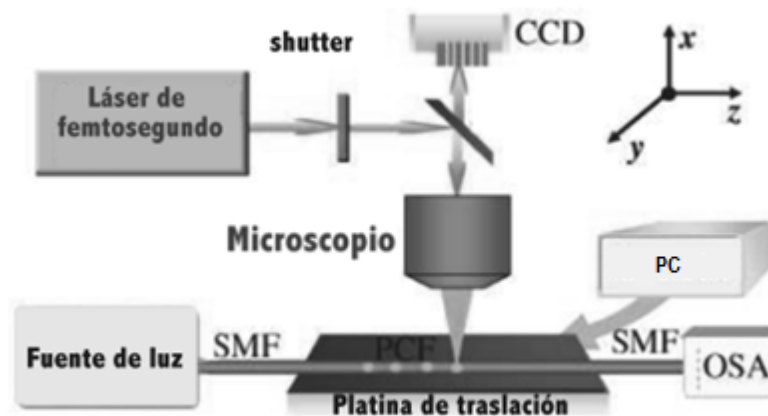


Figura 1.8. Técnica para grabar rejillas de difracción en fibras micro-estructuradas utilizando un láser de femtosegundos (figura editada de [28]).

1.3.2 Rejillas de Período Largo de Inducción Mecánica

También es posible inducir una RFPL en forma temporal utilizando una micro-estructura externa. Esta micro-estructura permite cambiar el periodo de la RFPL en forma dinámica, lo que hace posible la creación de dispositivos ajustables. Cuando se utilizan micro-estructuras externas, la forma en que se produce la RFPL consiste en presionar a la fibra utilizando una micro-rejilla. Esta rejilla externa contiene micro canales en su superficie, que al presionar a la fibra óptica le provocan variaciones en el índice de refracción (Figura 1.9). Estas variaciones periódicas en el núcleo de la fibra son las que producen la RFPL [29].

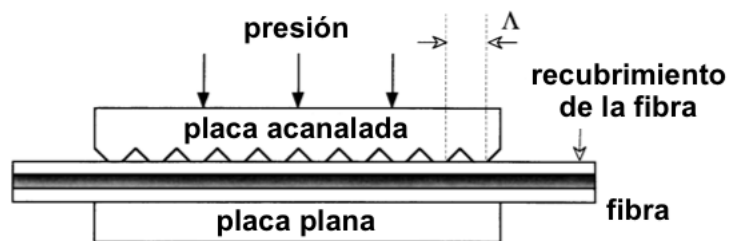


Figura 1.9 Vista lateral de una RFPL inducida por una micro-rejilla externa [30].

Para la fabricación de las rejillas externas se utilizan estructuras tanto de silicio como de metal, como el aluminio o el acero inoxidable [29] [31], lo que puede requerir de equipo y personal especializado para su producción.

1.4 Sensores embebidos

Los sensores de rejillas de fibra óptica han sido embebidos en un gran número de materiales con el fin de optimizar algunas características de sensado de manera exitosa [32], ejemplo de ello son los materiales compuestos avanzados con los cuales se logra mejorar la sensibilidad o la resistencia a condiciones ambientales extremas. Los materiales compuestos juegan un papel muy importante en el diseño de sensores. Constan de dos o más materiales físicamente distintos, los cuales pueden fabricarse mezclando los distintos materiales de modo que se logren características específicas en un material [33]. Los materiales compuestos disponen de ventajas con relación a otros productos, aportando numerosas cualidades funcionales como son: ligereza, resistencia mecánica y resistencia química. Otro tipo de material que ha sido utilizado con el propósito de mejorar la

eficiencia en la respuesta a cambios de temperatura de sensores basados en rejillas de fibra óptica es el Polidimetilsiloxano o PDMS, la presentación comercial del PDMS consta de un agente curante y un pre-polímero que al mezclarse se obtiene un material con características mecánicas específicas (tal como se describe a detalle en el capítulo 3), que dependen directamente de la relación entre la cantidad de agente curante utilizado con el pre-polímero. Otra ventaja se presenta cuando los sensores basados en fibra óptica se integran fácilmente en estos materiales gracias a que su tamaño es pequeño [34][32]. En la figura 1.10 se presenta un sensor basado en Rejillas de Bragg, la cual ha sido fabricada mediante métodos tradicionales (como se describe en la sección 1.2 de este capítulo), el cual es recubierto con PDMS para optimizar su respuesta a los cambios de temperatura, aprovechando que la propiedad de expansión térmica del PDMS es mucho mayor ($300 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$) en comparación con materiales como el aluminio, Ti, Ni ($20.03 \text{ m/m}^\circ\text{C}$, $8.35 \text{ m/m}^\circ\text{C}$ y $13.3 \text{ m/m}^\circ\text{C}$ respectivamente), que también han sido utilizados con anterioridad para mejorar la sensibilidad a la temperatura de estos tipo de sensores[35].

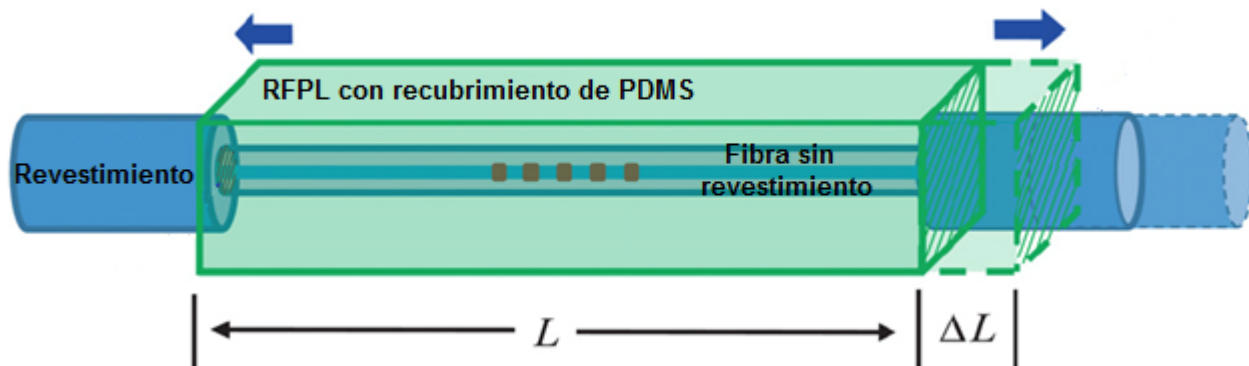


Figura 1.10 Sensor basado en Rejillas de Bragg recubierto con PDMS con lo cual se incrementa la sensibilidad en temperatura, debido a que el coeficiente de expansión térmica es alto ($300 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$) (imagen editada de [35]).

1.5 Micro-estructuras de polímero y fibras ópticas

En un trabajo reciente dentro de nuestro grupo de investigación, se ha demostrado que la interacción de micro-estructuras de polímero con fibras ópticas puede inducir perturbaciones (atenuación) en el espectro de transmisión, tal como sucede en con rejillas de fibras ópticas fabricadas mediante técnicas convencionales [31], tales como las que se describieron anteriormente en los apartados 1.3 y 1.3.2. Este comportamiento se verificó

mediante un arreglo de dos micro-rejillas fabricadas con Polidimetilsiloxano (PDMS) en contacto con una fibra óptica previamente adelgazada, como se muestra en la figura 1.11. El adelgazamiento de la fibra se realiza con el objetivo de aumentar la sensibilidad al medio externo en la fibra óptica en esta zona. Las ventajas de realizar un arreglo con PDMS, radica en que este material, que es un polímero orgánico, presenta características químicas atractivas como son: nula toxicidad, alta viscosidad en estado líquido, inflamable y además presenta transparencia óptica [36] [37] [38].

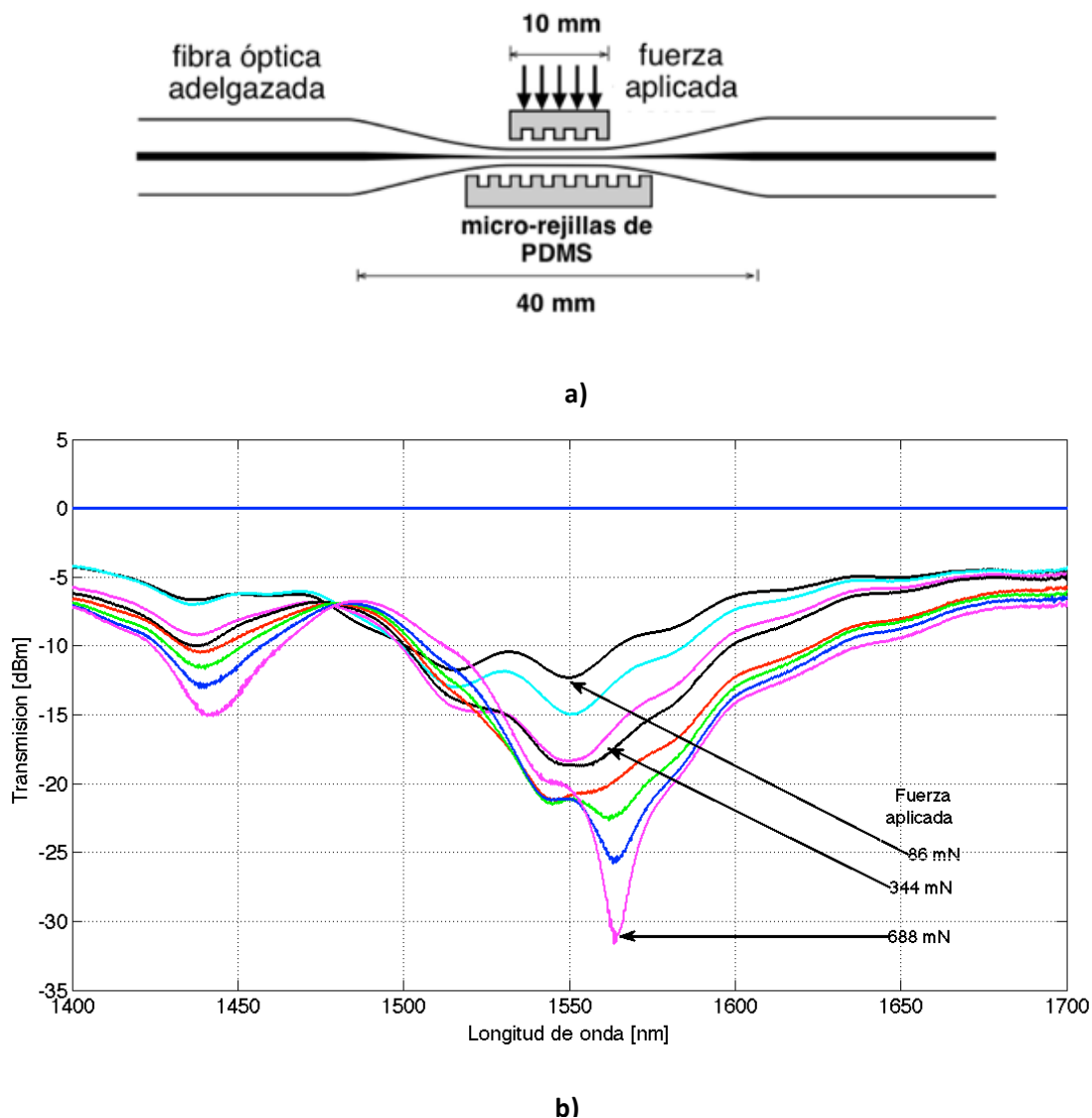


Figura 1.11. a) Arreglo experimental de rejillas fabricadas con PDMS y fibra óptica. **b)** Espectro de transmisión producido por la variación de presión (figura tomada de [30]).

Con la inducción de rejillas de período largo con estructuras de polímero se observaron las variaciones en el espectro óptico al realizar variaciones de temperatura y de presión, sin embargo, para lograr esto, es necesario ejercer cierta presión en puntos específicos, lo cual es difícil de controlar [30]. Esta tesis es la continuación de los resultados previos presentados en el trabajo que se acaba de describir, con el fin de fabricar un dispositivo más robusto y explotar todas las posibilidades de sensado por medio de la regeneración de recubrimientos de polímero micro estructurados en una fibra óptica adelgazada.

1.6 Justificación

Como se revisó en las secciones 1.1 y 1.1.2, las perturbaciones de período micrométrico en el núcleo de una fibra óptica, ya sean las inscritas directamente en el núcleo o por medio de una micro-rejilla externa, requiere de equipamiento de alto costo y de limitado acceso, es decir, se requieren instalaciones tipo cuarto limpio y métodos de litografía óptica sobre superficies cilíndricas de alta resolución.

La fabricación de micro-rejillas metálicas utilizadas para inducir una rejilla de fibra óptica de período largo (RFPL) es menos costosa; sin embargo, los materiales metálicos no ofrecen bajas resoluciones en la micro fabricación, sus propiedades reflectivas no representan una ventaja en la implementación de sensores basados en rejillas de fibra inducida por micro-estructuras y no es adecuado para aplicaciones biológicas.

En la búsqueda de alternativas que reduzcan los costos y el tiempo requerido para fabricar un sensor basado en una RFPL, se han incorporado anteriormente micro rejillas de polímero en una fibra de sección adelgazada, como se mencionó en la sección 1.4, produciendo picos de atenuación que demostraron las posibilidades de esta integración. Sin embargo, estas variaciones en el espectro solo se observaron al ejercer presión entre la fibra y las micro-rejillas de polímero, teniendo poco control en el experimento. Estos resultados han motivado el trabajo de tesis que presento, buscando mejorar la integración de un sistema ópticamente transparente, biocompatible y flexible, brindando así una amplia gama de posibilidades de sensado.

1.7 Objetivo General

Diseñar, construir y caracterizar un sensor basado en recubrimientos micro-estructurados de PDMS para rejillas de difracción óptica y evaluar su desempeño como sensor de cambio de índice de refracción y de temperatura.

1.7.1 Objetivos específicos

- a) Diseñar y fabricar un micro arreglo cuyo proceso de fabricación integre la micro-estructura de polímero y la fibra óptica adelgazada en el mismo sustrato tipo membrana deformable (fibra óptica embebida en PDMS), que funcione eficazmente como sensor de cambio de índice de refracción de bajo costo, biocompatible y deformable.
- b) Implementar un arreglo experimental sistemático que permita caracterizar el funcionamiento, desempeño y posibilidades del dispositivo utilizando como sensor de índice de refracción de bajo costo, biocompatible y deformable.
- c) Explorar las capacidades de monitorear las variaciones en índice de refracción para detectar diferentes propiedades físicas (temperatura, desplazamiento, presencia de entidades biológicas, etc.).

Capítulo 2

Principios de sensores basados en rejillas de difracción óptica

RESUMEN

En este capítulo se describen los principios físicos del comportamiento y propagación de la luz a través de una fibra óptica para entender el principio de funcionamiento de una rejilla de inducción de período largo. Además se presenta una introducción de los materiales empleados para realizar litografía suave, que es la técnica utilizada para reproducir las micro-estructuras poliméricas que sirven para inducir una rejilla de difracción óptica.

2.1 Sensores Ópticos

Un sensor forma parte de un sistema de medición que está directamente afectado por un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser medida [39]. Éste puede definirse como un dispositivo que recibe un estímulo y responde con una señal. El estímulo recibido representa la cantidad, propiedad o condición que generalmente se convierte en una señal eléctrica con el fin de que sea compatible con un circuito electrónico [40]. Actualmente se han desarrollado una gran cantidad dispositivos cuyo funcionamiento se basa en fenómenos producidos por la luz, dando lugar a los llamados sensores ópticos. A partir de esto, se dice que los sistemas ópticos están compuestos por un transductor, un canal de comunicación y un acondicionador de señal, tal como se muestra en la figura 2.1.

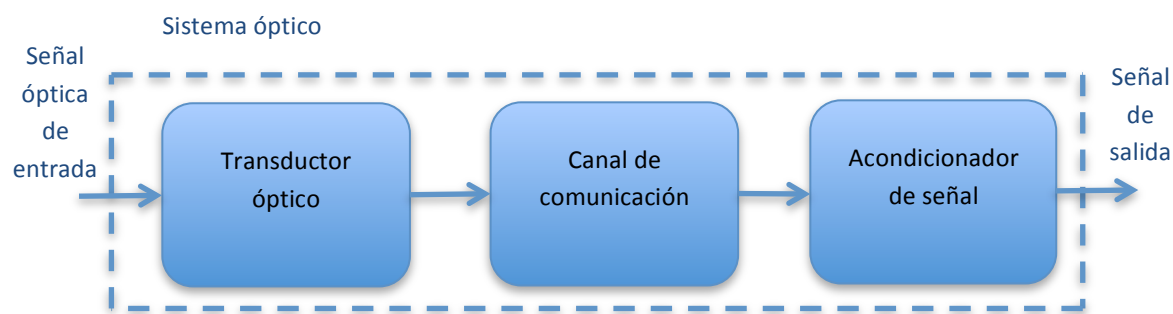


Figura 2.1 Diagrama conceptual de un sistema óptico de sensado.

En particular, un sistema óptico es un sistema en el cual la magnitud del objeto a medir (señal de entrada) induce una modificación o modulación (producidas por fenómenos de reflexión, dispersión o absorción) en algunas características de la luz, que, una vez que ha sido detectada, es procesada y acondicionada para producir una señal de salida, generalmente eléctrica [41].

2.1.2 Sensores basados en fibra óptica

Tal como se mencionó en el capítulo 1, las FOs han aportado un mejoramiento al desarrollo, no sólo de comunicaciones, sino en distintos campos. Dentro de la gran variedad de sensores ópticos, se encuentra el de sensores basados en FO y cuya característica principal radica en la modificación de la luz guiada dentro de la

propia FO, en respuesta a una influencia externa, la cual, cómo ya se ha dicho, puede ser física, química o biológica [42]. De acuerdo a las características que presentan, se clasifican en dos tipos: sensores intrínsecos y sensores extrínsecos. En el primer caso la estimulación externa es convertida en una señal de luz dentro de la FO, mientras que en el caso de los sensores extrínsecos la luz viaja a través de la FO (dentro o fuera) hasta llegar al área de sensado (figura 2.2) [43].

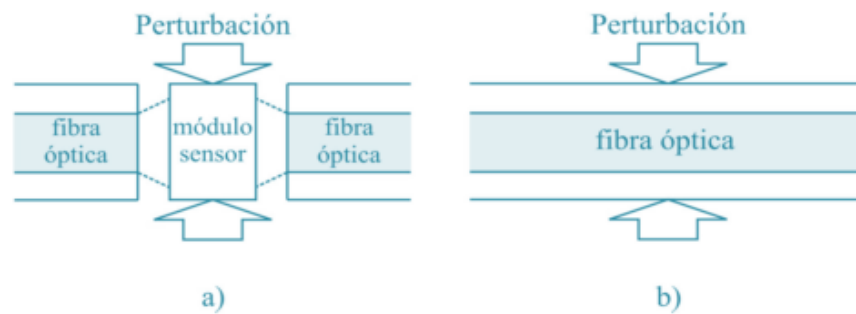


Figura 2.2 Tipo de sensores. **a)** Extrínsecos. **b)** Intrínsecos. (Figura tomada de [4]).

La tabla 2.1 muestra una comparación entre sensores intrínsecos y extrínsecos [44].

Tabla 2.1 Comparación entre sensores extrínsecos e intrínsecos.

Sensores extrínsecos	Sensores intrínsecos
<ul style="list-style-type: none"> - Aplicaciones en temperatura, presión, nivel de líquido y flujo - Menos sensitivo - Fácil multiplexión - Se tienen problemas de conexión - Fácil de usar - Menos costosos en comparación con los sensores intrínsecos 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicaciones en rotación, aceleración, presión acústica y vibraciones - Más sensitivos - Se complica la multiplexión - Se reducen problemas de conexión - La demodulación es más elaborada - Son más caros

Como se mencionó anteriormente, entre los sensores de FO que han tenido un mayor impacto se encuentran los conocidos como rejillas de fibra óptica, las cuales pueden ser de periodo corto (o rejillas de Bragg o de reflexión) o bien, de periodo largo (o de transmisión), siendo estas últimas en las que se enfoca este trabajo de tesis.

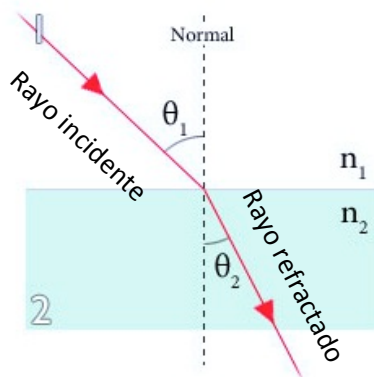
Para entender cómo funciona un sensor basado en FO y el efecto producido por las rejillas basadas en este elemento óptico, a continuación se describe el principio de funcionamiento de una FO.

2.2 Principios físicos de Fibra óptica

Cuando los fotones de luz se transmiten a través de un material transparente, pierden algo de energía y, como resultado, la velocidad de la luz se reduce cambiando la dirección del haz luminoso (figura 2.3). El cambio en la velocidad de la luz que pasa a través de un medio se expresa mediante la propiedad óptica denominada índice de refracción. El índice de refracción de un material, también conocido como índice refractivo, el cual es representado por el símbolo n , es la relación entre la velocidad de luz en el vacío (c) y la velocidad en ese medio específico (v):

$$n=c/v \quad (2.1)$$

El rayo de luz incidente que pasa de un medio con índice de refracción n_1 a otro con índice de refracción n_2 , se relaciona con el ángulo incidente θ_1 y el ángulo de refracción θ_2 , tal como lo establece la ley de Snell, esto se representa en la figura 2.3.



Ley de Snell

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

Donde:

n_1 : Índice de refracción del medio 1

n_2 : Índice de refracción del medio 2

Figura 2.3 Rayo de luz incidente en la frontera de la interfaz entre dos medios de diferente índice de refracción y su relación con el ángulo de incidencia dado por la Ley de Snell (figura adaptada de [45]).

Para un rayo de luz que pasa de un medio a otro de menor índice de refracción, existe un ángulo de incidencia límite a partir del cual la luz deja de atravesar la superficie y es reflejada internamente de manera total. Este ángulo es conocido como ángulo crítico θ_c , y se define en $\theta_2 = 90^\circ$ y está dado por la siguiente expresión (derivada de la ley de Snell) [46]:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.2)$$

Es decir, a medida que el ángulo de incidencia se incrementa y sobrepasa el ángulo crítico se produce el efecto conocido como reflexión interna total (figura 2.4).

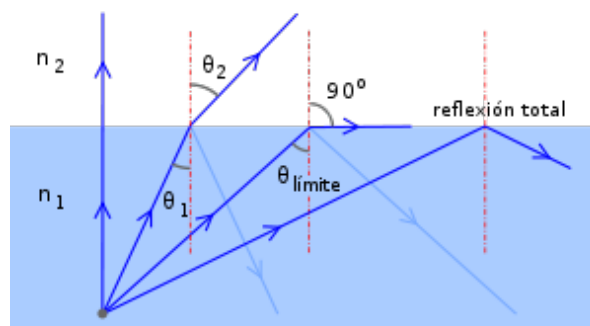


Figura 2.4 Diagrama que indica el ángulo crítico θ_c para la reflexión total interna de la luz que pasa de un medio de índice refractivo alto n_1 a otro de índice refractivo bajo n_2 . Adviértase que entre mayor sea el ángulo de incidencia, la luz se refleja totalmente de regreso hacia el medio de alto índice de refracción (figura adaptada de [47]).

Así, la FO está conformada por un núcleo con índice de refracción n_1 y un revestimiento con índice de refracción n_2 . Además, está cubierta por un recubrimiento como se muestra en la figura 2.5 [48].

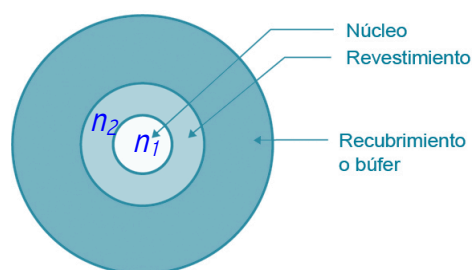


Figura 2.5 Vista de la sección transversal de una fibra óptica

De acuerdo a lo descrito anteriormente, para que exista la propagación de la luz dentro de la fibra, el índice de refracción del núcleo (n_1) debe ser mayor que el índice de refracción del revestimiento ($n_1 > n_2$). De este modo se producirá el fenómeno de reflexión total interna (figura 2.2), que permite la transmisión de la luz a través de la fibra y la conducción de los rayos de luz son guiados a través del núcleo de la fibra con bajas pérdidas [49].

2.2.1 Propagación de la luz en fibras ópticas

La luz que se propaga en una fibra óptica esta constituida por un conjunto de ondas electromagnéticas guiadas, llamadas modos. Cada modo guiado es un patrón de campos magnéticos o eléctricos distribuidos, que se repiten a lo largo de la fibra, en intervalos iguales y de forma discreta. La luz que viaja a través de la FO, a lo largo del eje de la fibra es representada por la expresión $e^{i(\omega t - \beta z)}$, donde el factor β es la componente de la constante de propagación de la onda $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Para modos guiados, β puede asumir ciertos valores discretos en el rango donde se cumpla la condición $n_1 > \beta > n_2$. Un modo guiado que viaja a lo largo del eje de la fibra es la superposición de ondas planas, cuya fase cambia en cada reflexión en la interfaz entre el núcleo y el revestimiento [50]. El concepto de propagación en forma de modos forma parte de la ecuación característica de la fibra óptica, que proporciona las condiciones que debe cumplir la constante de propagación β de la luz que viaja por la fibra. Esta ecuación tiene soluciones múltiples que proporcionan constantes de propagación β_m , $m=1,2,\dots, n$, donde cada solución representa un modo [30].

En guías de onda planas, la solución de la ecuación de Maxwell en la frontera proporciona modos eléctricos y magnéticos transversales, sin embargo, en el caso de las guías de onda cilíndricas (fibras ópticas), las condiciones de frontera conducen al acoplamiento entre las componentes del campo eléctrico y magnético y produce modos híbridos, y se designan como HE y EH, dependiendo de la contribución transversal mayoritaria del campo magnético y eléctrico respectivamente.

Un fenómeno importante en las fibras ópticas, sucede cuando la luz se refleja totalmente en el interior de la fibra sin que su intensidad decaiga abruptamente a cero en la interfaz, sino que una pequeña porción de la luz penetra

en el medio reflectivo, lo suficiente para reconocer la diferencia en el índice de refracción. Este campo electromagnético es conocido como onda evanescente o como onda de frontera [51] y su intensidad decae exponencialmente con la distancia, empezando en la interfaz y extendiéndose dentro del medio con menor índice de refracción [30]. Esta distancia es definida como profundidad de penetración d_p y matemáticamente se describe como:

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}} \quad (2.3)$$

Donde λ es la longitud de onda de la fuente de luz, θ es el ángulo de incidencia de la luz en la interfaz del núcleo y el revestimiento, y n_1 y n_2 son los índices refractivos del núcleo y del revestimiento, respectivamente. Esto se ilustra en la figura 2.6.

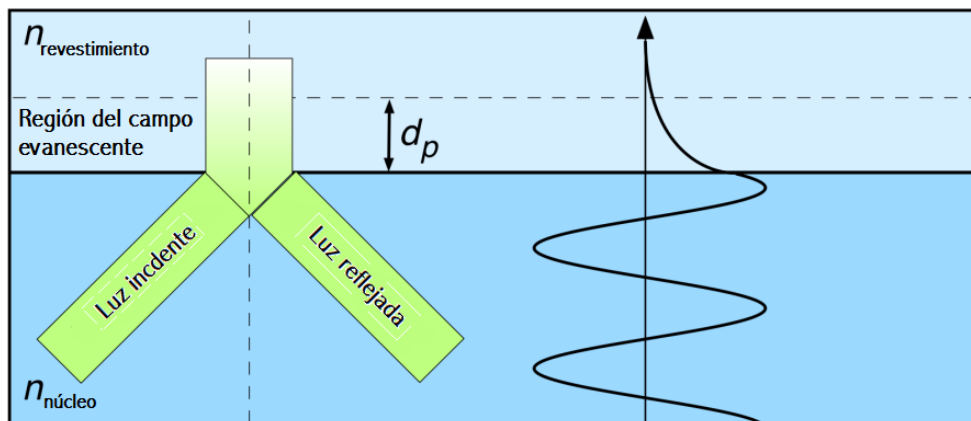


Figura 2.6 Profundidad de penetración del campo evanescente en la interfaz núcleo-revestimiento.

Algunos sensores de fibra óptica utilizan este principio para sensado de diferentes parámetros físicos y químicos, especialmente para contaminantes ambientales [14]; sin embargo, se requiere exponer el campo evanescente, lo que se explicará más a detalle en el apartado 2.3.4.

2.2.2 Parámetros de las fibras ópticas

Las fibras ópticas tienen parámetros que nos permiten definir características específicas, como los parámetros estáticos, los cuales son constantes a lo largo de la fibra, dentro de las tolerancias propias de fabricación, y pueden ser de tipo óptico o bien geométricos, como la apertura numérica, que es la cantidad de luz que puede aceptar una fibra y está dada por la siguiente expresión [19]:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.4)$$

Otro parámetro importante es el que aparece al trabajar con las ecuaciones de Maxwell y obtener las soluciones de dichas ecuaciones de campo. Este es conocido como parámetro "V", o bien frecuencia normalizada, y relaciona el número de veces que el radio "a" de la fibra contiene la longitud de onda. Este factor V depende de la longitud de la onda que se está propagando (λ_0), del radio del núcleo (a), del índice de refracción del mismo y de la apertura numérica (NA), como se muestra en la siguiente ecuación.

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda_0} NA$$

(2.5)

Por otro lado, los parámetros dinámicos son características que afectan la propagación de la luz como lo son la atenuación y la dispersión.

2.2.3 Mecanismos de atenuación en fibras ópticas

La luz que se propaga en un conductor de fibra óptica experimenta una atenuación en su espectro de transmisión, es decir, produce una pérdida de energía [52]. La atenuación (α) de una fibra está definida por la relación entre la potencia óptica de la señal de salida (P_{out}) y la potencia óptica de la señal de entrada (P_{in}) de una fibra de longitud L, como se expresa en la ecuación (2.6)..

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (2.6)$$

Cabe mencionar que la relación de potencias es función de la longitud de onda como se muestra más adelante en la figura 2.7. Los mecanismos básicos de atenuación en una fibra son producidos por fenómenos de absorción y esparcimiento o bien por curvaturas [53]. La absorción es producida principalmente por dos diferentes mecanismos: absorción intrínseca, generada por defectos atómicos en la composición del vidrio, y la absorción extrínseca, debida a impurezas como el agua (iones de OH), y metales, tales como cromo, cobalto y cobre. Las pérdidas por esparcimiento surgen debido a variaciones microscópicas en la densidad del material, fluctuaciones en la composición e inhomogeneidades o defectos durante la manufactura de la fibra. El mecanismo dominante de este tipo de atenuación es denominado esparcimiento Rayleigh y este fenómeno se incrementa para longitudes de onda pequeñas, ya que dicha atenuación es proporcional a λ^{-4} [54].

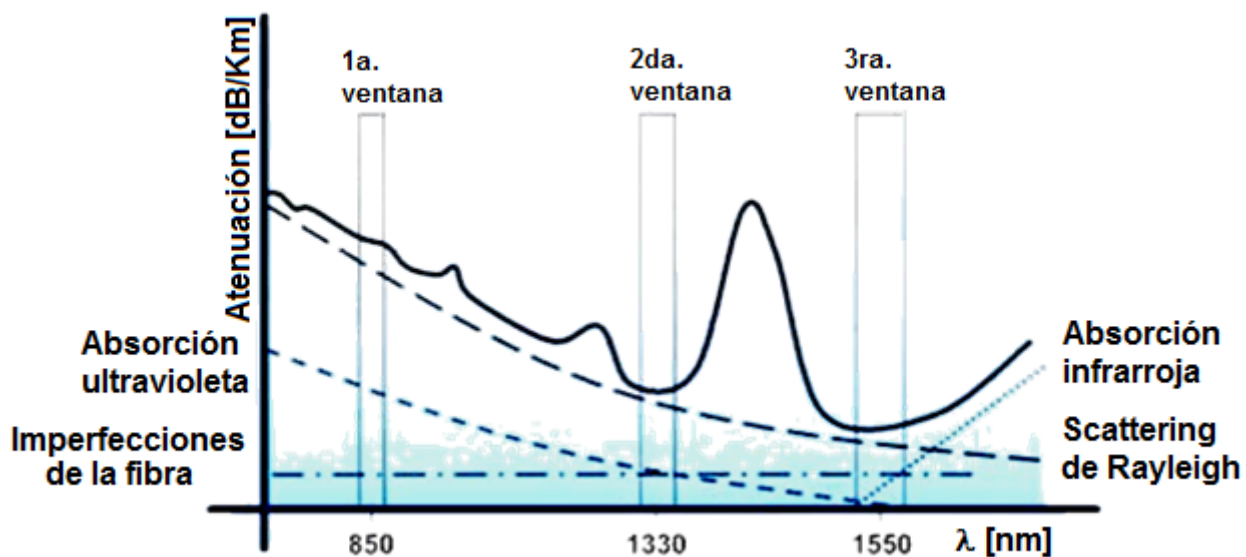


Figura 2.7 Gráfica que muestra las pérdidas en una fibra óptica en relación con la longitud de onda de cada ventana.

Finalmente, se tienen las pérdidas producidas por curvaturas de las cuales existen esencialmente dos tipos asociadas a dos diferentes mecanismos. El primero de ellos es conocido como macro-curvaturas y están relacionadas con una curvatura axial de radio relativamente largo (del orden de 1 mm o mayor), las cuales pueden

ser producidas a partir de un esfuerzo inducido sobre la fibra. El segundo mecanismo es conocido como microcurvatura, el cual se refiere a la pérdida derivada de la acumulación de ondas de pequeña magnitud, formadas por pequeños desplazamientos de la fibra en direcciones que son transversales al eje de la fibra, y cuya magnitud se encuentra en el orden de los micrómetros. Este efecto se asocia con micro-deformaciones dentro del recubrimiento [54]. En la figura 2.8 se muestra un esquema de los principales efectos que producen atenuación en una fibra óptica.

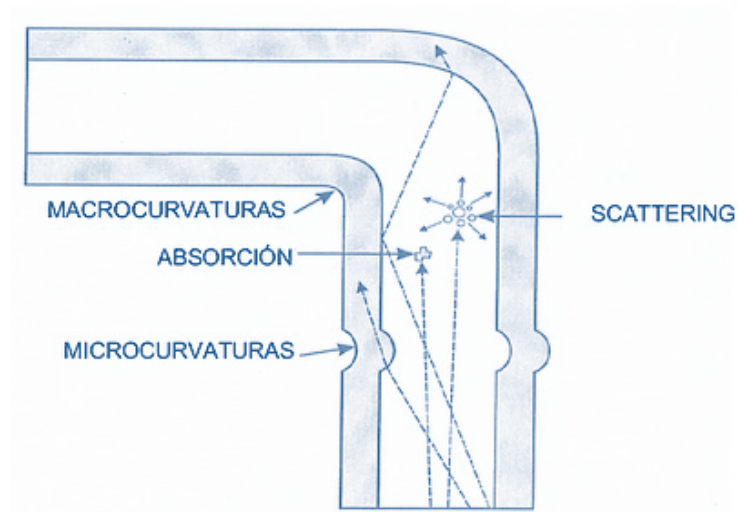


Figura 2.8 Principales efectos que producen atenuación en una fibra óptica.

2.2.4 Clasificación de fibras ópticas: monomodo y multimodo

Las fibras ópticas están divididas en dos grupos llamados monomodo y multimodo. El parámetro V se utiliza para identificar el número de modos posibles en una transmisión por una guía de onda, demostrándose que para valores de V menores a 2,405 existe únicamente un solo modo de propagación, mientras que para valores superiores es posible la existencia de más modos. En la expresión de frecuencia normalizada (ecuación 2.5), se observa que para una determinada longitud de onda incidente, se pueden combinar diversos valores de los índices de refracción del núcleo y del revestimiento, de modo que se mantenga una V menor o igual que 2.405, de lo que resultarán diferentes fibras con una característica común: la transmisión, por lo que se les denomina "fibras monomodo". A medida que el valor de V se incrementa, aumenta el número de modos transmitidos y a

estas fibras se les denominan "fibras multimodo". Es importante mencionar que la presencia de muchos modos de transmisión provoca atenuaciones en la señal de información que se esté transmitiendo.

Esta clasificación depende del perfil del índice de refracción de la fibra, el cual puede ser de índice escalonado o índice graduado. En el caso de las fibras con índice escalonado monomodo, el perfil del índice en la sección transversal del núcleo de la fibra se mantiene constante; en fibras monomodo comerciales, el diámetro del núcleo suele ser de 8 μm , mientras que el diámetro del forro exterior es de aproximadamente 125 μm . En la fibra de vidrio óptica tipo multimodo, la cual tiene un núcleo de índice de refracción graduado, es decir, el índice del núcleo varía gradualmente desde el centro del núcleo hasta el revestimiento, muchos modos de onda pasan simultáneamente a través de la fibra, lo que causa una señal existente más dispersa que la producida por la fibra monomodo.

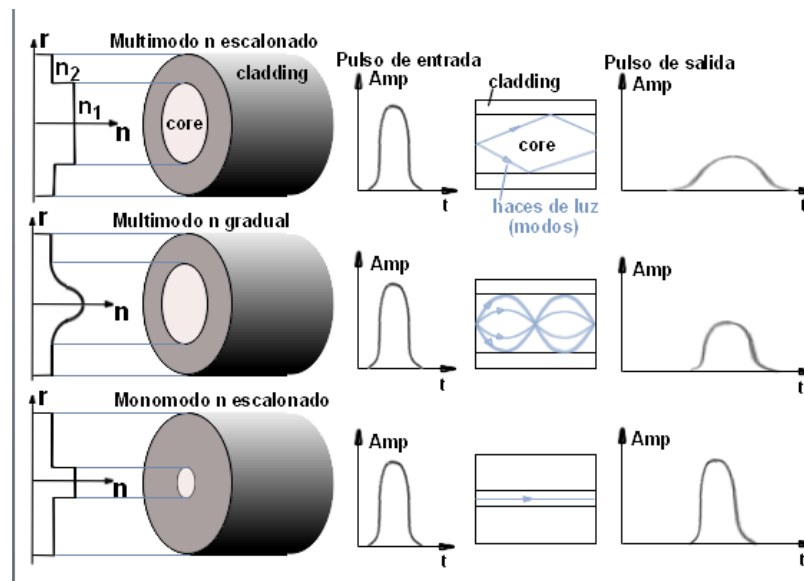


Figura 2.9 Clasificación de las fibras ópticas de acuerdo al perfil del índice de refracción del núcleo y los modos de propagación. Se observa que en las fibras multimodo se presenta mayor dispersión temporal que en las fibras monomodo, y a su vez las fibras de índice gradual presentan menor dispersión que las fibras multimodo de índice escalonado (figura adaptada de [55]).

Finalmente las fibras multimodo con índice de refracción escalonado tienen un núcleo con diámetro 62.5 μm , lo cual es mayor que el de las fibras monomodo. Este tipo de fibras son usadas en aplicaciones que requieren grandes anchos de banda (<1 GHz) en distancias relativamente cortas (3 Km), tales como las redes de área

local. Dentro de las ventajas de este tipo de FO se tiene que se usan de una forma relativamente fácil, dado que su núcleo es grande, lo que ayuda al acoplamiento de la luz con fuentes de luz láser y de led. En la tabla 2.3 se muestra una relación de las características principales entre los tres tipos de FO.

Tabla 2.3 Características de los principales tipos de FO.

Monomodo de índice escalonado	Multimodo de índice gradual	Multimodo de índice escalonado
<ul style="list-style-type: none"> - Apertura numérica pequeña - Difícil acoplamiento de la luz - No hay dispersión modal - Largas distancias - Alta velocidad de transmisión de datos 	<ul style="list-style-type: none"> - Apertura numérica grande - Fácil acoplamiento de la luz - Dispersión modal baja 	<ul style="list-style-type: none"> - Apertura numérica grande - Fácil acoplamiento de la luz - Existe dispersión modal - Funciona en distancias cortas - Baja velocidad de transmisión de datos

Cabe mencionar que la mayoría de los nuevos sistemas de comunicación por fibra óptica usan las fibras monomodo, debido a que éstas tienen pérdidas luminosas bajas y son más baratas y fáciles de fabricar.

2.2.5 Método para incrementar la sensibilidad a cambios en el medio externo de las fibras ópticas

Como se mencionó en el Capítulo 1, las fibras ópticas fueron diseñadas originalmente para comunicaciones con bajas pérdidas, en donde la profundidad de penetración descrita en el apartado 2.3, es mucho más pequeña que el espesor del recubrimiento, provocando que no haya interacción entre el campo óptico y el medio ambiente. Sin embargo, para algunas aplicaciones de sensado, el campo evanescente necesita ser expuesto al ambiente [56], con lo cual se incrementa la sensibilidad de la FO. Las fibras ópticas adelgazadas (FOA) ofrecen una buena solución para este propósito y pueden fabricarse mediante grabado químico o bien, mediante un proceso de calentamiento-tensión, en el que la fuente de calor puede ser un arco eléctrico, láseres de alta potencia o una flama [57]. Este último es el que se utiliza en este trabajo, empleando una flama producida por hidrógeno. La geometría de una FOA consiste en tres partes concéntricas que consisten en una zona central, en donde se

encuentra el diámetro más adelgazado y uniforme, y dos zonas de transición cónicas a los costados de la zona central, en donde gradualmente se cambia el diámetro, lo que se representa en la figura 2.10.

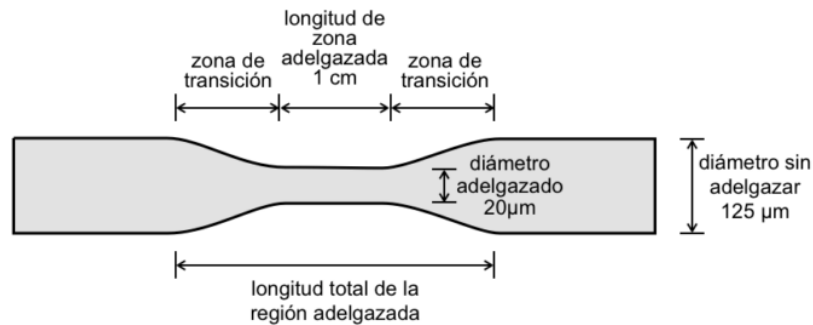


Figura 2.10 Esquema que muestra las partes de una fibra adelgazada. Al centro de la fibra se encuentra la zona adelgazada de diámetro uniforme, que tiene a sus extremos las dos zonas de transición (figura tomada de [30]).

En este trabajo, para realizar el adelgazamiento de la FO, se utilizó el equipo Dowson OC-2010, el cual cuenta con un quemador que produce una flama de hidrógeno. Para realizar este proceso se utiliza una FO monomodo (SMF-28e, Corning), a la cual se le retira el recubrimiento en la zona que se requiere adelgazar y posteriormente es sujeta a dos postes cuyo movimiento es controlado de forma precisa mediante motores a pasos. Al comenzar el proceso de adelgazamiento, se aplica tensión a la fibra al tiempo que la flama de hidrógeno se desplaza longitudinalmente a la fibra, en forma oscilatoria, calentando la zona de la fibra que se desea adelgazar, tal como se observa en la figura 2.11.

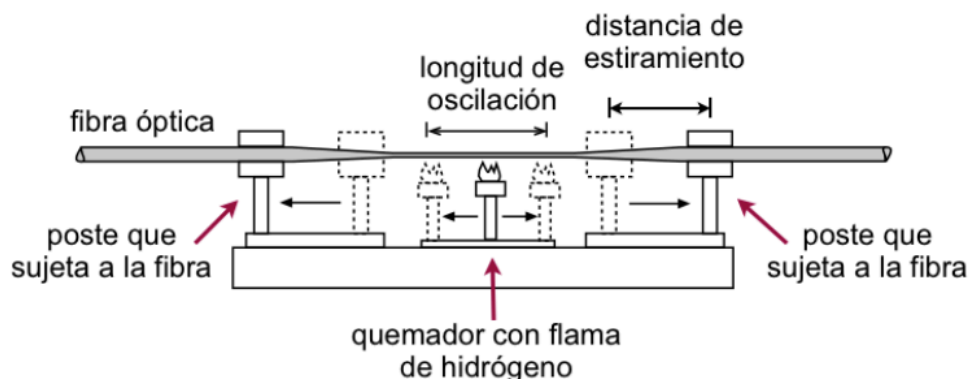


Figura 2.11 Diagrama de la estación Dowson OC-2010. Los postes que sujetan a la fibra se van alejando uno del otro para mantener a la fibra en tensión, al mismo tiempo que la flama oscila una longitud constante por debajo de la zona de la fibra que se va a adelgazar (imagen tomada de [30]).

2.3 Rejillas de período largo (RFPL).

Tal como se menciona en el apartado 1.2.1, la forma más simple de una rejilla de fibra óptica es en la cual hay una modulación periódica del índice de refracción del núcleo de una fibra óptica monomodo, cuyo periodo de modulación se designa por Λ . El método más común para su fabricación consiste en utilizar fibras ópticas dopadas con germanio, las cuales son sensibles a la luz ultravioleta [30].

Los modos que se propagan dentro de una fibra óptica se pueden clasificar en dos tipos: modos del revestimiento y modos del núcleo. El núcleo de la fibra permite que sus modos se propaguen casi sin sufrir pérdidas. En cambio en el revestimiento los modos propagados presentan pérdidas muy altas, por lo que la energía de la luz que se propaga se disipa rápidamente y la luz no logra llegar al otro extremo de la fibra [10]. En el caso de las rejillas de Bragg o de período corto, donde el periodo Λ es del orden de menos de $100 \mu\text{m}$, existe un intercambio de energía (acoplamiento) entre modos ópticos del núcleo de la fibra que se propagan en direcciones opuestas, mientras que en las rejillas de periodo largo, cuyo periodo de modulación es del orden de cientos de micrómetros, se producen acoplamientos entre modos ópticos del núcleo y el revestimiento de la fibra pero con la misma dirección de propagación. En ambos casos, estos acoplamientos se observarán en el espectro de transmisión como picos de atenuación que se presentan en distintas longitudes de onda, como se muestra en la figura 2.12.

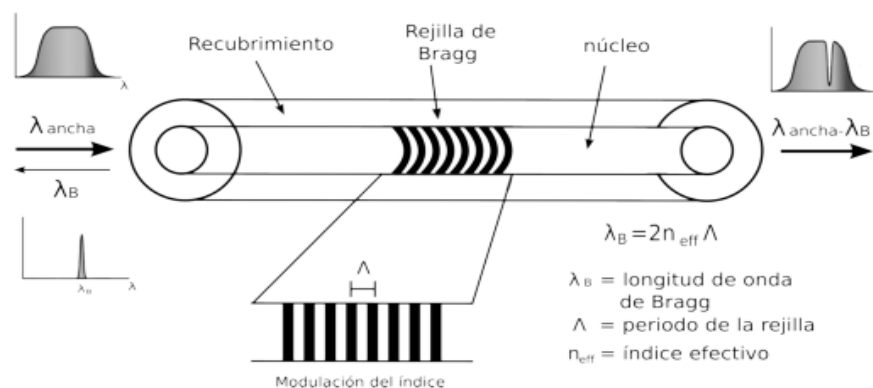


Figura 2.12 Esquema que describe el principio de operación de una rejilla de fibra óptica de periodo corto (imagen adaptada de [20]). La variación del índice en el núcleo es una estructura periodica similar a un holograma de volumen o una red cristalina que actua como filtro paso banda.

La condición de acoplamiento en rejillas de periodo largo se puede escribir en términos de los índices de refracción efectivos, partiendo del hecho de que $\beta = n_{\text{eff}} 2\pi/\lambda$

$$\frac{2\pi(n_{\text{eff},01} - n_{\text{eff},m})}{\lambda} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (3)$$

donde $n_{\text{eff},01}$ es el índice de refracción efectivo del modo fundamental del núcleo, $n_{\text{eff},m}$ es el índice de refracción efectivo del modo $\beta(m)$ del revestimiento, λ es la longitud de onda en la cual se produce el acoplamiento entre los modos y Λ es el periodo de modulación de la RFPL, y por lo tanto la longitud de onda donde aparecerá el pico de atenuación en el espectro de transmisión [30].

Capítulo 3

Fabricación y caracterización del dispositivo de RFPL

RESUMEN

Se describen los procedimientos desarrollados para encapsular una fibra óptica adelgazada, FOA, en una micro-estructura polimérica, así como algunas de las complicaciones presentadas en cada una de las distintas formas de fabricación y los métodos abordados para corregir y mejorar los procedimientos. Se muestran los resultados obtenidos al caracterizar la respuesta del dispositivo ante cambios de temperatura, al ser expuesto a sustancias con diferente índice de refracción y se presenta el principio para realizar mediciones de desplazamiento con este tipo de dispositivos.

3.1 Pruebas preliminares

Como ya se comentó en el capítulo 1, este trabajo es la continuación de investigaciones previas en las que se indujo una RFPL con una fibra óptica adelgazada y dos microestructuras de PDMS que ejercían presión sobre la zona adelgazada de una FOA [30]. En ese experimento se generaron las micro-estructuras de polímero empleando el método de litografía suave, explicado a detalle en el apartado 2.5.1; sin embargo, el sistema de molde-réplica se realizó con moldes de poliestireno termoplástico. Este tipo de moldes son fabricados imprimiendo el diseño de la microestructura sobre láminas de poliestireno termoplástico conocidas como *Shrinky Dinks* (modelo *Crystal Clear, Unprinted for Creativity*). La impresión se realiza 5 veces consecutivas sobre la misma lámina en una impresora láser convencional, de manera que el tóner se va depositando en capas para aumentar la altura de los canales. Estos depósitos no se realizan de manera uniforme, ya que no se tiene precisión en el alineamiento de cada capa de tinta o sobre-impresión. Mediante este método se lograron reproducir canales de 60 μm de profundidad con un periodo de 624 μm [58], [59] .

Con el arreglo experimental mencionado, se observó que para poder obtener picos de resonancia a la misma longitud de onda, cada vez que se presiona la fibra con los micro-canales, era necesario ajustar con precisión la forma en que el dispositivo de PDMS presionaba la fibra. Esto debido a que existían pequeñas variaciones en la posición del dispositivo. El ángulo que se formaba entre los micro-canales con el eje de la fibra, y la distribución de la fuerza con que se presionaba sobre el dispositivo, provocaba que la longitud de onda y la amplitud de los picos de atenuación variaran considerablemente, limitando así, las posibilidades de utilizar el dispositivo como un sensor confiable. Para solucionar estas complicaciones se propuso la idea de embeber la fibra óptica dentro de la micro-estructura de polímero.

Para el desarrollo de este trabajo, el primer paso fue repetir el experimento anterior pero con micro canales de mayor profundidad ya que se tenía la hipótesis de que se requería ejercer presión entre las micro estructuras y la FOA para forzar un contacto uniforme, lo que ocasionaba que se deformara la micro estructura fácilmente. Canales más profundos podrían permitir cambios más notorios en el índice de refracción que con la configuración anterior, y por lo tanto disminuir la presión necesaria para inducir los picos de atenuación. Para fabricar dichos

canales de mayor profundidad, fue necesario buscar una alternativa a los moldes de poliestireno termoplástico, puesto que la profundidad alcanzada por esta técnica depende del número de impresiones láser que se depositan sobre las láminas de poliestireno termoplástico. Como se comentó, la desventaja de este método es que se va perdiendo resolución en cada superposición de impresiones. Se propuso entonces emplear moldes metálicos fotograbados (el fotograbado es la técnica utilizada en este trabajo de tesis, el cual será explicado a detalle en el apartado 3.3 de este escrito).

3.2 PDMS: propiedades físicas y mecánicas

Para inducir la rejilla de difracción, en este trabajo se utiliza el PDMS, el cual es un elastómero de silicón. Desde que los silicones fueron sintetizados por primera vez por Wacker Chemie en 1950, éstos se han infiltrado en todas las áreas de la vida. Los elastómeros, como el PDMS, son polímeros cuyo comportamiento mecánico es elástico. Los polímeros (del griego poly “muchos” y mero “parte, segmento”) son macromoléculas, generalmente orgánicas, formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros, cuya unión se logra mediante reacciones de polimerización. La fórmula química del PDMS es $(\text{C}_3\text{H}_7)_3[\text{SiO}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n\text{Si}(\text{CH}_3)_3$, donde n es el número de unidades repetitivas del monómero $[\text{SiO}(\text{CH}_3)_2]$. En este trabajo de tesis, el PDMS usado es el conocido comercialmente como Sylgard 184, el cual es provisto en dos componentes: una base de monómero, que contiene vinildimetil siloxano, y un agente de curado basado en hidrurodimetil siloxano. El proveedor sugiere mezclar los componentes en una proporción de 10:1 (base: agente de curado) [36], de tal forma que se produzca un polímero sólido pero flexible [48], cuyas características puede variar al modificar la relación de la mezcla entre la base y el agente curante.

Una de las principales aplicaciones que se le ha dado al PDMS es para el encapsular componentes electrónicos, esto se realiza por medio de la técnica de moldeo (también conocida como colada), con el fin de prolongar el tiempo de vida de los dispositivos, pues gracias a sus características (las cuales se describen más adelante en este mismo apartado), actúa como un aislante dieléctrico, los protege de condiciones ambientales, de golpes mecánicos y todo esto dentro de un amplio rango de temperatura ($-50\text{ }^\circ\text{C}$ - $200\text{ }^\circ\text{C}$) [60]. Sin embargo, en la actualidad se utiliza ampliamente en aplicaciones de microfluídica para sistemas de separación, mezcladores y válvulas [61]; en sistemas MEMS, como parte de procesos de microfabricación y membranas ultradelgadas y

ultrasensibles [62–65]; y también se utiliza en aplicaciones ópticas: lentes, rejillas de difracción, etc. [36], [66], todo esto es gracias a las propiedades que posee, las cuales se describen en la tabla 3.1 [36], [67].

Tabla 3.1 Propiedades físicas y químicas del PDMS.

Propiedad	Característica	Consecuencia
Química	Peso de unidad repetitiva 207.4 (g/mol), con un peso molecular numeral de 27000, una densidad de 0.928 (g/mL) y una viscosidad de 500 cSt (en membranas).	Tamaño máximo del poro es de 80 μm^2 con una rugosidad de 550.87 (nm).
Óptica	Transparente UV, longitud de onda de corte de 240 nm. Índice de refracción 1.4235. Absorción del 0.04% y transmisión arriba del 95% en la región visible	Detección óptica de la 240 (nm) a 1100 (nm).
Eléctrica	Aislante, conductividad eléctrica $4 \times 10^{-13} \Omega\text{m}$	Permite la incrustación de circuitos.
Mecánica	Módulo de Young 360-870KPa, coeficiente de Poisson 0.5, módulo cortante 2.24 MPa, densidad 0.97 kg/m ³	Adopta la forma de la superficie, existe facilidad de moldeado y es reversible cuando se actúa sobre él al deformarlo.
Térmica	Aislante, conductividad térmica 0.15 W/(m.k), coeficiente de expansión térmica 330 $\mu\text{m}/(\text{m}.\text{°C})$	Se usa como aislante térmico, no permite disipación de calor.
Interfacial	Baja energía libre superficial 20/erg/cm ² , 100% de elongación	Réplicas son fácilmente removidas del molde.
Permeabilidad	Impermeable al agua, permeable a gases y solventes orgánicos no polares.	Permite transportar gas a través de grandes cantidades de material, aunque es incompatible con muchos solventes orgánicos.
Reactividad	Inerte, puede ser oxidado por exposición a un plasma	No reactivo con muchas sustancias químicas, la superficie puede ser grabada
Toxicidad	No tóxico	Se usa en aplicaciones biomédicas y biológicas.

3.2.1 Litografía suave y fotograbado

La litografía suave ha sido utilizada como una herramienta común, de bajo costo, para definir micro estructuras de polímero, debido a que no se requieren instalaciones especiales, como un cuarto limpio, para producir dispositivos de PDMS; además, es un método que se lleva a cabo de forma rápida y simple [68]. El

procedimiento que se sigue, parte de crear el diseño del patrón en software CAD (*Freehand, Illustrator, AutoCAD*) en el que se define la topografía del dispositivo y utilizar dicho diseño para fabricar, mediante técnicas como “*shrinky dinks*” o fotograbado, el molde o patrón, en el cual pueden utilizarse materiales como son los polímeros, los metales o las cerámicas. Cabe mencionar que basta un solo molde para fabricar una gran cantidad de réplicas de PDMS [69]. El principio de la litografía suave empleada, radica en la técnica de molde-réplica. Una vez que se tiene el molde, se vierte el PDMS sobre la superficie del molde y después de curarlo se desprende del molde (figura 3.1). Las réplicas producidas bajo este método alcanzan resoluciones de hasta 20 nm [70], sin embargo depende en gran medida de la resolución del molde.

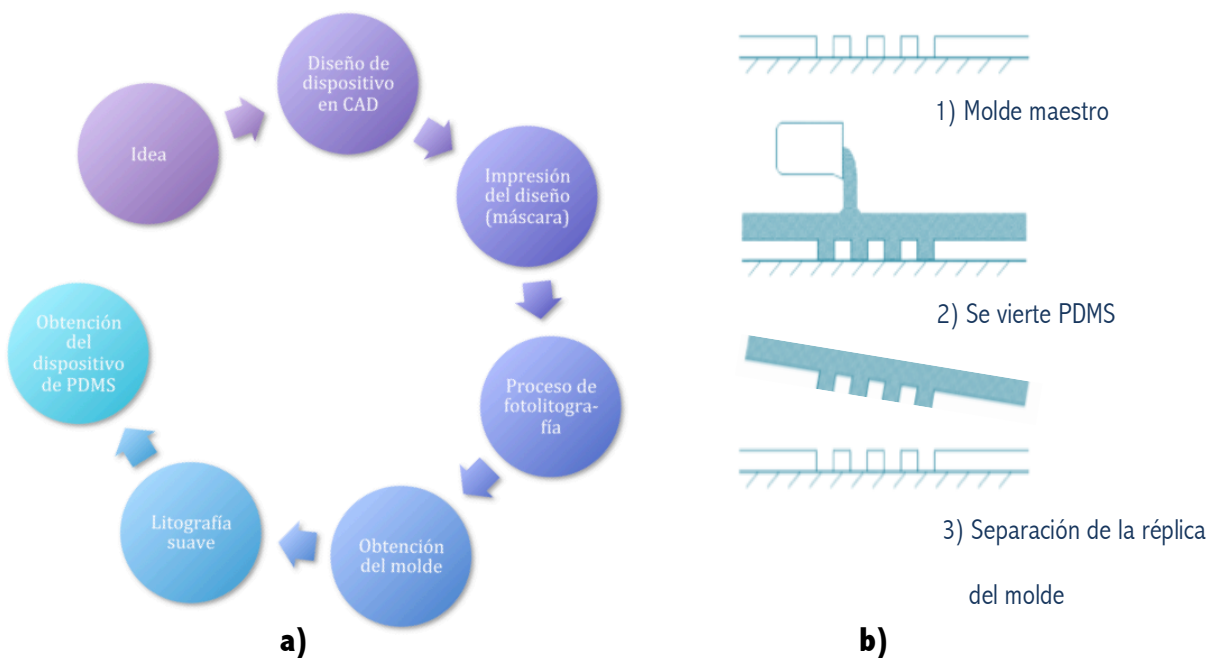


Figura 3.1 a) Método para obtener réplicas de PDMS. b) Proceso de obtención de la réplica de PDMS mediante litografía suave.

3.3 Fabricación de moldes metálicos de canales profundos

El molde metálico utilizado en este trabajo es fabricado por la técnica denominada fotograbado. Este proceso consiste en aplicar una película fotosensible (*photoresist*) sobre el sustrato, que en este caso es una lámina de zinc. Sobre la película fotosensible se coloca un acetato con la imagen previamente diseñada en CAD (fotolito) que contiene las microestructuras que se desean grabar en el metal, enmascarando parte de la película

fotosensible, que posteriormente es expuesta a radiación UV. La película fotosensible protege selectivamente a la lámina de zinc, de acuerdo al diseño plasmado en el acetato, por lo que al sumergirlo en el ácido nítrico, las microestructuras serán grabadas en relieve sobre la lámina de zinc y las partes que no fueron enmascaradas se retiran mediante procesos químicos (revelado), es decir, se retiran de la superficie de la lámina .

Después de retirar completamente la película fotosensible, y antes de ser utilizado, se lava el molde con una solución de hidróxido de sodio (Extran MA 01 marca Merck), y se talla con una esponja, se enjuaga con agua desionizada y se seca con aire. Este proceso se ilustra en la figura 3.2.

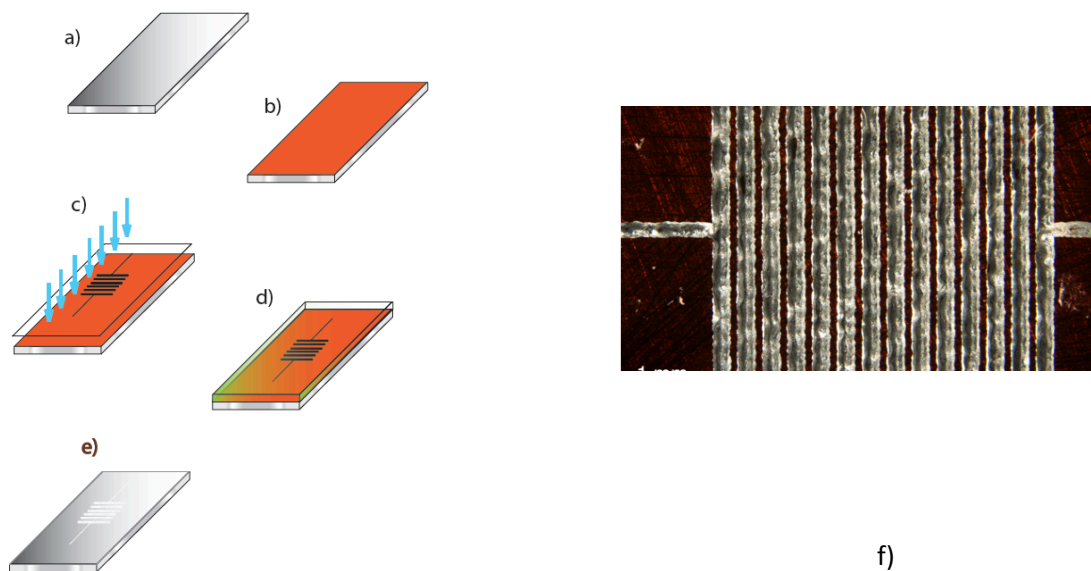


Figura 3.2 a) Lámina de zinc. b) Depósito de la película fotosensible sobre la placa de zinc. c) Exposición a la Luz UV sobre el acetato que contiene el diseño geométrico de la estructura. d) Inmersión de la placa en ácido nítrico para grabar los canales. e) Retiro de la película fotosensible y limpieza del molde. f) Fotografía de un molde metálico micro estructurado.

3.3.1 Caracterización topográfica de moldes

Para caracterizar la topografía de los moldes se empleó un perfilómetro óptico comercial, Polytec MSA-4 que se encuentra en el laboratorio del Centro UNAMems, en la División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería. Este equipo es un analizador de micro-sistemas, el cual cuenta con un módulo para realizar mediciones topográficas de una estructura, con base en el principio de interferometría óptica de luz blanca. Para

determinar la topografía del dispositivo se realiza un barrido en el eje z entre el objeto a medir y un objeto a una distancia de referencia mediante un actuador piezo-eléctrico y el patrón de interferencia producido se detecta y captura mediante un microscopio y una cámara de video. Sin embargo, este método no es ideal para superficies transparentes tales como el PDMS o los moldes de PST, ya que éstas no producen patrones de interferencia definidos debido a que para ello la superficie debe reflejar la luz y en el caso de los objetos transparentes no se produce dicho fenómeno.

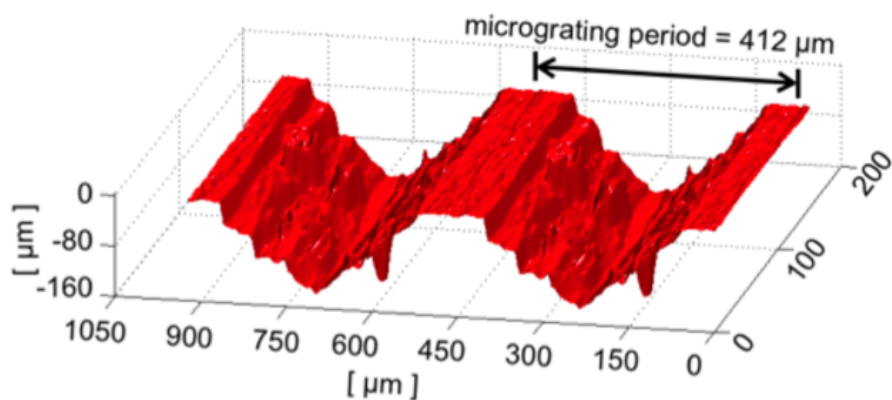


Figura 3.3 Caracterización de los microcanales del molde metálico con el equipo Polytec MSA-400.

Sin embargo, al contar con moldes metálicos en vez de PST, podemos tener una medición de mayor resolución y considerando que el PDMS tiene la propiedad de replicar estructuras de hasta 20 nm, entonces podemos utilizar la medición directa del molde como una referencia fiable de las dimensiones que se obtendrán del sistema embebido (figura 3.3) que se describe más adelante.

Al caracterizar los microcanales se obtiene que la profundidad en estos nuevos moldes es ahora de 120-150 μm , en vez de los 60-80 μm logrados anteriormente con los moldes de poliestireno. Además, con esta técnica, se logra mayor resolución en el periodo de la microestructura, el cual se redujo de 600 μm a 400 μm . El diseño de este primer molde metálico se muestra en la figura 3.2, junto con la caracterización de los microcanales hechas con el equipo Polytec MSA-400.

3.4 Caracterización de la forma geométrica de la FOA

Tal como se mencionó en el capítulo 2, para incrementar la sensibilidad de las fibras ópticas, éstas son adelgazadas en la estación de trabajo Dowson OC-2010. Para verificar la geometría y las dimensiones se utiliza el microscopio digital Dino-Lite (AD7013MTL) (figura 3.4), el cual cuenta con un sensor de 5 megapíxeles, magnificación de 20x y un software que permite obtener las dimensiones de la fibra óptica, lo cual es importante, ya que se requiere que la sección más uniforme de la FOA, se coloque lo más alineada posible con los microcanales del molde metálico. Para realizar las mediciones, la FOA se fija en una placa de vidrio y paralelamente se coloca una micro-regla patrón. Después de calibrar el microscopio, partir de un punto de referencia, se comienza un barrido a lo largo de la parte sin recubrimiento de la FOA, y se van tomando las medidas cada 2 mm.

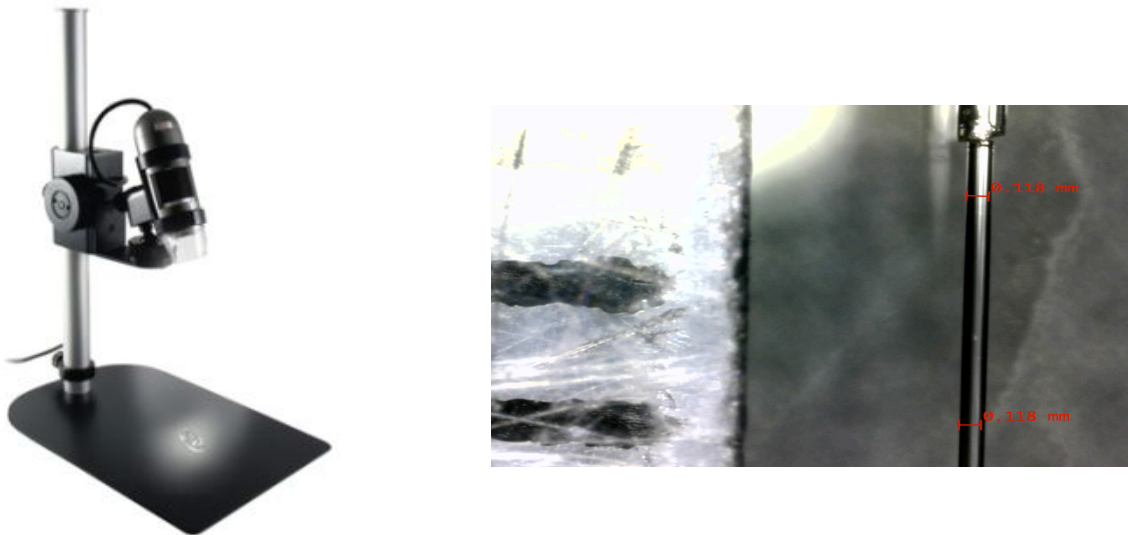


Figura 3.4 a) Microscopio Dino-Lite **b)** Fotografía tomada al realizar la caracterización de la FOA con el microscopio Dino-Lite.

3.5 Resultados de pruebas preliminares con rejillas externas

Una vez que se tiene el molde, se fabrica un dispositivo con microcanales usando el molde de zinc, y la técnica de litografía descrita en el capítulo 2. Se observa que los picos de atenuación se obtienen aplicando menor fuerza

sobre la fibra, aproximadamente de 49 [mN], que al utilizar los moldes de poliestireno termoplástico (figura 3.5). Sin embargo, los problemas de alineación y control de la posición de las rejillas permanecen provocando alteraciones en el espectro de transmisión al realizar el mínimo movimiento. Por lo cual se busca tener un nuevo método para embeber (encapsular) la fibra dentro del dispositivo de PDMS y producir la rejilla.

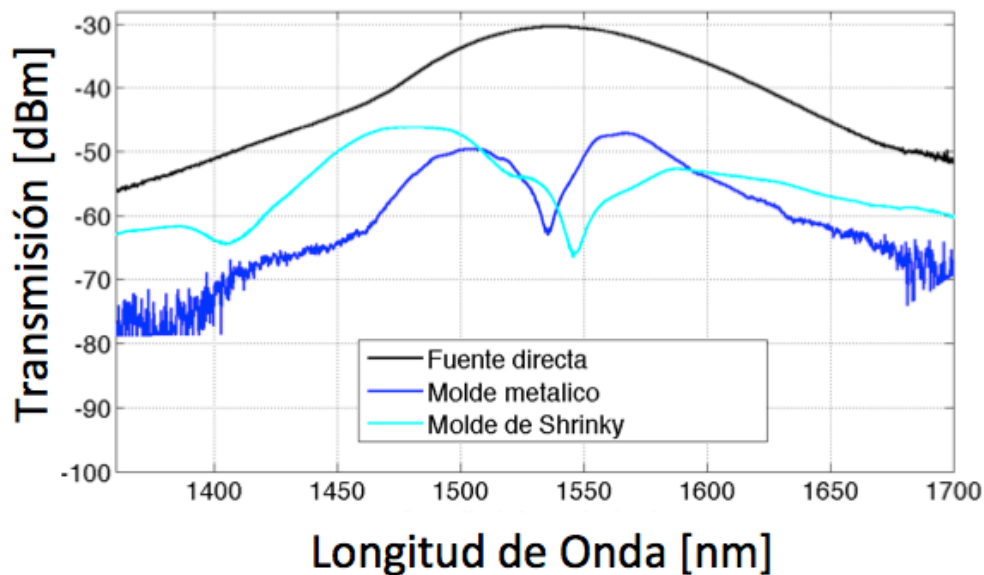


Figura 3.5 Espectro de transmisión de una rejilla externa fabricada con un molde de metal.

3.6 Pruebas para determinar la longitud de la RFPL

Para embeber la fibra se utiliza la técnica de litografía suave utilizando el mismo molde metálico, sin embargo, se probaron distintas longitudes de rejillas (L): 0.3 cm, 0.5 cm, 0.64 cm, 0.70 cm y se verificó la respuesta en cada caso. Para limitar la longitud de las rejillas sin tener que hacer un molde para cada caso, se utilizó un enmascaramiento con papel aluminio, el cual se describe a detalle a continuación: sobre el molde se coloca una máscara de papel aluminio que tiene una ventana con la longitud de rejillas deseada. Posteriormente se coloca una fibra óptica adelgazada sobre la máscara de aluminio. Se vierte el PDMS 10:1 líquido (sin curar) sobre la fibra y el molde con la máscara de aluminio. En seguida se coloca una membrana de PDMS solidificado (curado) sobre este arreglo.

Cuando el PDMS está curado completamente, la réplica se puede desprender fácilmente del molde y se puede observar que la fibra ha quedado embebida, este procedimiento se ilustra en la figura 3.6.

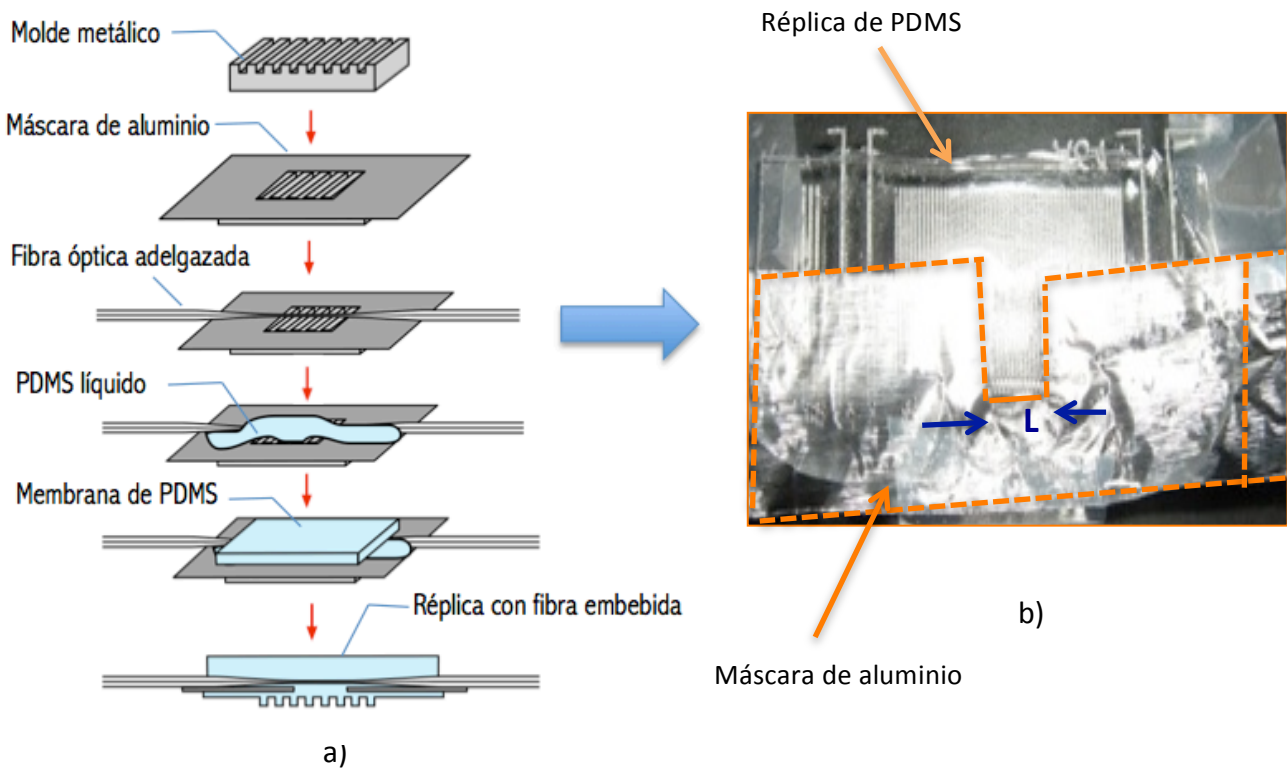


Figura 3.6. a) Procedimiento de fabricación. **b)** Réplica con fibra embebida.

Para conocer la respuesta espectral de esta micro-estructura con la FOA embebida, se conecta la fuente de luz, la cual se trata de un LED infrarrojo modelo MPS-8012 de la marca ILX Lightwave (con un ancho espectral de 100 nm), a uno de los extremos de la fibra, y en el otro extremo se conecta el analizador de espectros ópticos (OSA) 86140B de la marca Agilent, como se muestra en el esquema de la Figura 3.7 a). Con estos resultados, se observó que para una longitud de 0.5 cm, y un período de 400 μm , si bien no se tiene picos tan definidos, las pérdidas por inserción son menores que en los otros casos, además con estas características se tiene mayor repetibilidad en la respuesta del dispositivo. Por otro lado, se observa que la manufactura de micro estructuras de zinc mediante la técnica de fotograbado con períodos menores a 400 μm se vuelve complicada, debido a la

resolución que ofrece este proceso. Los resultados obtenidos y el arreglo experimental se muestran en la siguiente imagen (figura 3.7).

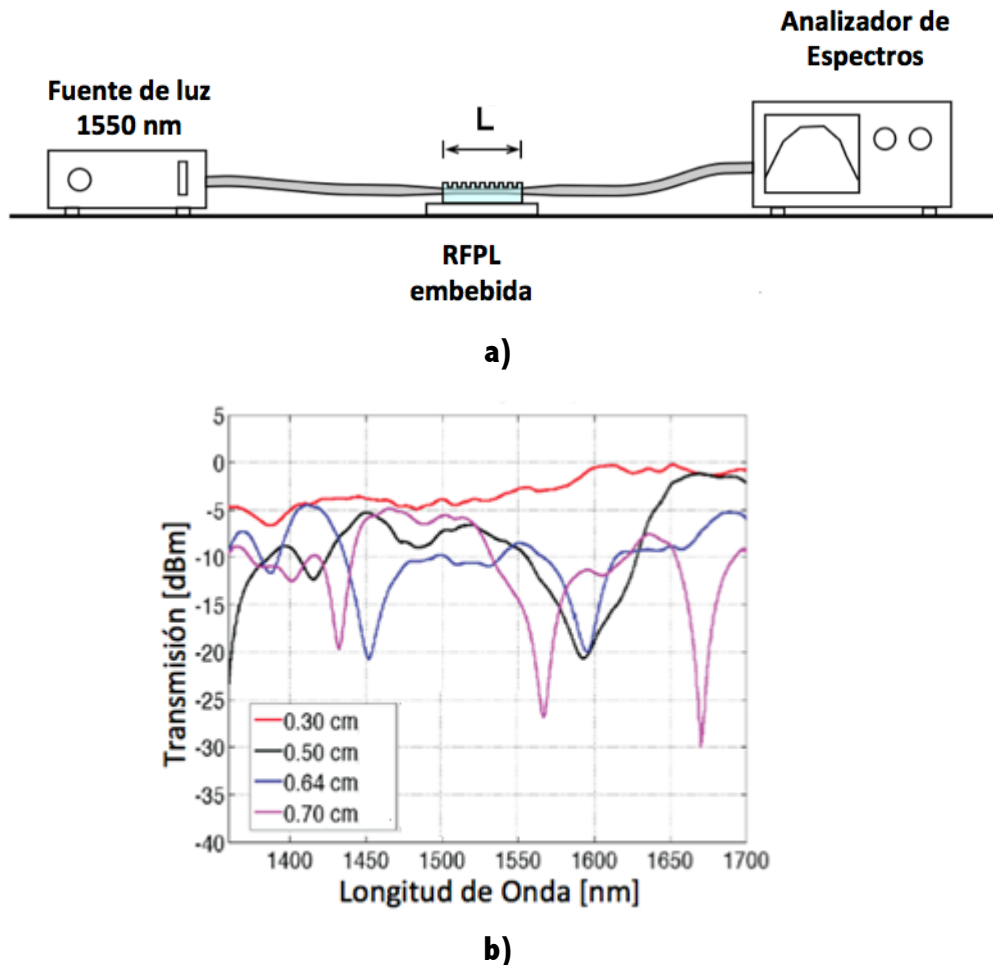


Figura 3.7 a) Arreglo experimental. b) Espectros de transmisión obtenidos bajo diferentes longitudes de rejilla.

De acuerdo a los resultados anteriores, se observa lo siguiente:

- a) Para longitudes de rejillas $L < 0.3$ cm, no se observaron picos de atenuación.
- b) Para la rejillas con $L = 0.7$ cm los picos de atenuación son más pronunciados, no obstante con la rejillas con $L = 0.5$ cm se obtienen menores pérdidas.
- c) Se logró mayor repetibilidad para las rejillas con $L = 0.5$ cm.

Con estas observaciones un nuevo molde se diseñó con las características siguientes: en el mismo molde se establecieron 3 distintas longitudes de rejilla: $L = 0.3$ cm, $L = 0.5$ cm y $L = 0.7$ cm, esto con el fin de fabricar rejillas en paralelo con las longitudes propuestas. El período utilizado fue de $\lambda = 400 \mu\text{m}$, se estableció un ciclo de trabajo de los canales en 50%, es decir, las líneas negras que definen el microcanal, tendrán la misma dimensión de las líneas blancas que definen la ausencia del canal. El diseño del molde también cuenta con dos canales perpendiculares a los microcanales que sirven de guía para ayudar a que la fibra esté perpendicular a los microcanales, como se muestra en la figura 3.8.

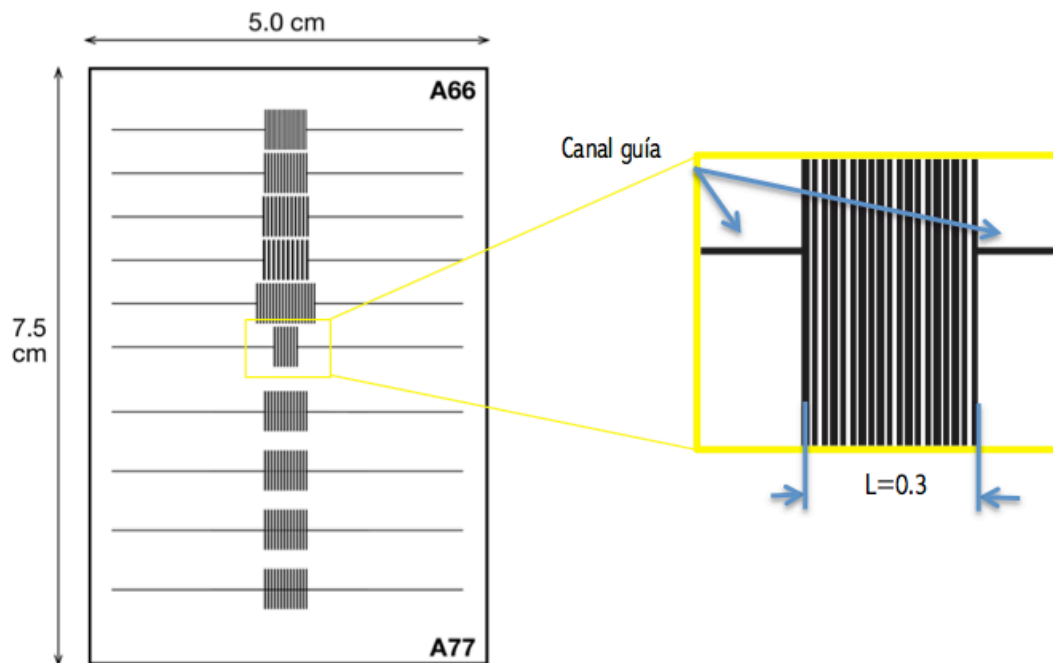


Figura 3.8 Diseño de molde con canales guía.

Al igual que con el molde anterior se realiza la caracterización de los microcanales y se obtiene el periodo, el cual es aproximadamente $412 \mu\text{m}$. Cabe mencionar que en este nuevo diseño, dado que se tienen longitudes fijas de rejilla, no era necesario ya emplear la máscara de papel aluminio.

3.7 Método para encapsular la FOA en un paso

Para la fabricación de la réplica y una vez que se tiene la caracterización del molde, se siguieron los siguientes pasos: se coloca una FOA sobre los canales guía que tiene el molde metálico, es decir, de manera perpendicular a los micro-canales, de tal forma que la parte más estrecha y uniforme de la FOA haga contacto sobre la rejilla del molde metálico. Una vez que se fija la fibra óptica se coloca una membrana de PDMS (sólido), y se sujeta con una prensa para asegurar el contacto de la fibra con los micro canales. Posteriormente se vierte PDMS líquido y para acelerar el proceso de polimerización se coloca sobre una parrilla eléctrica a una temperatura de $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante 15 minutos aproximadamente. Una vez que el PDMS está completamente polimerizado, se desprende la réplica de PDMS del molde. Este procedimiento se ilustra en la figura 3.9.

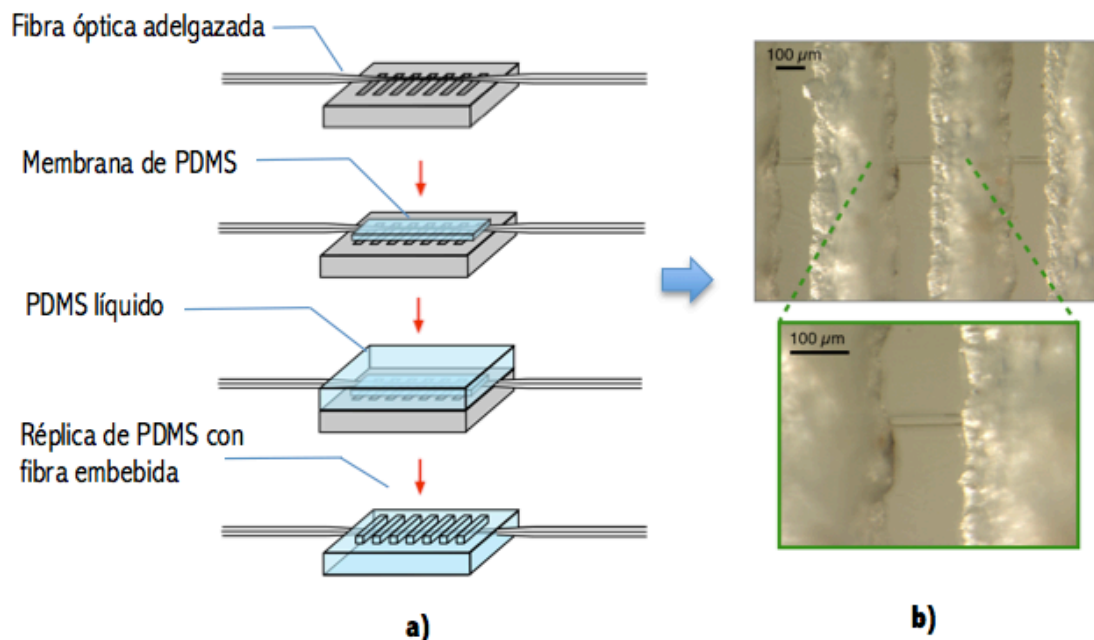


Figura 3.9 a) Método de fabricación del dispositivo con fibra óptica embebida. **b)** Micrografía de la fibra óptica embebida en la estructura de polímero.

Los dispositivos que se fabricaron utilizando este molde tenían el inconveniente de que la longitud del molde (5 cm) no permitía embeber toda la zona adelgazada y descubierta de la fibra óptica, la cual mide alrededor de 8 cm.

Debido a lo anterior, los extremos de la fibra que quedaban desprotegidos y producían que el espectro de la rejilla óptica tuviera muchas variaciones al tocar ligeramente estas áreas expuestas de la fibra, o bien, que se rompiera el dispositivo, ya que esta zona queda sin recubrimiento. Para corregir esta situación se probó agregar extensiones de vidrio al molde para poder encapsular toda la zona expuesta de la fibra. Al observar el espectro se consiguen buenos picos de atenuación, como se muestra en la figura 3.10.

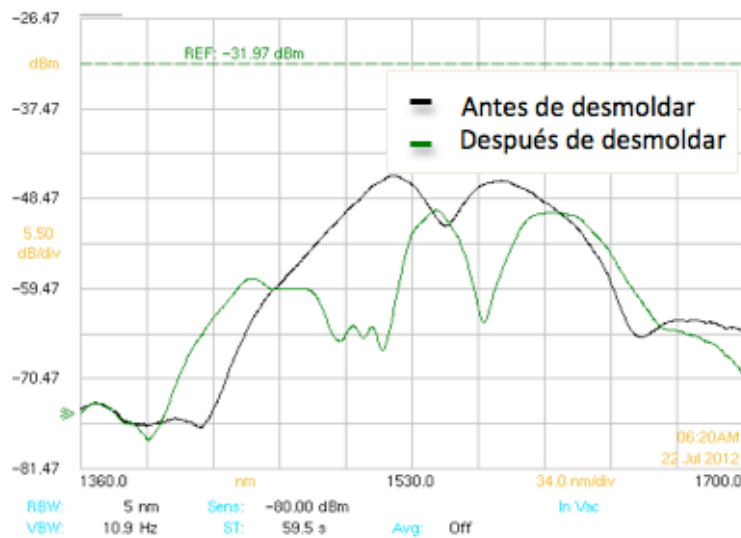


Figura 3.10 Espectros producidos de la fibra embebida antes y después de desmoldar.

Sin embargo, la fibra óptica embebida se rompía recurrentemente al tratar de retirar el dispositivo de PDMS del molde. Esto es probablemente debido a que las extensiones de vidrio del molde hacen que la forma del dispositivo no sea uniforme, dificultando mucho el proceso de desmolde. Por tanto, se propuso otro nuevo molde con una base de longitud mayor, con el fin de cubrir el área total de la fibra adelgazada (figura 3.11).

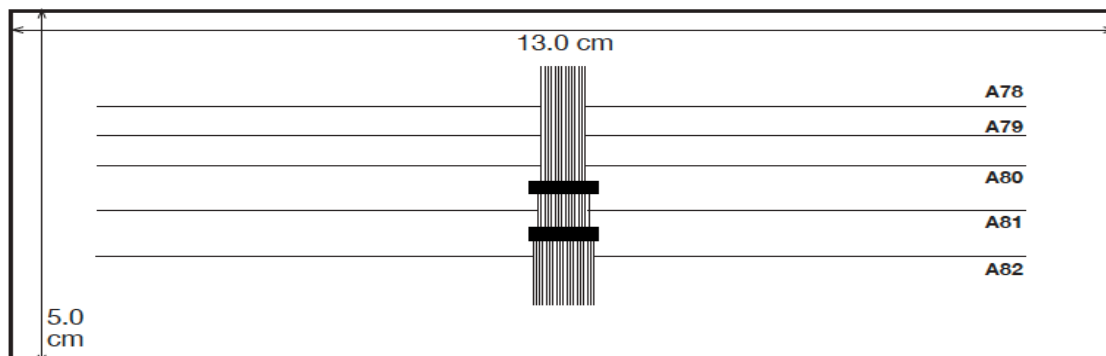


Figura 3.11 Diseño del nuevo molde de mayor área, para embeber las áreas desprotegidas de la FOA.

Al igual que en los casos anteriores, se tiene un molde con distintas longitudes de rejilla: A78-A80, la longitud de la rejilla es de 0.5 cm, para A81, $L=0.64$ y finalmente para A82, $L=0.7$ cm. Con este nuevo diseño se lograron obtener réplicas más robustas, con las cuales se logró verificar la respuesta ante cambios de temperatura y cuyos resultados se presentan en el siguiente apartado. La figura 3.12 muestra el procedimiento utilizando prensas de sujeción.

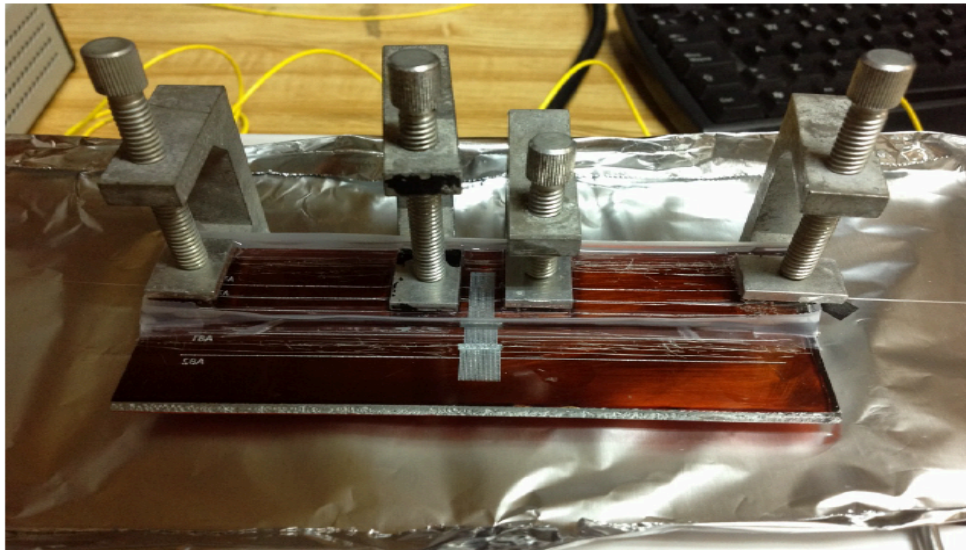


Figura 3.12 Utilización del nuevo diseño de molde metálico en el proceso de fabricación.

Para llevar un mejor control del experimento se tomaron los espectros en los diferentes pasos llevados a cabo durante la fabricación, con lo que se pudieron observar las pérdidas en cada uno de ellos. Estos espectros se muestran en la figura 3.13 y se inicia con el espectro tomado de la fuente directamente sin la fibra óptica, posteriormente se tiene el espectro ya con la fibra antes de ser adelgazada, a continuación se muestra el espectro de la fibra adelgazada, en seguida se muestra cuando la FOA es colocada sobre el molde metálico y finalmente cuando se vierte el PDMS líquido sobre la fibra que está colocada sobre el molde y al polimerizar el PDMS.

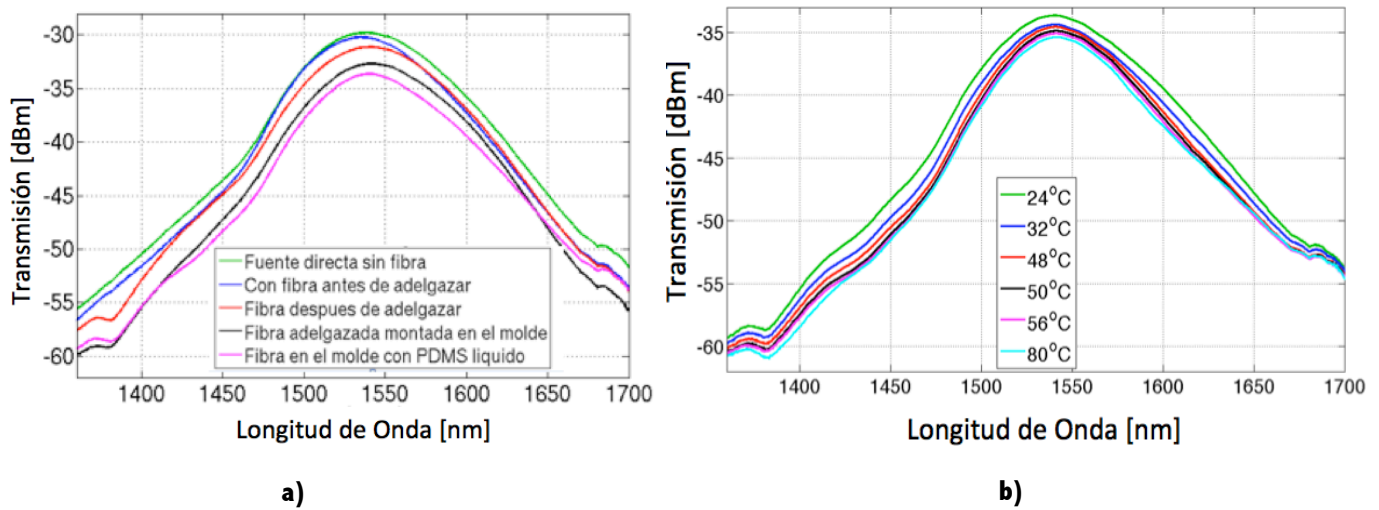


Figura 3.13 a) Espectros obtenidos durante el procedimiento de fabricación, donde se perciben las pérdidas producidas en cada uno de los pasos seguidos para producir la réplica polimérica. **b)** Durante el proceso de polimerización del PDMS.

3.8 Respuesta a cambios de temperatura

Para verificar la respuesta a los cambios de temperatura, se utilizó una parrilla eléctrica sobre la cual se colocó el dispositivo, así como un termopar colocado sobre la superficie del dispositivo para monitorear y registrar cambios de temperatura. El arreglo experimental se muestra en la figura 3.14.

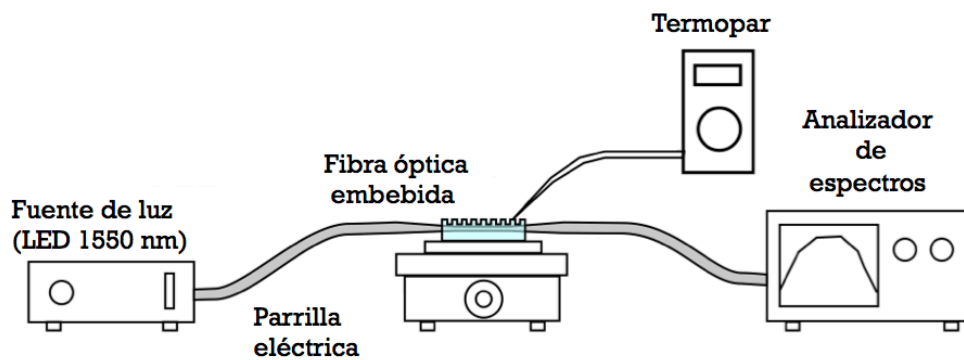


Figura 3.14 Arreglo experimental para verificar la respuesta ante cambios de temperatura.

La temperatura inicial fue tomada a temperatura ambiente y posteriormente se fue incrementando cada 5°C hasta llegar a una temperatura final de 80 °C, así también se tomaron los espectros en el descenso de la temperatura del dispositivo. Con estos datos y utilizando la herramienta *basic fitting* de Matlab se obtuvo la sensibilidad del

dispositivo para los dos picos de atenuación principales que se presentaron. Así, para el primer pico se obtuvieron $0.80 \text{ [nm/}^\circ\text{C]}$ y $0.89 \text{ [nm/}^\circ\text{C]}$ para las variaciones de temperatura en ascenso y descenso, respectivamente. Para el segundo pico de atenuación, se obtuvieron 0.50 [nm] y $0.81 \text{ [nm/}^\circ\text{C]}$ en cada caso, como se muestra en la figura 3.15.

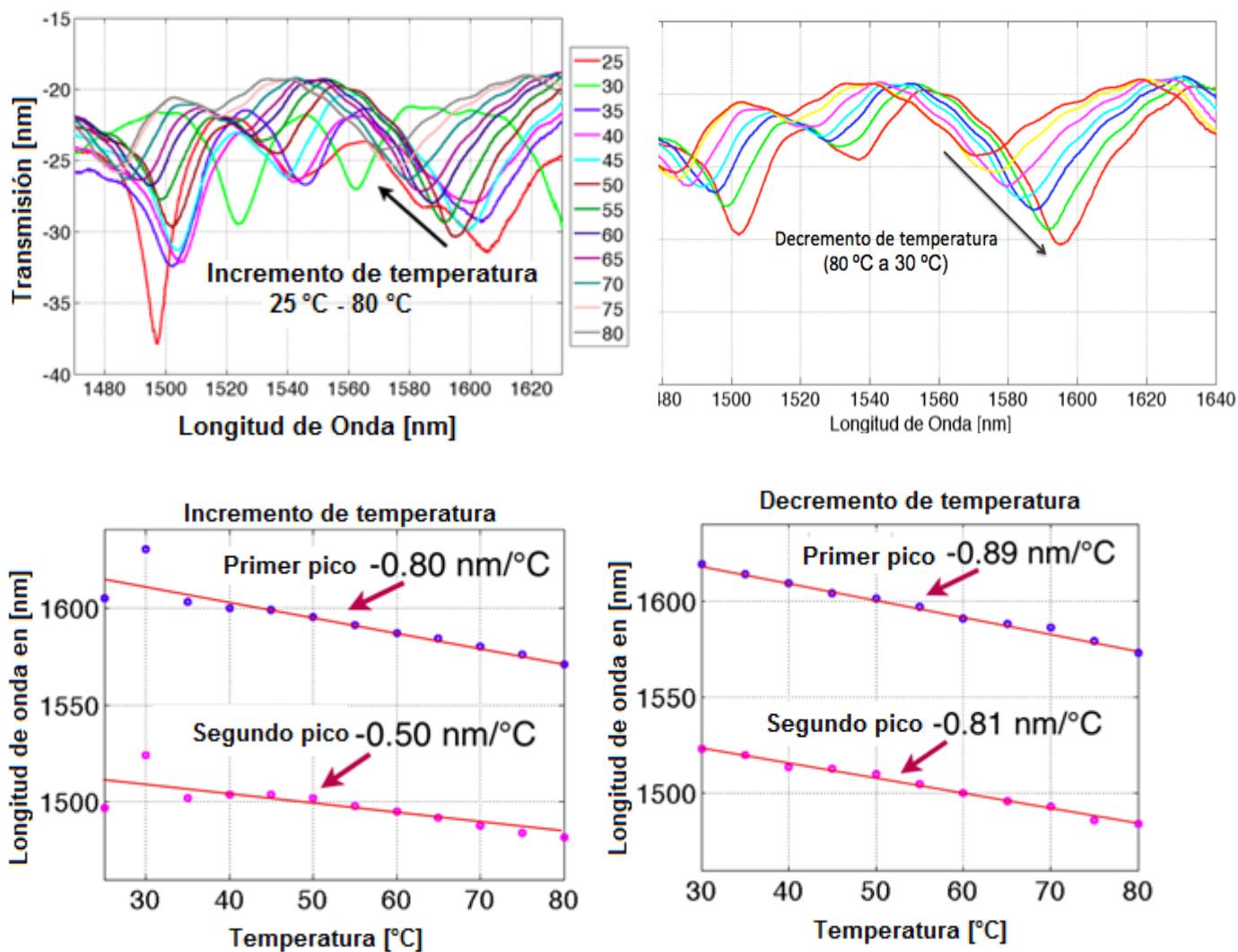


Figura 3.15 a) Espectro de transmisión en respuesta a variaciones de temperatura. b) Obtención de la sensibilidad del dispositivo utilizando.

Aún cuando se tuvieron buenos resultados, este método de fabricación presenta una gran dificultad al momento de desmoldar, lo que provoca que la fibra se rompa fácilmente. Por otro lado se observó que se producían

pequeñas ondulaciones cerca de la zona donde empezaban los microcanales, algunas de estas observaciones se presentan en la figura 3.16.

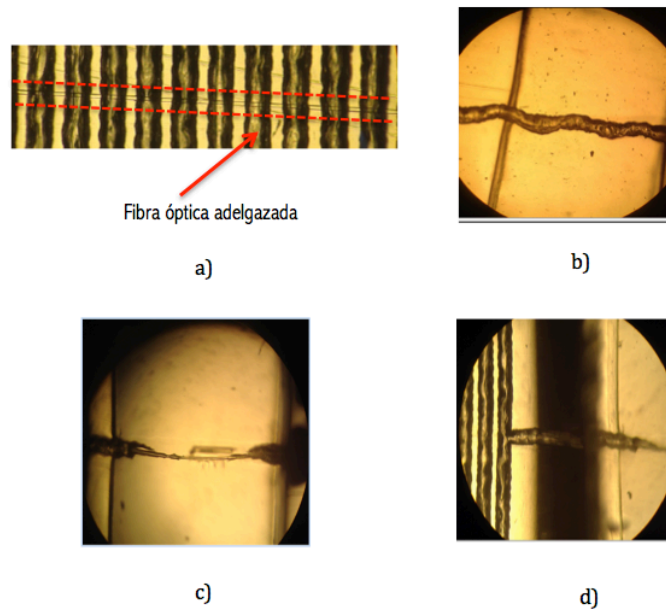


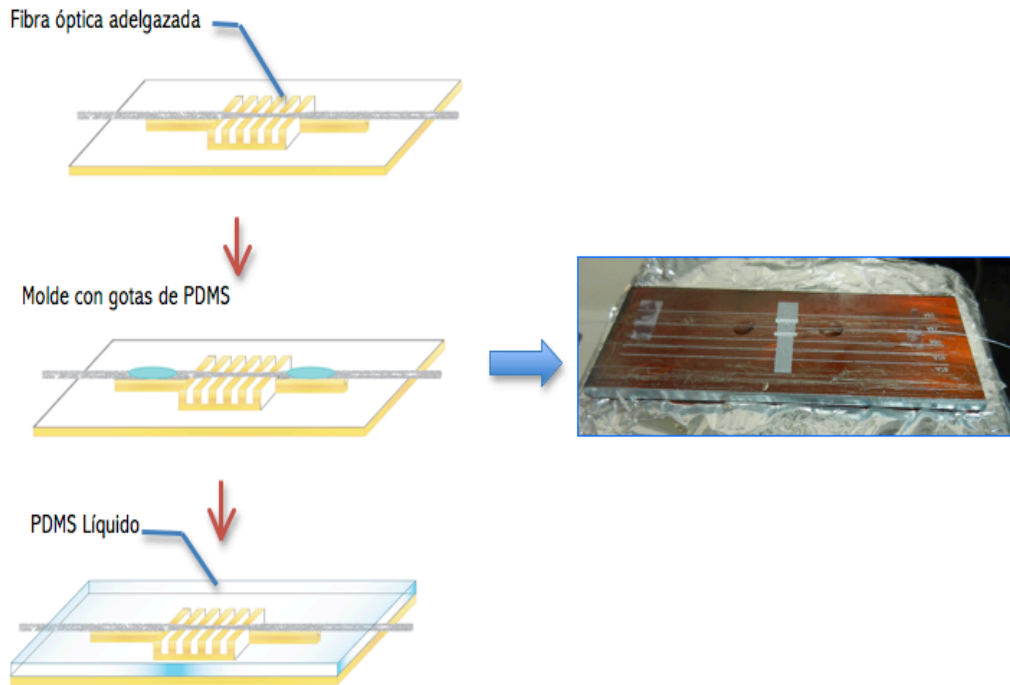
Figura 3.16 Micrografías del dispositivo **a)** Fibra embebida en micro canales. **b)** Micro curvaturas producidas cerca de la zona de microcanales. **c)** y **d)** Puntos de ruptura en distintas zonas del dispositivo.

También se observó que los microcanales se desprendían de la microestructura, debido a la membrana de PDMS pre-solidificado que se coloca al momento de la fabricación, por lo que no se lograba una buena adhesión entre la membrana de sujeción de la fibra y el PDMS vertido para realizar la réplica. Además, si se lograba desprender el dispositivo sin que se rompiera, se tenía que manipular con extrema precaución al momento de hacer mediciones para no romper la fibra dentro de los microcanales.

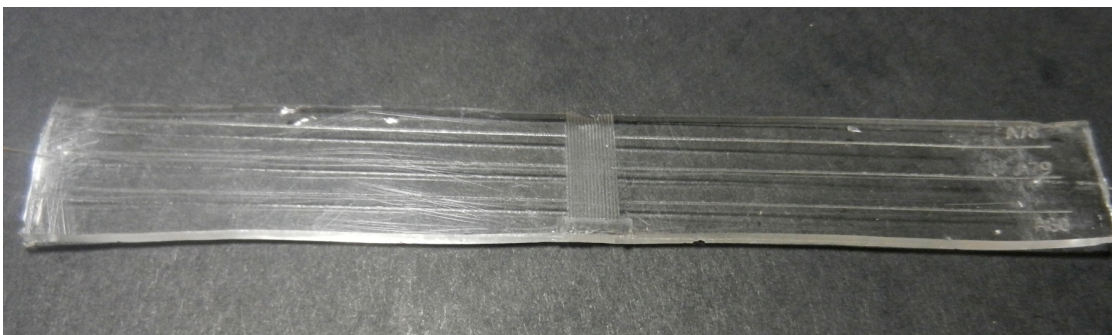
3.9 Procedimiento de fabricación en dos pasos

Para solucionar los problemas mencionados en el apartado anterior, se optó por modificar el procedimiento de fabricación, en dónde la idea principal es eliminar las prensas de sujeción usadas, ya que se tenía el planteamiento de que al usar las prensas se generaban las micro-curvaturas, debido a . El procedimiento que se sigue es colocar la fibra con la parte más adelgazada sobre el molde de metal, se vierten dos gotas de PDMS sobre la fibra sin revestimiento, a los costados de los microcanales, y se coloca todo sobre la parrilla para

acelerar el curado de las gotas. Las gotas tienen la función de pegar la fibra, sustituyendo así las prensas externas. Cuando la fibra ya está sujeta, se vierte el PDMS (líquido) sobre el molde y la fibra, y se coloca sobre la parrilla a 55 °C durante 1.25 hr. que es el tiempo en que alcanza el curado, este procedimiento se muestra en la figura 3.17.



a)



b)

Figura 3.17 a) Procedimiento de fabricación sin prensas. **b)** Fotografía del dispositivo desmoldado

Con esta técnica se producen los siguientes resultados:

- a) El método se realiza en dos pasos, en lugar de hacerlo en un solo paso como en los casos anteriores, es decir vertiendo el PDMS una vez.
- b) Se eliminan los escalones en las orillas, los cuales producían cierta inestabilidad en los dispositivos, es decir, se tenía alta sensibilidad en esa zona por lo cual con pequeños movimientos se alteraba el espectro de transmisión, ver figura 3.18.
- c) Con esta técnica se tiene contacto con la parrilla en toda el área del molde, es decir, la temperatura es más uniforme al momento de curar.
- d) La réplica es más uniforme.
- e) Se siguen produciendo las micro-curvaturas.

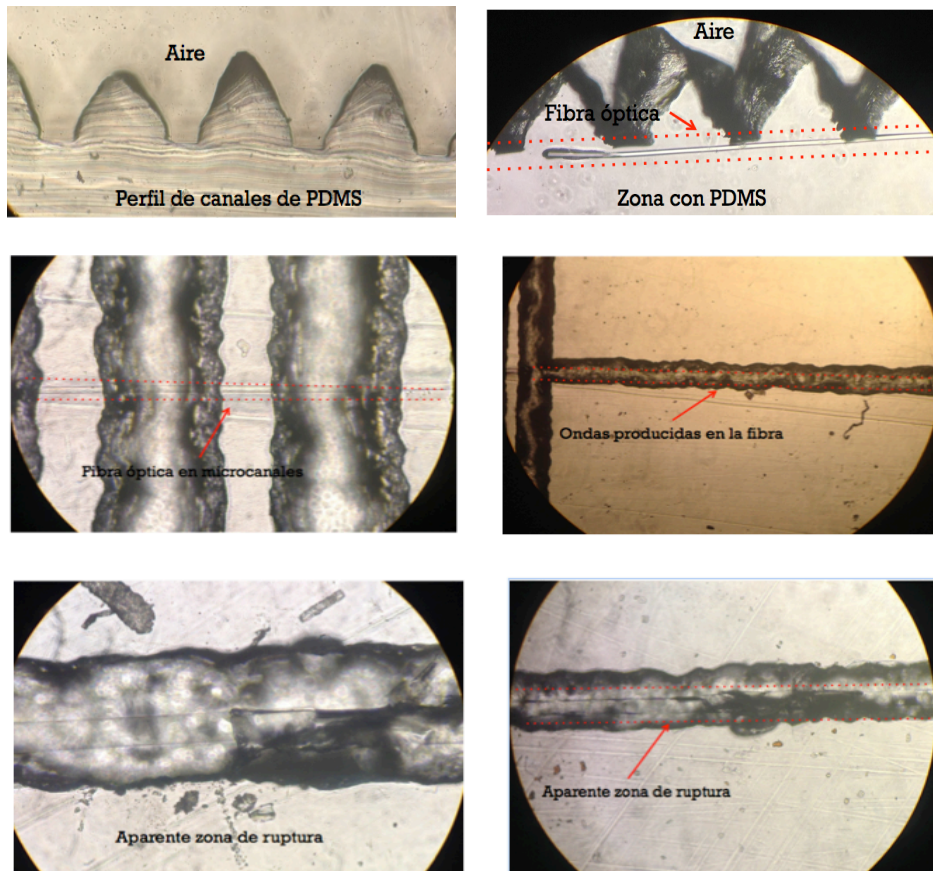


Figura 3.18 Micrografías del dispositivo.

Aún con las ventajas obtenidas, la réplica se rompió, por lo cual, el siguiente paso, fue buscar darle mayor robustez al dispositivo. Esto se logró embebiendo dos fibras sin adelgazar a los costados de la réplica, tal como se muestra en la figura 3.19.

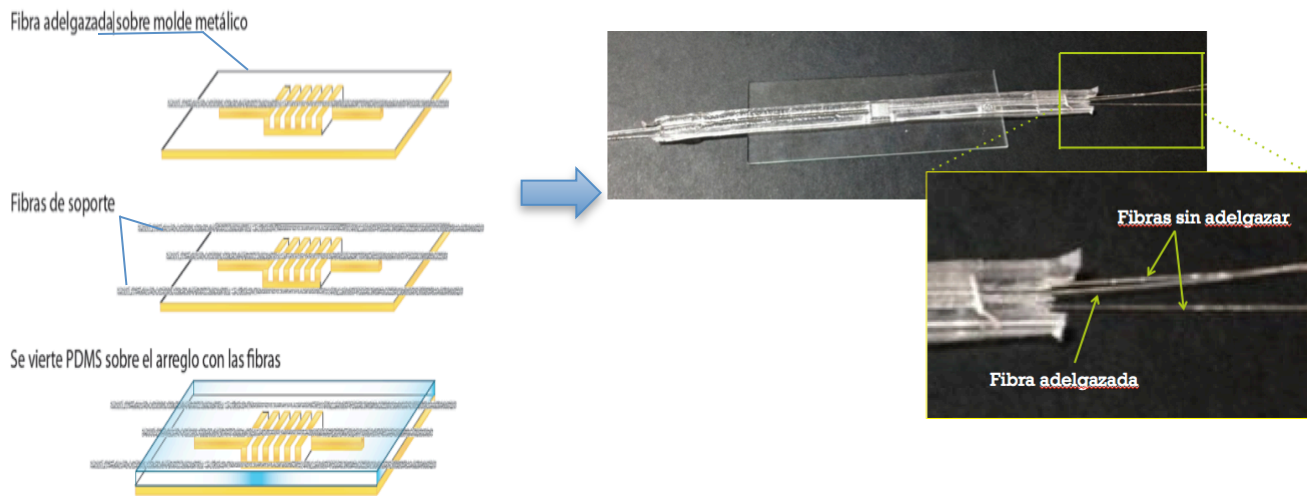


Figura 3.19 Dispositivo con dos fibras embebidas para minimizar los esfuerzos mecánicos al desmoldar.

Con este método también se modificó la relación de la mezcla entre la base y el agente curante, con el fin de evitar los esfuerzos mecánicos que se generan en la réplica durante la polimerización (mencionar lo del factor de encogimiento del PDMS e incluir la referencia). Esto con el fin de evitar la ruptura de la fibra dentro del dispositivo de PDMS. Con este procedimiento se observó lo siguiente:

- a) La fibra no se rompió.
- b) Los picos sólo se forman cuando el dispositivo es cóncavo en los microcanales. Es decir, no se forman picos de atenuación si no hay flexión.

Para obtener el espectro de transmisión lo que se hizo fue colocar el dispositivo en una posición inicial con los canales cóncavos, observándose un corrimiento en el pico de atenuación conforme se estabilizaba a una posición final (figura 3.20).

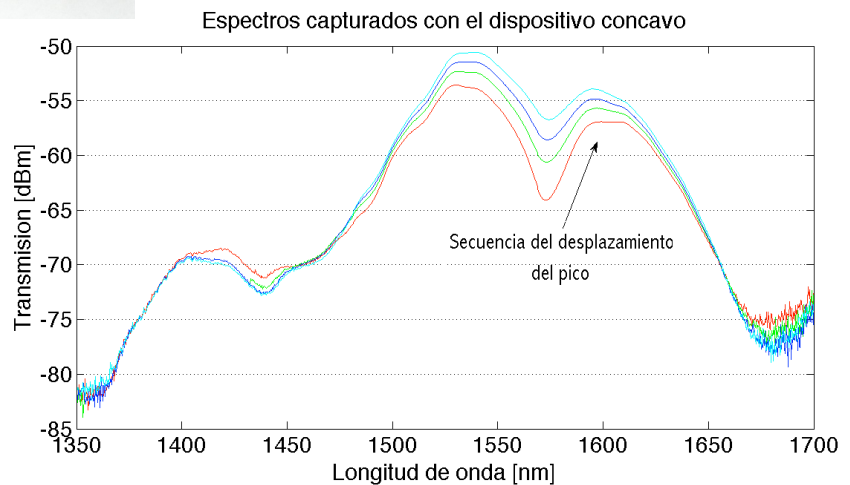


Figura 3.20 Dispositivo con canales cóncavo y su espectro de transmisión.

- c) No se perciben las micro-curvaturas que se producen en los dispositivos anteriores.
- d) La mezcla PDMS-curante fue de 10 ml de PDMS por 0.7 ml de curante, lo que logró que el dispositivo tuviera una consistencia menos rígida, de modo que se puede manipular de manera menos delicada.
- e) El tiempo de curado fue de alrededor de 2 hr. a 45 °C

3.10 Procedimiento de fabricación en dos pasos con prensas de sujeción

Posteriormente, y de acuerdo a las observaciones que se realizaron, se fabricó un nuevo molde metálico, en este caso se realizó sin canales guía, con el fin de hacer más fácil el desmolde del dispositivo y la longitud del molde se mantuvo igual, con el fin de que la fibra quede completamente encapsulada por el PDMS en su zona sin recubrimiento al momento de la fabricación. Adicionalmente, una vez fijada la fibra al molde, lo primero que se recubrió con el PDMS fue únicamente el área de la rejilla, dejando descubierto la mayor parte de la fibra sin recubrimiento, y se dejó curar a temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C), lo cual tardó alrededor de 3

días. Esto con el objetivo de disminuir los esfuerzos del PDMS sobre la fibra de sílica, que se producen por el encogimiento del primero durante el proceso de polimerización. Al curarse el PDMS, se desprendió la réplica y posteriormente se realizó el recubrimiento del total en la zona de la FOA sin recubrimiento. Esto se muestra en la figura 3.21a, y en la figura 3.21b se muestran los espectros obtenidos antes y después de desprender el dispositivo del molde. Observe que al modificar la posición de los canales, el espectro de transmisión también cambia.

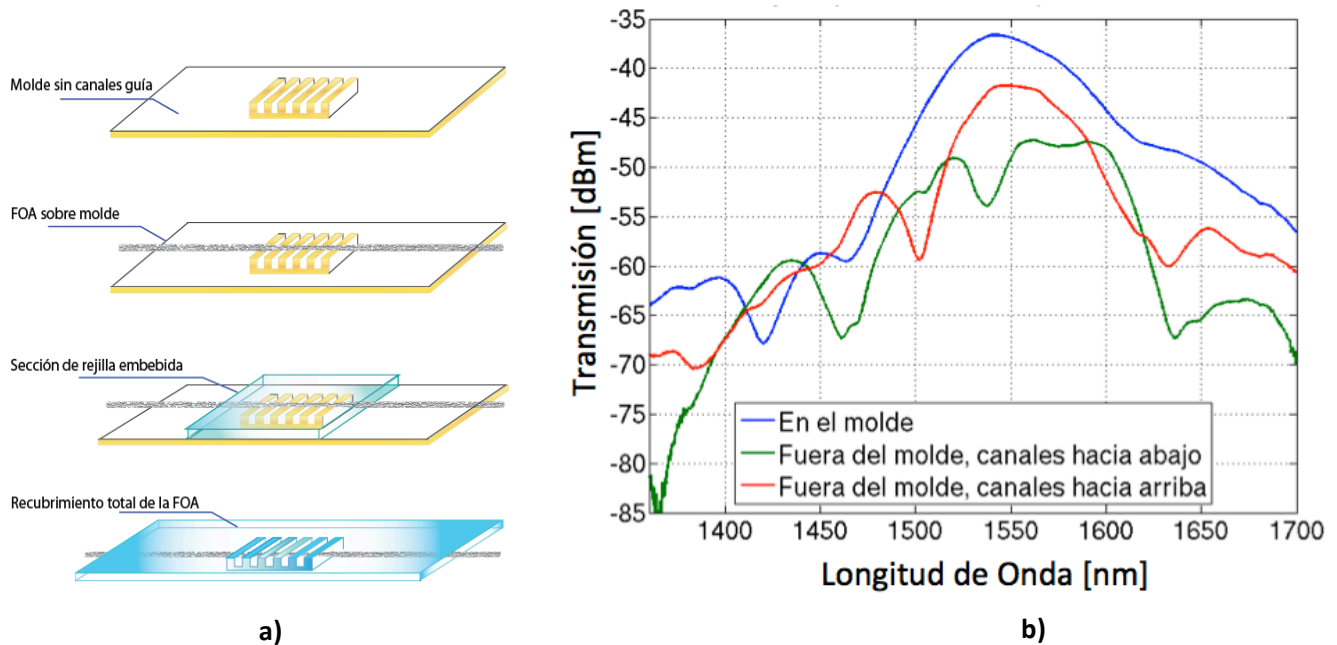


Figura 3.21 a) Método de fabricación a temperatura ambiente. En este procedimiento se realiza el encapsulamiento de la FOA por partes, iniciando con el área en el que se encuentra la rejilla en el molde metálico. **b)** Espectros obtenidos antes y después de desprender el dispositivo del molde con canales cóncavos y convexos.

Con este dispositivo se obtuvieron las respuestas a incrementos de temperatura. Se puede observar que si bien se forman 5 picos bien definidos, en comparación con resultados anteriores, este dispositivo no se comporta como se esperaba; es decir, no se presenta un corrimiento consecutivo hacia la izquierda del espectro como debiera de suceder debido a los cambios en el índice de refracción del PDMS debido al incremento en la temperatura. Para este caso se puede ver que existen saltos en temperaturas menores a 40 °C. Esto se muestra en la figura 3.22.

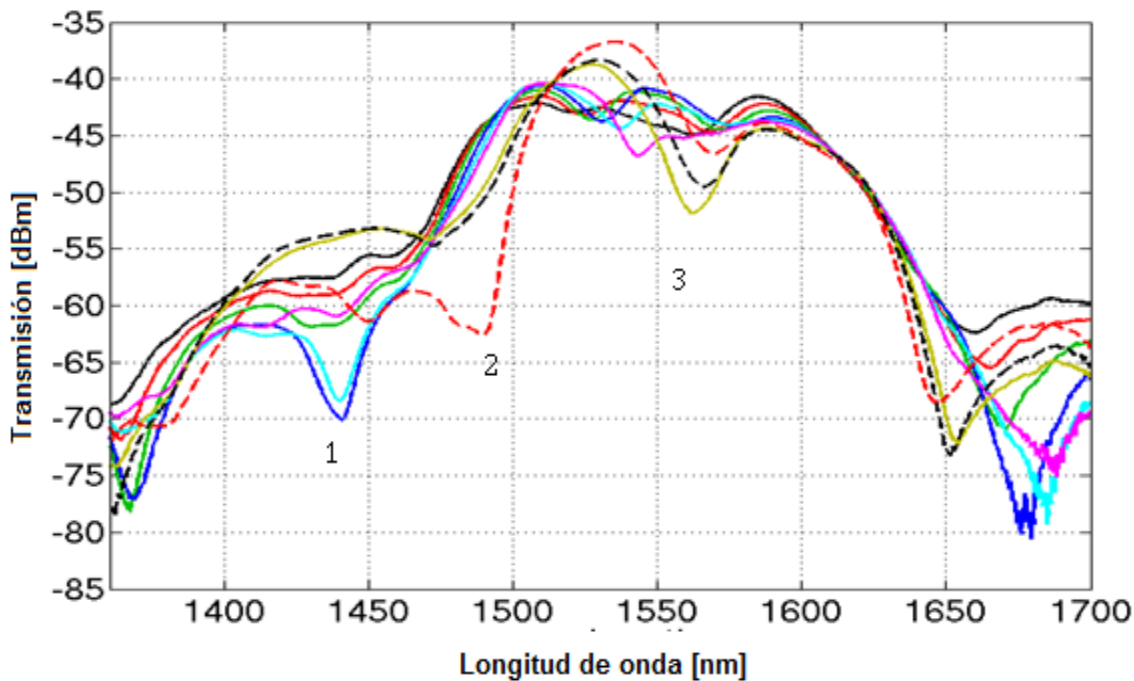


Figura 3.22 Respuesta a cambios de temperatura del dispositivo en donde se muestran los saltos temperaturas menores a los 40°C.

Con estos resultados es posible analizar la sensibilidad de cada uno de los picos en respuesta a cambios de temperatura. Es así que el pico 1 presenta una sensibilidad de 0.52 nm/°C, el pico 2 tiene una sensibilidad de 1.25 nm/°C y de 1.227 nm/°C para el pico 3. Estos valores se obtienen mediante un ajuste lineal con ayuda de las herramientas en Matlab (*basic fitting*); la pendiente obtenida mediante este procesamiento es la que permite verificar los valores de sensibilidad (figura 3.23).

Estos resultados muestran que los picos de atenuación no tienen la misma sensibilidad para los cambios de temperatura, pues como ya se mencionó anteriormente, no todos los picos de resonancia reaccionan igual ante un mismo estímulo, lo que tienen como bondad la posibilidad de sensar diversas variables en un mismo dispositivo; es decir, se puede asociar cada pico a una variable física diferente.

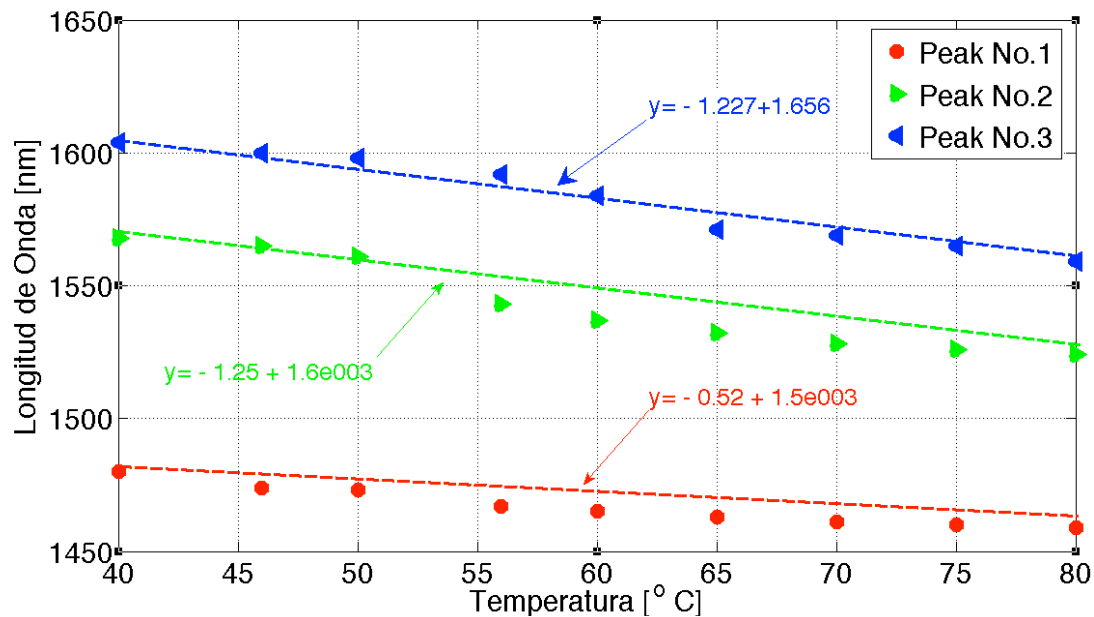


Figura 3.23 Ajuste lineal realizado con la herramienta *basic fitting* de Matlab donde se observa la sensibilidad para los picos 1,2 y 3

Con el objetivo de conocer la repetibilidad del dispositivo ante los cambios de temperatura, se realizó un experimento aumentando y disminuyendo la temperatura en incrementos de 5 °C, desde una temperatura inicial de 40 °C hasta llegar a 80 °C y regresando a la temperatura inicial. Posteriormente se analizó si el espectro regresaba a la misma longitud de onda en cada ciclo, esto se obtuvo sobre el pico 3, y los resultados se muestran en la figura 3.24.

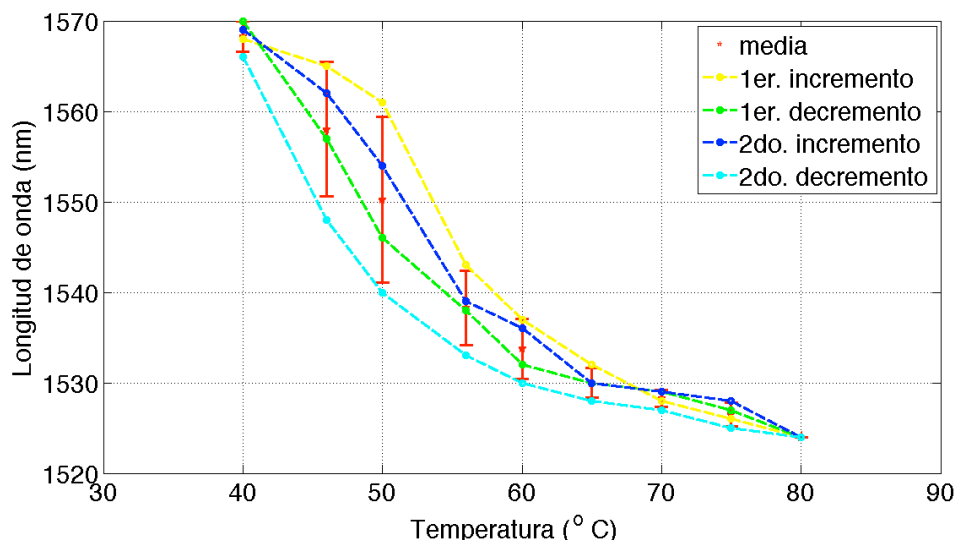


Figura 3.24 Repetibilidad en la señal para el pico 3.

Con este mismo dispositivo se realizaron pruebas para verificar su respuesta ante cambios en el índice de refracción, lo que es posible gracias a la interacción de la onda evanescente que queda expuesta al medio en la región de los micro-canales de PDMS. Para este experimento, se colocaron gotas de diferentes sustancias: agua y metanol, siendo el segundo un solvente orgánico, y se compararon con respecto de la respuesta al aire. Los cambios se verifican en las gráficas obtenidas que se muestran en la figura 3.25.

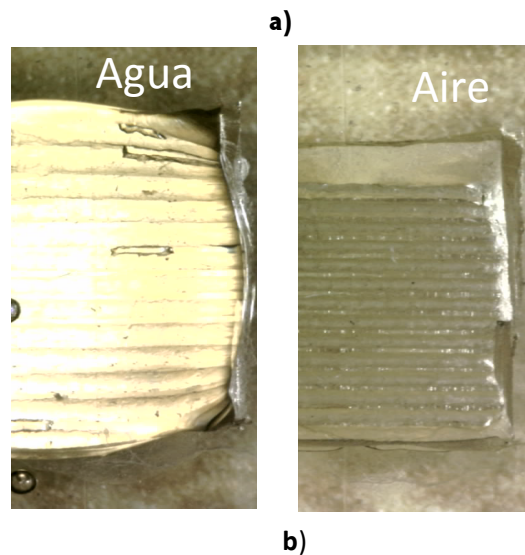
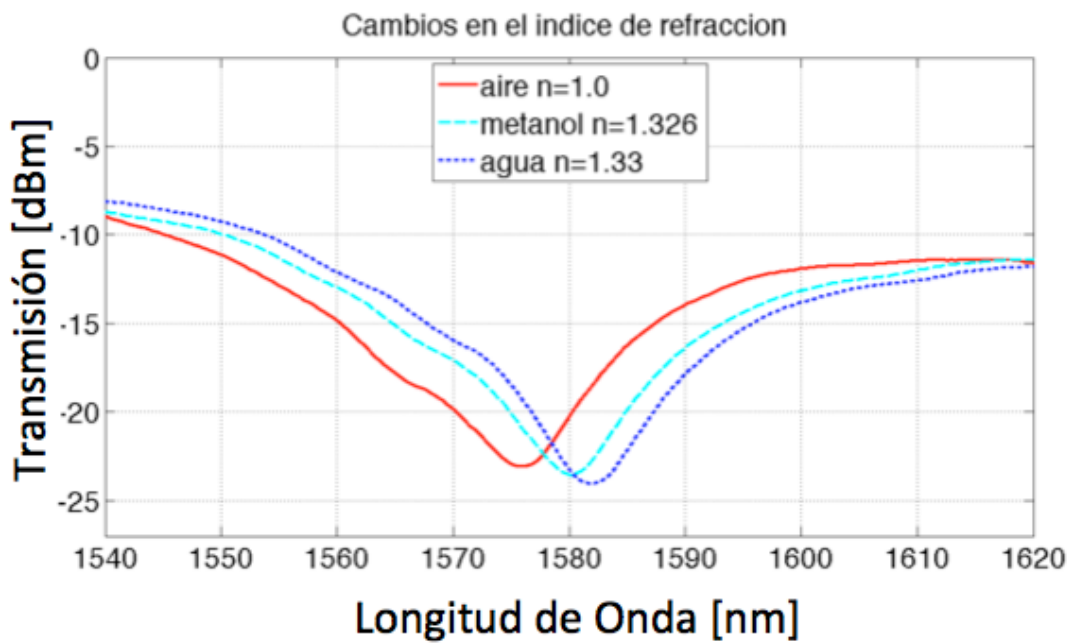


Figura 3.25 a) Respuesta del dispositivo a cambios de índice de refracción. b) Dispositivo con sustancias para la medición de índice de refracción.

Posteriormente se monitorearon las fluctuaciones en longitud de onda del pico 3 con respecto al tiempo, del dispositivo en contacto con metanol y con agua. En el caso del metanol, las variaciones en longitud de onda alcanza una longitud de onda máxima al cabo de 8 minutos, y después decae, como se observa en la figura 3.26. Esto se debe a la evaporación del metanol en medio ambiente. En la figura se muestra cómo este valor regresa a una longitud muy cercana a la inicial.

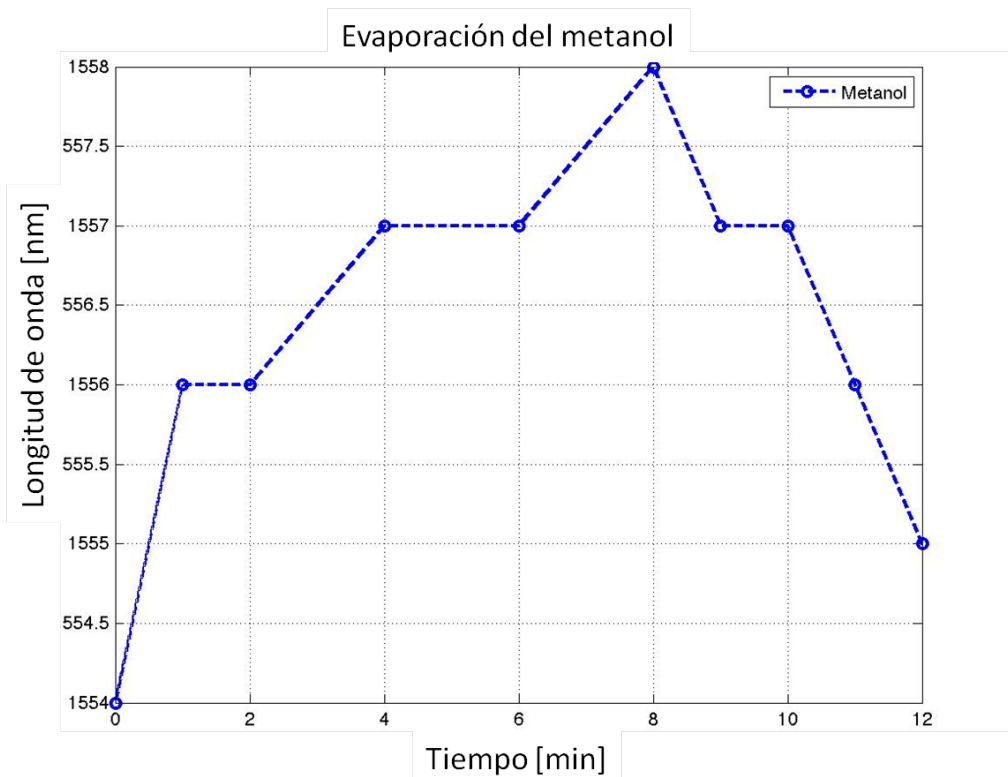


Figura 3.26 Comportamiento del cambio de la longitud de onda con metanol.

Por otra parte, el agua no se evapora del mismo modo en que se evapora el metanol; el tiempo en el que tarda en alcanzar el valor máximo en longitud de onda es de aproximadamente 30 minutos. Una vez que se observó que este valor ya no cambiaba, se retiró el agua con ayuda de una jeringa. El comportamiento del dispositivo regresó a su valor inicial después de otros 30 minutos, como se observa en la figura 3.27.

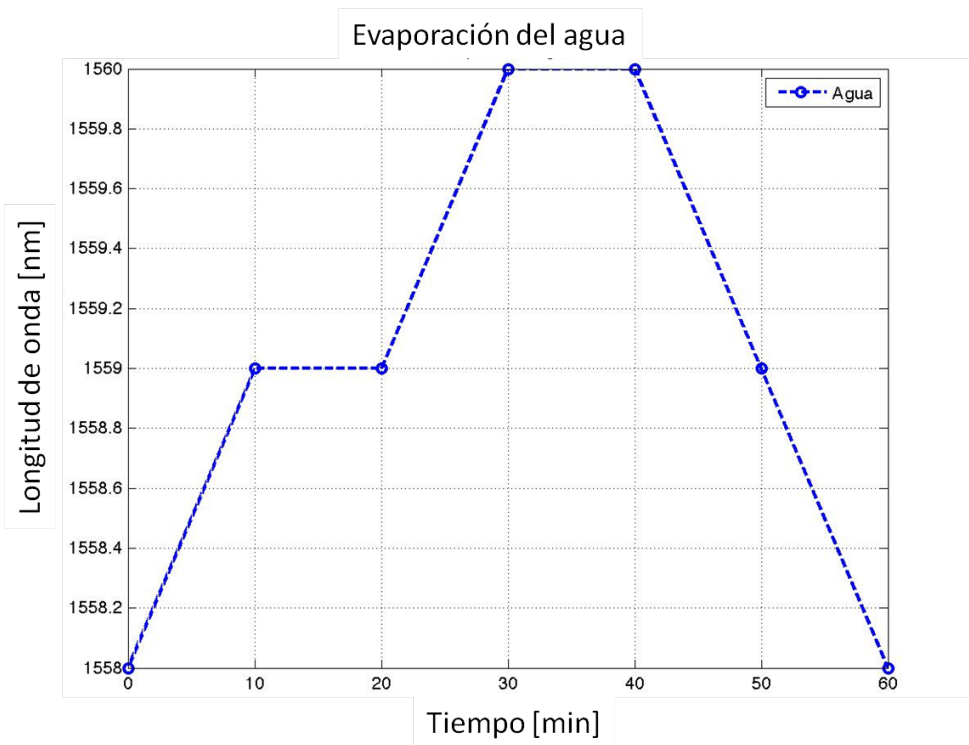


Figura 3.27 Comportamiento del cambio de la longitud de onda con metanol.

Capítulo 4

Análisis de resultados y conclusiones

4.1 Análisis de resultados

Para la caracterización del dispositivo se realizaron pruebas de temperatura y de cambio de índice de refracción, logrando verificar que el dispositivo tiene un alto potencial para ser utilizado como sensor de éstos dos parámetros físicos. En las pruebas de temperatura el comportamiento del dispositivo presenta un corrimiento de los picos de atenuación hacia longitudes de onda más corta conforme se incrementa la temperatura, en el análisis de estos resultados, se determina que se tienen sensibilidades distintas en cada uno de los picos de atenuación que se producen, y cuyos valores se encuentran entre $0.5[\text{nm}/^{\circ}\text{C}]$ y $0.89 [\text{nm}/^{\circ}\text{C}]$ con el primer dispositivo, lo que se observa en las gráficas de la figura 3.15, y se obtiene una sensibilidad entre $0.52 [\text{nm}/^{\circ}\text{C}]$ y $1.25 [\text{nm}/^{\circ}\text{C}]$, con el segundo dispositivo (ver figura 3.23). El rango de operación de temperatura considerado en el último experimento fue de $40\text{-}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ debido a que para valores menores a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ se observaron saltos inestables en el espectro de transmisión, presumiblemente debido a variaciones en el sistema de calentamiento ya que la parrilla no genera una temperatura uniforme en el dispositivo. En diferentes intentos se lograron diferentes rangos y con resoluciones variables. Por lo que creemos que el problema no es el sensor, si no el sistema de caracterización del que se tiene poco control.

En la prueba con sustancias de diferentes índices de refracción, se observa que aquéllos que tienen un menor índice refractivo, provocan que el corrimiento del pico de resonancia se incline a valores menores en la longitud de onda, tal como se menciona en la literatura [73]. Así mismo, las últimas pruebas realizadas muestran que existe la posibilidad de sensar la evaporación de diferentes sustancias. Esto se observa en la gráfica del comportamiento del metanol en el tiempo, en la que se tiene un valor máximo al cabo de 8 minutos, y luego decae gradualmente hasta alcanzar un valor cercano al inicial. Este decaimiento ocurre debido a la volatilidad del metanol que provoca una rápida evaporación. Sin embargo, se distingue que no recupera su valor inicial, lo cual se puede explicar por la propiedad del PDMS de absorber solventes orgánicos [74]. Dicha absorción genera la expansión del material y como consecuencia se modifica el periodo de la rejilla, modificando al mismo tiempo el espectro de transmisión.

4.2 Resumen de procedimientos y observaciones

Para concluir este trabajo de tesis, se presenta a continuación la tabla 4.1 con el resumen de los procedimientos llevados a cabo y los resultados obtenidos con cada uno de ellos. Adicionalmente se muestra la tabla 4.2 con las características del dispositivo que fue caracterizado.

Tabla 4.1 Resumen y evaluación de procedimientos llevados a cabo en este trabajo de tesis.

Descripción del procedimiento:	Observaciones:
Encapsulamiento utilizando en un paso con pinzas de sujeción: en este procedimiento se utilizaron pinzas de sujeción para fijar la fibra al molde, oprimiendo estas mediante membranas delgadas de PDMS, la temperatura de polimerización fue de 80 °C (ver figuras 3.9 y 3.12).	Existía mucha dificultad al momento de desmoldar la réplica, provocando que la fibra se rompiera. Además, la manipulación se tenía que hacer de forma precisa, ya que se originan micro-curvaturas en la FOA que tienden a romperse. Difícil medir espectros debido a su inestabilidad.
Procedimiento en dos pasos (fijando primero la fibra al molde): se fija la fibra al molde con dos gotas de PDMS y se cura, posteriormente se realiza el recubrimiento en el área de interés restante de la fibra. Temperatura de polimerización a 80°C (ver figuras 3.17).	Se realiza de forma más sencilla que el procedimiento anterior y no se requieren pinzas de sujeción, aunque se siguen formando microcurvaturas y al momento de separar la réplica se rompe la FO. Difícil replicar debido a que las fibras se rompían con facilidad.
Con fibras sin adelgazar como soporte: se sigue el procedimiento anterior, empero se embeben dos fibras para darle mayor soporte al dispositivo, un cambio adicional es que la mezcla PDMS curante se realizó en una proporción 10:0.7. La Temperatura de polimerización fue de 55 °C en 2 hrs 45 min (ver figuras 3.19 y 3.20).	El desmolde se realizó de forma sencilla, sin embargo se complica la fabricación al sujetar dos fibras adicionales. Por otro lado, no se generaban picos de resonancia sino hasta tener los canales cóncavos. Dispositivo robusto fácil de manipular y se logró reducir notablemente la generación de micro-curvaturas.

Tabla 4.2 Resumen y evaluación de procedimientos llevados a cabo en este trabajo de tesis (continuación).

Descripción del procedimiento:	Observaciones:
Procedimiento en dos pasos (encapsulando primero el área de la rejilla) con prensas de sujeción: Se fija la fibra al molde con prensas de sujeción y se vierte el PDMS en el área de la rejilla, una vez curado, se recubre el resto de la FO. Polimerización a temperatura ambiente aprox de 23 °C - 25 °C en 3 días (ver figuras 3.21, 3.22, 3.23 , 3.24 y 3.25).	El desmolde fue sencillo y no se produjeron microcurvaturas se lograron obtener buenas mediciones en temperatura y cambio de índice de refracción, para los cuales posteriormete se realiza un análisis para determinar su repetibilidad y su sensibilidad.

Tabla 4.2 Parámetros principales del dispositivo.

Parámetro	Índice de refracción	Temperatura
Tipo	Extrínseco, se comprobó su respuesta a cambios de temperatura e índice de refracción	
Rango	Pruebas realizadas con aire, metanol y agua; con valores de índice de refracción de 1, 1.326 y 1.33 respectivamente	40 °C - 80 °C
Repetibilidad	-	Máxima: 9.1788 nm @ 50°C Mínima: 0 nm @ 80 °C
Sensibilidad	-	0.52 nm/ °C 1.25 nm/ °C 1.2267 nm/°C (picos 1,2 y 3 respectivamente)

4.3 Conclusiones

En este trabajo de tesis se diseñó, fabricó y caracterizó un dispositivo basado en recubrimientos microestructurados de PDMS para inducir rejillas de difracción óptica de periodo largo. Este trabajo fue motivado por una investigación previa en la que se logró inducir una rejilla de periodo largo en fibras ópticas adelgazadas mediante dispositivos MEMS de polímero polidimetilsiloxano (PDMS). Sin embargo, en esta tesis se reporta un dispositivo más robusto y controlado, del que se logró con el trabajo anterior. Adicionalmente se evaluó su desempeño como sensor de cambio de índice de refracción, de temperatura y se muestra el principio básico para implementarlo como sensor de deformidad, desplazamiento y evaporación.

Algunas de las ventajas que se aporta con este tipo de dispositivos es que el procedimiento de fabricación, basado en litografía suave, es sencillo, puede brindar alta resolución en micro-estructuras y para la realización de prototipos en universidades no se requiere de instalaciones especiales tipo cuarto limpio para su producción, las cuales requieren de una gran inversión y en ocasiones de contratación de personal especializado para el manejo del equipo, por lo anterior, los costos de este tipo de dispositivos se reducen en comparación con las rejillas ópticas que se fabrican comercialmente. Además, entre las características que destacan del PDMS, es que posee biocompatibilidad, permitiendo su aplicación en sistemas biológicos que potencialmente puedan ser integrados en sistemas tipo Lab-On-A-Chip, en conjunto con aplicaciones de microfluídica y óptica, las cuales han tenido un alto impacto en áreas de la salud.

Durante el desarrollo de las pruebas con la rejilla de fibra óptica de período largo con micro-estructuras de polímero, se observaron diversos aspectos importantes en el diseño, el proceso de fabricación y la caracterización del dispositivo. El diseño de este dispositivo fue desarrollado con base en las observaciones hechas previamente con micro estructuras externas presionadas a una fibra óptica adelgazada, FOA [19]. Por otra parte, para el diseño del molde fue necesario estudiar la problemática que se tenía al encapsular la fibra en la micro-estructura, ya que la falta de un sistema de alineación adecuado generaba curvaturas en la FOA durante la fabricación, causando pérdidas. Estas se originan ya que algunos de los rayos guiados dentro de la fibra son refractados fuera de ella debido a dichas curvaturas, de tal forma que la atenuación producida es directamente proporcional al radio de dicha curvatura [71]. En cambio, al diseñar un molde con canales guía, la FOA se alinea

mejor sin provocar esta flexión. El problema de esta propuesta es que los canales guía dificultaban el proceso de desmolde puesto que el diámetro de los canales ($\sim 100 \mu\text{m}$) es menor que el de la fibra con recubrimiento ($125 \mu\text{m}$), provocando que la fibra se rompiera al momento de desmoldar. Este problema se solucionó diseñando un nuevo molde sin canales guía, pero que permitía dividir el procedimiento de encapsulamiento en dos pasos: primero se encapsula una pequeña zona central donde se encuentra la rejilla y posteriormente se encapsula el resto de la fibra en su región desprotegida por el adelgazamiento, sujetándola únicamente de los extremos. Esto resolvió el problema mencionado, en el que se presentaban pérdidas por el desalineamiento de la FO.

Otra complicación se tuvo con la aparición ahora de micro-curvaturas producidas en la FOA al momento de separar el dispositivo del molde, las cuales eran posiblemente originadas debido a que el coeficiente de expansión del PDMS es diferente del de una fibra óptica, $0.3 \times 10^{-3} \text{ C}^{-1}$ [30] y $0.55 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ [72], respectivamente. Por lo cual, al momento de realizar el curado sobre la parrilla, se producía un estiramiento mayor en el PDMS que en la fibra, provocando con ello que al alcanzar la temperatura ambiente la contracción entre el polímero y la fibra fuera desigual, alcanzando en algunos casos el punto del rompimiento de la fibra. Después de realizar diversas pruebas en las que se variaba la temperatura y el tiempo de curado, se observó que a temperaturas menores de los $80 \text{ }^\circ\text{C}$ se minimizaban las micro-curvatura. Se obtuvieron resultados favorables al polimerizar a temperaturas alrededor de $50 \text{ }^\circ\text{C}$, con lo que se alcanzó la polimerización en un tiempo de 2 horas y 15 minutos. Finalmente se decidió realizar el curado a temperatura ambiente, entre $23 \text{ }^\circ\text{C}$ - $25 \text{ }^\circ\text{C}$ para minimizar estos esfuerzos generados por el factor de encogimiento del PDMS al polimerizarse, alcanzando la polimerización completa del dispositivo en un lapso de 3 días. De acuerdo a las técnicas de manufactura utilizadas y con las observaciones mencionadas, se logró optimizar el proceso de fabricación de manera que se se obtuvo un dispositivo más robusto y de producción más sencilla.

Finalmente, se puede concluir que se cumplieron con los objetivos propuestos de diseñar, construir y caracterizar un sensor basado en recubrimientos micro-estructurados de PDMS para rejillas de difracción óptica y realizar la evaluación de su desempeño como sensor de cambio de índice de refracción y de temperatura. Cabe mencionar que resultados previos de este proyecto fueron presentados en el congreso Latin America Optics & Photonics Conference, el cual fue celebrado en Maresías, Brasil en noviembre de 2012 en forma oral (Apéndice A).

4.4 Trabajo a futuro

Con los experimentos realizados, se ha observado que este tipo de dispositivos tiene un gran potencial para funcionar como sensor de distintas variables físicas, temperatura, índice de refracción, desplazamiento, etc. Sin embargo, aún cuando se obtuvieron resultados aceptables con este prototipo siguiendo los métodos descritos, es posible optimizarlos mejorando el método de fabricación. Por ejemplo, se podría modificar el diseño del molde, de modo que al montar la fibra no se tenga la necesidad de fijarla ni con PDMS ni con prensas de sujeción. Además, se podría tener una medida específica del espesor del dispositivo.

Una propuesta alterna a tener un molde de zinc, es utilizar otro tipo de material que no sea metálico, por ejemplo el teflón, lo que ayudaría a que la réplica se desprendiera más fácilmente del molde, reduciendo así los esfuerzos mecánicos al momento de separar la réplica del molde. Adicionalmente se podría implementar un sistema con control micrométrico para la alineación de la fibra sobre el molde, de modo que se asegure que la zona más angosta de la fibra adelgazada (cintura) se coloque centrícamente sobre los microcanales del molde metálico.

Otro aspecto que se podría mejorar es el mecanismo de sujeción de la fibra, ya que con esto se tendría un mejor control en la tensión aplicada al momento de colocarla sobre el molde. Actualmente esto se realiza de manera manual, y en algunas ocasiones se tensa más que en otras, lo que posiblemente contribuye a que la fibra se someta a grandes esfuerzos y se rompa con mayor facilidad. Aunado a todo lo anterior, el tener un molde con mayor resolución podría mejorar la respuesta del dispositivo, por lo que se ha pensado realizar el molde empleando fotolitografía, los cuales alcanzan mayor resolución.

Por otra parte, se busca mejorar el sistema de caracterización, lo que ayudaría a tener una mejor análisis de los resultados que se obtienen, esto es posible realizando las mediciones en un ambiente de temperatura y humedad controlada, posibilitando que las pruebas se reproduzcan siempre bajo las mismas condiciones. Pues como ya se indicó, el dispositivo presenta un comportamiento no esperado para temperaturas por debajo de 40 °C.

Así mismo, dado que el PDMS es un material biocompatible, sería posible aprovechar esta característica para integrarse en sistemas para realizar mediciones biológicas, como pueden ser los cultivos celulares, o bien, se puede realizar la funcionalización de la superficie para realizar la detección de determinados agentes biológicos esto con el objetivo de integrarlo más adelante en sistemas Lab-On-a-Chip.

APÉNDICE A. MANUSCRITO PRESENTADO EN EL CONGRESO DE ÓPTICA Y FOTÓNICA DE LATINOAMÉRICA (LAOP 2012)

Fabrication of Low-Cost Long-Period Fiber Gratings Using Tapered Optical Fibers Embedded in Polymer

Anabel Martínez-Gaytán¹, Jorge A. Soto-Olmos¹, Laura Oropeza-Ramos¹ and Juan Hernández-Cordero²

¹ Departamento de Electrónica, Centro UNAMems, Facultad de Ingeniería,
UNAM, Edificio DIE-DIMEI, 3er. Piso, México D.F., 04510, México

² Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, Apdo. Postal 70.360, Cd. Universitaria, México D.F. 04510, México

Abstract: We report on the fabrication of long-period fiber gratings using tapered fibers embedded in PDMS polymer using a low-cost technique. Temperature sensitivity of these biocompatible devices is also evaluated.

OCIS codes: (060.0060) Fiber optics; (160.5470) Polymers; (060.2370) Fiber optic sensors

1. Introduction

Conventional long-period fiber gratings (LPFGs) are made by introducing periodic index changes in the fiber core to couple the fundamental mode with cladding modes at discrete wavelengths. These devices thus produce attenuation bands that can be used in diverse applications such as communications as gain equalizers for fiber amplifiers, band rejection filters in lasers and to alter the spectra of broadband sources [1]. LPFGs have been induced in tapered optical fibers (TOFs) by corrugating the surface of the fiber as well as using an external metallic micrograting [2, 3]. Previously, our group reported an LPFG induced by a periodic polymeric micrograting externally placed in contact with the thin region of a TOF [4, 5]. The micrograting was fabricated using the soft lithography technique through a low-cost polystyrene thermoplastic mold and its poly(dimethylsiloxane) (PDMS) micro-structured replica. This proof of concept showed similar behavior to that reported for LPFG structures with metallic microgratings, with the additional benefit of biocompatibility, optical transparency and a low-cost fabrication method. Albeit these features, the grating response had to be induced by applying force between the external polymeric microchannels and the TOF region, probably due to the lack of contact between the microchannels and the fiber.

With the aim of improving the fabrication process of polymer based LPFG, in this work we report a different approach. This is based upon embedding a TOF into a PDMS device composed of parallel microchannels. The microchannel grating provides a modulation effect on the external refractive index, thus producing the LPFG. In this novel grating design, a thin layer of PDMS between the microchannel grating and the TOF prevents direct contact between both elements; nonetheless, this layer is thin enough to still allow for the evanescent wave to be affected by the periodical changes in the refractive index. We thus provide details of the fabrication process as well as preliminary results on the response of the LPFG to temperature changes.

2. Fabrication Method

The optical fiber is tapered using a Dowson OC-2010 workstation, commonly employed to fabricate optical fiber couplers. The tapering process consists of heating and pulling the fiber (Corning SMF-28e) so that an adiabatic change in diameter can be achieved. Using the proper settings for the process, the taper waist radius reduces to about 20 μm , one sixth of its original size (Fig. 1a) and a low loss fiber taper can thus be obtained.

A metallic master mold with the grating is fabricated using a common screen-printing technique known as electrochemical marking. This mold contains a microchannel grating with a period of 412 μm and a depth of 160 μm , as shown in Figure 1b. To produce PDMS replicas, the tapered zone of the fiber is placed perpendicular to the microchannels and then a rectangular thin membrane of PDMS is used to press the fiber. This is done to provide close contact between the tapered fiber and the microchannel grating, as is depicted in Figure 2a.

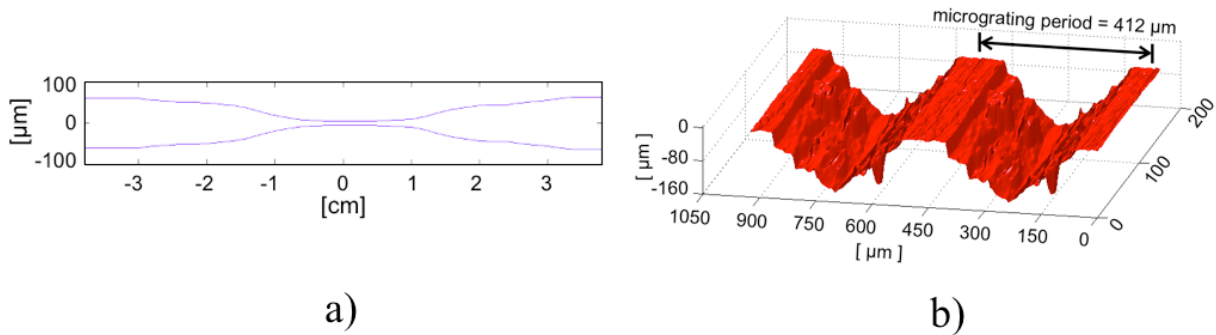


Figure 1. a) Measured profile of the tapered fiber. b) Characterization of the microchannels in the metallic master mold, using a MSA-400 Polytec non-invasive topography system.

Liquid PDMS is then poured between the mold and the fiber and the sandwich is placed inside a vacuum chamber to assure that the PDMS completely fills the microchannels. The PDMS is subsequently heated using an electric hot plate to accelerate the curing process. Once the polymer is cured, the fabricated structure can be easily detached from the master mold, resulting in an embedded TOF-microstructured polymeric device (Fig. 2b).

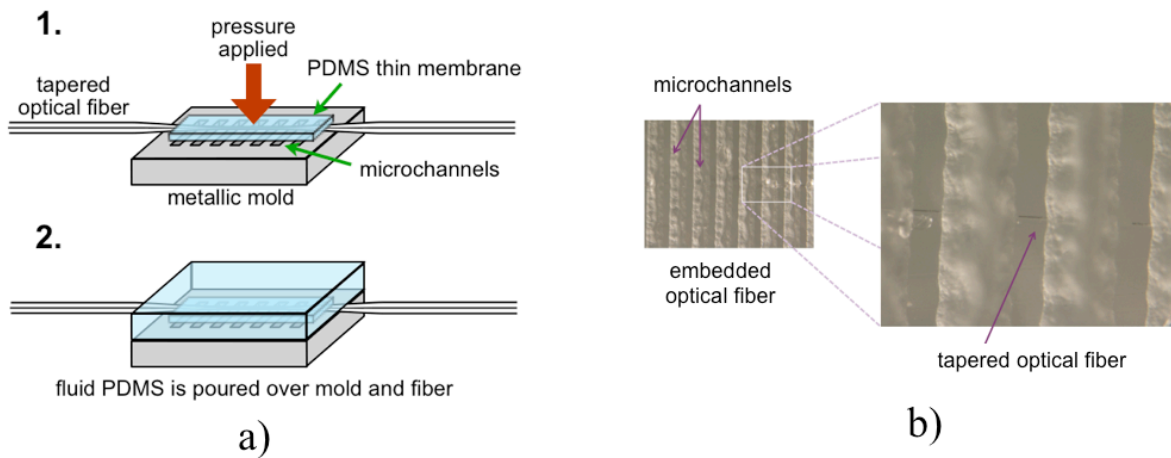


Figure 2. a) Schematic of the process used to embed the TOF using a metallic master mold and PDMS polymer. Fluid PDMS is poured in between the fiber and the mold while a PDMS thin membrane is used to maintain the fiber in close contact with the microchannels during the polymerization process. b) Micrograph of the embedded TOF-microstructured polymeric device.

3. Device characterization

To evaluate the response of the device we employed a 1550 nm LED light source and an Optical Spectrum Analyzer (OSA, Agilent 86140B). The optical transmission spectra obtained for three devices with different microchannel grating lengths are shown in Figure 3a. The shortest grating length has the smallest attenuation peak, and as the grating length increases, the depth of the peaks increases as well. Note that, for the device with grating length of 0.75 cm, the attenuation peak is smaller than the one produced by an external polymeric microchannel grating reported earlier [5].

The insertion losses for a grating length of 0.75 cm are about 6 dB, as shown in the optical spectrum of Figure 3a. Compared to our previous design [5], a reduction of 20% in insertion losses is achieved following this new fabrication process. Nonetheless, the insertion losses that we obtained are higher than those reported using LPFGs with external metallic microchannels, which are around 3 dB [2].

Figure 3b shows the response of the LPFG to variations in temperature. Data were obtained upon placing the embedded LPFG (for a micrograting length = 0.5 cm) on an electric hot plate. As seen in the figure, the attenuation

peak shifts as the temperature increases following a similar behavior to that obtained for LPFGs produced by external gratings. The temperature sensitivity is estimated to be around $-0.46 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, which is also similar to that reported with our previous design [5]; furthermore, the structure seems to perform better than the $-0.24 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ for metallic external gratings [2]. Notice however that a direct comparison between our results and previous works is not that straightforward because the temperature sensitivity is strongly dependent on the particular attenuation band (cladding mode coupling) that is being measured.

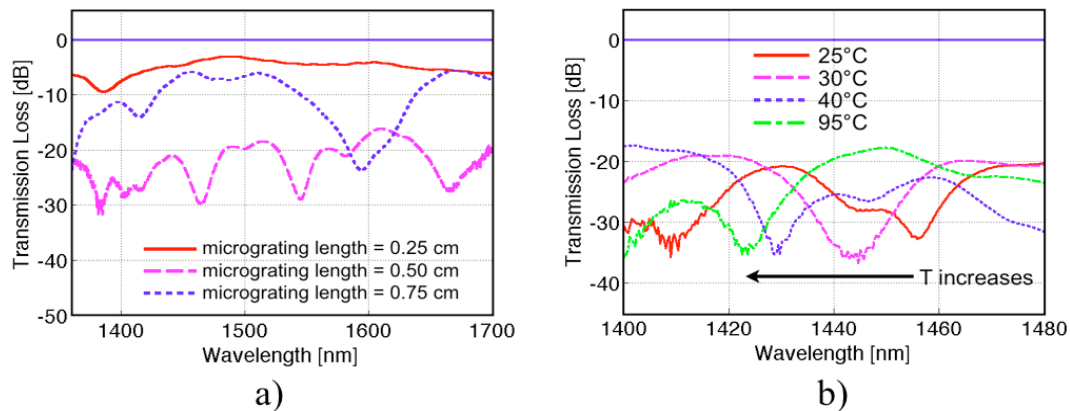


Figure 3. a) Spectrum transmission of the embedded LPFGs for three different micrograting lengths. b) Response of the embedded LPFG to variations in temperature (for micrograting length=0.5 cm).

4. Conclusions

An embedded TOF microstructured polymeric device was successfully fabricated. With this microstructure, a LPFG was induced in the optical fiber using an inexpensive, straightforward and rapid fabrication method based in soft lithography. Although this lithographic technique is often limited by the availability of appropriate master molds, the use of metallic casts used in this work are inexpensive and easy to fabricate. With this new approach we still get the benefits of using PDMS instead of metal or silicon-based microgratings, namely, biocompatibility, optical transparency and a simple fabrication method that does not require of high-precision manufacturing. The proposed technique further yields devices that are also compatible with microfluidics technology. These features make these kinds of devices potential candidates for developing temperature sensors for biotechnology and medical applications.

Acknowledgments

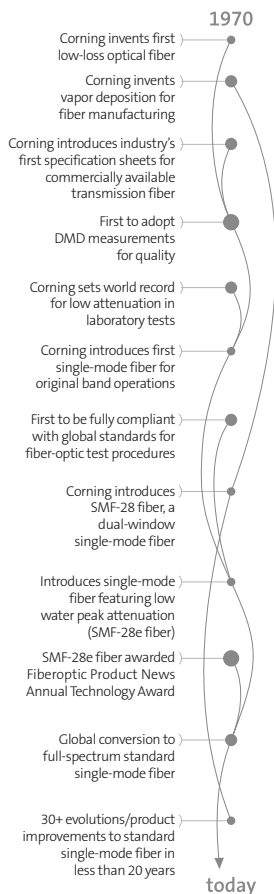
The authors are grateful to the UNAMems Center (Engineering School-UNAM) where the optical topography characterization was carried out, to the Biophysics of Excitable Systems Lab (Science School-UNAM) where the microgratings were fabricated. Technical support from Héctor Regalado-Quezada and Amado Velázquez-Benítez is greatly appreciated. This project was partially supported by CONACYT-154464, ICYTDF- PINV11-17 and DGAPA-UNAM (PAPIIT IN102112).

Bibliography

- [1] S. Savin, M. J. Dignonnet, G. S. Kino and H. J. Shaw, "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings," *Opt. Lett.* 25, 710-712 (2000).
- [2] K.-C. Hsu, N.-K. Chen, C.-L. Lee, Y.-S. Chih, P.-J. Jhuang and Y. Lai, "Spectral Response of Long-Period Fiber Grating Based on Tapered Fiber With Side-Contacted Metal Grating," *J. Lighthwave Technol.* 28, 1057-1063 (2010).
- [3] W. Ding and S. R. Andrews, "Modal coupling in surface-corrugated long-period-grating fiber tapers," *Opt. Lett.* 33, 717-719 (2008).
- [4] J. A. Soto-Olmos, J. Hernández-Cordero, and L. Oropeza-Ramos, "Characterization of a Low-Cost Long-Period Fiber Grating Induced by a Polymeric Microstructure," in *Optical Sensors, OSA Technical Digest (CD)* (Optical Society of America, 2011), paper SMC6.
- [5] J. A. Soto-Olmos, L. Oropeza-Ramos and J. Hernández-Cordero, "Low-cost and biocompatible long-period fiber gratings", *Proc. SPIE* 8011, 80114S (2011); doi: 10.1117/ 12.902143

APÉNDICE B. HOJA DE DATOS DE LA FIBRA MONOMODAL SMF-128-e

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.

PI1344 | ISSUED: DECEMBER 2007
SUPERSEDES: MAY 2007

ISO 9001 REGISTERED



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

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@coming.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.

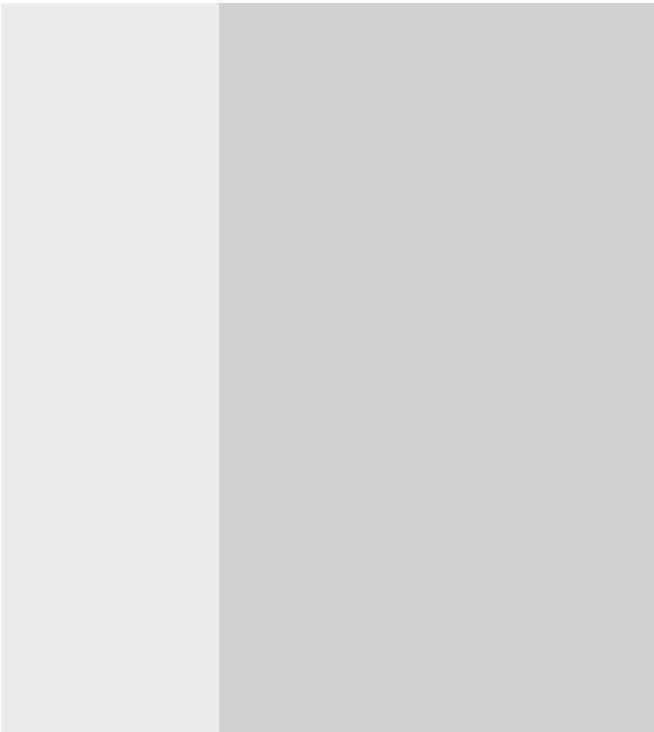
Length

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_f)	20
Coating Strip Force	<u>Dry</u> : 0.6 lbs. (3N)



APÉNDICE C. HOJA DE DATOS DE PDMS (SYLGARD 184)

Product Information Solar

DOW CORNING

Sylgard[®] 184 Silicone Elastomer

FEATURES

- Transparent
- Cures to flexible elastomer
- Constant cure rate, regardless of sectional thickness or degree of confinement
- Service range of -45 to 200°C (-49 to 392°F)
- No post cure required
- Two part, 10:1 mix
- RT/HA cure
- Minimal shrinkage
- No exotherm during cure
- No solvents or cure byproducts
- Repairable
- Good dielectric properties
- Deep section cure
- UL 94 V1, V0
- UL RTI 130°C (266°F)

COMPOSITION

- Two-part silicone elastomer supplied as flowable liquid

Two-part silicone that cures to a flexible elastomer for protection of electrical and electronic devices in solar applications

APPLICATIONS

- Protection of electrical/electronic devices.
- General potting applications including power supplies, connectors, sensors, industrial controls, transformers, amplifiers, high voltage resistor packs, and relays; adhesive/encapsulant for solar cells.

TYPICAL PROPERTIES

Specification Writers: Please contact your local Dow Corning sales office or your Global Dow Corning contact before writing specifications on this product.

Test	Unit	Result
Mix Ratio		10:1
Color		Clear
Viscosity	centipoise or mPa.s	3900
Durometer, Shore A		50
Specific Gravity		1.03
Working Time at RT	min	>2 hours
Thermal Conductivity	Watt/meter-°K	0.2
	cal/cm-sec °C	4.3 x 10 ⁻⁴
Linear Coefficient of Thermal Expansion	µm/m-°C or ppm	310
UL Flammability Classification		94 V1, V0
UL Temperature Index, Electrical/ Mechanical	°C	130/130
Dielectric Strength	volts/mil	540
	kV/mm	21.2
Dielectric Constant at 100 Hz		2.7
Dielectric Constant at 100 kHz		2.7
Volume Resistivity	ohm-cm	1.2 x 10 ¹⁴
Dissipation Factor at 100 Hz		<0.001
Dissipation Factor at 100 kHz		<0.001

DESCRIPTION

Sylgard[®] 184 Silicone Elastomer is supplied as two-part liquid component kits comprised of Part A/Part B to be mixed in a 10:1 ratio by weight or volume. It is suitable for manual mixing or automated mixing and dispensing.

When liquid components are thoroughly mixed, the mixture cures to a flexible elastomer, which is suited for the protection of electrical/electronic devices in solar applications.

HOW TO USE

Mixing

Sylgard 184 Silicone Elastomer is supplied in two parts as lot-matched base and curing agent that are mixed in a ratio of 10 parts base to one part curing agent, by weight. For further information, consult your local Dow Corning representative.

Pot Life/Working Time

Cure reaction begins with the mixing process. Initially, cure is evidenced by a gradual increase in viscosity, followed by gelation and conversion

to a solid elastomer. Pot life is defined as the time required for viscosity to double after Parts A and B (base and curing agent) are mixed. *Sylgard* 184 Silicone Elastomer has a pot life of >2 hours.

Processing and Curing

Thoroughly mixed *Sylgard* 184 Silicone Elastomer may be poured/dispensed directly into the container in which it is to be cured. Care should be taken to minimize air entrapment.

When practical, pouring/dispensing should be done under vacuum, particularly if the component being potted or encapsulated has many small voids. If this technique cannot be used, the unit should be evacuated after the silicone encapsulant has been poured/dispensed.

Sylgard 184 Silicone Elastomer may be either room temperature (25°C/77°F) or heat cured following this schedule:

~48 hours at room temperature
45 minutes at 100°C (212°F)
20 minutes at 125°C (257°F)
10 minutes at 150°C (302°F)

These data are believed to be typical and should be used as initial estimates of cure times. Times will vary slightly from batch to batch and can be longer or shorter due to thermal mass of your parts and your heating ramp rate. Pretesting is recommended to confirm adequate cure for your application.

Sylgard 184 Silicone Elastomer can be placed in service immediately following the completion of the cure schedule. No post cure is required.

SURFACE PREPARATION

In applications requiring adhesion, priming is required. For best results, the primer should be applied in a very thin, uniform coating and then wiped off after application. The surface should be thoroughly air-dried prior to application of the silicone elastomer. Instructions for primer usage can be found in the Dow Corning literature, "How To Use *Dow Corning* Primers and Adhesion Promoters" (Form No. 10-366) and in the information sheets specific to the individual primers.

USEFUL TEMPERATURE RANGES

For most uses, *Sylgard* 184 Silicone Elastomer should be operational over a temperature range of -45 to 200°C (-49 to 392°F) for long periods of time. However, at both the low and high temperature ends of the spectrum, behavior of the materials and performance in particular applications can become more complex and require additional considerations.

For low-temperature performance, thermal cycling to conditions such as -55°C (-67°F) may be possible, but performance should be verified for your parts or assemblies. Factors that may influence performance are configuration and stress sensitivity of components, cooling rates and hold times, and prior temperature history.

At the high-temperature end, the durability of the cured silicone elastomer is time- and temperature-dependent. As expected, the higher the temperature, the shorter the time the material will remain usable.

COMPATIBILITY

Certain materials, chemicals, curing agents, and plasticizers can inhibit the cure of *Sylgard* 184 Silicone Elastomer. Most notable of these include:

- Organotin and other organometallic compounds
- Silicone rubber containing organotin catalyst
- Sulfur, polysulfides, polysulfones, or other sulfur-containing materials
- Amines, urethanes, or amine-containing materials
- Unsaturated hydrocarbon plasticizers
- Some solder flux residues

If a substrate or material is questionable with respect to potentially causing inhibition of cure, it is recommended that a small-scale compatibility test be run to ascertain suitability in a given application. The presence of liquid or uncured product at the interface between the questionable substrate and the cured gel indicates incompatibility and inhibition of cure.

HANDLING PRECAUTIONS

PRODUCT SAFETY INFORMATION REQUIRED FOR SAFE USE IS NOT INCLUDED IN THIS DOCUMENT. BEFORE HANDLING, READ PRODUCT AND MATERIAL SAFETY DATA SHEETS AND CONTAINER LABELS FOR SAFE USE, PHYSICAL, AND HEALTH HAZARD INFORMATION. THE MATERIAL SAFETY DATA SHEET IS AVAILABLE ON THE DOW CORNING WEBSITE AT WWW.DOWCORNING.COM, OR FROM YOUR DOW CORNING REPRESENTATIVE, OR DISTRIBUTOR, OR BY CALLING YOUR GLOBAL DOW CORNING CONNECTION.

USABLE LIFE AND STORAGE

Sylgard 184 Silicone Elastomer has a shelf life of 24 months from date of manufacture at room temperature.

For best results, *Sylgard* 184 Silicone Elastomer should be stored at or below 25°C (77°F). Special precautions must be taken to prevent moisture from contacting this material. Containers should be kept tightly closed and head or air space minimized. Partially filled containers should be purged with dry air or other gases, such as nitrogen.

PACKAGING

Sylgard 184 Silicone Elastomer is supplied in nominal 0.45-, 3.6-, 18- and 200-kg (1-, 8-, 40- and 440-lb) containers, net weight. Packaging options may vary.

Consult Dow Corning Customer Service at (989) 496-6000 for additional packaging options.

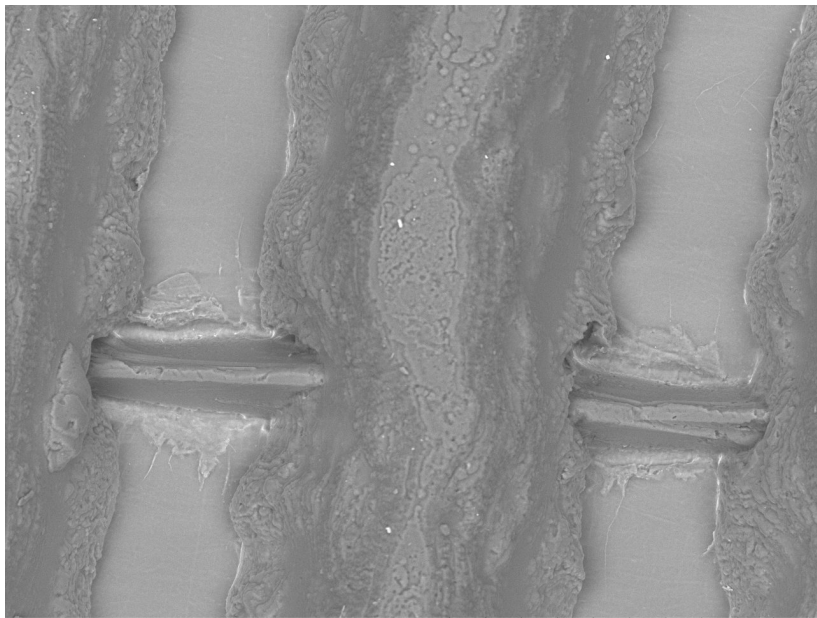
LIMITATIONS

This product is neither tested nor represented as suitable for medical or pharmaceutical uses.

HEALTH AND ENVIRONMENTAL INFORMATION

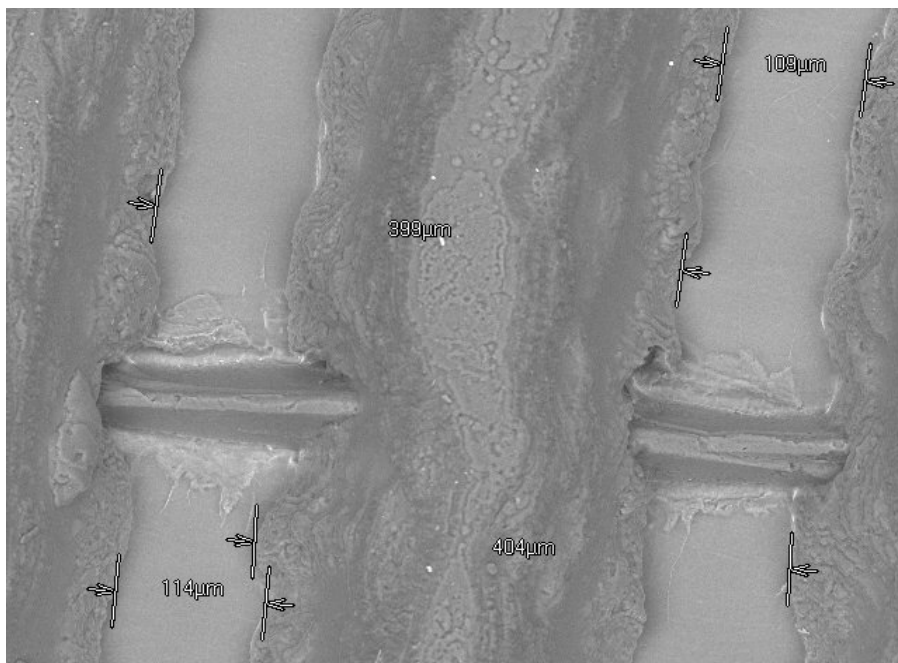
To support customers in their product safety needs, Dow Corning has an extensive Product Stewardship organ-

APÉNDICE D. MICROGRAFÍAS DEL DISPOSITIVO CAPTURADAS CON MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.



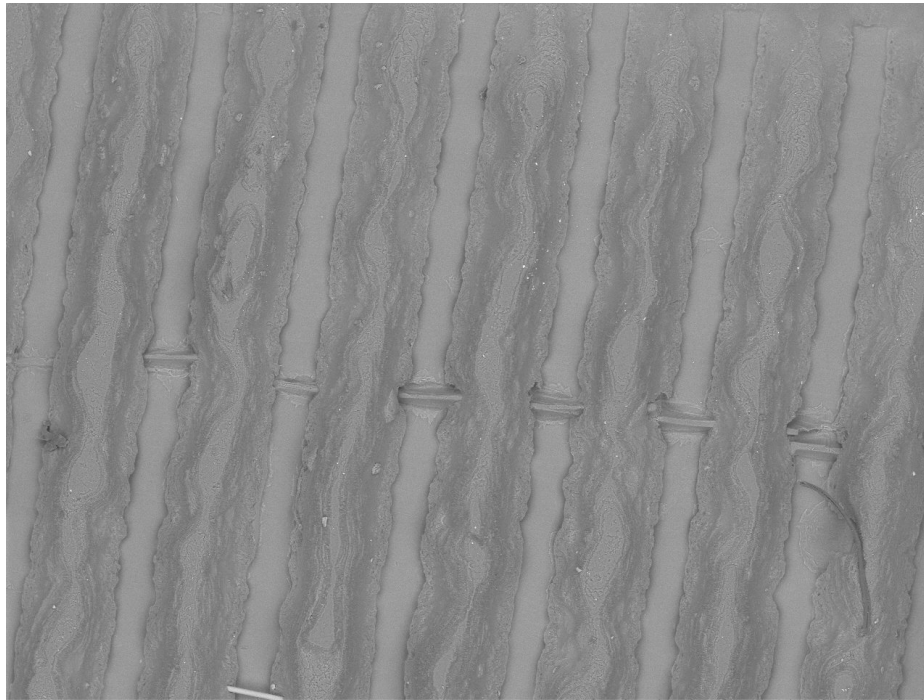
TM3030_0019 2013/10/29 15:32 HL 300 µm

D.1 Micrografía del dispositivo



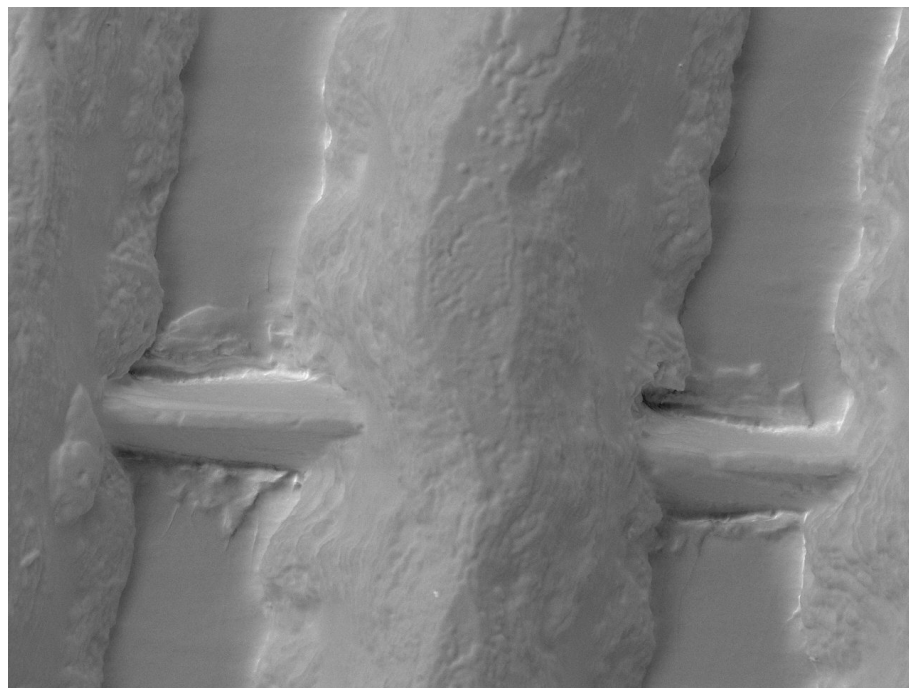
TM3030_0020 2013/10/29 15:32 HL 300 µm

D.2 Mediciones del periodo de la rejilla



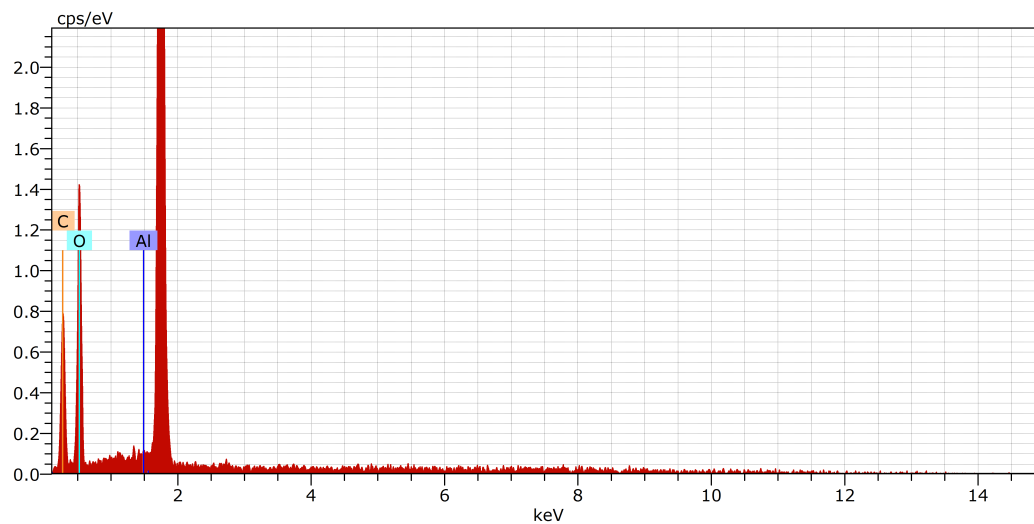
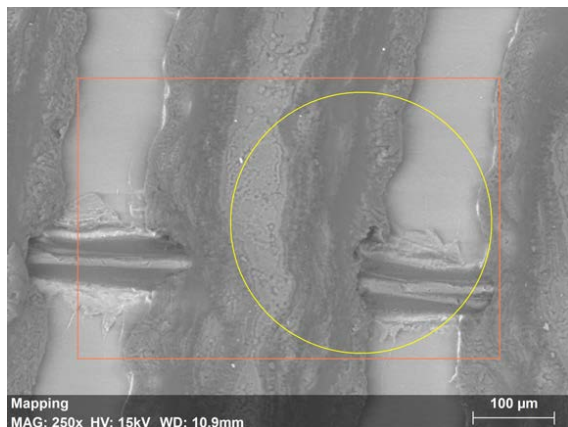
TM3030_0018 2013/10/29 15:30 HL 1 mm

D.3 Rejilla de polímero con la fibra embebida



TM3030_0021 2013/10/29 15:39 HLT 300 μ m

D.4 Realce de la rejilla de polímero con fibra óptica adelgazada embebida



Spectrum: Point

Element	AN	Series	norm. [wt.%]	Atom. [at.%]
Carbono	6	K-series	36.75	49.49
Oxígeno	8	K-series	32.39	32.75
Silicio	14	K-series	30.85	17.77
Total:			100.00	100.00

D.5 Análisis de composición de elementos sobre un área de la rejilla de polímero

Bibliografía

- [1] S. Pascual and J. Hernández, “Fibras ópticas láser: cómo cocinar vidrio para generar luz,” *Materiales Avanzados*, no. 9, pp. 5–14, 2007.
- [2] B. Lee, “Review of the present status of optical fiber sensors”, *Optical Fiber Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 57–79.
- [3] J. W. Berthold, “Industrial Applications of Fiber Optic Sensors”, *Proceedings of SPIE*, vol. 0566, p. 414.
- [4] G. Arenas, “Desarrollo de sensores de fibra óptica: aplicación de un interferómetro de Fizeau al estudio de polímeros”, Tesis doctorado, Universidad Nacional del Mar de Plata, Argentina, 2009.
- [5] S. Yu, Francis T.S., Yin, "Fiber Optic Sensors". CRC Press, 2002.
- [6] B. Culshaw, “Optical Fiber Sensor Technologies: Opportunities and Perhaps Pitfalls”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 39–50, Jan. 2004.
- [7] D. Jessie and P. Torres, “Aplicaciones De Sensores Basados En Redes De Bragg En Fibra Óptica En Estructuras Civiles Applications”, *Revista Colombiana de Física*, vol. 43, no. 3, Medellín, Colombia, pp. 3–6, 2011.
- [8] P. Taylor, G. A. Cranch, and G. M. H. Flockhart, “Tools for synthesising and characterising Bragg grating structures in optical fibres and waveguides,” *Journal of Modern Optics*, vol. 59, no. March, pp. 37–41, 2012.
- [9] K. O. Hill and G. Meltz, “Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1263–1276, 1997.
- [10] I. F. Llamas, “Aplicaciones y diseño de las rejillas en fibra óptica en la Ingeniería en Telecomunicaciones”, tesis doctoral, UNAM, 2007.
- [11] S. W. James and R. P. Tatam, “Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application”, *Measurement Science and Technology*, vol. 14, no. 5, pp. R49–R61, 2003.
- [12] R. A. Vázquez-sánchez, C. M. García-lara, A. Romero-pérez, M. May-alarcón, and U. Autónoma, “Sensor Láser con Rejillas de Bragg de Fibra Óptica Caracterizado con Celdas Peltier para Aplicarse como un Sensor de Alarma de Temperatura”, *Simposio de Metrología*, Querétaro, Octubre, 2008, pp. 6.

-
- [13] A. D. Kersey, M. A. Davis, et al, "Fiber grating sensors", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1442–1463, 1997.
- [14] D. Marazuela and M. C. Moreno-Bondi, "Fiber-optic biosensors: an overview", *Analytical and bioanalytical chemistry*, vol. 372, no. 5–6, pp. 664–682, 2002.
- [15] K. S. Chiang, Q. Liu, and H. Kong, "Long-Period Grating Devices for Application in Optical Communication", *International Conference on Optical Communications and Networks*, 2006, pp. 128–133.
- [16] D. Inaudi, "State of the Art in Fiber Optic Sensing Technology and EU Structural Health Monitoring Projects", *First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, 2003, pp. 191–198.
- [17] A. Othonos and K. Kalli, "Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing", Boston, Massachusetts: Artech House, 1999, p. 422.
- [18] A. Othonos, "Fiber Bragg gratings," *Rev. Sci. Instrum.* 68, no. December, pp. 4309–4341, 1997.
- [19] N. Patricia, P. Ramírez, and A. R. Castañeda, "Fibras ópticas con inhomogeneidad inducida", *Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Ingenierías*, vol. XIV, no. 56, Nuevo León, México, pp. 30–37, 2012.
- [20] L. A. A. Castro, "Sensor distribuido de fibra óptica basado en rejillas de Bragg de ultra-baja reflectancia" CICESE, 2009.
- [21] O. Andreas and K. Kalli, "Fiber Bragg gratings. Fundamentals and application in telecommunications and sensing", 1ra. edición. Artech House, 1999, p. 422.
- [22] A. Iadicicco, D. Paladino, P. Pilla, S. Campopiano, A. Cutolo, and A. Cusano, "Long Period Gratings in New Generation Optical Fibers", in *Recent Progress in Optical Fiber Research*, M. Yasin, W. S. Harun, and H. Arof, Eds. Croatia: IntechWeb.ORG, 2002, p. 462.
- [23] Y. H. Lei Gao, Tao Zhu, Ming Deng, King Seng Chiang, Xiaokang Sun, Xiaopeng Dong, "Long-Period Fiber Grating Within D-Shaped Fiber Using Magnetic Fluid for Magnetic-Field Detection", *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, no. 6, pp. 2095–2104, Dec. 2012.
- [24] G. L. In, W. L. lu, and W. U. Chengwen, "Fiber-Optic Humidity Sensor Based on an Air-Gap Long Period Fiber Grating", *Optical Review*, vol. 18, no. 1, pp. 93–95, 2011.

- [25] K.-R. Sohn, K.-T. Kim, and J.-W. Song, "Optical fiber sensor for water detection using a side-polished fiber coupler with a planar glass-overlay-waveguide", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 101, no. 1–2, pp. 137–142, Sep. 2002.
- [26] A. M. R. Pinto and M. Lopez-Amo, "Photonic Crystal Fibers for Sensing Applications", *Journal of Sensors*, vol. 2012, pp. 1–21, 2012.
- [27] T. Sorensen, J. Broeng, A. Bjarklev, E. Knudsen, and S. E. Barkou Libori, "Macro-bending loss properties of photonic cristal fibre", *Electronics Letters*, vol. 37, no. 5, pp. 287–289, 2001.
- [28] S. Liu, L. Jin, W. Jin, D. Wang, C. Liao, and Y. Wang, "Structural long period gratings made by drilling micro-holes in photonic crystal fibers with a femtosecond infrared laser", *Optics express*, vol. 18, no. 6, pp. 5496–503, Mar. 2010.
- [29] S. Savin, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino, and H. J. Shaw, "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings", *Optics letters*, vol. 25, no. 10, pp. 710–712, May 2000.
- [30] J. A. S. Olmos, "Inducción de rejillas de periodo largo en fibras ópticas mediante la aplicación de dispositivos MEMS de polímero", Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.
- [31] K.-C. Hsu, N.-K. Chen, C.-L. Lee, Y.-S. Chih, P.-J. Jhuang, and Y. Lai, "Spectral Response of Long-Period Fiber Grating Based on Tapered Fiber With Side-Contacted Metal Grating", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 7, pp. 1057–1063, 2010.
- [32] K. S. C. Kuang, R. Kenny, M. P. Whelan, W. J. Cantwell, and P. R. Chalker, "Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials", *Composites Science and Technology*, vol. 61, no. 10, pp. 1379–1387, Aug. 2001.
- [33] D. Hull, "An introduction of composite materials", 2nd. ed., vol. 78, no. 1. Cambridge University Press, 1996, pp. 144–54.
- [34] M. Frövel, "Sensores de fibra óptica tipo redes de Bragg embebidos en material compuesto para medir deformaciones y temperaturas criogénicas", Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, 2006.
- [35] C. Park, "A PDMS-Coated Optical Fiber Bragg Grating Sensor for Enhancing Temperature Sensitivity", vol. 15, no. 4, pp. 329–334, 2011.
- [36] A. S. Alvarado, L. E. Erro, S. María, and T. Puebla, "Propiedades físico-químicas de membranas PDMS empleadas en lentes líquidas", *Superficies y Vacío*, vol. 22, no. 3, Huajuapán de León Oaxaca, México, pp. 61–66, Sep-2009.

- [37] J. M. K. Ng, I. Gitlin, A. D. Stroock, and G. M. Whitesides, "Components for integrated poly(dimethylsiloxane) microfluidic systems", *Electrophoresis*, vol. 23, no. 20, pp. 3461–3473, 2002.
- [38] H. Search, C. Journals, A. Contact, M. Iopscience, and I. P. Address, "The mechanical properties of the rubber elastic polymer polydimethylsiloxane for sensor applications", *Micromechanics and Microengineering*, vol. 7, pp. 145–147, 1997.
- [39] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), "JCGM 200 : 2008 International vocabulary of metrology. Basic and general concepts and associated terms (VIM)" , 2008
- [40] J. Fraden, "Handbook of Modern Sensors" , 2nd. Edition, New York: Springer-Verlag, 2004.
- [41] J. M. López-Higuera, "Optical Sensors", Publicaciones de la Universidad de Catabria, 2001, pp. 263.
- [42] N. D. Herrera, "Desarrollo de sensores de fibra óptica para el control 'In-Situ' de parámetros físicos del medio acuático", Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 2005.
- [43] E. Udd, Ed., "Fiber optic sensors An Introduction for Engineers and Scientist", Wiley-Interscience, 2006, p. 476.
- [44] K. Fidanboyly and H. . Efengioglu, "Fiber optic sensors and their applications", in 5th International Advanced Technologies Symposium, 2009, pp. 1–6.
- [45] J. L. Alcoba, ¿Qué es una fibra óptica y como funciona), "<http://www.xatakaon.com/tecnologia-de-redes/especial-comunicaciones-opticas-ii-que-es-una-fibra-optica-y-como-funciona>", Consulta: junio 2013 .
- [46] W. F. Smith and J. Hashemi, "Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales", 4ta. ed. McGrawHill, 2006.
- [47] Wikipedia, Ley de Snell, "http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Snell", Consulta: junio 2013 .
- [48] A. M. Velázquez-Benítez, "Acopladores de fibra óptica con recubrimientos de azopolímero", Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, 2010.
- [49] C. M. Davis, E. F. Carome, M. H. Weik, and R. E. Einzig, "Fiber Optic Sensor Technology Handbook", vol. 5225, no. 703.
- [50] P. Suresh Kumar, "Design and development of fiber optic sensors for trace detection of certain environmental pollutants", Cochin University of Science and Technology, 2003.

- [51] E. Hetch, "Óptica", 3rd. ed. Addison Wesley, 2000.
- [52] G. Mahlke and P. Gössing, "Conductores de fibras ópticas", 1ra. edición. Marcombo, 1987, p. 268.
- [53] G. Keiser, "Optical Fiber Communication", 2da. edición. Rochester, New York: McGraw-Hill, 1991, p. 461.
- [54] J. A. Buck, "Fundamentals of optical fibers", 1ra. edición. J. Wiley, 1995, p. 266.
- [55] Fibremex, cables, "<http://www.yio.com.ar/fo/>", consulta: julio 2013.
- [56] Y. Tian, W. Wang, N. Wu, X. Zou, and X. Wang, "Tapered optical fiber sensor for label-free detection of biomolecules", *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 11, no. 4, pp. 3780–90, Jan. 2011.
- [57] H. J. Khashi, "Fabrication of Submicron-Diameter and Taper Fibers Using Chemical Etching", vol. 28, no. 4, pp. 308–312, 2012.
- [58] A. Grimes, D. N. Breslauer, M. Long, J. Pegan, L. P. Lee, and M. Khine, "Shrinky-Dink microfluidics: rapid generation of deep and rounded patterns", *Lab on a chip*, vol. 8, no. 1, pp. 170–172, 2008.
- [59] M. Abdelgawad, M. W. L. Watson, E. W. K. Young, J. M. Mudrik, M. D. Ungrin, and A. R. Wheeler, "Soft lithography: masters on demand", *Lab on a chip*, vol. 8, no. 8, pp. 1379–1385, 2008.
- [60] F. Schneider, T. Fellner, J. Wilde, and U. Wallrabe, "Mechanical properties of silicones for MEMS", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, no. 6, p. 065008, Jun. 2008.
- [61] D. A. Chang-yen, R. K. Eich, and B. K. Gale, "A Monolithic PDMS Waveguide System Fabricated Using Soft-Lithography Techniques", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 6, pp. 2088–2093, 2005.
- [62] H.-S. Chuang and S. Wereley, "Design, fabrication and characterization of a conducting PDMS for microheaters and temperature sensors," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 19, no. 4, p. 045010, Apr. 2009.
- [63] X. Gong and W. Wen, "Polydimethylsiloxane-based conducting composites and their applications in microfluidic chip fabrication", *Biomicrofluidics*, vol. 3, no. 1, p. 12007, 2009.
- [64] J. C. Lötters, W. Oithuis, P. H. Veltink, and P. Bergveld, "The mechanical properties of the rubber elastic polymer polydimethylsiloxane for sensor applications", *October*, vol. 145, 1997.
- [65] T. K. Kim, J. K. Kim, and O. C. Jeong, "Measurement of nonlinear mechanical properties of PDMS elastomer", *Microelectronic Engineering*, vol. 88, no. 8, pp. 1982–1985, Aug. 2011.

-
- [66] J. L. Wilbur, R. J. Jackman, G. M. Whitesides, E. L. Cheung, L. K. Lee, and M. G. Prentiss, "Elastomeric Optics", *Chemistry of Materials*, vol. 8, no. 7, pp. 1380–1385, 1996.
- [67] J. C. McDonald and G. M. Whitesides, "Poly(dimethylsiloxane) as a material for fabricating microfluidic devices", *Accounts of chemical research*, vol. 35, no. 7, pp. 491–9, Jul. 2002.
- [68] Y. Xia and G. M. Whitesides, "Soft Lithography", *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 37, pp. 550–575, 1998.
- [69] Y. Fainman, P. Demetri, C. Yang, and L. P. Lee, "Optofluidics. Fundamentals, Devices, and Applications", Mc Graw-Hill. 2010, pp. 528.
- [70] J. C. McDonald and G. M. Whitesides, "Poly(dimethylsiloxane) as a material for fabricating microfluidic devices.," *Accounts of chemical research*, vol. 35, no. 7, pp. 491–9, Jul. 2002.
- [71] J. A. Jay, "An Overview of Macrobending and Microbending of Optical Fibers", White Paper WP1212, Corning, December 2010.
- [72] W. Morey, G. Meltz, and H. Glenn, "Fiber Optic Bragg Grating", in *Fiber Optic and Laser Sensor*, SPIE, 1989.
- [73] K. Hsu, N. Chen, C. Lee, Y. Chih, P. Jhuang, and Y. Lai, "Spectral Response of Long-Period Fiber Grating Based on Tapered Fiber With Side-Contacted Metal Grating", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 7, pp. 1057–1063, Apr. 2010.
- [74] J. N. Lee, C. Park, and G. M. Whitesides, "Solvent compatibility of poly(dimethylsiloxane)-based microfluidic devices", *Analytical chemistry*, vol. 75, no. 23, pp. 6544–54, Dec. 2003.