



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

**INDUCCIÓN DE REJILLAS DE PERIODO LARGO
EN FIBRAS ÓPTICAS MEDIANTE LA APLICACIÓN
DE DISPOSITIVOS MEMS DE POLÍMERO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

- INGENIERÍA ELÉCTRICA - SISTEMAS ELECTRÓNICOS

P R E S E N T A :

JORGE ALFONSO SOTO OLMOS

TUTORA:

DRA. LAURA ADRIANA OROPEZA RAMOS



2011

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. NASER QURESHI

Secretario: DR. JOSÉ ISMAEL MARTÍNEZ LÓPEZ

Vocal: DRA. LAURA ADRIANA OROPEZA RAMOS

1^{er}. Suplente: DR. PABLO ROBERTO PÉREZ ALCÁZAR

2^{do}. Suplente: DR. JUAN ARNALDO HERNÁNDEZ CORDERO

Lugar o lugares donde se realizó la

tesis: POSGRADO DE INGENIERÍA, CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F.

TUTORA DE TESIS:

DRA. LAURA ADRIANA OROPEZA RAMOS



FIRMA

Índice

Resumen	7
Resumen en inglés (<i>Abstract</i>)	8
Capítulo 1	9
1. Introducción	9
1.1. Propagación de la luz en forma de modos	9
1.2. Reflexión de Bragg	10
1.3. Acoplamiento de modos en rejillas de periodo largo	12
1.3.1. Tráferencia máxima de energía de los modos acoplados	14
1.4. Rejillas de fibra de periodo largo (RFLP) utilizadas como sensores	15
1.5. RFPL inducidas por micro-rejillas externas	16
1.6. Principio de funcionamiento de las fibras ópticas	17
1.6.1. Fibras ópticas adelgazadas	19
1.7. Fabricación de dispositivos MEMS poliméricos	21
1.7.1. Litografía suave	22
1.7.2. Técnicas de micro-moldeo	23
1.7.3. Moldeo de réplicas	24
1.7.4. Ventajas y desventajas de la litografía suave	25
1.8. Fabricación de moldes	26
1.9. Aplicaciones médicas y biotecnológicas del polidimetilsiloxano (PDMS) . .	29
1.10. Planteamiento del problema	31
1.11. Objetivos	33
1.11.1. Objetivo General	33
1.11.2. Objetivos Particulares	33
Capítulo 2	34

2. Fabricación de dispositivos de polímero	34
2.1. Moldes basados en láminas de <i>poliestireno termoplástico</i> (PST)	34
2.2. Diseño de la micro-rejilla en <i>software</i> CAD	36
2.3. Reducción del molde en el horno y obtención de las réplicas	40
2.4. Caracterización de las micro-rejillas de PDMS	41
2.4.1. Mediciones topográficas por interferometría de luz blanca	44
2.4.2. Post-procesamiento de la imagen obtenida	45
2.4.3. Generación del corte transversal de la superficie en Matlab	50
2.4.4. Generación de la imagen tridimensional de la superficie	51
 Capítulo 3	 54
3. Fabricación de fibras ópticas adelgazadas	54
3.1. Fabricación de fibras adelgazadas	54
3.1.1. Determinación de las dimensiones de la fibra adelgazada	54
3.1.2. Caracterización de la estación de trabajo para adelgazar fibras	56
3.1.3. Obtención del diámetro y la longitud de la zona adelgazada	58
3.1.4. Caracterización de las fibras ópticas adelgazadas	59
3.2. Resultados	61
3.3. Resumen del método de adelgazamiento de fibras	63
 Capítulo 4	 65
4. Caracterización experimental de la RFPL	65
4.1. Arreglo experimental	65
4.2. Pruebas de variaciones en la fuerza aplicada y en la temperatura	67
 Conclusión y discusión de los resultados	 72
Conclusión	72
Discusión de los resultados	72

Trabajo a futuro	80
Apéndice A	83
Manuscrito publicado en la memoria del Congreso ICO 22	83
Apéndice B	92
Cartel presentado en el Congreso ICO 22	92
Apéndice C	94
Resumen publicado en la memoria del Congreso de Fotónica Avanzada 2011	94
Apéndice D	96
Código de Matlab para graficar el corte transversal de los micro-canales	96
Apéndice E	99
Código de Matlab para graficar la superficie tridimensional de los micro-canales	99
Apéndice F	101
Secciones transversales obtenidas en los moldes de <i>poliestireno termoplástico</i>	101
Bibliografía	103

Agradecimientos

A mi familia, en especial a mi madre, Julieta Olmos Romero, y a mi padre, Alfonso Soto Soria (q. e. p. d.), ya que su insistencia constante es lo que nos hace a mis hermanos y a mí superarnos continuamente.

Al Dr. Juan Hernández Cordero, por su ayuda y apoyo durante estos dos años, que resultaron invaluable para el desarrollo de esta tesis.

A mis profesores de Maestría, en especial a Pablo Pérez Alcázar, a Pedro Acevedo Contla y a Luis Arturo Haro Ruiz.

Al Centro UNAMems por facilitar la utilización del equipo y las instalaciones que fueron necesarias para la caracterización de los dispositivos fabricados.

A mis compañeros del Laboratorio de Sensores de Fibra Óptica y Fibras Ópticas Láser del Instituto de Investigación en Materiales, UNAM, por su valiosa ayuda para la parte óptica de este trabajo.

A mis compañeros y a los profesores del Laboratorio de Biofísica de la Facultad de Ciencias, UNAM, donde se fabricaron los dispositivos poliméricos utilizados en este trabajo. Agradezco en especial el apoyo de la Dra. Hortensia González Gómez y de mis compañeros Sergio Juárez y Arturo Macías.

Agradezco también la beca que me fue otorgada por la Coordinación de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Finalmente, agradezco a mi tutora Laura Oropeza Ramos, ya que sin su motivación y ayuda esta tesis no existiría.

Resumen

Inducción de rejillas de periodo largo en fibras ópticas mediante la aplicación de dispositivos MEMS de polímero

En este trabajo de tesis de maestría se demuestra cómo una microestructura polimérica de bajo costo induce una rejilla de fibra de periodo largo. Las rejillas de fibra de periodo largo se pueden inducir en una fibra óptica adelgazada al poner en contacto a una micro-rejilla de periodo constante con la zona adelgazada de la fibra. El dispositivo que contiene a la micro-rejilla se fabrica utilizando polidimetilsiloxano (PDMS), que es un polímero transparente, no-tóxico, de bajo costo, empleado ampliamente en microfluidica, en electrónica orgánica y también en aplicaciones biotecnológicas. La fabricación de dispositivos de PDMS se vuelve sencilla y de muy bajo costo al utilizar la técnica de litografía suave junto con moldes de poliestireno termoplástico. Los dispositivos de PDMS presentan además la ventaja de que su fabricación no requiere de micromaquinado de precisión, además, la resolución de las microestructuras está limitada únicamente por la resolución de la impresora láser que se utilice para crear los patrones sobre las láminas de poliestireno.

Tanto la fibra óptica adelgazada como las micro-rejillas fueron caracterizadas utilizando microscopía óptica e interferometría de luz blanca, respectivamente, para determinar sus dimensiones. Se observaron las variaciones en el espectro óptico ocasionadas por cambios en la presión aplicada y en la temperatura, y sus magnitudes fueron similares a las que se observan cuando se utilizan microestructuras metálicas. De esta manera se pueden producir rejillas de fibra de periodo largo, de forma económica y rápida, utilizando el polímero PDMS junto con fibras ópticas adelgazadas. Estos dispositivos poliméricos pueden ser integrados en sistemas microfluidicos y del tipo “Lab-on-a-Chip”, donde la biocompatibilidad tiene gran importancia.

Resumen en inglés (*Abstract*)

In this thesis, a low-cost long-period fiber grating (LPFG) induced by a polymeric microstructure is demonstrated. LPFGs are induced on a tapered optical fiber (TOF) when a periodic micro-grating comes into contact with the tapered region of the fiber. The micro-grating device is made using polydimethylsiloxane (PDMS), an inexpensive, nontoxic and optically transparent polymer that is extensively used in microfluidics, organic electronics and biotechnological applications. Soft lithography, along with molds built from thermoplastic polystyrene sheets, makes the fabrication straightforward and extremely low-cost. Additionally, no precision machining is necessary and the resolution of the microstructures is limited only by the resolution of the laser printer used for patterning the polystyrene sheets.

The TOF and the micro-grating were dimensionally characterized using optical microscopy and white light interferometry, respectively. Variations on the optical spectrum due to pressure and temperature were observed and their magnitudes were similar to those obtained using metallic microstructures. Thus, LPFGs can be made in an inexpensive and expeditious way using PDMS and TOFs. These polymeric devices can be integrated into microfluidic and other lab- on-a-chip systems where biocompatibility is a valuable characteristic.

1. Introducción

El presente trabajo de tesis de maestría trata sobre las *rejillas de fibra de periodo largo* (RFPL). Las rejillas de fibra óptica son dispositivos que permiten controlar las propiedades de la luz que se propaga dentro de la fibra. Una RFPL consiste en una perturbación periódica en las propiedades de la fibra óptica, en especial en el índice de refracción del núcleo de la fibra, lo cual hace que se generen bandas de atenuación en el espectro óptico (Figura 1) [1]. Las rejillas de fibra se pueden clasificar, de acuerdo con el periodo de las perturbaciones de la fibra, en dos tipos diferentes: rejillas de periodo largo y rejillas de Bragg, o de periodo corto. Las rejillas de periodo largo producen acoplamiento entre los *modos* que se propagan por la fibra óptica, como se detalla en la siguiente sección.

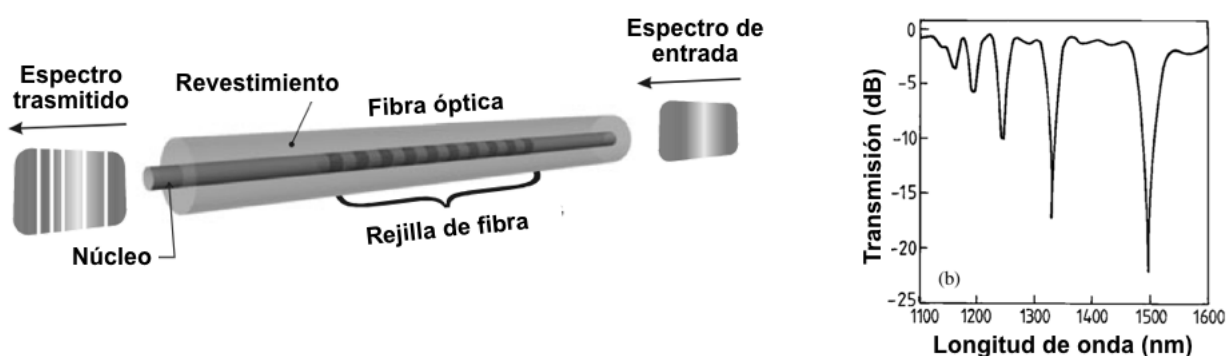


Figura 1: Las rejillas de fibra consisten en una variación periódica en el núcleo de la fibra óptica. Esta variación produce picos de atenuación en el espectro de transmisión de la luz que atraviesa la rejilla (ilustración adaptada de [1]).

1.1. Propagación de la luz en forma de modos

El concepto de propagación en forma de modos parte de la ecuación característica de la fibra óptica, que proporciona las condiciones que debe de cumplir la *constante de propagación* β de la luz que viaja por la fibra. Esta ecuación característica tiene soluciones múltiples que proporcionan constantes de propagación β_m , $m=1,2,\dots$, donde cada solución representa un modo [2].

Por lo tanto, la luz se propaga en una fibra óptica en forma de modos, en un campo óptico cuya amplitud compleja es generalmente una superposición de estos modos. Las amplitudes de los diferentes modos dependen de la fuente de luz que se utilice para excitar a la fibra óptica. Si la fuente tiene una distribución que corresponde exactamente a la de un modo específico, entonces únicamente ese modo será excitado. Todo esto significa que la luz que proporciona la fuente se puede transmitir a través de la fibra en uno, en dos o en muchos modos y el número máximo de ellos depende tanto del tipo de fuente como del diámetro de la fibra óptica [2]. Antes de detallar la manera en que los modos se acoplan entre sí se tratará el tema de la *reflexión de Bragg*.

1.2. Reflexión de Bragg

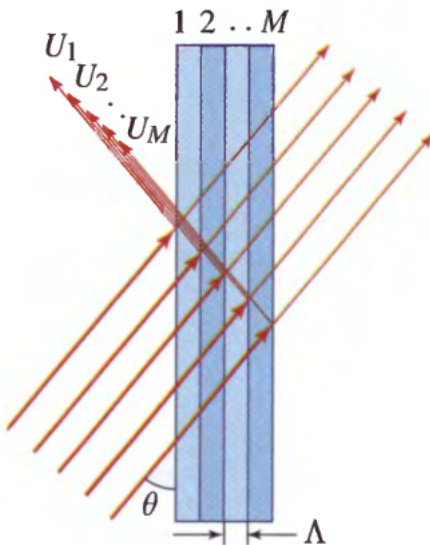


Figura 2: Reflexión de una onda plana en M planos paralelos separados entre sí por una distancia Λ . Las ondas reflejadas se interfieren en forma constructiva y producen una intensidad máxima cuando el ángulo θ es el ángulo de Bragg (ilustración adaptada de [2]).

La reflexión de Bragg se puede explicar mediante un grupo de espejos planos paralelos que tienen entre sí una distancia de separación constante Λ (Figura 2). Las ondas reflejadas experimentarán interferencia constructiva cuando el ángulo de incidencia θ sea igual al

ángulo de Bragg, como se define a continuación:

$$\text{sen } \theta = \frac{\lambda}{2\Lambda} \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda de la luz incidente. Para este modelo simplificado se asumen dos condiciones, la primera es que los espejos reflejan muy poca de la luz incidente, por lo que el haz de luz no se atenúa en forma considerable conforme la luz se propaga. La segunda condición consiste en que se pueden despreciar los efectos que producen las nuevas reflexiones que ocurren cuando las ondas reflejadas vuelven a atravesar el medio. Bajo estas condiciones, la reflectancia \mathcal{R}_N de una rejilla compuesta por un número N de espejos se relaciona con la reflectancia \mathcal{R} de uno solo de los espejos mediante la relación

$$\mathcal{R}_N = \frac{\text{sen}^2 N\varphi}{\text{sen}^2 \varphi} \mathcal{R} \quad (2)$$

donde el factor $\text{sen}^2 N\varphi / \text{sen}^2 \varphi$ representa la intensidad de la suma de N fasores de amplitud unitaria y diferencia de fase 2φ . Esta función tendrá un valor máximo de N^2 cuando se satisface la condición de Bragg, es decir, cuando 2φ sea igual a $q2\pi$, donde $q = 0, 1, 2, \dots$ [2].

Para una rejilla de Bragg, compuesta por espejos parcialmente reflejantes separados entre sí por una distancia Λ , se tendrá que la fase $2\varphi = 2k\Lambda \cos \theta$, donde θ es el ángulo de incidencia y k es el *número de onda*. Por lo tanto, la reflexión máxima ocurre cuando $2k\Lambda \cos \theta = 2q\pi$, o sea

$$\cos \theta = q \frac{\lambda}{2\Lambda} = q \frac{\nu_B}{\nu}, \quad (3)$$

donde

$$\nu_B = \frac{c}{2\Lambda} \quad (4)$$

Para esta ecuación c es la velocidad de la luz en el vacío y ν_B es la frecuencia de Bragg [2].

Para un ángulo de incidencia normal ($\theta = 0^\circ$), como es el caso de las fibras ópticas, la reflectancia máxima ocurre para frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia de Bragg [2]. Esto significa que una rejilla de Bragg actúa como un espejo que refleja la luz que viaja por la fibra, pero únicamente para longitudes de onda discretas. Para estas longitudes de onda se observarán picos en el espectro óptico de la luz que es reflejada y que viaja de regreso

por la fibra. En cambio para estas mismas longitudes de onda aparecerán picos de atenuación para el espectro de transmisión de la fibra óptica. Este fenómeno se puede interpretar como un acoplamiento que ocurre entre el modo β_{01} que se propaga hacia adelante por el núcleo de la fibra y el modo $-\beta_{01}$ que se propaga hacia atrás, también por el núcleo de la fibra.

1.3. Acoplamiento de modos en rejillas de periodo largo

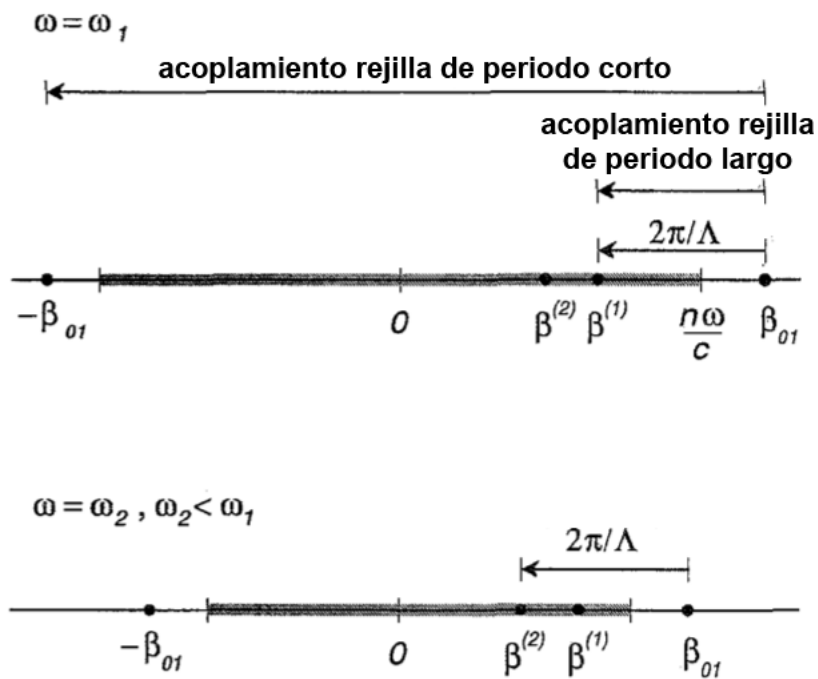


Figura 3: Representación gráfica del acoplamiento de modos para las rejillas de periodo corto y de periodo largo (ilustración adaptada de [3]).

La luz que se propaga dentro de una fibra óptica lo hace en forma de modos, que son un conjunto discreto de campos electromagnéticos. Estos modos se pueden clasificar en dos tipos: modos del núcleo y modos del revestimiento. El núcleo de la fibra permite que sus modos se propaguen casi sin sufrir pérdidas. En cambio, el revestimiento que rodea al núcleo de la fibra presenta pérdidas muy altas, por lo que la energía de la luz que se propaga por los modos del revestimiento se disipa rápidamente y la luz no logra llegar al otro extremo de la

fibra [4].

Cuando el diámetro del núcleo de una fibra óptica es lo suficientemente reducido, solamente se puede propagar un modo a través de él, y a este tipo de fibras se les denomina fibras mono-modales. Considere una fibra mono-modal, que tiene una constante de propagación β_{01} que corresponde al modo fundamental del núcleo de la fibra. Las constantes de propagación de los modos del revestimiento se denotan por $\beta^{(m)}$, donde m denota el orden del modo. Las posiciones relativas de las constantes de propagación se muestran en la parte superior de la Figura 3, para una velocidad angular $\omega = \omega_1$. La región remarcada del eje, que va desde 0 hasta $n\omega/c$ representa la zona donde se encuentran todos los modos que existen en el revestimiento, siendo n el índice de refracción del revestimiento y c la velocidad de la luz en el vacío. En dicha Figura 3 el punto β_{01} representa el modo fundamental que se propaga hacia adelante por el núcleo y el punto $-\beta_{01}$ representa el modo que se propaga hacia atrás por el núcleo. Para que el modo β_{01} se pueda acoplar al modo $-\beta_{01}$ se necesita un vector $\Delta\beta$ largo, que en la figura se representa por la distancia entre el punto β_{01} y el punto $-\beta_{01}$. Como el vector $\Delta\beta$ es largo y teniendo que $\Delta\beta = 2\pi/\Lambda$, el periodo Λ de la rejilla deberá ser entonces corto [3]. Esto es lo que ocurre en el caso de las rejillas de Bragg, donde el periodo Λ es del orden de menos de un micrómetro.

A diferencia de esto, las *rejillas de periodo largo* producen el acoplamiento entre el modo β_{01} que se propaga hacia adelante por el núcleo y los modos $\beta^{(m)}$ del revestimiento, que también se propagan hacia adelante. La condición de acoplamiento está dada por

$$\beta_{01} - \beta^{(m)} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (5)$$

donde Λ es el periodo de la rejilla que se requiere para acoplar el modo fundamental del núcleo β_{01} con el modo del revestimiento $\beta^{(m)}$. Para este caso, el vector $\Delta\beta$ es la distancia entre el punto β_{01} y el punto $\beta^{(m)}$, por lo que ahora $\Delta\beta$ será corto, y el periodo de la rejilla Λ será largo, del orden de cientos de micrómetros [3].

Para una segunda velocidad angular $\omega_2 < \omega_1$, la zona remarcada del eje de la parte inferior de la Figura 3 se hace más corta, y el periodo original Λ , que antes acoplaba el modo fundamental con el primer modo del revestimiento, ahora acoplará el modo fundamental con

el segundo modo del revestimiento. Esta representación gráfica implica que para una misma rejilla de periodo Λ existirán acoplamientos entre el modo fundamental y varios de los modos del revestimiento. Estos acoplamientos se observarán en el espectro de transmisión como *picos de atenuación* que ocurren a longitudes de onda distintas. La representación gráfica de la Figura 3 también indica que para una velocidad angular ω_{corte} mayor a ω_1 el vector $\Delta\beta$ se encontrará al final de la zona donde se encuentran todos los modos del revestimiento. A esta velocidad angular ω_{corte} le corresponde una longitud de onda λ_{corte} , que es la longitud de onda mínima a partir de la cual la rejilla producirá picos de atenuación en el espectro.

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

$$\frac{2\pi(n_{\text{eff},01} - n_{\text{eff},m})}{\lambda} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (6)$$

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 y λ es la longitud de onda en la cual se produce el acoplamiento entre los modos, y por lo tanto la longitud de onda donde aparecerá el pico de atenuación en el espectro de transmisión [5].

1.3.1. Trasferencia máxima de energía de los modos acoplados

La fracción de la potencia inicial del modo fundamental del núcleo β_{01} que se acopla al modo del revestimiento $\beta^{(m)}$ está dada por [3]:

$$\frac{P^{(m)}(L)}{P_{01}(0)} = \frac{\text{sen}^2 \left[\kappa_g L \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\kappa_g} \right)^2} \right]}{1 + \left(\frac{\delta}{\kappa_g} \right)^2} \quad (7)$$

donde δ está dada por:

$$\delta = \frac{1}{2} \left\{ \beta_{01} - \beta^{(m)} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right\} \quad (8)$$

κ_g es la constante de acoplamiento para la rejilla óptica y L es la longitud de la rejilla óptica. La constante de acoplamiento κ_g es proporcional a Δn , que es la diferencia entre el índice de refracción del núcleo y el índice de refracción de las variaciones periódicas que forman la

rejilla óptica. Esta constante κ_g siempre se trata de elevar al máximo para obtener la transferencia máxima de potencia entre el modo del núcleo y los modos del revestimiento, por lo que Δn , y por lo tanto κ_g , se incrementan hasta que se cumple la condición $\kappa_g L = \pi/2$, que es cuando se produce la transferencia máxima de energía [3]. Si Δn se sigue incrementando a partir de este punto, la transferencia de energía comenzará a disminuir, debido a que la función de la Ecuación 7 es del tipo $\text{sen}^2(x)/x^2 = \text{sinc}^2(x)$, donde se alternan los máximos y mínimos conforme se incrementa la variable x . Este fenómeno se ha observado experimentalmente en las rejillas ópticas de periodo largo inducidas por presión [6], donde conforme se aumenta la presión ejercida sobre la fibra, y por lo tanto Δn , la magnitud del pico de atenuación aumenta hasta alcanzar un máximo, y al continuar aumentando la presión a partir de este máximo ahora la magnitud del pico de atenuación disminuye en vez de aumentar.

1.4. Rejillas de fibra de periodo largo (RFLP) utilizadas como sensores

Como se vio anteriormente, las RFPL son similares a las rejillas de Bragg, y su principal aplicación es como filtros de eliminación de bandas, con las ventajas de que presentan pérdidas bajas y además se pueden fabricar dentro de la misma fibra óptica [7]. Entre sus características sobresalientes se encuentra el costo de fabricación, que es menor que el de los dispositivos basados en rejillas de fibra de periodo corto, ya que su periodo de mayores dimensiones hace posible que puedan ser fabricadas utilizando medios externos que no requieren de alta precisión. La respuesta de las RFPL presenta picos de resonancia, por lo que su sensibilidad es mayor que la de otros tipos de sensores de fibra óptica, debido a que estas transiciones abruptas son fáciles de detectar [8]. Las longitudes de onda de las resonancias dependen de la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento, por lo que cualquier variación ocasionada por esfuerzos mecánicos, cambios en la temperatura o en el índice de refracción del medio externo provocarán grandes desplazamientos en las longitudes de onda, por lo que su sensibilidad es alta [9]. Las RFPL presentan características interesantes que las convierten en dispositivos ópticos muy usados en aplicaciones dentro de las áreas de sistemas de telecomunicaciones y también en el área de sensores [1].

Los sensores de fibra óptica presentan ventajas como: inmunidad a la interferencia electromagnética, peso ligero, tamaño pequeño, sensibilidad alta, ancho de banda amplio y facilidad para transmitir su señal [10]. Como este tipo de sensores no requieren de señales eléctricas para realizar sus funciones, pueden ser utilizados en ambientes extremos o con alta influencia de interferencia electromagnética [11].

Los sensores de fibra óptica se pueden dividir en dos tipos: sensores extrínsecos y sensores intrínsecos. Los extrínsecos utilizan a la fibra óptica únicamente para transmitir la información que genera el sensor. Los sensores basados en RFPL son del tipo intrínseco, donde la fibra óptica misma participa en la transducción de la variable externa a la señal óptica que se va a analizar [12]. Una ventaja de los sensores basados en rejillas ópticas es su tamaño compacto, de apenas unos pocos centímetros. Otra de sus ventajas radica en que las rejillas ópticas pueden ser utilizadas en sistemas de sensores distribuidos, donde una misma fibra óptica contiene varios sensores distribuidos a lo largo de su longitud, con lo que es posible monitorear un área mucho mayor utilizando una sola fibra óptica [9].

1.5. RFPL inducidas por micro-rejillas externas

Las ventajas que tienen las RFPL han provocado que se hayan desarrollado varios métodos para fabricarlas. El método más común consiste en utilizar fibras ópticas dopadas con germanio, que son sensibles a la luz ultravioleta [1]. La 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 (Figura 1). Sin embargo, el inconveniente de este método de fabricación es que una vez que se ha creado la rejilla en la fibra ya no es posible cambiar sus características, por lo que su respuesta siempre será la misma. También es posible inducir una RFPL en forma temporal utilizando una microestructura externa. Esta microestructura permite cambiar el periodo de la RFPL en forma dinámica, lo que hace posible la creación de dispositivos ajustables [6]. Además de ajustables, también se pueden *encender* y *apagar* o ser reconfigurados por completo. La utilización de las micro-estructuras externas también produce que la RFPL se vuelva sensible a la polarización

de la onda que viaja por la fibra. Este efecto se puede utilizar en el diseño de dispositivos correctores de polarización, aunque también es posible desarrollar dispositivos insensibles a la polarización mediante alteraciones en el diseño de la micro-estructura que se utilice [13].

Cuando se utilizan microestructuras externas, la forma en que se produce la RFPL consiste en presionar a la fibra utilizando una micro-rejilla. Esta rejilla externa contiene microcanales en su superficie, que al presionar a la fibra óptica le provocan variaciones en el índice de refracción (Figura 4). Estas variaciones periódicas en el núcleo de la fibra son las que producen la RFPL [6].

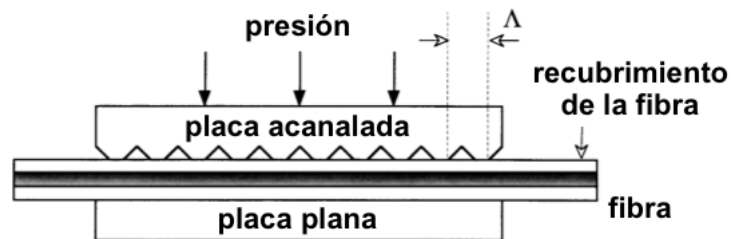


Figura 4: Vista lateral de una RFPL inducida por una micro-rejilla externa (ilustración adaptada de [6]).

1.6. Principio de funcionamiento de las fibras ópticas

Una fibra óptica es una guía de onda con sección transversal circular hecha de un material dieléctrico. La luz es confinada en la fibra óptica debido a la reflexión total interna, lograda mediante la diferencia de los índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento de la guía de onda (Figura 5). El núcleo de la fibra cuenta con un índice de refracción mayor, y si incide con un ángulo lo suficientemente grande, entonces la luz se refleja totalmente en la unión del núcleo con el revestimiento, por lo que nunca abandonará el núcleo [14].

La reflexión total interna en una fibra óptica depende de los índices de refracción del material con que está fabricada. El material con el que están fabricados el núcleo y el revestimiento es el mismo, pero el núcleo recibe un tratamiento que hace que su índice de

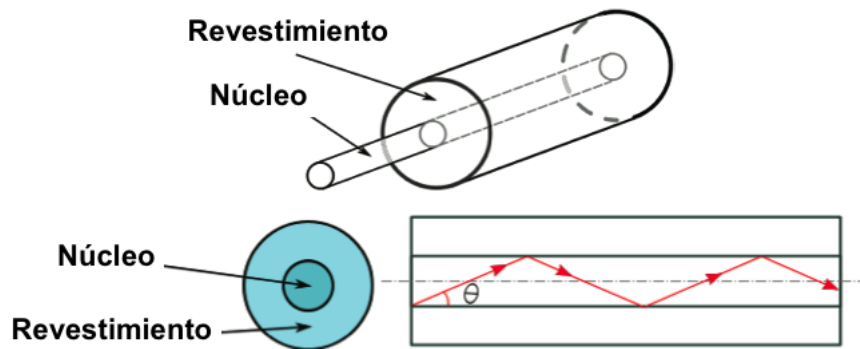


Figura 5: Una fibra óptica consiste de un núcleo y un revestimiento concéntricos. La luz que entra en el núcleo será totalmente reflejada por el revestimiento si el ángulo de incidencia es mayor al ángulo crítico (ilustración adaptada de [14]).

refracción aumente. Esta condición es suficiente para que se presente la refracción total interna para determinadas longitudes de onda. El haz de luz que entra por uno de los extremos de la fibra es confinado y se refleja tal como aparece en la Figura 6d [14].

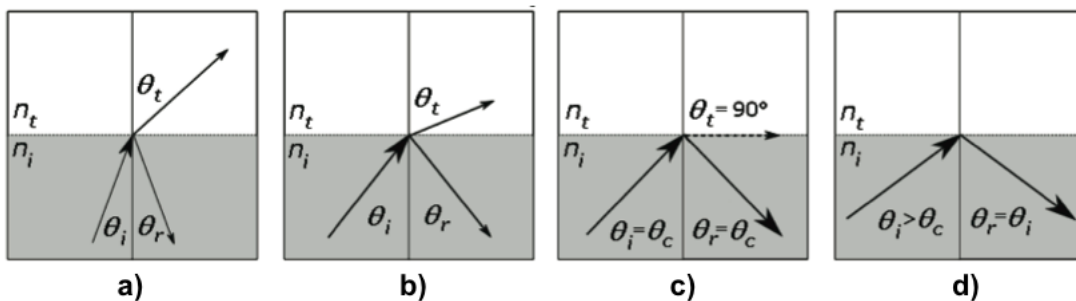


Figura 6: La reflexión total interna ocurre en la interfase entre el medio de índice de refracción mayor n_i con el medio de índice de refracción menor n_t . a) Al incidir el haz se transmite parte de la luz y otra parte de la luz se refleja. b) y c) Al aumentar el ángulo θ_i , el ángulo θ_t también aumenta, y cuando θ_i es igual al ángulo crítico θ_c , el ángulo de transmisión será igual a 90° . d) Con ángulos de incidencia mayores a θ_c , la luz será totalmente reflejada (ilustración adaptada de [14]).

Como se observa en la (Figura 6), el ángulo de reflexión de la luz va aumentando conforme aumenta el ángulo de incidencia, hasta llegar a sobrepasar un ángulo conocido como

ángulo crítico θ_c . Cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo crítico, el haz transmitido se refleja a 90° de la normal al eje de la fibra. Al sobrepasar el ángulo crítico todo el haz de luz es reflejado en la unión entre los dos medios [14].

1.6.1. Fibras ópticas adelgazadas

Cuando la luz incidente es totalmente reflejada en el interior de la fibra, su intensidad no decae abruptamente a cero en la interfase. Una pequeña porción de la luz penetra en el medio reflejante una distancia de una fracción de longitud de onda, o sea, lo suficientemente lejos para detectar que el índice de refracción es diferente al del núcleo de la fibra. Este campo electromagnético, llamado *onda evanescente*, tiene una intensidad que decae en forma exponencial con la distancia, comenzando en la interfase y extendiéndose dentro del medio de índice de refracción menor [15].

Para exponer la *onda evanescente* al medio externo se pueden utilizar fibras adelgazadas. El funcionamiento de estas fibras adelgazadas se basa en el hecho de que el revestimiento de la fibra aísla al núcleo de los efectos que pudiera provocar el medio ambiente. Este aislamiento es deseable para muchas aplicaciones, pero para otras se desea que el medio externo tenga alguna interacción con la luz que viaja por la fibra óptica. Mediante la utilización de fibras ópticas adelgazadas el revestimiento se reduce y hasta se elimina totalmente, con lo que el haz de luz que se propaga por la fibra es mucho más sensible al medio externo en que se encuentra la fibra óptica.

La alta sensibilidad al medio externo de las fibras adelgazadas ha servido como base para fabricar amplificadores ópticos basados en fibras, los cuales pueden ser re-ajustados al cambiar la temperatura del medio externo en que se encuentra la parte adelgazada de la fibra. Para el medio externo se han utilizado líquidos ópticos marca *Cargille* [16] y también recubrimientos poliméricos [17]. El medio externo de la fibra adelgazada que se utilizará para este trabajo contiene a la micro-rejilla de PDMS que produce la *rejilla de fibra de periodo largo* (RFPL), tal como se muestra en la Figura 7. La utilización de fibras ópticas adelgazadas hace que el campo electromagnético del modo que se propaga por la fibra se extienda

fuera de ella, con lo que la luz tendrá las interacciones con las microestructuras externas que producirán la RFPL [18].

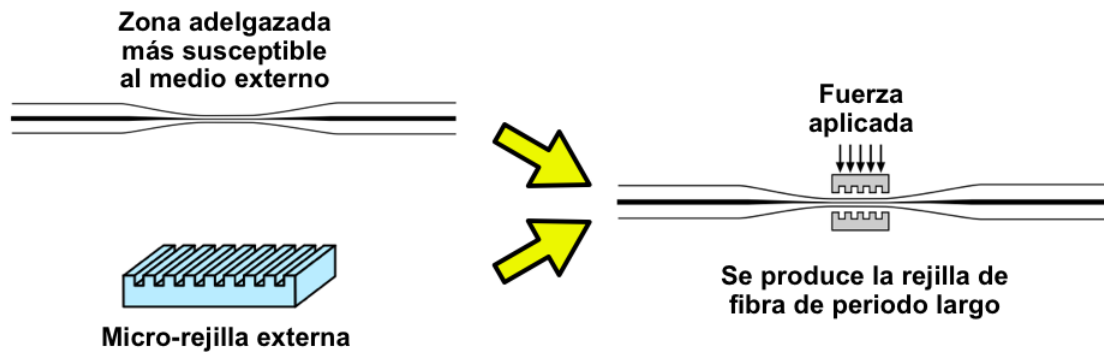


Figura 7: Esquema que representa la utilización de una fibra óptica adelgazada, cuya mayor sensibilidad al medio externo facilita que la micro-rejilla externa produzca la rejilla de fibra de periodo largo.

Para el adelgazamiento de las fibras ópticas se pueden utilizar métodos químicos, como la eliminación selectiva del revestimiento mediante ácido fluorhídrico [19]. Otro método produce el adelgazamiento al calentar la fibra, como es el caso de la *estación de trabajo* marca Dowson que se utilizó para este trabajo. Esta estación de trabajo se utiliza normalmente para fabricar acopladores de fibra óptica, por lo que parte de este trabajo de tesis consistió en investigar la forma de utilizar esta máquina para fabricar fibras ópticas adelgazadas. Para esto se requirió determinar los parámetros de operación para controlar en forma precisa el diámetro y la longitud de la zona adelgazada de la fibra óptica que se utilizará para generar la RFPL.

Para inducir las RFPL en fibras ópticas se han utilizado micro-rejillas de materiales metálicos como el aluminio [5] o el acero inoxidable [6]. Estos dispositivos metálicos son costosos, pues su fabricación requiere de equipo y personal especializados. Para solucionar el problema del alto costo de las micro-rejillas metálicas se buscó una alternativa en las técnicas de fabricación que se utilizan para fabricar dispositivos MEMS poliméricos.

1.7. Fabricación de dispositivos MEMS poliméricos

Los microsistemas electromecánicos (MEMS: *Micro-electro-mechanical systems*) son dispositivos que se fabrican utilizando técnicas de micro-fabricación similares a las que se utilizan para crear circuitos integrados. Los MEMS normalmente tienen partes móviles que permiten la realización de funciones físicas o analíticas, además de las funciones eléctricas. Para la fabricación de dispositivos MEMS los materiales más utilizados tradicionalmente son el silicio y el vidrio [20]. La micro-fabricación de estructuras basadas en silicio requiere de ciclos de fotolitografía, grabado químico o con plasma y depósito de películas delgadas de materiales semiconductores, aislantes, metálicos y resinas fotosensibles, con el fin de crear estructuras como conductores eléctricos, conexiones entre capas, reservorios, válvulas, membranas, etc. [21]. Estos procesos se realizan en laboratorios especializados tipo cuarto limpio con equipos de procesamiento de altos costos de inversión (del orden de millones de dólares) y de mantenimiento [22].

Sin embargo, algunas aplicaciones de los MEMS requieren de otro tipo de materiales, como son los polímeros. Los polímeros cuentan entre sus ventajas el que pueden ser fabricados en grandes volúmenes y que pueden ser duros o también blandos como el hule y se fabrican comúnmente utilizando la técnica conocida como *litografía suave* [20].

La fotolitografía o litografía óptica es probablemente la tecnología más utilizada para la creación de micro-estructuras. Tiene sus orígenes en la microelectrónica, donde se le utiliza para la fabricación de circuitos integrados [23]. En la litografía óptica se crean patrones en una película fotosensible al exponerla a la luz ultravioleta, para poder generar una máscara que se utilizará en los pasos de fabricación siguientes. La película fotosensible transfiere sus patrones a las capas inferiores mediante diversos métodos, como pueden ser el crecimiento selectivo de material en las zonas del sustrato que no fueron enmascaradas o el grabado químico o por plasma para eliminar el material que no es protegido por la máscara [24].

La fotolitografía y los mecanismos de depósito y abrasión para el desarrollo de circuitos integrados y MEMS tradicionales sobre sustratos de silicio son métodos ampliamente desarrollados y muy utilizados, sin embargo, cuentan con desventajas como es la alta inversión

de capital que requieren [23].

1.7.1. Litografía suave

Las técnicas de fabricación por litografía suave requieren de poca inversión de capital, procedimientos sencillos, y permiten desarrollar nuevos tipos de dispositivos que serían difíciles de fabricar por fotolitografía. Para la fabricación de micro-estructuras, los polímeros más utilizados son el policarbonato, el poliuretano, el polimetilmetacrilato (PMMA), el poliestireno y en especial el elastómero denominado polidimetilsiloxano (PDMS) [25]. Los elastómeros son polímeros elásticos, de los cuales el PDMS es el más utilizado en la litografía suave. También es conocido como *Sylgard 184*, que es el nombre comercial utilizado por la empresa Dow Corning. Entre las características del PDMS se encuentran la baja permeabilidad al agua y la baja conductividad eléctrica [26]; y además tiene la ventaja de que sus propiedades sufren muy poca variación con el transcurso del tiempo [27]. El PDMS es muy utilizado para fabricar sellos y moldes debido a las características siguientes [23]:

- Es un elastómero que toma la forma de la superficie del sustrato sobre un área relativamente grande.
- Los polímeros que se moldean sobre PDMS no se adhieren en forma permanente ni reaccionan con su superficie.
- Es homogéneo, isotrópico y presenta transparencia óptica hasta 300 nm.
- Es durable.
- Las características de su superficie pueden ser modificadas por tratamiento con plasma seguido de formación de *monocapas autoensambladas*.

Para la fabricación de sellos y moldes, el PDMS también presenta limitaciones:

- La gravedad, la adhesión y las fuerzas capilares ejercen tensión en las microestructuras provocando que colapsen y además generan defectos en los patrones formados.

- Estas interacciones también producen hundimientos cuando las relaciones de aspecto son demasiado bajas, por lo que no se puede utilizar la litografía suave para patrones que presentan grandes separaciones entre las estructuras.
- En general las relaciones de aspecto deberán encontrarse dentro del rango de 0.2 a 2 para evitar defectos en los moldes y en los sellos.
- El PDMS encoge alrededor de 1 % durante el curado.

1.7.2. Técnicas de micro-moldeo

Existen diversas técnicas de micro-moldeo que utilizan el PDMS [23]:

Moldeo de micro-transferencia (μ TM: *micro-transfer molding*)

En esta técnica se le aplica al molde de PDMS una gota del pre-polímero líquido, y se quita el exceso al pasar un bloque de PDMS. El molde se coloca luego en contacto con el sustrato y se eleva la temperatura para acelerar la solidificación del pre-polímero. Luego de que el polímero curado se ha solidificado, el molde se desprende con cuidado dejando la microestructura en la superficie del sustrato. Esta técnica se ha utilizado para fabricar guías de onda óptica, acopladores e interferómetros basados en polímeros orgánicos.

Micro-moldeo por capilaridad (MIMIC: *micromolding in capillaries*)

Esta técnica permite formar micro-estructuras en superficies planas y curvas. El procedimiento consiste en colocar un pre-polímero líquido de viscosidad baja en el extremo abierto de una red de canales para que el líquido llene los canales en forma espontánea por capilaridad. Este procedimiento permite utilizar un rango de materiales mayor que la fotolitografía y, también, la creación de estructuras con alturas diferentes. Con esta técnica se han fabricado dispositivos electrónicos como FET, MOSFET y diodos Schottky, aunque el tamaño de los dispositivos es 100 veces mayor que los que produce la fotolitografía.

Micro-moldeo asistido por solventes (SAMIM: *solvent-assisted micromolding*)

Esta técnica permite la creación de micro-estructuras tridimensionales en sustratos poliméricos. El procedimiento consiste en impregnar el molde de PDMS con un solvente y luego se pone en contacto el molde con el sustrato. El solvente disuelve una capa delgada del polímero del sustrato, y el fluido resultante toma la forma de las estructuras del molde de PDMS. Al evaporarse el solvente el polímero se solidifica y se puede desprender el sustrato del molde. Esta técnica tiene la ventaja de que se pueden añadir tintes y sales inorgánicas al solvente, que serán incorporadas a las micro-estructuras resultantes.

1.7.3. Moldeo de réplicas

El moldeo de réplicas se utiliza para duplicar la estructura del molde utilizado y tiene la ventaja de que permite utilizar una gama de materiales más amplia que en la fotolitografía. El moldeo de réplicas también permite duplicar estructuras tridimensionales de un solo paso, en vez de necesitar del conjunto de pasos requerido en la fotolitografía. Otra ventaja consiste en que la resolución es mayor que la de la fotolitografía, ya que teóricamente es posible fabricar estructuras nanométricas. Sin embargo existen ciertos factores que limitan la resolución, como son las interacciones de Van Der Waals, la mojabilidad (*wetting*) y los factores cinéticos durante el llenado del molde. A pesar de estas limitantes se han podido fabricar dispositivos con resolución mayor a los 100 nm que permite la fotolitografía [23].

Además de las ventajas expuestas anteriormente, el moldeo de réplicas también permite utilizar técnicas novedosas, como la creación de réplicas utilizando moldes deformados. Los moldes se deforman mediante la aplicación de fuerzas, lo que permite la creación de estructuras de topología compleja, debido a que las estructuras que contiene el molde pueden ser modificadas en forma precisa y controlada. Utilizando este método se han creado rejillas de difracción, estructuras en la superficie de objetos esféricos, y arreglos de micro-lentes [23].

El moldeo de réplicas consiste en una secuencia de pasos, como se observa en la Figura 8. El primer paso consiste en preparar la mezcla del pre-polímero con el agente curante, y

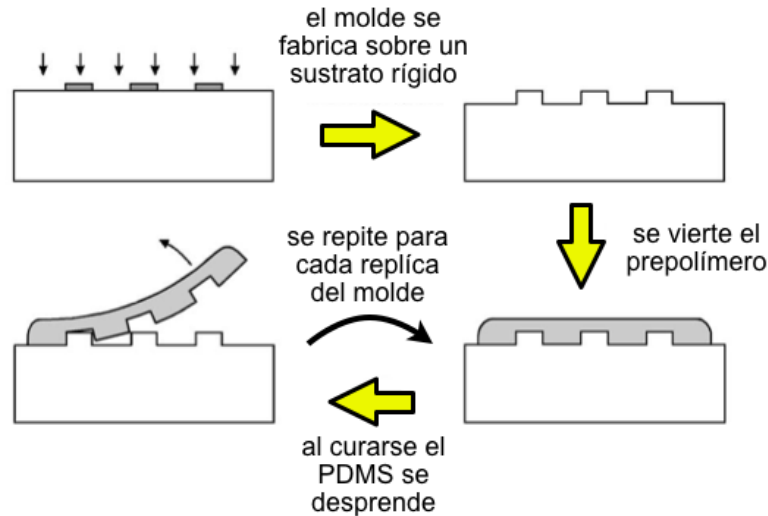


Figura 8: La fabricación por moldeo de réplicas consiste en depositar el pre-polímero sobre el molde, y una vez que ha solidificado, el polímero se desprende para quedar con las microestructuras grabadas en su superficie (ilustración adaptada de [20]).

luego se vierte la mezcla sobre el molde que contiene a las microestructuras. El segundo paso consiste en el curado del polímero, que se puede acelerar al elevar la temperatura. Finalmente, una vez que ha solidificado, el polímero se desprende del molde [28].

1.7.4. Ventajas y desventajas de la litografía suave

Los métodos de fabricación por litografía suave presentan ventajas importantes, entre las que se encuentran las siguientes:

- Se pueden fabricar estructuras menores a 100 nm.
- Se pueden crear patrones en superficies que no son planas.
- Es posible crear estructuras tridimensionales en un solo paso, en vez de tener que trabajar capa por capa como con los dispositivos de silicio o de vidrio.
- Se puede experimentar con otros materiales además de la resina fotosensible para crear las microestructuras.

- Los moldes se pueden deformar al aplicar una fuerza sobre ellos en forma controlada, con la finalidad de modificar la forma de sus réplicas.
- Los patrones con estructuras mayores a $1 \mu\text{m}$ no requieren de un cuarto limpio para su fabricación.

Las técnicas de litografía suave también presentan algunas desventajas, como pueden ser:

- Es teóricamente posible alcanzar resoluciones de 20 nm, debido a que no existe la limitante de la difracción de la luz, sin embargo otros factores han impedido alcanzar esta resolución máxima.
- Se debe tomar en cuenta la distorsión y deformación que sufren los materiales elastoméricos.
- Todavía hace falta mejorar la reproducción exacta de los patrones transferidos, así como la calidad de las micro-estructuras, especialmente las líneas delgadas. Esto hace que la litografía suave no se pueda utilizar en la fabricación de dispositivos microelectrónicos complejos.

Debido a estas características, la litografía suave se puede aplicar en general donde no se requieran altos niveles de alineamiento, continuidad, aislamiento y uniformidad, como puede ser en arreglos de micro-electrodos, sensores, biosensores y sistemas de micro-análisis. También es posible fabricar otros sistemas simples como componentes ópticos, dispositivos de despliegue (*displays*) y dispositivos microelectrónicos elementales [23].

1.8. Fabricación de moldes

En este trabajo se utilizó la litografía suave, en su modalidad de *moldeo de réplicas*, para fabricar las microestructuras. Aunque este método es más económico y mucho más rápido que los métodos convencionales de micro-fabricación, también presenta inconvenientes, siendo el más importante que se requiere fabricar los moldes mediante fotolitografía. Como

se observa en la Figura 9, la fotolitografía consiste en depositar una capa de fotoresina sobre el sustrato, que normalmente se trata de una oblea de silicio. Sobre la fotoresina se proyecta la luz ultravioleta a través de una máscara que contiene el patron a grabar. Las zonas de la fotoresina que no estaban protegidas por la máscara se eliminan durante el proceso de revelado, lo que produce las micro-estructuras de fotoresina sobre el sustrato. La fotolitografía es una tecnología comprobada con la que se pueden elaborar los moldes para la litografía suave, pero su inconveniente radica en que se requiere realizar la fabricación dentro de un cuarto limpio, y muchos laboratorios de investigación no cuentan con acceso a uno.

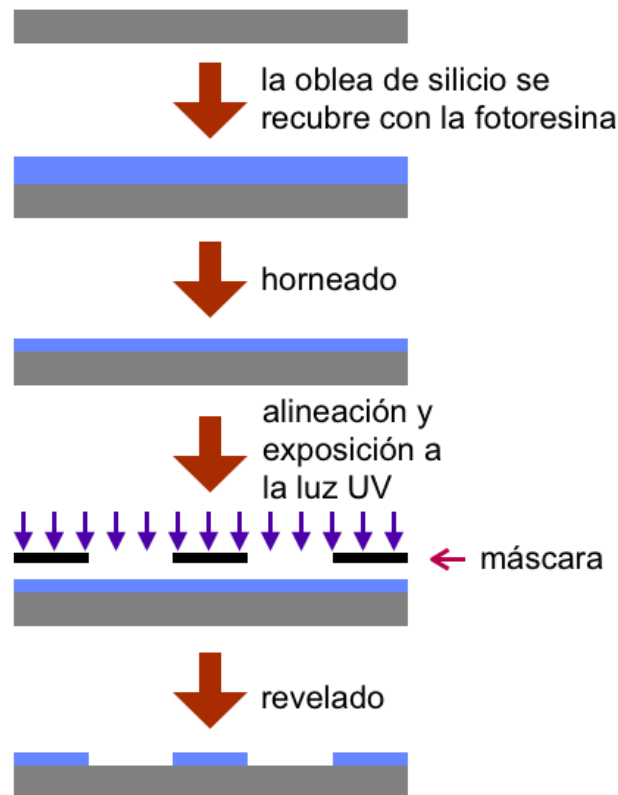


Figura 9: Diagrama lateral que muestra los pasos para la fabricación de moldes por litografía suave. Se deposita una capa de fotoresina sobre el sustrato, que luego se endurece durante el horneado. Las micro-estructuras se forman en la fotoresina cuando se eliminan de ésta las zonas que no estuvieron protegidas por la máscara durante el proceso de revelado.

Para solucionar este problema se han desarrollado nuevas variedades de métodos de fa-

bricación de moldes para mejorar a la litografía suave. Estos métodos pueden dividirse en dos categorías, los métodos que utilizan fotolitografía y los que no la utilizan. Entre los ejemplos de la primera categoría se encuentran las películas de fotoresina y la utilización de tarjetas de circuitos impresos para la fabricación de moldes. Como ejemplo de la segunda categoría se encuentra la impresión de patrones micrométricos utilizando *toner* o cera. Estos patrones se utilizan luego en forma directa o indirecta para la fabricación de moldes [29].

Las microestructuras de *toner* se han producido utilizando una fotocopidora para imprimir los moldes sobre acetatos. Este método tiene el inconveniente de que la profundidad de los micro-canales no será mayor a 15 μm , ya que este es el grosor de la capa de *toner* que la fotocopidora es capaz de depositar sobre el acetato [30]. Para alcanzar una mayor profundidad en los canales para el presente trabajo se utilizaron moldes de poliestireno termoplástico.

Los moldes de poliestireno termoplástico se elaboran a partir de láminas tamaño carta que se comercializan con el nombre de “Shrinky-Dinks” [31]. Para la creación de este tipo de moldes, primero se imprime el diseño con las microestructuras en una lámina de poliestireno utilizando una impresora láser. La lámina así impresa se calienta luego en un horno convencional. Dentro del horno, la lámina de poliestireno reduce su tamaño a un tercio del tamaño original en forma permanente. Esta reducción aumenta la resolución del diseño que fue impreso en la lámina, al tiempo que la altura del diseño aumenta en un 500 %, lo cual es muy ventajoso para la creación de microestructuras. Las microestructuras que se generen en el molde de poliestireno se transferirán fielmente a los dispositivos de PDMS que se fabriquen a partir del molde [28].

Los moldes de poliestireno no requieren de un cuarto limpio para su fabricación, como es el caso de los moldes hechos a base de obleas de silicio con microestructuras de fotoresina SU-8. Otra de sus ventajas es que su fabricación no requiere de equipo costoso ni de personal altamente capacitado, como es el caso de los moldes basados en placas metálicas (Figura 10). Por lo tanto, la fabricación de dispositivos de polímero PDMS a partir de moldes de poliestireno termoplástico es un método muy económico para la fabricación de microestructuras, y es un método que se puede utilizar en cualquier laboratorio que cuente con el equipamiento

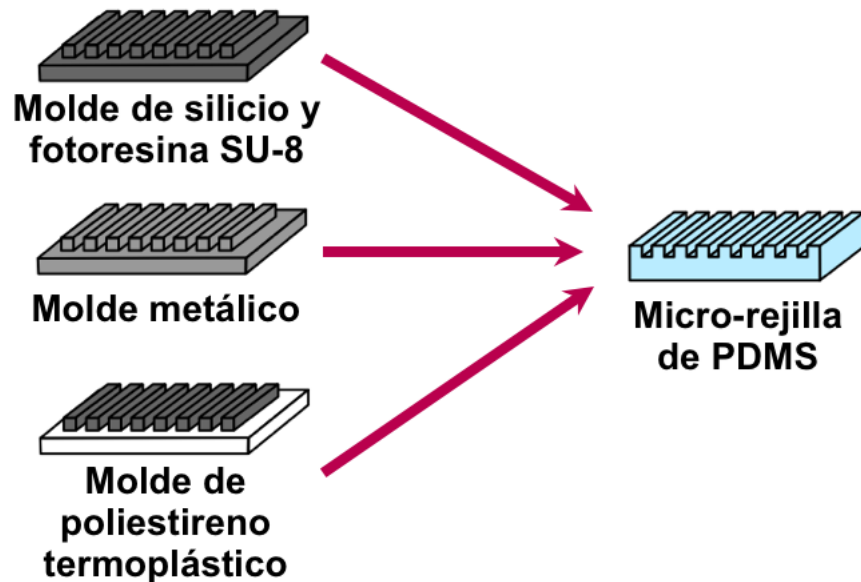


Figura 10: La micro-rejilla de PDMS requiere de un molde para su fabricación. Se eligieron los moldes de poliestireno termoplástico, debido a su bajo costo y que su fabricación es sencilla, rápida y no requiere de equipo especializado.

básico.

1.9. Aplicaciones médicas y biotecnológicas del polidimetilsiloxano (PDMS)

La utilización de moldes de poliestireno termoplástico hace que la fabricación de los dispositivos de PDMS se vuelva sencilla, rápida y económica, y en el grupo de trabajo del Centro UNAMems se tiene ya experiencia en el método [32]. Esto es importante ya que el PDMS es un material ampliamente utilizado en microfluidica, que es una disciplina de gran relevancia para químicos y biólogos que no cuentan con la posibilidad de fabricar moldes metálicos o de silicio. Los dispositivos basados en microfluidos cuentan con ventajas sobre los dispositivos convencionales, como son su tamaño reducido para mayor portabilidad, la reducción en la cantidad de reactivos utilizados y el menor tiempo que requieren los análisis [26]. Los dispositivos microfluidicos que se han fabricado se han aplicado en áreas como el análisis bioquímico automatizado (aplicaciones denominadas *Lab-on-a-Chip*), la detección

de sustancias químicas [33] y tienen el potencial para influir en distintas áreas que van desde la síntesis química y el análisis biológico hasta la óptica y las tecnologías de la información [34].

La óptica y la microfluidica se unen en una disciplina llamada optofluidica, que pretende fundamentalmente el manipular fluidos y luz a escalas microscópicas para aplicar sus interacciones en la fabricación de dispositivos altamente versátiles. Como ejemplos de estos dispositivos se encuentran lentes ópticas adaptables y microscopios optofluidicos. Las aplicaciones potenciales se pueden agrupar en dos categorías. En la primer categoría se utilizan microfluidos para transportar a las sustancias que se analizan mediante dispositivos microfotónicos. En la segunda categoría los microfluidos se utilizan para controlar a los dispositivos microfotónicos, haciéndolos adaptables y reconfigurables [35]. Ejemplos de estos dispositivos son filtros ópticos y de control de ganancia que se controlan utilizando actuadores microfluidicos del tipo *electrowetting* [36].

La fabricación de sistemas de microfluidos basados en PDMS ha permitido la creación de dispositivos tales como mezcladores, interruptores, válvulas neumáticas, filtros magnéticos, membranas funcionalizadas y componentes ópticos [26]. El PDMS cuenta con transparencia óptica para la luz visible y la luz ultravioleta, lo que ha permitido su utilización para la creación de guías de onda, rejillas ópticas [37], espejos [38] y lentes [39].

Para las aplicaciones de microfluidos es importante la biocompatibilidad, pues permite realizar aplicaciones donde intervienen células y otros organismos, además de que la biocompatibilidad del PDMS [40] también hace posible la fabricación de dispositivos que pueden ser implantados dentro de seres vivos. Para estas aplicaciones biomédicas, el PDMS cuenta con otra ventaja importante que es el hecho de que su bajo costo permite la fabricación de dispositivos desechables. Para aplicaciones biomédicas también resulta muy ventajosa la transparencia óptica del PDMS, ya que los dispositivos fabricados con él pueden utilizarse para muchos tipos diferentes de espectroscopía, como pueden ser por absorción, fluorescencia, fosforescencia, Raman, SERS, refracción, espectrometría por dispersión, etc. [41].

Estas ventajas de biocompatibilidad, la posibilidad de fabricar dispositivos desechables

y de fabricar dispositivos ópticos, hacen que una rejilla óptica basada en PDMS tenga la posibilidad de ser integrada dentro de sistemas ópticos y biomédicos complejos basados en PDMS.

1.10. Planteamiento del problema

En la Figura 11 se presentan algunos de los puntos sobresalientes de la investigación bibliográfica. En esta figura se observa que los sensores basados en RFPL cuentan con ventajas importantes con respecto a los sensores electromecánicos. Este tipo de sensores se pueden fabricar utilizando micro-rejillas externas de distintos materiales, entre los que resalta el polímero PDMS debido a sus ventajas como bajo costo, transparencia, biocompatibilidad y fabricación por medio de litografía suave.

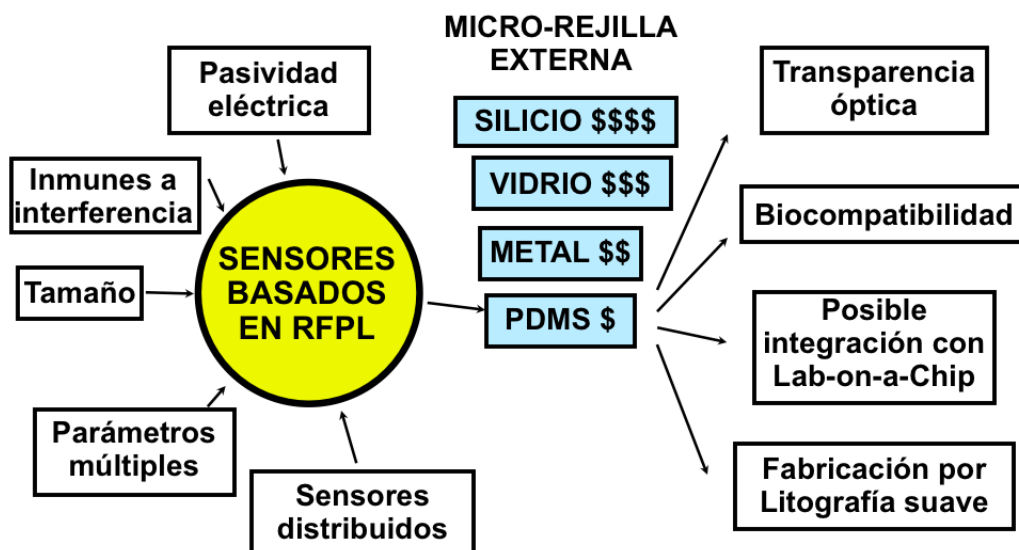


Figura 11: Los sensores basados en las rejillas de fibra de periodo largo (RFPL) presentan un número de ventajas que aumenta al utilizar una micro-rejilla externa de polímero PDMS.

La investigación bibliográfica permitió obtener ideas y conceptos para sustentar la hipótesis de este trabajo de tesis. La primer idea que surge es que la fabricación de las micro-rejillas metálicas utilizadas para inducir una *rejilla de fibra de periodo largo* (RFPL) es costosa y tardada, pues requiere de equipo y personal especializado. Se desea bajar los costos y el

tiempo requerido para fabricar una RFPL, además de que también se desea realizar toda la fabricación en los laboratorios disponibles y con el equipo que existe en ellos, sin tener que encargar la fabricación a un laboratorio externo. Para lograr estos fines se encontró la técnica de micro-fabricación llamada *litografía suave* que utiliza polímeros en vez de materiales metálicos. Los polímeros cuentan entre sus ventajas que son materiales baratos y biocompatibles. En particular, el PDMS es un polímero que permite usar la técnica de litografía suave en su modalidad de *moldeo de réplicas*, que junto con moldes de poliestireno termoplástico permitirá una fabricación rápida, económica y sin tener que requerir de laboratorios externos o de equipo especializado. Las micro-rejillas de PDMS tendrán propiedades mecánicas diferentes a las micro-rejillas metálicas que se han utilizado para producir a las RFPL; sin embargo, para inducir rejillas en fibras adelgazadas lo importante es que el índice de refracción del material sea diferente al índice de refracción del medio externo, por lo que las rejillas de PDMS deberán de proporcionar una respuesta similar a las micro-rejillas metálicas aunque sus propiedades mecánicas sean distintas. Otra diferencia con los metales radica en que el PDMS es un material biocompatible, lo que permite su aplicación en dispositivos *Lab-on-a-Chip* para aplicaciones en bioingeniería y medicina, además de que su transparencia óptica hace posible la integración con dispositivos como lentes y guías de onda.

1.11. Objetivos

1.11.1. Objetivo General

Investigar la forma en que las micro-estructuras MEMS de polímero pueden utilizarse para modificar las propiedades de las fibras ópticas e inducir así, una rejilla de fibra de periodo largo con propiedades novedosas como la biocompatibilidad, transparencia óptica y bajo costo.

1.11.2. Objetivos Particulares

- Diseñar un dispositivo MEMS que modifique el espectro de transmisión de una fibra óptica adelgazada.
- Fabricar y caracterizar micro-estructuras de polímero PDMS por medio de litografía suave utilizando micro-moldes de poliestireno termoplástico.
- Realizar experimentos para comprobar los efectos que producen las interacciones entre el dispositivo MEMS y la fibra óptica adelgazada a diferentes presiones de contacto y a diferentes temperaturas.
- Comparar los resultados obtenidos en este trabajo con las RFPL que utilizan micro-rejillas metálicas reportadas anteriormente.

2. Fabricación de dispositivos de polímero

Como se mencionó en la Sección 1.7.1, la técnica de fabricación por *litografía suave* tiene distintas modalidades para fabricar dispositivos a partir de materiales poliméricos. Como el polímero que se desea utilizar es el PDMS, se utilizará la fabricación por *moldeo de réplicas* [23]. El moldeo de réplicas es un método de bajo costo y sencillo de implementar, pero requiere de moldes microestructurados que comúnmente se fabrican utilizando métodos como la litografía óptica y abrasión de paredes verticales profundas (DRIE), cuyo funcionamiento e infraestructura necesaria es de mayor complejidad y de alto costo. A diferencia de estos métodos, los moldes se pueden fabricar utilizando láminas de poliestireno termoplástico. Este método es muy económico, además de que se puede realizar en cualquier laboratorio convencional y en cuestión de horas, por lo que resulta altamente conveniente para la realización de prototipos. Por lo tanto, en este capítulo se describe la fabricación mediante moldes de poliestireno termoplástico de micro-rejillas de PDMS para producir una *rejilla de fibra de periodo largo*.

2.1. Moldes basados en láminas de *poliestireno termoplástico* (PST)

Las láminas de *poliestireno termoplástico* (PST) utilizadas como moldes para litografía suave surgen de la necesidad de crear canales para microfluidos sin tener que utilizar equipamiento especializado de elevado costo. Las láminas de PST son producidas por la empresa *K&B Innovations* bajo el nombre comercial *Shrinky Dinks*. Estas láminas fueron probadas en el 2007 por el equipo de Michelle Khine [31] de la Universidad de California en Merced para la fabricación de micro-canales, lo que impulsó su utilización en laboratorios de microfluidica.

Para fabricar micro-canales ya se habían probado otros métodos que no requieren de fotolitografía, como es la creación de microestructuras sobre acetatos utilizando fotocopiadoras [30], sin embargo estos métodos tenían la desventaja de que no se alcanzaba mucha profundidad en los micro-canales generados, pues la capa de *toner* que se deposita tiene un

grosor de entre 5 a 14 μm . Esta profundidad es suficiente para muchas aplicaciones, sin embargo resulta insuficiente para aplicaciones con células de animales, que pueden ser mayores a los 10 μm de diámetro. Para aumentar la profundidad se probó imprimir hasta cuatro veces seguidas sobre el mismo sustrato, lo que aumentó la altura de las estructuras hasta 25 μm [42].

Además de mayor profundidad en los canales para las aplicaciones microfluidicas también es importante que los canales tenga forma redondeada para mejorar el funcionamiento de dispositivos tales como las válvulas de control de flujo [31]. Los canales redondeados son muy difíciles de fabricar utilizando fotolitografía, sin embargo se producen de manera natural utilizando moldes basados en las láminas de PST.

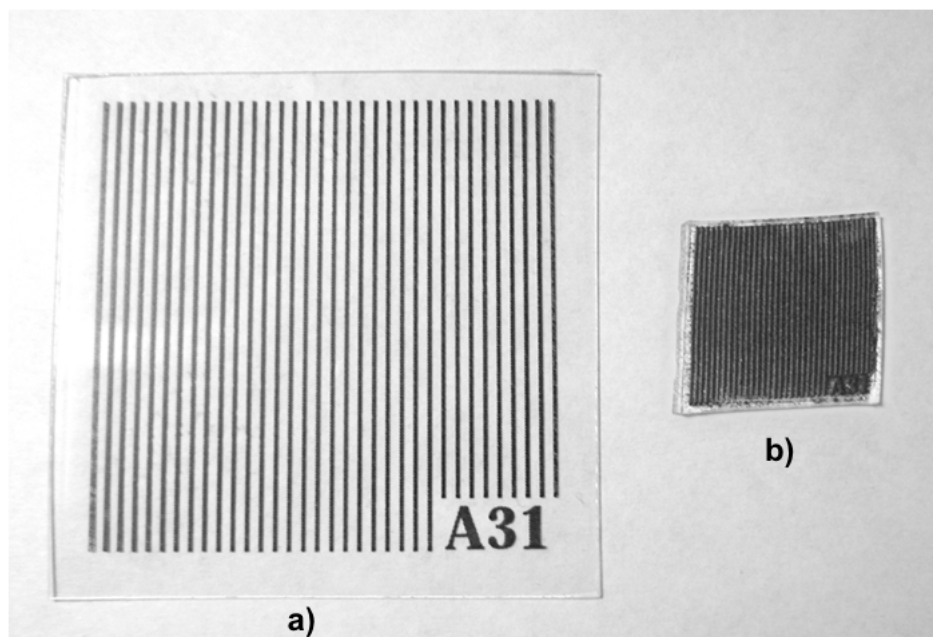


Figura 12: La lámina de poliestereo termoplástico reduce su tamaño original (a) a un tercio después de ser calentada en el horno (b), lo que aumenta la resolución de las microestructuras impresas.

Para fabricar los moldes se utiliza una lámina de PST tamaño carta, de apariencia parecida a una hoja de acetato, que se imprime utilizando una impresora *HP Laserjet 1320*, para calentarse luego en un horno donde ocurre el encogimiento. Este encogimiento se debe a

que la empresa que produce las láminas de PST las calienta y les aplica tensión para que se estiren y alcancen un tamaño tres veces mayor al tamaño original. Al calentar de nuevo a las láminas de PST por encima de su temperatura de transición estas recuperan el tamaño original que tenían antes del estiramiento (Figura 12). Durante el encogimiento los patrones que se imprimieron sobre la superficie de las láminas de PST aumentan su altura al tiempo que disminuye el ancho y largo [31]. Como se observa en la Figura 13, la diferencia de alturas entre las estructuras impresas y las que resultan después del encogimiento es considerable, de aproximadamente 500 %, y además las estructuras resultantes sirven para generar canales redondeados.

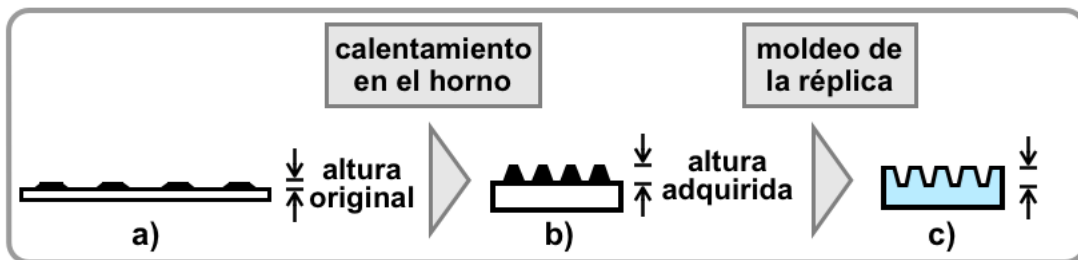


Figura 13: Esquema con vista lateral donde se muestra que la altura original (a) de las microestructuras impresas en la superficie de la lámina aumenta en un 500 % (b) después de calentarse en un horno. La altura adquirida por las microestructuras será igual a la profundidad que tengan los micro-canales en las réplicas (c).

2.2. Diseño de la micro-rejilla en software CAD

El primer punto a considerar consistió en determinar el periodo que se desea que tenga la micro-rejilla. Como punto de partida y con fines comparativos se desea que la micro-rejilla tenga un funcionamiento similar a las micro-rejillas metálicas que se han reportado, por lo que se decidió fabricar una micro-rejilla de $600 \mu\text{m}$ de periodo. Este periodo producirá acoplamientos con los *modos* de orden bajo dentro del ancho espectral de la fuente de luz que se va a utilizar, que en este caso se trata de un LED de 1550 nm [6]. El periodo de $600 \mu\text{m}$ significa que los micro-canales paralelos que forman a la micro-rejilla tendrán un ancho de

300 μm , y una distancia de separación entre sí de 300 μm (Figura 14).

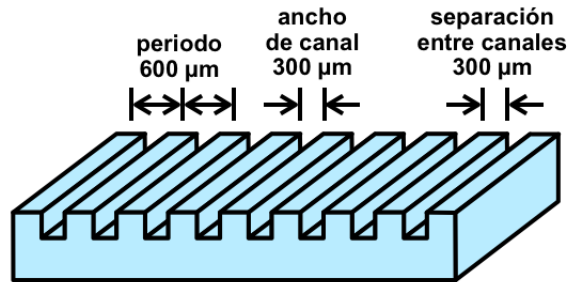


Figura 14: El periodo de 600 μm de la micro-rejilla permitirá que las franjas de atenuación aparezcan dentro de la región que puede generar la fuente de luz.

Una vez determinado el periodo que se desea que tenga la micro-rejilla, se procede a elaborar el diseño utilizando *software* de diseño gráfico, que para este trabajo consistió en el paquete *Freehand 11.0* de la empresa *Macromedia*. Para el diseño hay que tomar en cuenta que el molde de poliestireno termoplástico se va a reducir a aproximadamente a un 40 % del tamaño que tenga el dispositivo en el archivo de *Freehand* [31]. Es decir, las líneas que formarán los canales deberán de tener un grosor de 750 μm que equivale un periodo de 1500 μm , para que al encogerse por calentamiento adquieran un grosor de 300 μm , lo que producirá el periodo deseado de 600 μm (Figura 15).

Además de determinar el periodo del dispositivo, también hay que determinar la profundidad que deberán de tener los micro-canales, teniendo en cuenta que si se imprime una sola vez sobre la lámina de PST los canales tendrán una profundidad cercana a los 25 μm . Esta profundidad parece insuficiente ya que se desea que el ancho del canal sea de 300 μm , lo que significa una relación entre la profundidad y el ancho del canal igual a 0.08. Esta relación de aspecto tan baja produciría cambios en el índice de refracción muy pequeños en la superficie de la rejilla, que serían difíciles de detectar por la *onda evanescente* que induce la rejilla óptica. Y para el caso de que se quiera inducir la rejilla óptica por efecto fotoelástico, la relación de aspecto mínima que se recomienda es de 0.2, para que las microestructuras no se deformen al momento de presionar con ellas [23].

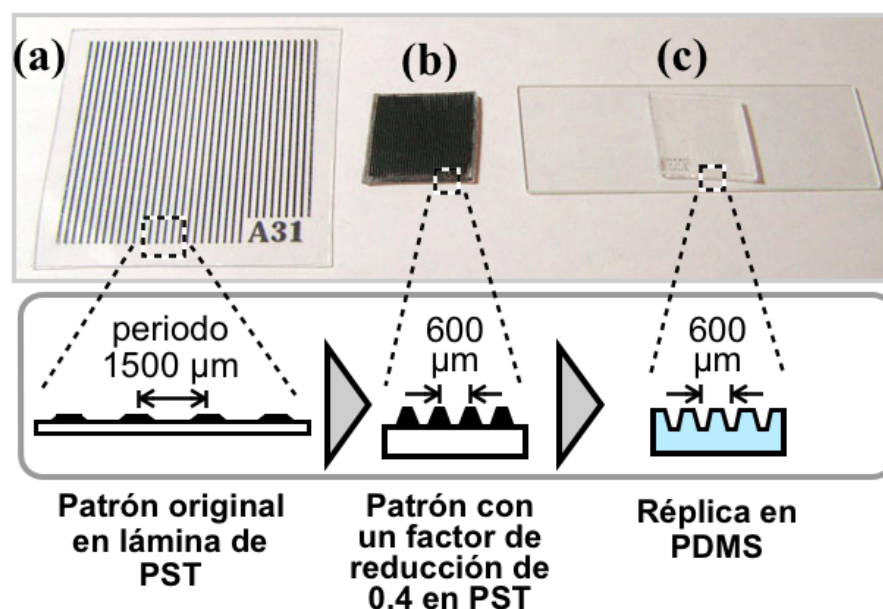


Figura 15: El periodo de las microestructuras en la lámina de poliestireno es de $1500 \mu\text{m}$. Este periodo se reduce a $600 \mu\text{m}$ después de calentar la lámina en el horno. La réplica de polímero PDMS contendrá micro-canales producidos por las microestructuras que se encuentran en el molde.

Para aumentar la altura de las microestructuras impresas, se puede imprimir varias veces el diseño sobre la misma lámina de poliestireno, lo que provocará que las líneas que imprima la impresora láser se vayan apilando una encima de la otra, con lo que aumentará la altura que alcanzan [31]. Para el presente trabajo se eligió imprimir el mismo diseño cinco veces consecutivas sobre la misma lámina de poliestireno, con lo que las micro-estructuras alcanzan una altura de $60 \mu\text{m}$, lo que produce la relación de aspecto mínima recomendada de 0.2. El diseño se puede imprimir más de cinco veces consecutivas, sin embargo se observó que la lámina de PST se va ensuciendo de *toner* con cada impresión, además de que también aumenta el riesgo de que alguna de las impresiones no quede alineada con respecto a las demás.

Con la finalidad de cambiar la forma que tiene el fondo del canal, es decir, su corte transversal, se utilizaron distintas aproximaciones para variar el grosor de las líneas que

se sobre-imprimían. Como se muestra en la Figura 16, la primer aproximación consistió en imprimir las cinco líneas consecutivas con el mismo grosor. Para la segunda aproximación las líneas que se sobre-imprimían iban disminuyendo su tamaño en cada una de las impresiones. La tercera consistió en aumentar consecutivamente el grosor de las líneas en cada impresión, y otras aproximaciones consistieron en aumentos y disminuciones de tipo exponencial, en vez de aumentar y disminuir linealmente. Todas estas aproximaciones produjeron variaciones en la forma de la sección transversal de los micro-canales, que iban desde semicírculos hasta canales en forma de V, que se caracterizaron utilizando interferometría de luz blanca, como se detalla en la Sección 2.4.

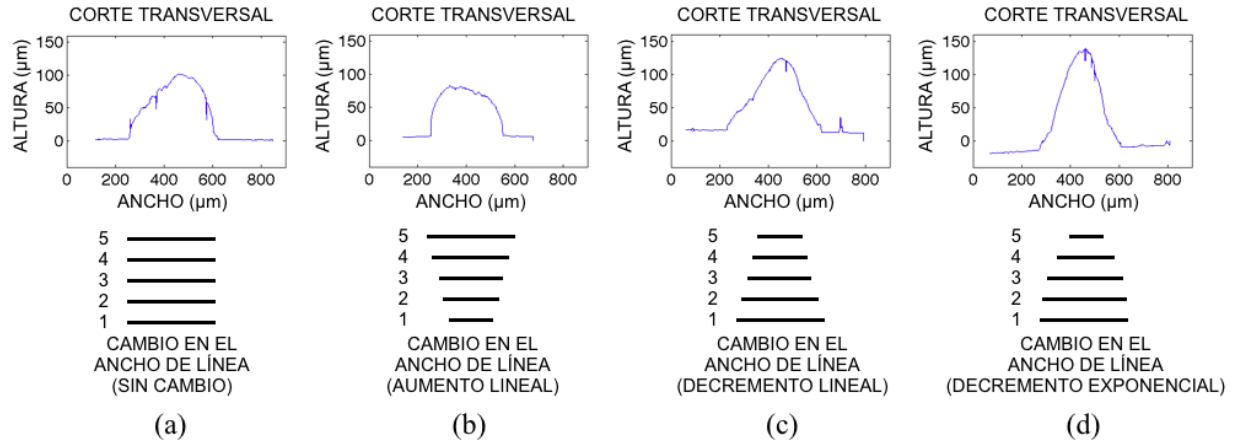


Figura 16: Cuatro diferentes aproximaciones para sobre-imprimir una encima de la otra a las cinco líneas que forman a la microestructura. La sección transversal de la microestructura depende de la aproximación. (a) El ancho de las líneas se mantuvo constante durante las cinco sobre-impresiones. (b) El ancho de las líneas se fue aumentando en forma lineal. (c) El ancho de las líneas se fue disminuyendo en forma lineal. (d) El ancho de las líneas se disminuyó en forma exponencial.

De las diferentes secciones transversales se eligió usar los perfiles en forma de V, debido a que como la rejilla óptica se va a inducir en forma mecánica, los micro-canales en V ejercerán una presión en forma puntual que producirá la variación periódica en el índice de refracción requerida por la *rejilla de fibra de periodo largo* [6].

Al sobre-imprimir cinco veces la misma línea sobre la lámina de poliestireno se encontró que el grosor de la microestructura generada era mayor al de la línea original. Esto es debido a que las cinco capas de *toner* no se apilan una sobre la otra de manera uniforme por falta de un sistema de alineación preciso, con lo que el ancho de la línea va aumentando con cada impresión consecutiva. El grosor de la línea final depende también del perfil de sobre-impresiones que se haya utilizado para realizar las impresiones consecutivas, lo que también afecta el factor de encogimiento de la línea.

Para el perfil que se eligió, donde el grosor de las líneas que se sobre-imprimían van disminuyendo en forma exponencial, se encontró que el grosor de las líneas se reduce a un 60 % del grosor original después del calentamiento del PST. Este resultado contrasta con el factor de encogimiento de todo el molde, donde la longitud total se reduce a 40 % del tamaño original.

Para la impresión se recomienda una impresora láser de las que tienen una bandeja que se extrae de la impresora para colocar las hojas a imprimir, y luego la bandeja se vuelve a insertar dentro de la impresora. Esto es debido a que esta bandeja se puede ajustar para que la lámina de poliestireno entre de forma más o menos precisa al ser jalada por la impresora, lo cual es importante para que las cinco impresiones consecutivas queden lo más alineadas posible. Las impresoras láser donde las hojas se colocan en la parte frontal para ser jaladas por la impresora presentan mayores problemas de alineación para las impresiones consecutivas sobre la misma lámina.

2.3. Reducción del molde en el horno y obtención de las réplicas

Una vez impreso el diseño sobre la lámina de poliestireno, se recortó la lámina para trabajar sólo con la porción que se utilizará como molde. Las láminas que se utilizaron miden 20.3 por 25.4 cm, y son los *Shrinky Dinks* modelo *Crystal Clear, Unprinted for Creativity*. Ya que se cuenta con el molde recortado, se sigue con el procedimiento estándar para producir moldes a partir de las láminas de poliestireno. Este procedimiento consiste en calentar al molde en un horno convencional a 163°C durante un tiempo de 3 a 5 minutos [28].

Ya que se cuenta con el molde, se puede obtener la réplica de polímero PDMS, que para este caso se trató del PDMS *Sylgard 184* de la marca Dow Corning. El método para obtener las réplicas consiste en limpiar los moldes recién encogidos remojándolos en alcohol isopropílico y aplicándoles varias veces una rociada de acetona, para enjuagarse luego con agua destilada, como se muestra en el video que aparece en la referencia [28]. Luego se mezcla el pre-polímero PDMS con el agente curante y se le extraen las burbujas a la mezcla usando una campana de vacío o un disecador. El PDMS se vierte sobre el molde y, para acelerar la polimerización, se calientan el molde y el PDMS sobre una parrilla eléctrica, con lo que el PDMS se solidifica aproximadamente en 10 minutos. Una vez que ha solidificado, el PDMS se puede desprender del molde, con lo que se obtiene la micro-rejilla de PDMS, que está lista para usarse (Figura 18). Los pasos de fabricación de la micro-rejilla se presentan en la Figura 17. El tiempo de fabricación de las micro-rejillas de PDMS es corto, ya que el diseño de las microestructuras en el *software* tarda un par de horas, la reducción de tamaño y limpieza del molde de PST toma una hora, y la preparación del pre-polímero PDMS y su polimerización sobre el molde tardará otras dos horas más, por lo que el tiempo total de fabricación de las micro-rejillas será de unas 5 horas.

2.4. Caracterización de las micro-rejillas de PDMS

La caracterización de los dispositivos MEMS fabricados se realizó utilizando el analizador de micro-sistemas MSA-400 de la marca Polytec, que se encuentra en el laboratorio del Centro UNAMems de la Facultad de Ingeniería. Este analizador realiza mediciones *sin contacto* y *no destructivas*, y cuenta con tres métodos de caracterización diferentes [43] (Figura 19).

El primer método se utiliza para realizar mediciones de los movimientos *en el plano*; es decir, aquellos que se producen en las direcciones paralelas al plano de observación. Las mediciones se realizan mediante el procesamiento digital de las imágenes de video que se obtienen a través de un microscopio y que son capturadas utilizando luz estroboscópica de alta velocidad.

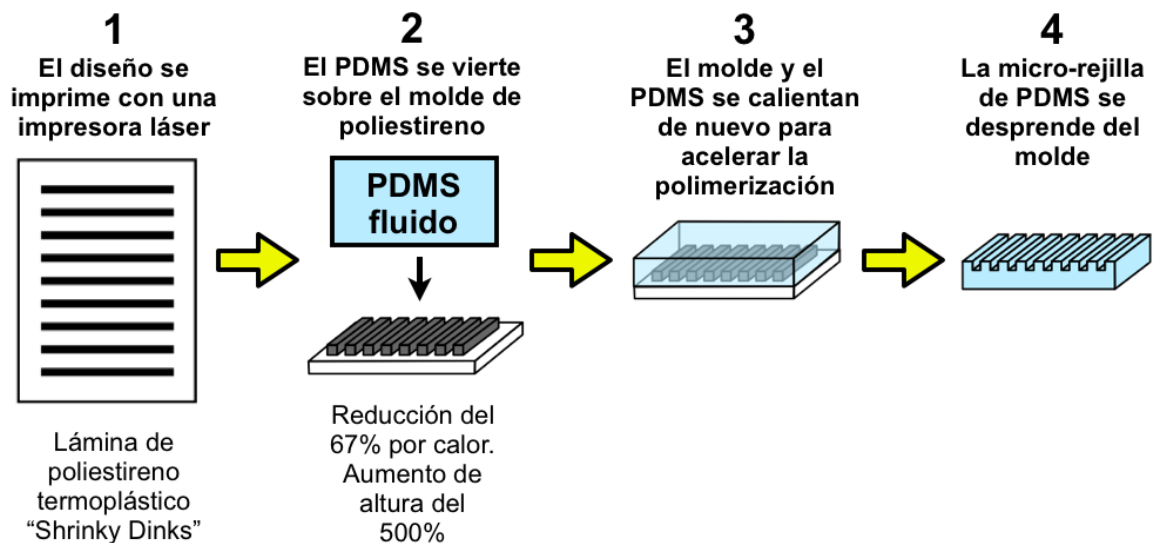


Figura 17: Esta figura muestra los pasos requeridos para la fabricación de una micro-rejilla de polímero PDMS a partir de un molde de poliestireno termoplástico.

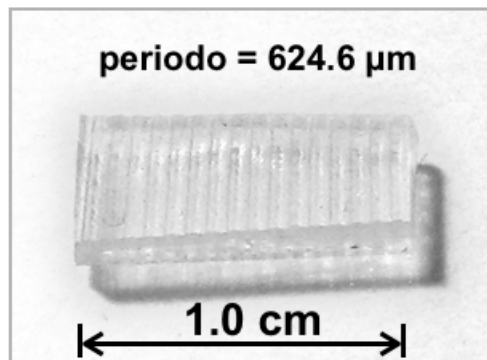


Figura 18: Esta figura muestra una de las micro-rejillas producidas. El periodo que se esperaba obtener para la micro-rejilla era de 600 μm , y después de la caracterización se determinó que su periodo real es de 624.6 μm .

El segundo método realiza mediciones de la dinámica del micro-sistema, en particular de los movimientos *fuera del plano*; es decir, aquellos que se producen en dirección perpendicular al plano de observación. Para estas mediciones se utiliza interferometría láser, mediante un vibrómetro que realiza escaneos de la superficie mediante un microscopio. Este vibrómetro nos permite conocer la respuesta en frecuencia de los movimientos *fuera del plano* de los



Figura 19: El autor de esta tesis junto con el analizador de micro-sistemas MSA-400 de Polytec dentro del cuarto limpio clase 10000 del Centro UNAMems.

dispositivos MEMS.

El tercer método es el *sistema de mediciones topográficas*, que sirve para medir la topografía 3D de los dispositivos MEMS que se analicen. Este último método fue el que se utilizó para este trabajo con el propósito de caracterizar a los dispositivos fabricados.

2.4.1. Mediciones topográficas por interferometría de luz blanca

El sistema de topografía Polytec realiza las mediciones utilizando *interferometría de luz blanca*, que es un método óptico que no requiere de contacto físico con las superficies. Las mediciones utilizan luz blanca en vez de la fuente de luz láser que utilizan otro tipo de interferómetros, pero al igual que estos también funciona detectando las diferencias entre dos distancias: la distancia entre el interferómetro y la superficie a caracterizar y la distancia de referencia. La superficie del objeto se captura mediante un microscopio y una cámara de video, para determinar luego la profundidad que tienen cada uno de los píxeles de la imagen. Esta profundidad es determinada al realizar un barrido en el eje z mediante un actuador piezo-eléctrico, barrido que produce interferencia óptica en cada uno de los píxeles de la imagen, comenzando desde las zonas más profundas y hasta llegar a las regiones más cercanas al microscopio. Al producirse la interferencia óptica significa que la distancia entre el interferómetro y esa región en particular es igual a la distancia de referencia. Como la distancia de referencia es conocida, ahora también se conoce la profundidad a la que se encuentra la región que se está midiendo. Al terminar el barrido ya se conocen las profundidades de todas las regiones que componen a la superficie y, ahora, se cuenta con los valores de z para cada uno de los píxeles que componen a la imagen capturada, con lo que se ha caracterizado la topografía de la superficie.

El proceso de caracterización de superficies se puede dividir en tres pasos que se resumen a continuación y que se describen en forma detallada en el manual del *software Topography Measurement System (TMS)* de Polytec [44]. El primer paso consiste en colocar sobre la platina del microscopio, del sistema de topografía Polytec, el dispositivo MEMS cuya topografía se desea caracterizar, para observar su superficie en la pantalla de la computadora mediante el *software TMS*. Para poder observar esta imagen es necesario ajustar antes el *tiempo de exposición* de la cámara, de forma que la imagen en la computadora no aparezca ni totalmente blanca por sobre-exposición ni totalmente negra, por falta de iluminación. Más bien se busca que la imagen muestre los tonos grises intermedios. Una vez que se ajustó el tiempo de exposición, se puede enfocar el microscopio hasta observar claramente la super-

ficie del dispositivo, momento en el cual aparecerán las *franja de interferencia* que indican exactamente que zona de la superficie se encuentra enfocada.

El segundo paso consiste en determinar la distancia de escaneo requerida. El piezo-eléctrico tiene una distancia de escaneo máxima de 500 μm , y hay que verificar que todas las micro-estructuras a caracterizar se encuentren dentro de este rango, para lo que hay que desplazar el piezo-eléctrico de forma que vaya enfocando a todas las estructuras que componen a la superficie, desde la más baja hasta la más alta. Se puede saber que una región de la superficie se encuentra enfocada cuando aparecen en ella las franjas de interferencia. Si no se puede enfocar alguna región de la superficie, significa que esta región se encuentra más arriba o más abajo del rango de desplazamiento del piezo-eléctrico, por lo que habrá que ajustar manualmente el enfoque del microscopio hasta que todas las estructuras se encuentren dentro del rango. Una vez hecho esto se definen ahora los puntos inicial y final del escaneo, de forma que la zona más profunda de la superficie corresponda al punto inicial y la zona más elevada corresponda al punto final.

Para el tercer paso se elige el *área de interés* de la superficie que nos interesa caracterizar. Se recomienda que esta área sea más ancha que alta, para que el escaneo se realice en poco tiempo. Si el *área de interés* es demasiado grande, es posible que la memoria de la computadora se sature y marque un error, por lo que habrá que reiniciar el *software* para repetir la medición, ahora utilizando un área más pequeña. Ya con el área de medición marcada, se puede comenzar la medición al oprimir el botón verde *start* del panel superior del *software* TMS (Figura 20).

2.4.2. Post-procesamiento de la imagen obtenida

Una vez que la medición ha concluido, la *ventana de medición* del *software* cambia por la *ventana de análisis*. En esta ventana aparece la superficie recién capturada, que se puede observar vista desde arriba o también en forma tridimensional, y en el panel inferior se pueden observar cortes de la superficie (Figuras 21 y 22). Estas imágenes nos muestran toda la información que se requiere conocer acerca de la superficie, aunque existe el problema

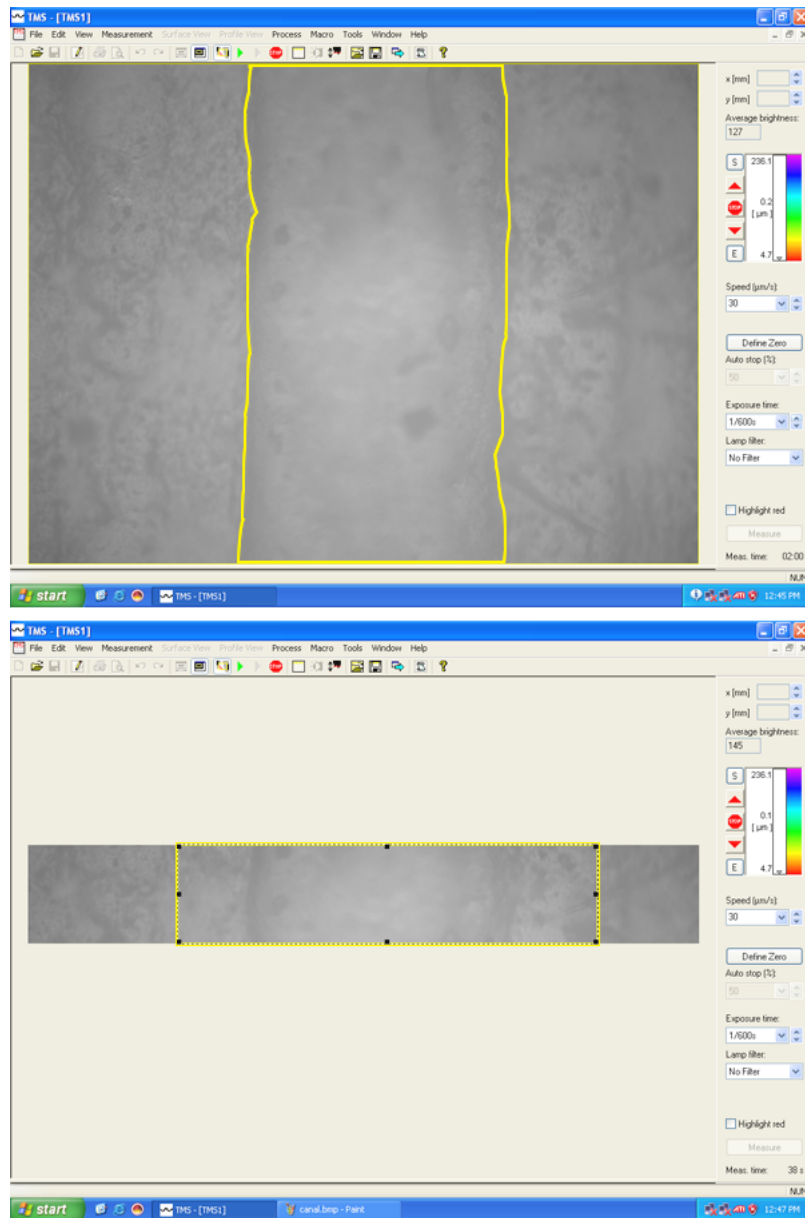


Figura 20: La pantalla superior muestra el micro-canal señalado con la línea amarilla. Abajo se muestra dentro del recuadro amarillo el área seleccionada para ser analizada.

de que el tamaño del área está limitada por dos factores: el primero consiste en que si el área es demasiado grande se saturará la memoria de la computadora, y el segundo en que el ancho máximo que puede tener la imagen está limitado ópticamente a $900 \mu\text{m}$ cuando se utiliza el objetivo de 10x, que es el que permite observar la mayor área. Para solucionar este

problema se capturaron en forma individual varias zonas adyacentes del dispositivo, que luego se exportaron al *software* Matlab. En Matlab se unieron las zonas adyacentes para formar la superficie total que nos interesa visualizar.

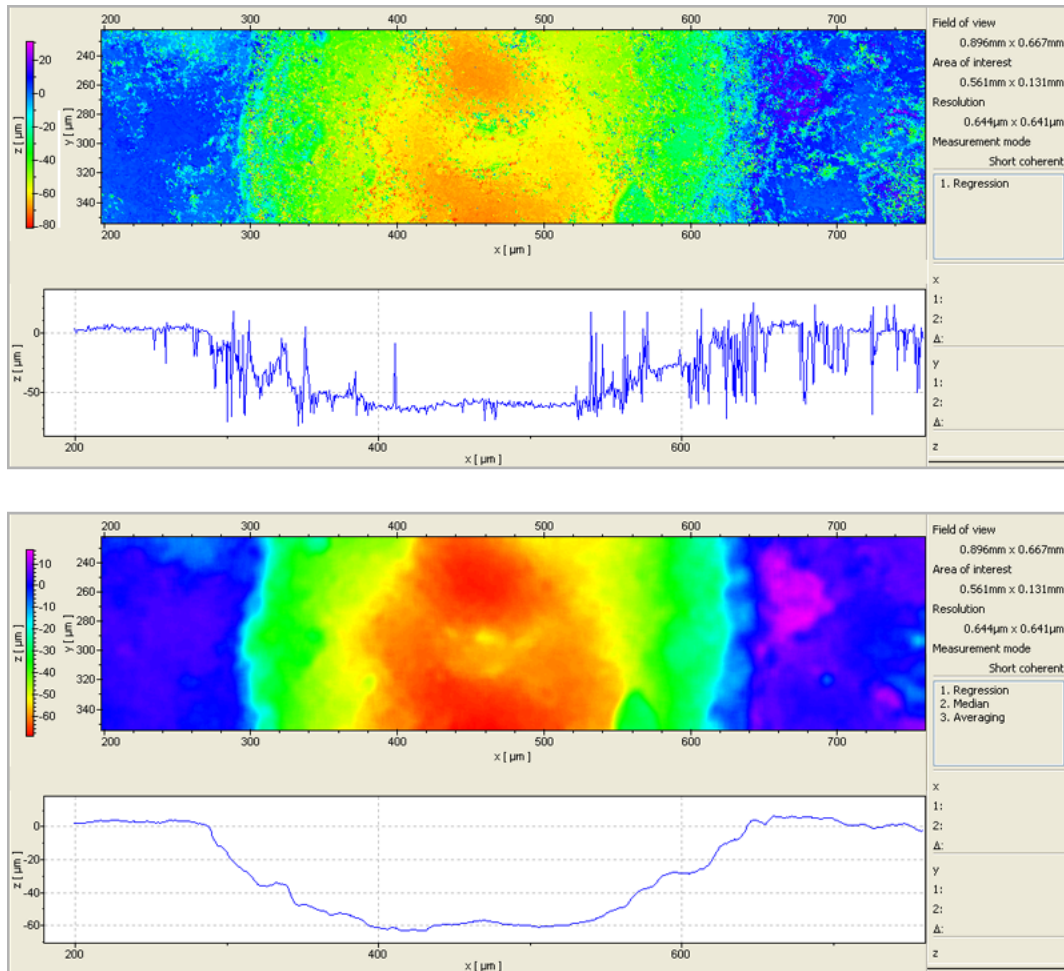


Figura 21: Al concluir la medición, el sistema Polytec muestra la superficie vista desde arriba, donde el código de colores indica la profundidad que tiene cada uno de los puntos, junto con un corte transversal de la superficie. Las líneas verticales que aparecen en el corte son ocasionados por ruido, y son eliminadas durante el post-procesamiento, como lo muestra la figura inferior.

Antes de exportar los datos a Matlab es conveniente aplicar a las superficies obtenidas tres de las opciones del menú de *Procesamiento* del *software*. La primer opción, llamada *linear*

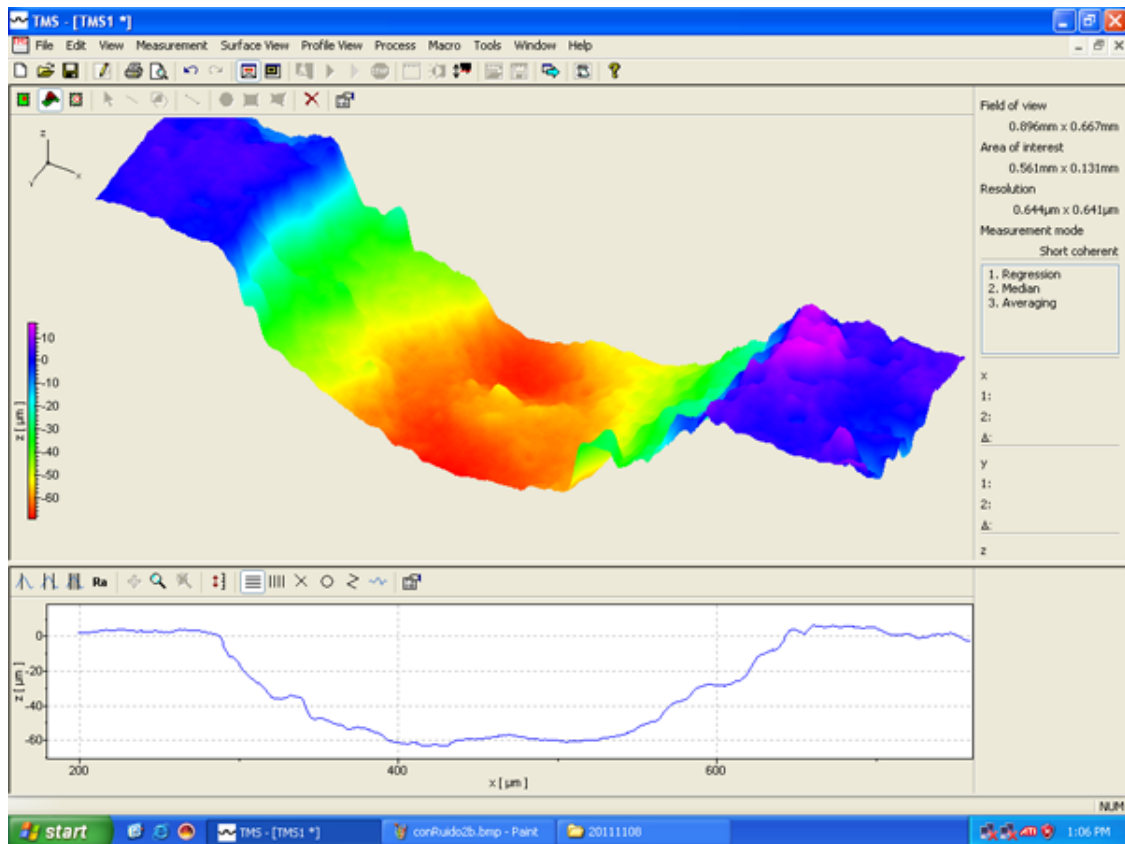


Figura 22: El software TMS de Polytec también puede graficar las superficies en forma tridimensional, aunque para la caracterización de los dispositivos fabricados la graficación tridimensional se realizó en software Matlab.

regression, se utiliza para corregir las mediciones donde la superficie del dispositivo no se pudo colocar en forma completamente horizontal y paralela a la platina del microscopio, por lo que todo el dispositivo aparece ligeramente inclinado. *Linear regression* utiliza máscaras para seleccionar las zonas de la superficie que deben de aparecer horizontales.

La segunda opción, llamada *median filter*, elimina las líneas verticales que aparecen en la superficie debido al ruido. Estas líneas aparecen especialmente en las superficies inclinadas y verticales del dispositivo debido a que la luz que se refleja en ellas es menor, aunque también aparecen en menor cantidad en las superficies horizontales debido a que el PDMS es un material transparente, lo que dificulta la medición por medios ópticos. La tercer opción a

utilizar, denominada *averaging*, sirve para eliminar las líneas provocadas por el ruido que hayan quedado después de utilizar *median filter*. En la Figura 23 se muestran los cortes transversales que resultan después de haber realizado el post-procesamiento.

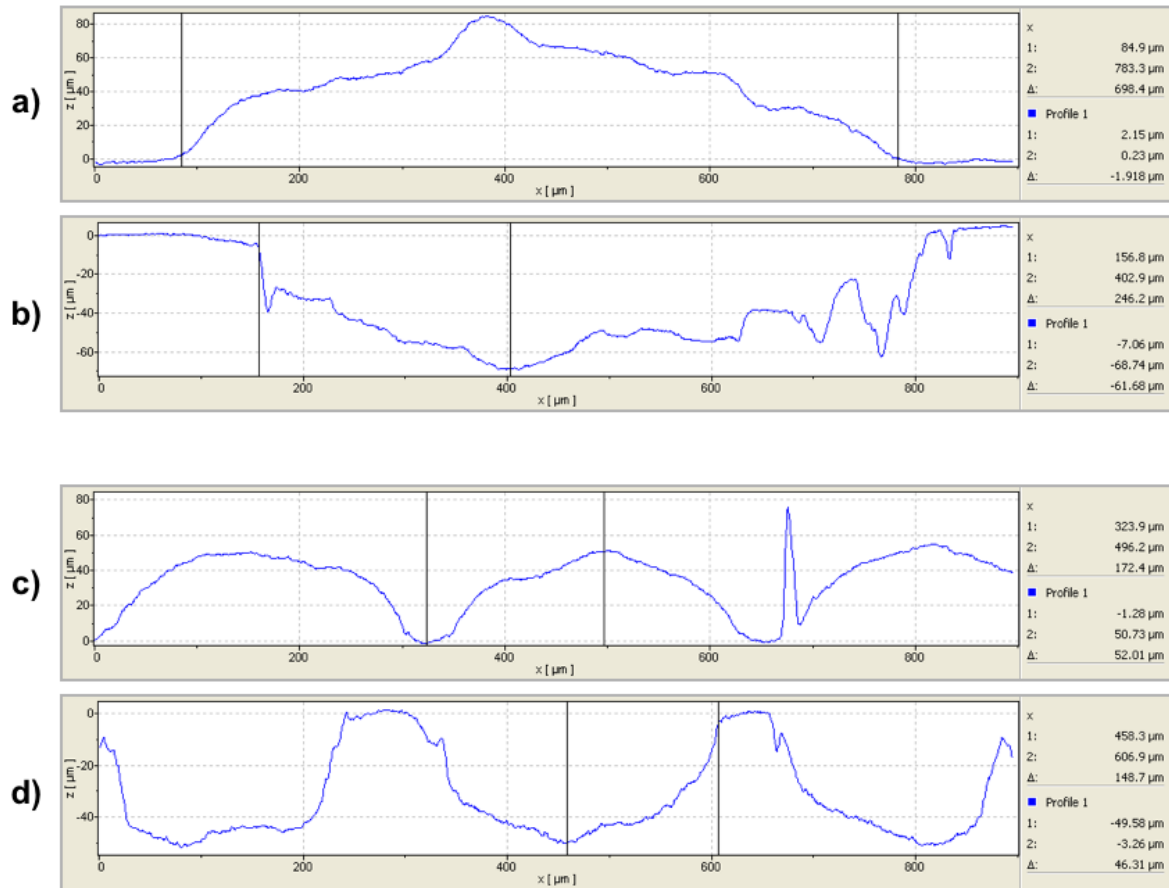


Figura 23: Después del post-procesamiento se elimina la mayor parte del ruido, aunque todavía aparecen picos ocasionados por él. En la parte superior se muestran cortes transversales del molde (a) y de la réplica (b) de un canal de 698 μm de ancho. En la parte inferior aparece el molde (c) y la réplica (d) de un dispositivo con canales de 344 μm de ancho.

2.4.3. Generación del corte transversal de la superficie en Matlab

Después del post-procesamiento se exportan los datos obtenidos al *software* Matlab. El archivo que exporta el *software* TMS de Polytec es un archivo de texto que contiene todos los datos numéricos obtenidos, que se encuentran ordenados en 3 columnas. Las columnas corresponden a los datos de las coordenadas x , y y z , donde el valor de z corresponde a la altura que tiene la superficie caracterizada en el punto correspondiente a las coordenadas x y y . El archivo exportado por Polytec se abre en *software* de hoja de cálculo, donde se le quitan los encabezados y la información adicional, dejando únicamente los valores numéricos de las tres columnas. Este archivo modificado se exporta ahora con extensión *.csv* (*Comma-Separated Values*).

Una vez que se cuenta con los archivos *.csv* que contienen la información de las superficies, los archivos se importarán en Matlab, donde la información contenida en las tres columnas del archivo *.csv* se convertirá en una variable matricial de tres columnas. Las matrices importadas se deberán de cargar manualmente antes de correr el código que aparece en el Apéndice D. Para mayor comodidad se recomienda crear un archivo *.mat* que contenga a las matrices, para cargarlo automáticamente mediante el comando `load` dentro del código de Matlab.

Las matrices que se importaron en Matlab tienen un formato de tres columnas con los valores de x , y y z , pero este formato no se puede graficar directamente, debido a que todos los pixeles de la imagen se encuentran mezclados en las tres columnas de la matriz. Por lo tanto, antes de poder graficar, hay que determinar el número de columnas y de renglones que tenía la imagen original.

Para determinar el número de columnas se utiliza el comando `plot` con el propósito de graficar únicamente los valores de la columna x . En la gráfica producida es fácil determinar el número de columnas de la imagen ya que se observan transiciones abruptas cada vez que los valores de x cambian de un renglón a otro de la imagen. Para conocer el número exacto de columnas se utiliza la herramienta *data cursor* de Matlab. Ya que se conoce el número de columnas, se obtiene el número de renglones al dividir la cantidad de elementos de la

columna x , que es el número total de píxeles de la imagen, entre el número de columnas obtenido.

Ya que se cuenta con el número de columnas, se escribe este valor en la variable `numElem` del código, y ahora hay que elegir cual de los renglones de la imagen es el que queremos observar, es decir, en que punto de la superficie queremos que aparezca el corte transversal. Se recomienda elegir alguno de los primeros renglones, observar el corte transversal, y si se desea se puede cambiar a otro renglón modificando la variable `indice` del código (ver el Apéndice D).

Antes de correr el código hay que elegir otras dos variables, `offx` y `offy`, que representan el *offset* que tendrán las distintas superficies capturadas individualmente, de forma que todas aparezcan alineadas en la figura. Para lograr esta alineación se seguirá un procedimiento de *prueba y error*, donde se irán probando distintos valores de *offset* hasta que se observe que todos los cortes se han alineado y aparecen como un solo corte transversal (Figura 24).

Ya que se obtuvo el corte transversal total, ahora se puede obtener el periodo utilizando el botón *data cursor* de la ventana donde aparece la figura. Para obtener el periodo se determina el punto medio del primer canal y el punto medio del último canal, y la distancia entre estos puntos se divide entre el número de canales que aparecen en el corte. El valor obtenido será el periodo promedio del dispositivo. La profundidad de los canales también se podrá determinar utilizando de nuevo la herramienta *data cursor*.

2.4.4. Generación de la imagen tridimensional de la superficie

Una vez obtenidos el periodo del dispositivo y la profundidad de los canales, ahora se puede generar la imagen tridimensional que presenta información adicional de la superficie. Para generar la imagen se utiliza el código de Matlab que aparece en el Apéndice E, donde se utiliza la instrucción `reshape` para convertir la matriz de tres columnas original en una matriz que puede ser graficada mediante la instrucción `surf`. Para poder utilizar `reshape` será necesario conocer antes el número de columnas de la imagen que se ha importado a

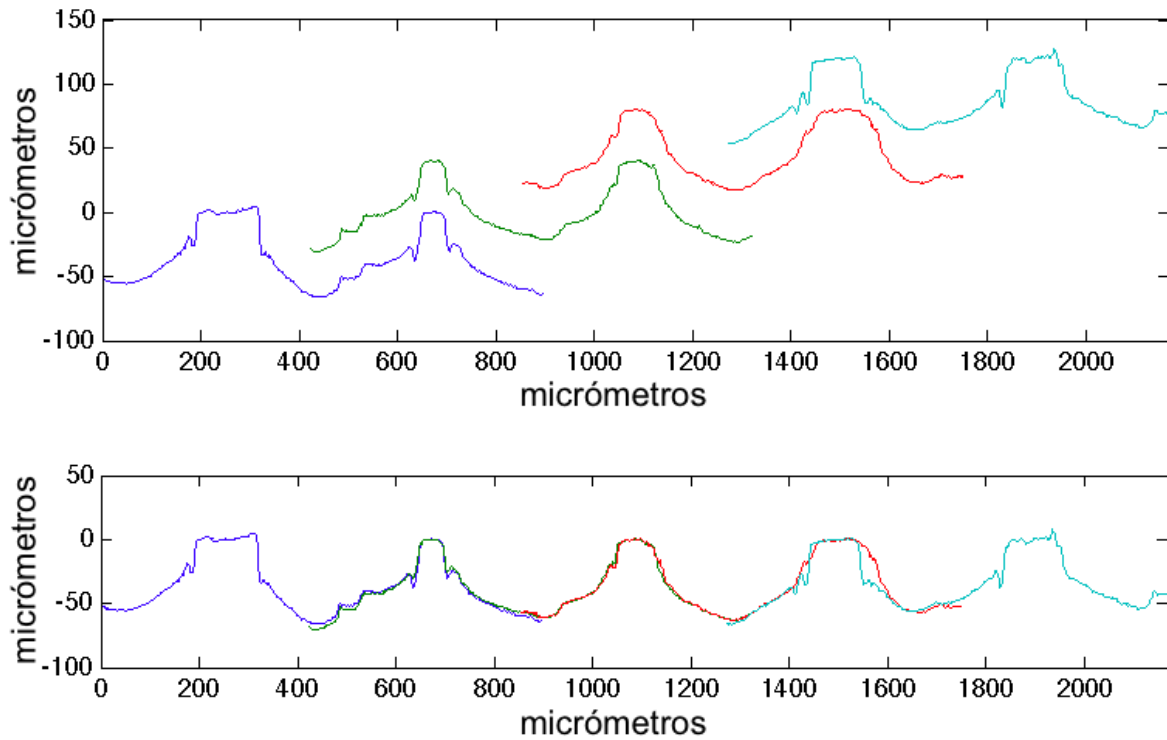


Figura 24: Utilizando código de Matlab se alinean los cuatro micro-canales que se capturaron en forma individual. Una vez alineados, se puede obtener tanto su separación como la profundidad promedio en forma precisa utilizando la herramienta data cursor de Matlab

Matlab, para lo que se puede utilizar el mismo método que se explicó en la Sección 2.4.3. Antes de graficar con `surf` también habrá que realizar la alineación de los canales que se capturaron en forma independiente, para lo que se utilizará de nuevo un procedimiento de *prueba y error* hasta que los canales se encuentren alineados.

Al observar la superficie producida, es importante notar que las dimensiones que aparecen en los ejes no corresponden a las dimensiones reales. Esto es debido a que la matriz resultante después de la conversión con `reshape` únicamente tiene la información del eje z , con lo que se pierde la información con las dimensiones del eje x y del eje y . Las cantidades que aparecen en los ejes de la figura corresponden al número de píxeles de la imagen, y no a las dimensiones físicas del dispositivo. Para solucionar este problema se puede obtener la relación que existe entre píxeles y micrómetros mediante el corte transversal que se ge-

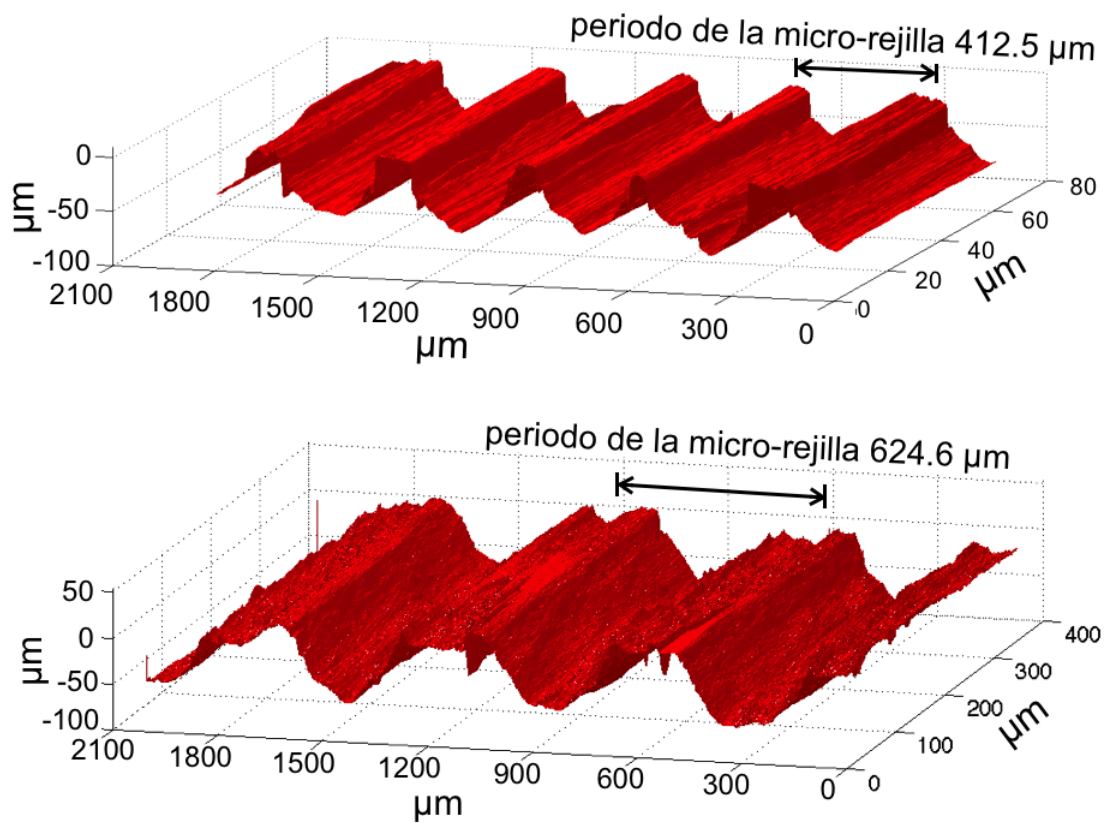


Figura 25: Esta figura muestra la caracterización de dos micro-rejillas con periodos diferentes, uno de 400 μm (412.5 μm reales) y otro de 600 μm (624.6 μm reales). Los canales adyacentes se obtuvieron en forma independiente con el sistema de topografía Polytec y luego se unieron en Matlab para formar las superficies totales.

neró anteriormente, y luego se pueden corregir manualmente los valores que aparecen en los ejes de la figura, para obtener la imagen final con dimensiones en micrómetros (Figura 25).

3. Fabricación de fibras ópticas adelgazadas

3.1. Fabricación de fibras adelgazadas

Las rejillas de periodo largo puede fabricarse utilizando guías de onda planas [45, 46], o también se pueden fabricar utilizando fibras ópticas. En el presente trabajo se desea producir una *rejilla de fibra de periodo largo* (RFPL) utilizando fibras ópticas adelgazadas. El adelgazamiento se realiza con la finalidad de que el medio externo a la fibra tenga mayor interacción con la luz que viaja por el núcleo de la fibra óptica. Para adelgazar fibras ópticas existen varios métodos, y para este trabajo la elección del método se debió a que se contaba con acceso al Laboratorio de sensores de fibra óptica del Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM). Este laboratorio cuenta con una estación de trabajo marca Dowson que se utiliza normalmente para fabricar acopladores de fibra óptica, aunque también es capaz de fabricar fibras ópticas adelgazadas, si bien en el laboratorio no la habían utilizado con este fin. Por lo tanto en este capítulo se describe la forma en que se caracterizó el procedimiento para fabricar fibras ópticas adelgazadas con una longitud y un diámetro controlados en forma precisa y repetible, utilizando la estación de trabajo Dowson.

3.1.1. Determinación de las dimensiones de la fibra adelgazada

Como se observa en la Figura 26, una fibra óptica adelgazada (FOA) contiene una región donde su diámetro es menor que el del resto, observándose así tres zonas. En la primer zona el diámetro consiste del diámetro original y luego disminuye hasta alcanzar el diámetro adelgazado. En la segunda zona el diámetro es constante y menor al original, y en la tercer zona se parte del diámetro adelgazado para aumentar hasta que alcanza su valor original.

Con fines comparativos, la FOA que se desea obtener tiene las mismas características que las fibras adelgazadas que se utilizan para producir las RFPL inducidas por micro-rejillas de aluminio [5]. De igual forma se decidió utilizar una fibra monomodal, ya que este es el tipo de fibras que se utilizan más comúnmente para producir a las RFPL [5, 1, 6]. Se utilizó una fibra monomodal estándar modelo SMF-28e de la marca Corning (diámetro del

núcleo $8.2 \mu\text{m}$, diámetro del revestimiento $125 \mu\text{m}$ y apertura numérica 0.14). Una vez que se haya adelgazado a la fibra, la longitud de diámetro constante deberá de ser de al menos un centímetro, ya que la micro-rejilla externa que se planea utilizar tiene esa longitud.

Como se vió en la sección 1.3, las longitudes de onda a las que se producen los picos de atenuación dependen del periodo de la micro-rejilla y también de la diferencia de índices de refracción efectivos entre el modo fundamental del núcleo y los modos del revestimiento. Esta diferencia de índices depende a su vez del diámetro de la fibra adelgazada, ya que una gran parte de los campos de los modos de orden alto se fugan hacia el aire para los diámetros más pequeños [5]. Como la diferencia de índices depende entonces del diámetro de la fibra, las longitudes de onda de los picos de atenuación dependerán también de dicho diámetro. Se desea que las longitudes de onda a las que se producen los acoplamientos con los modos de orden bajo ocurran dentro del ancho espectral de la fuente de luz utilizada, y en la literatura aparece que esto ocurre para el rango de diámetros que se encuentra entre los $10 \mu\text{m}$ y los $30 \mu\text{m}$ [5]. Debido a esto se elige el punto medio del rango, que corresponde a un valor de $20 \mu\text{m}$ de diámetro (Figura 26).

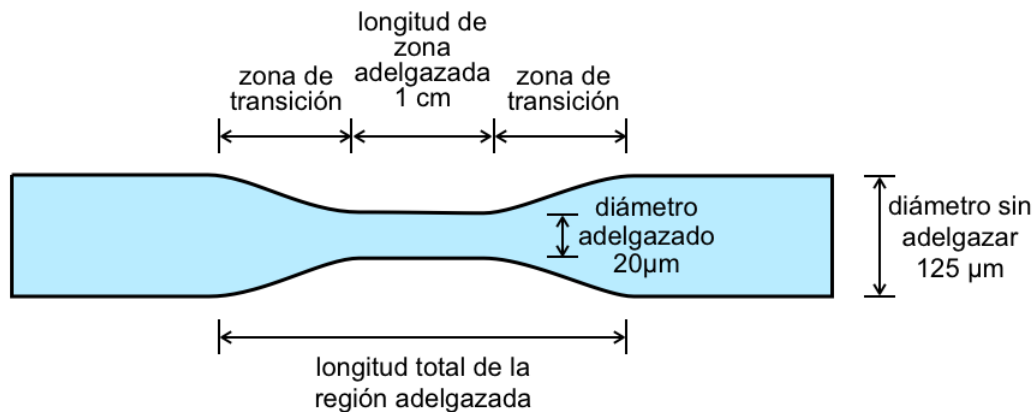


Figura 26: Esquema que muestra las partes de una fibra adelgazada. Al centro de la fibra se encuentra la zona adelgazada de diámetro uniforme, que tiene a sus extremos las dos zonas de transición.

3.1.2. Caracterización de la estación de trabajo para adelgazar fibras

Para adelgazar a la fibra óptica se utilizó la *estación de trabajo* marca Dowson, modelo OC-2010, que se encuentra en el Laboratorio de sensores de fibra óptica y fibras ópticas láser, en el Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM. Esta estación de trabajo se utiliza para fabricar acopladores de fibra óptica, que consisten en dos fibras ópticas que se trenzan entre sí, y luego la parte trenzada se funde en una sola fibra óptica al aplicarles tensión y el calor de una flama. Estos acopladores se utilizan para transmitir la luz que viaja por una de las dos fibras a la otra fibra.

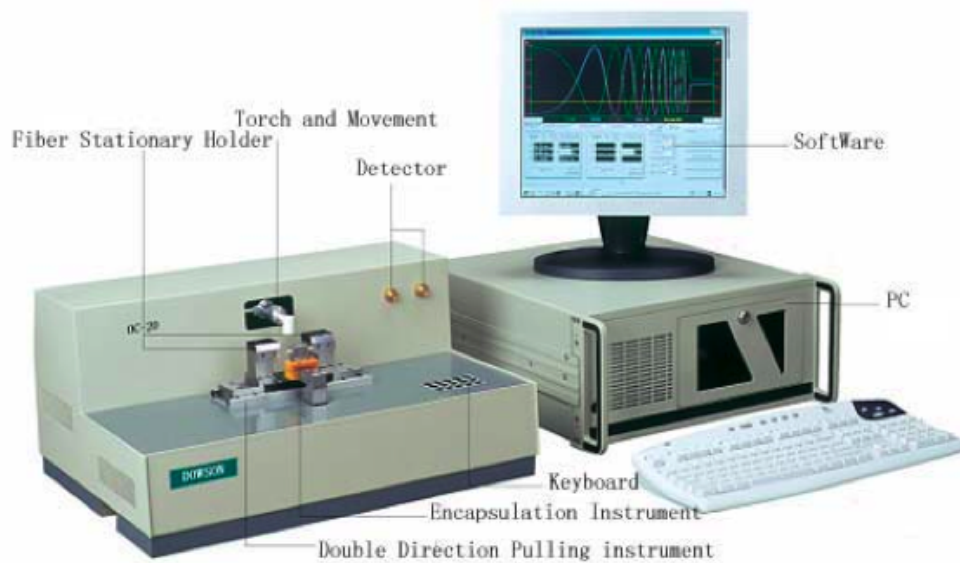


Figura 27: Estación de trabajo marca Dowson. Se utiliza para fabricar acopladores de fibra óptica y multiplexores por división de longitud de onda, aunque también se puede utilizar para adelgazar fibras ópticas (Foto de [47]).

La estación de trabajo Dowson cuenta con un quemador que produce una flama de hidrógeno, y el movimiento del quemador en los tres ejes se controla en forma precisa mediante motores de 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. Al controlar los distintos

parámetros de adelgazamiento la longitud total de la región adelgazada se puede variar desde 30 hasta 60 mm, mientras que la longitud correspondiente a la zona de diámetro uniforme va de los 10 a los 25 mm [48].

La estación de trabajo Dowson se había utilizado en el laboratorio para fabricar acopladores, pero no se había utilizado para adelgazar fibras ópticas. Debido a esto fue necesario caracterizar el procedimiento para adelgazar fibras ópticas. La estación Dowson es controlada por 28 parámetros distintos ajustables a través de *software*. Sin embargo, al investigar en la literatura se encontró que son cuatro los parámetros principales que controlan el adelgazamiento de la fibra óptica [49].

El primer parámetro es la *velocidad de estiramiento*, es decir, la velocidad a la que los dos postes que sostienen a la fibra óptica se alejan uno del otro, provocando que la fibra óptica se estire. El segundo parámetro es la *velocidad de oscilación*, que es la velocidad a la que se mueve la flama que calienta a la fibra. Esta flama se desliza a lo largo del eje longitudinal de la fibra óptica en forma oscilatoria, con un movimiento que permanece constante durante el proceso de adelgazamiento. El tercer parámetro que controla el adelgazamiento es la *longitud de oscilación* de la flama en su movimiento a lo largo de la fibra, y el cuarto parámetro es la *distancia de estiramiento*, es decir, la distancia total que se desplazan los postes que estiran la fibra óptica (Figura 28).

En cuanto a los dos primeros parámetros, según la literatura el punto importante es que la *velocidad de oscilación* sea mucho mayor que la *velocidad de estiramiento*. Mientras la velocidad de oscilación sea mucho mayor, se estará formando una *zona caliente* uniforme en la fibra óptica, donde el vidrio se adelgaza conforme la fibra óptica se estira [49]. Para determinar las velocidades a utilizar, se eligió una *velocidad de estiramiento* de 0.02 mm/s, ya que esta es la velocidad a la que se fabrican los acopladores utilizando la estación Dowson, luego se escogió una *velocidad de oscilación* de 3.00 mm/s, que es más de 100 veces mayor que la *velocidad de estiramiento*, cumpliendo el requerimiento de que la velocidad de oscilación sea mucho mayor que la velocidad de estiramiento.

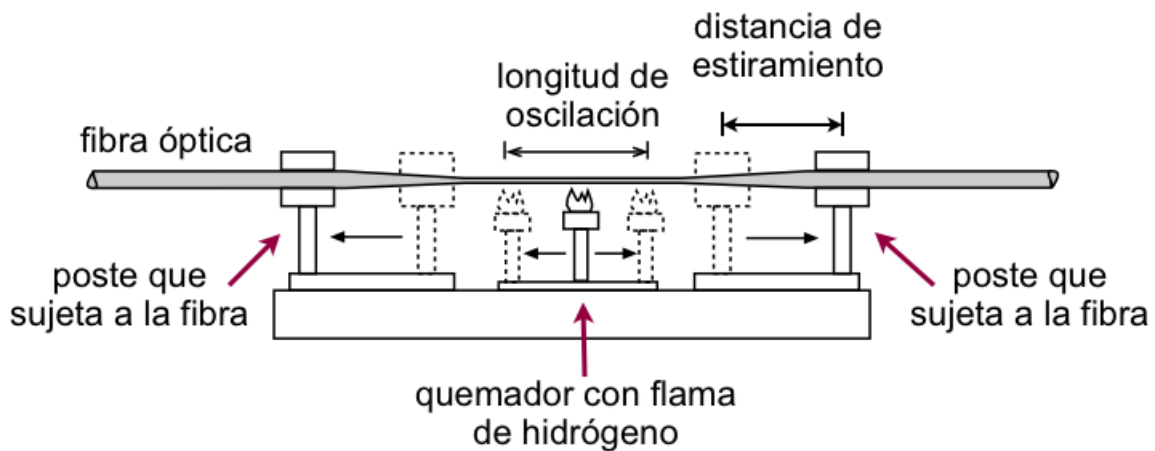


Figura 28: Diagrama de la estación de trabajo Dowson. Los postes que sujetan a la fibra se van alejando uno del otro para mantener a la fibra en tensión, al mismo tiempo que la flama oscila una longitud constante por debajo de la zona de la fibra que se va a adelgazar.

3.1.3. Obtención del diámetro y la longitud de la zona adelgazada

Para determinar el tercer y el cuarto parámetros de adelgazamiento, se utilizó un método de *prueba y error* que se describe a continuación. Primero se eligen una *distancia de estiramiento* y una *longitud de oscilación* cualquiera, aunque se recomienda que estos parámetros iniciales se encuentren a la mitad de los rangos que permite la estación Dowson. Con estos parámetros iniciales se adelgaza a la fibra óptica, y si el diámetro de la zona adelgazada fue menor que el deseado, se adelgaza otra fibra óptica con los mismos parámetros, pero ahora se incrementa la *longitud de oscilación*. Al incrementar la longitud de oscilación se obtendrá una segunda fibra adelgazada cuyo diámetro será mayor al diámetro de la primera. Si para esta segunda fibra adelgazada el diámetro no es igual al requerido, se cambia de nuevo la *longitud de oscilación* y se adelgaza otra fibra más. De esta forma se repite el procedimiento hasta obtener una fibra adelgazada con el diámetro deseado.

Una vez que se obtuvo el diámetro deseado, ahora se buscará obtener la *longitud de zona adelgazada* requerida. La *distancia de estiramiento* es directamente proporcional a esta longitud de zona adelgazada, por lo que si la longitud fue menor que la requerida, entonces

se adelgazará otra fibra óptica incrementando la *distancia de estiramiento*. Al cambiar este parámetro, cambiarán tanto la longitud de zona adelgazada como el diámetro de la fibra. Debido a esto se adelgazarán de nuevo un grupo de fibras ópticas utilizando siempre la misma *distancia de estiramiento*, y se irá variando la *longitud de oscilación* hasta obtener de nuevo el diámetro requerido.

Este método de caracterización de la estación de trabajo Dowson tomó tiempo, y también se requiere fabricar varias fibras adelgazadas antes de obtener a una fibra adelgazada con las dimensiones deseadas. Sin embargo, una vez que se llevó a cabo esta caracterización el procedimiento es de rutina.

3.1.4. Caracterización de las fibras ópticas adelgazadas

Para determinar si el método que se utilizó para adelgazar a las fibra funciona de manera correcta y repetible se caracterizan las dimensiones de las fibra adelgazadas que fueron fabricadas. Las principales dimensiones que se desea determinar son tres, el diámetro de la zona adelgazada, la longitud de zona adelgazada de diámetro constante y la longitud total de la región adelgazada.

Estas dimensiones se caracterizaron utilizando el microscopio óptico del laboratorio del Centro UNAMems, que cuenta con una cámara digital, con un monitor y con *software* que permite determinar en forma exacta las dimensiones de los objetos que aparecen en la pantalla (microscopio Nikon SMZ-1500 Zoom Stereo, rango de zoom de 0.75 a 11.25, Figura 29). Antes de realizar la caracterización se montó a la fibra óptica adelgazada en una placa de vidrio mediante cinta adhesiva, y paralela a la fibra se montó una regla para poder registrar las distancias a las que se tomaban las mediciones.

Antes de comenzar a medir las fibras adelgazadas se tuvo que calibrar el *software* del microscopio para que mostrara las dimensiones correctas. Para esto se puede utilizar una micro-regla, pero para este trabajo se utilizó a la fibra óptica misma, ya que tiene un diámetro de $125.0 \mu\text{m}$ con una tolerancia de $0.7 \mu\text{m}$ [50], lo que representa una tolerancia más que suficiente para las mediciones requeridas.



Figura 29: *Microscopio óptico Nikon SMZ-1500 del Centro UNAMems. En la foto se observan la fuente de iluminación por fibra óptica y el monitor digital que muestra las imágenes de la cámara de video.*

Una vez que se calibró el microscopio se procedió a realizar la caracterización. El método consistió en observar primero un extremo de la zona adelgazada de la fibra y luego ir recorriendo toda la longitud de la región adelgazada hasta llegar al otro extremo. El diámetro de la fibra se va anotando cada dos milímetros, distancia que se puede observar en la regla que se ha montado junto a la fibra óptica. Esta distancia de separación entre mediciones se puede variar, dependiendo si se desea mayor precisión o mayor rapidez en la caracterización. Conforme se avanza en la medición, se observa como se va reduciendo el diámetro, desde el diámetro normal sin adelgazar hasta el diámetro de la zona adelgazada, para regresar luego al diámetro original, que es el momento en que termina la caracterización.

Para cada una de las lecturas se mide el diámetro de la fibra, y la mejor forma de hacerlo es utilizando la herramienta *perpendicular measurement* del *software* del microscopio. Esta

herramienta permite trazar una línea que coincida con la orilla de la fibra óptica, y luego trazar otra línea perpendicular a la primera. Esta segunda línea será el diámetro exacto que tiene la fibra en el punto en el que se realiza la medición.

El conjunto de diámetros con respecto a la distancia registrados, se grafican en Matlab para poder observar el perfil que tiene la fibra se utiliza el *software* Matlab, donde se determinan las dimensiones de interés de la fibra utilizando la herramienta *data cursor*. Con ella se obtiene un cursor que indica el diámetro encontrado para cada uno de los puntos de la gráfica, y así se puede determinar el diámetro de la zona adelgazada, la longitud de zona adelgazada de diámetro constante y la longitud total de la región adelgazada, con lo que se ha caracterizado por completo a la fibra óptica.

3.2. Resultados

Para verificar el método de caracterización de la estación de trabajo Dowson, se obtuvieron tres fibras adelgazadas con los mismos parámetros, pero variando la *longitud de oscilación*. Se comenzó con una *longitud de oscilación* de 6 mm, luego se aumentó a 8 y a 10 mm para las fibras siguientes. Para la primera fibra adelgazada obtenida el diámetro fue de $4.57 \mu\text{m}$, y al aumentar la *longitud de oscilación* el diámetro cambió a $23.8 \mu\text{m}$, y luego aumentó a $42.5 \mu\text{m}$, como se observa en la Figura 30.

Para observar el efecto que tiene la *distancia de estiramiento*, se fabricaron 3 fibras variando este parámetro. La primer distancia de estiramiento fue de 16 mm, la segunda de 18 mm y la tercera de 20 mm. Al ir aumentando la *distancia de estiramiento* cambiaban tanto el diámetro de la zona adelgazada como la longitud de la zona de diámetro constante. Para esta prueba nos interesaba conocer la *longitud de zona adelgazada*, y se observa que dicha longitud aumenta de 5 mm a 10 mm y finalmente a 20 mm, conforme se aumenta la distancia de estiramiento (Figura 31).

El último parámetro por caracterizar es la relación de velocidades. Para esta relación se tiene que la *velocidad de oscilación* debe ser mucho mayor que la *velocidad de estiramiento*, en busca de un adelgazamiento uniforme [49]. Al comparar dos fibras adelgazadas, una

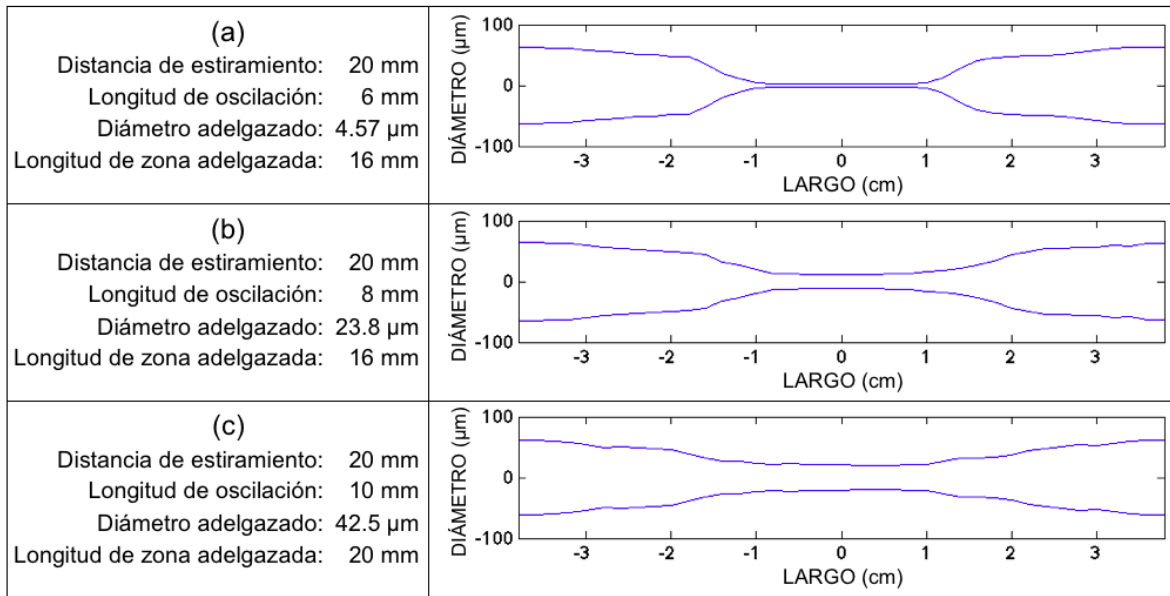


Figura 30: Cuadro comparativo que muestra cómo aumenta el diámetro de la FOA al aumentar la longitud de oscilación, para a) longitud de oscilación igual a 6 mm, b) 8 mm y c) 10 mm.

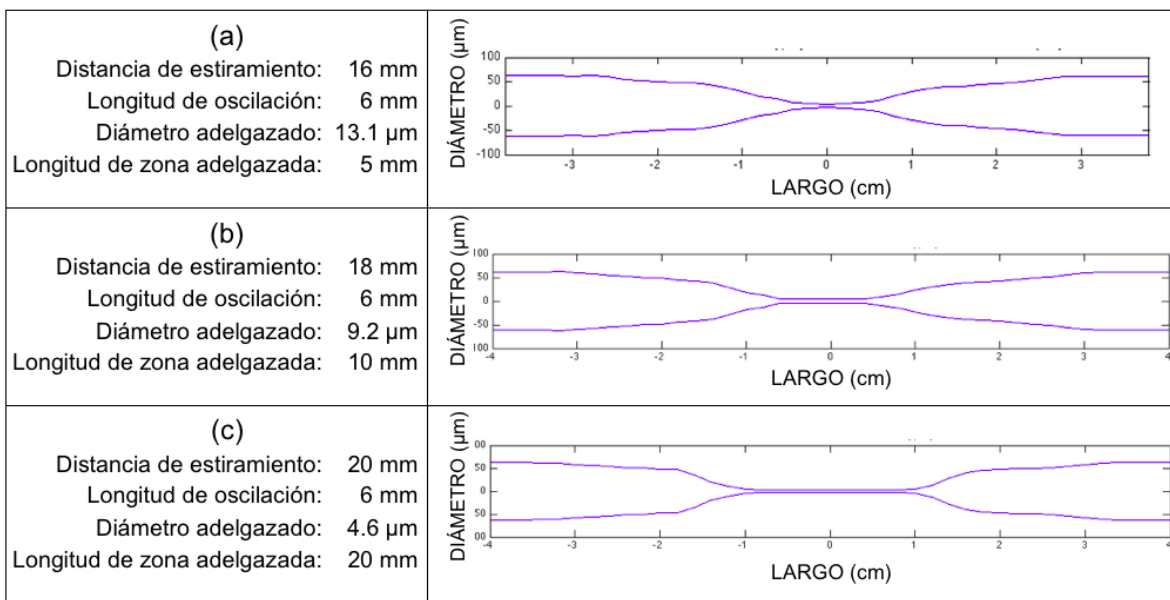


Figura 31: Incrementando el parámetro de distancia de estiramiento se aumenta la longitud de zona adelgazada, que es la zona de diámetro constante en el centro de la fibra. Su aumento fue de a) 5 mm a b) 10 mm y finalmente a c) 20 mm.

donde la *velocidad de oscilación* fue 10 veces mayor a la *velocidad de estiramiento*, y otra fibra adelgazada donde la *velocidad de oscilación* fue 100 veces mayor, se observa que para esta última fibra la longitud de la zona adelgazada fue del doble de largo (ver Figura 32).

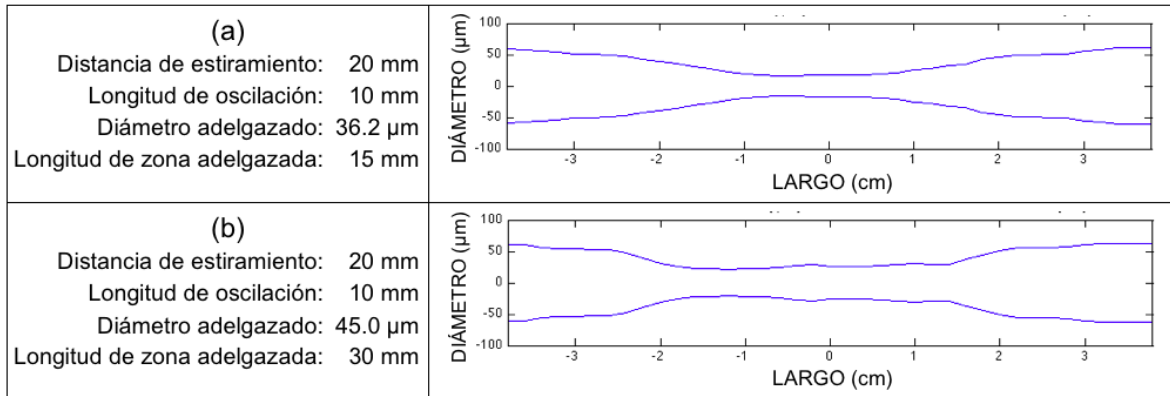


Figura 32: Para obtener un adelgazamiento uniforme se requiere que la velocidad de oscilación sea mucho mayor que la velocidad de estiramiento. Para la fibra de la parte superior la velocidad de oscilación fue 10 veces mayor, mientras que para la fibra de la parte inferior la velocidad fue 100 veces mayor. Esta última fibra presenta una zona adelgazada del doble de largo.

3.3. Resumen del método de adelgazamiento de fibras

En resumen, el procedimiento para adelgazar a la fibra con las dimensiones y perfil requeridos consta de dos pasos. El primer paso consiste en fijar un valor de *distancia de estiramiento*, y con esta distancia se fabrican varias fibras adelgazadas hasta obtener una fibra con el diámetro requerido. Este diámetro se obtiene utilizando siempre la misma *distancia de estiramiento*, pero variando la *longitud de oscilación*, tomando en cuenta que este parámetro será directamente proporcional al diámetro que se obtenga.

El segundo paso consiste en obtener la *longitud de zona adelgazada* requerida. Esta longitud es directamente proporcional al parámetro de *distancia de estiramiento*, por lo que si en el paso anterior se obtuvo una longitud de zona adelgazada menor que la deseada, ahora se probará con una *distancia de estiramiento* mayor que la inicial. Con esta nueva *distancia*

de estiramiento se repetirá el paso anterior, hasta obtener de nuevo el diámetro requerido. Una vez que se obtuvo este diámetro, se comprueba la longitud de la zona adelgazada. Si esta longitud es diferente a la requerida, se volverá a ajustar la *distancia de estiramiento* y a repetir de nuevo el primer paso del método.

Para obtener el diámetro y la longitud deseadas en la fibra adelgazada, también es necesario determinar la relación de velocidades de estiramiento. Esta relación de velocidades es la relación que existe entre la *velocidad de estiramiento* de la fibra óptica y la *velocidad de oscilación* de la flama. La literatura recomienda que la *velocidad de oscilación* sea mucho mayor que la *velocidad de estiramiento* [49]. Como se eligió una *velocidad de estiramiento* igual a la velocidad que se ha utilizado para fabricar acopladores con la estación de trabajo Dowson, entonces faltaba determinar la *velocidad de oscilación*. Se determinó que una relación de velocidades de 10 a 1 no era suficiente, por lo que finalmente se optó por que la *velocidad de oscilación* fuera 100 veces mayor que la *velocidad de estiramiento*, lo que produce una *zona caliente* uniforme durante el proceso de adelgazamiento de la fibra óptica. Así se produjo sistemáticamente fibras adelgazadas uniformes y con las dimensiones requeridas.

4. Caracterización experimental de la RFPL

Una vez que se contó con las micro-rejillas de polímero PDMS y con la fibra óptica adelgazada, se procedió a realizar el experimento donde se indujo la *rejilla de fibra de periodo largo* (RFPL). Para producir la RFPL se tiene que poner en contacto a las dos micro-rejillas de PDMS con la zona adelgazada de la fibra óptica, y para comprobar que la RFPL funciona, se monitorea el espectro óptico de la luz que viaja por la fibra donde los picos de atenuación indicarán que únicamente ciertas longitudes de onda están siendo filtradas. Además de comprobar que se produce la RFPL, también se realizarán otras pruebas de caracterización del sistema como sensor, donde se variará tanto la fuerza con que las micro-rejillas presionan a la fibra como la temperatura a la que se encuentra la RFPL.

4.1. Arreglo experimental

Para poder realizar los experimentos lo primero que se hace es montar la fibra óptica en una placa para poderla manipular con facilidad. Esto se hace debido a que las fibras ópticas adelgazadas son muy frágiles, y se rompen fácilmente si no se manipulan con cuidado. La manera que se eligió para montar a la fibra consistió en utilizar una placa de vidrio como base, y encima de ella se montaron dos portaobjetos de microscopio, sobre los que se colocó a la fibra adelgazada, como se observa en el esquema de la Figura 33. Los portaobjetos se colocan de forma que exista una separación entre ellos, buscando que apoyen a la fibra adelgazada, pero manteniendo la zona adelgazada de la fibra suspendida en el aire. Esto con la finalidad de dejar un espacio entre la placa de vidrio y la fibra para posteriormente colocar uno de los dispositivos de PDMS justo debajo de la zona adelgazada.

Una vez que se montó la fibra adelgazada sobre la placa de vidrio es más sencillo manipular a la fibra para poder armar el arreglo experimental. Para conocer la respuesta espectral se conecta la fuente de luz, que se trata de un LED infrarrojo con un ancho espectral de 100 nm modelo MPS-8012 de la marca *ILX Lightwave*, en uno de los extremos de la fibra, y en el otro extremo se conecta el analizador de espectros ópticos 8614OB de la marca *Agilent*. Con

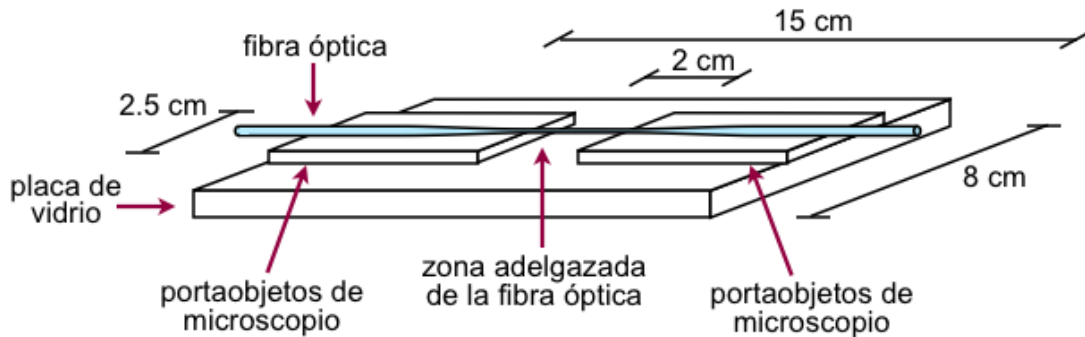


Figura 33: Esquema que muestra a la fibra óptica adelgazada montada sobre una placa de vidrio. La región adelgazada se encuentra suspendida en el aire para colocar debajo de ella una de las micro-rejillas de PDMS, posteriormente.

este arreglo experimental se puede obtener el espectro de la fibra adelgazada antes y después de inducir la RFPL con la micro-rejilla de polímero (Figura 34).

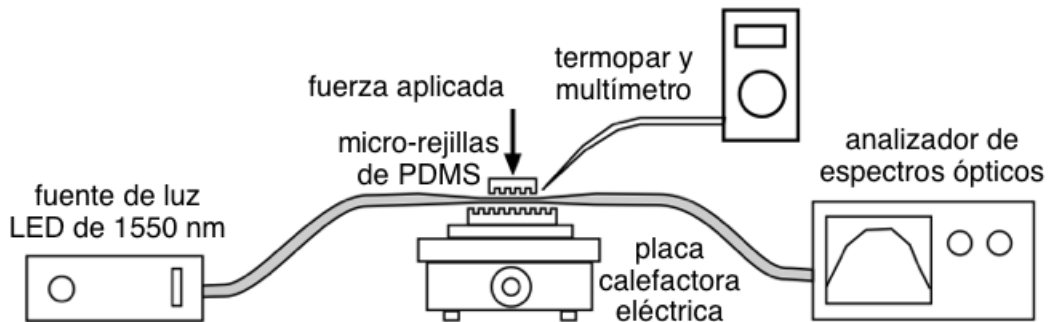


Figura 34: El arreglo experimental utilizado muestra el espectro de la luz que es producida por el LED infrarrojo y que atraviesa la fibra óptica adelgazada. Se utiliza una placa calefactora eléctrica para producir cambios en la temperatura, y estos cambios son monitoreados por un termopar y un multímetro.

Una vez armado el arreglo anterior se colocan las micro-rejillas que inducen la RFPL. Para esto se introdujo a la primer micro-rejilla en el espacio que existe entre la placa de vidrio y la fibra óptica, y la micro-rejilla superior se coloca encima de la zona adelgazada de la fibra óptica, como se muestra en la Figura 35.

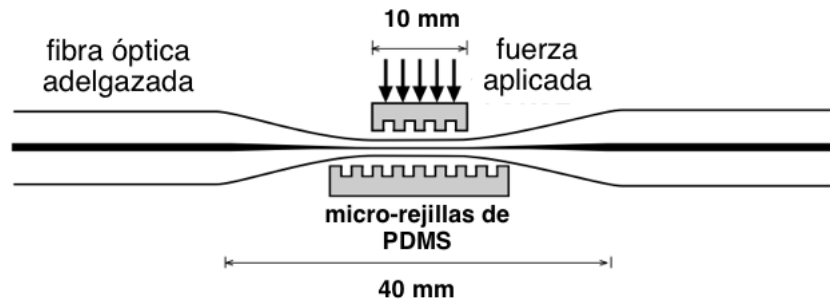


Figura 35: Las micro-rejillas son aplicadas a la fibra óptica adelgazada, una por debajo y la otra por encima de ella. Al coincidir sus canales se observarán los picos de atenuación en el espectro óptico al momento de aplicar fuerza sobre la rejilla superior.

4.2. Pruebas de variaciones en la fuerza aplicada y en la temperatura

Una vez que las dos micro-rejillas se encuentran colocadas por encima y por debajo de la fibra óptica, se procedió a inducir la RFPL en la fibra. Para inducir la RFPL se tiene que ejercer una ligera presión sobre la micro-rejilla que se encuentra encima de la fibra, para lo cual se utilizaron pequeñas pesas que se colocaron sobre el portaobjetos en el que está montada la rejilla superior (Figura 36). Al aplicar la fuerza se deberán de observar los picos de atenuación en el espectro que indican que se está produciendo la RFPL. Si los picos de atenuación no aparecen, significa que las micro-rejillas no están alineadas, por lo que será necesario el reposicionar a la micro-rejilla superior, hasta que se observe que se forman los picos en el espectro. Para producir los picos de atenuación se aplicó una fuerza de 688 mN sobre las micro-rejillas, y se observó que los picos de atenuación desaparecen al momento de quitar la presión que se aplica a las micro-rejillas (Figura 37).

En cuanto se comprobó que la RFPL sí está siendo inducida en la fibra óptica, se procedió a variar la fuerza que se aplica sobre las micro-rejillas, y a observar el efecto que estas variaciones producen en el espectro óptico. Para lograr esto se fue aumentando el peso que se aplica a micro-rejilla superior y se fueron capturando los espectros ópticos mediante la función de memoria del analizador de espectros. Antes de aplicar la fuerza, se observa el espectro original de la fibra adelgazada, y al comenzar a aplicar la presión, el espectro óptico se

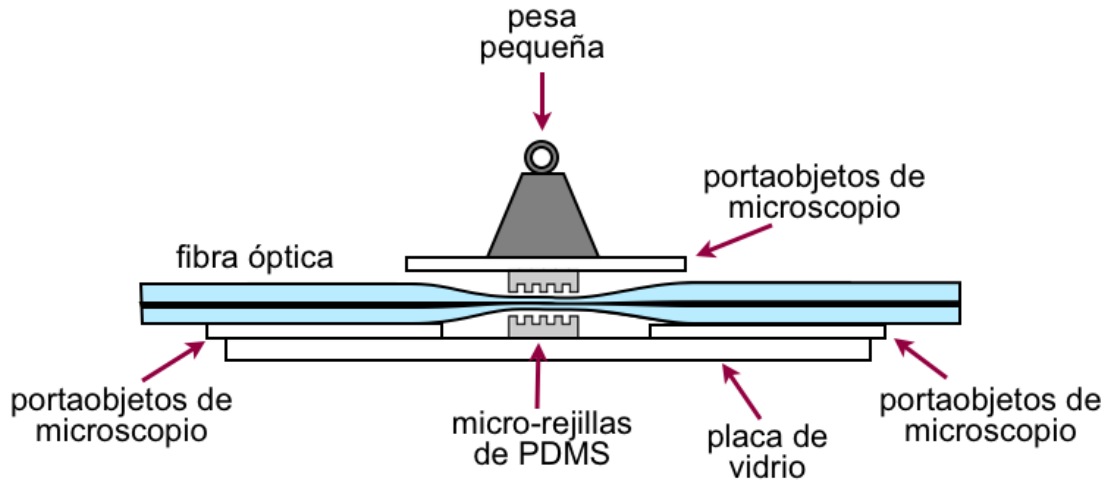


Figura 36: Esquema con vista lateral que muestra como se aplica presión a la la fibra óptica adelgazada. La fuerza se aplica con una pequeña pesa que se coloca sobre el portaobjetos que está sujeto a la micro-rejilla superior.

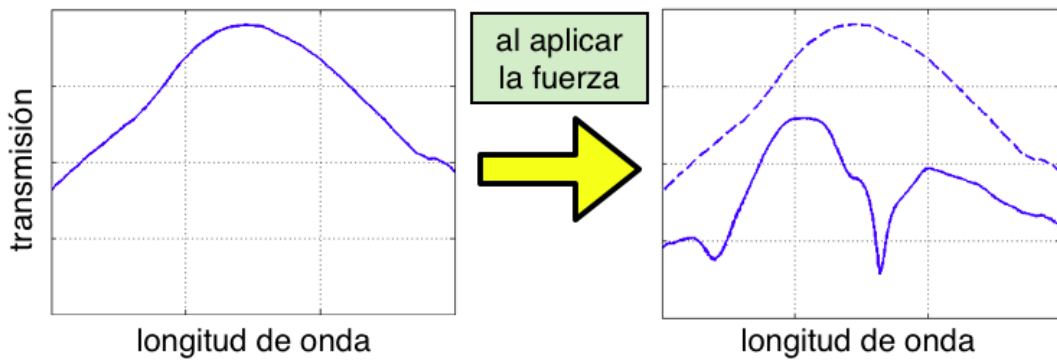


Figura 37: Los picos de atenuación se producen en el espectro óptico únicamente cuando las micro-rejillas ejercen presión sobre la fibra óptica adelgazada.

atenúa primero y luego comienza a aparecer el primer pico de atenuación. Al ir aumentando la fuerza, el pico de atenuación aumenta, y luego se forma un segundo pico de atenuación al lado del primero. Conforme se sigue aumentando la fuerza los picos de atenuación alcanzan un máximo, y al continuar aumentando la fuerza a partir de este máximo los picos comienzan a *decrecer*, en vez de incrementar su amplitud. Al llegar a este punto ahora se comienza a disminuir la fuerza aplicada, con lo que los picos de atenuación regresan a su máximo, y

al continuar disminuyendo la fuerza los picos de atenuación van disminuyendo hasta desaparecer por completo. Al desaparecer los picos de atenuación el espectro óptico regresa a su estado original, lo que sucede en el momento en el que se deja de aplicar presión a las micro-rejillas (Figura 38).

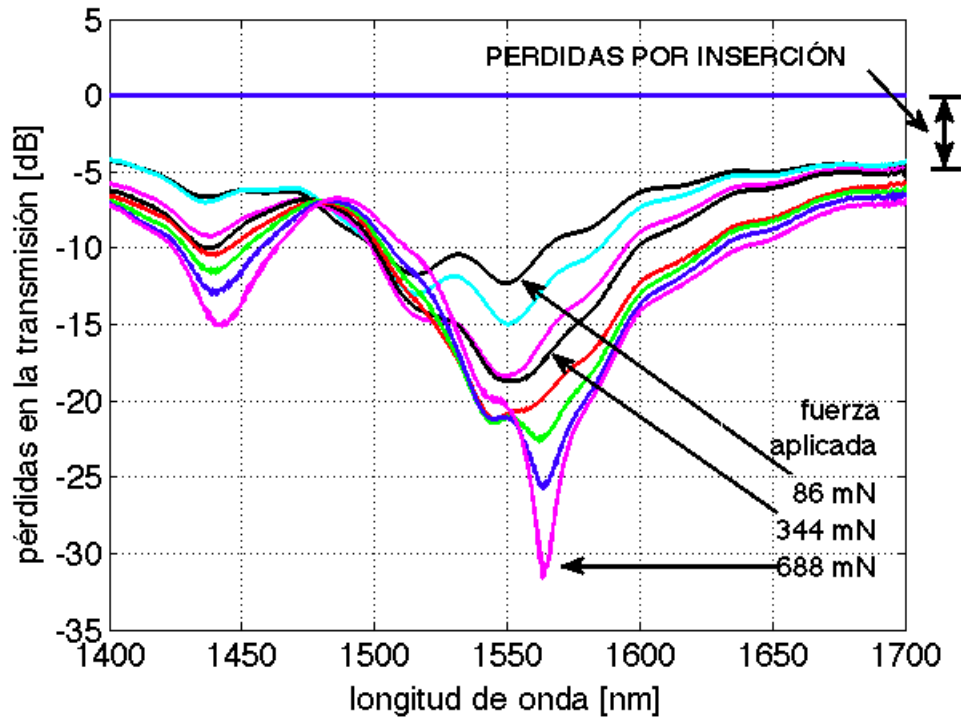


Figura 38: En esta gráfica normalizada se observa cómo, al aumentar la fuerza aplicada sobre las micro-rejillas, la amplitud de los picos de atenuación se va incrementando, hasta llegar a un máximo. En esta gráfica también se observan las pérdidas por inserción que se producen al aplicar las micro-rejillas de PDMS.

En la Figura 38 también se pueden observar las pérdidas por inserción que se producen al aplicar las micro-rejillas de PDMS. Las pérdidas por inserción son una medida de la atenuación que se produce en la potencia de la luz y que es debida a la inserción de un dispositivo dentro de una fibra óptica. Las pérdidas por inserción de la RFPL que se fabricó se deben principalmente a dos factores, el primero es debido a las *pérdidas por adelgazamiento* que sufre la señal óptica al pasar por la región adelgazada de la fibra y que se producen

independientemente de que se apliquen o no las micro-rejillas externas. Estas pérdidas por adelgazamiento fueron registradas durante el proceso de adelgazamiento de la fibra óptica, y son iguales al cambio de la potencia de la señal antes y después de adelgazar la fibra. Se adelgazaron 4 fibras de $20\ \mu\text{m}$ de diámetro, y el promedio de las pérdidas por adelgazamiento es de 0.61 dB. El segundo factor de pérdidas por inserción se refiere a las pérdidas que se producen al momento de aplicar las micro-rejillas de PDMS a la fibra óptica adelgazada, y para determinarlas se observa en el espectro óptico qué tanto disminuye la potencia de la señal en las regiones que no están siendo filtradas por la RFPL, tal como se muestra en la Figura 38. Estas pérdidas producidas al aplicar las micro-rejillas externas fueron de 7.11 dB, por lo que las pérdidas por inserción totales que se obtuvieron para la RFPL que se fabricó son de 7.72 dB.

Luego de las pruebas de variaciones en la fuerza aplicada ahora se varió la temperatura a la que se encuentra el dispositivo. Estas variaciones de temperatura se produjeron manteniendo constante la fuerza aplicada a las micro-rejillas. Para aumentar la temperatura se colocó la placa de vidrio que contiene a la fibra adelgazada sobre una placa calefactora eléctrica variable, y para medir los cambios de temperatura se utilizó un termopar conectado a un multímetro. Los espectros ópticos a diferentes temperaturas se fueron capturando a intervalos regulares utilizando la función de memoria del analizador de espectros. Para todas las temperaturas se aplicó una fuerza de 688 mN, que es la fuerza con la que se obtuvo el máximo pico de atenuación. La temperatura se varió en un rango que fue desde 40 hasta 80°C , y al ir aumentando la temperatura se observó, en el espectro óptico, que el pico de atenuación se va desplazando, desde su posición original, hacia longitudes de onda menores, obteniéndose un desplazamiento desde los 1542 nm hasta los 1528 nm (Figura 39). En la Figura 40 se graficó la longitud de onda del pico de atenuación contra la temperatura, y la recta que se ajusta a los valores encontrados tiene una pendiente de $m = -3.1$, lo que significa una variación de -0.32 nm por grado centígrado.

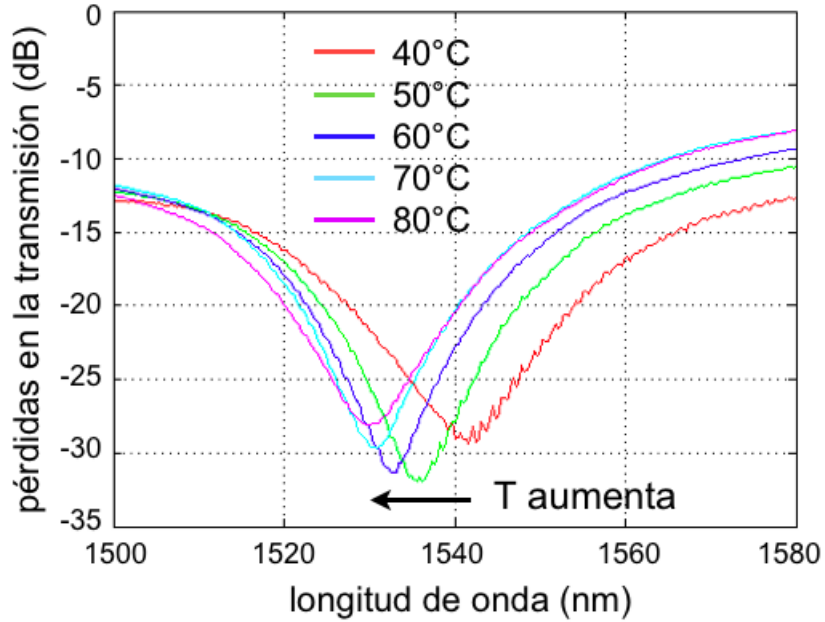


Figura 39: Gráfica normalizada donde se muestra la forma en que el pico de atenuación se va desplazando hacia longitudes de onda menores conforme aumenta la temperatura.

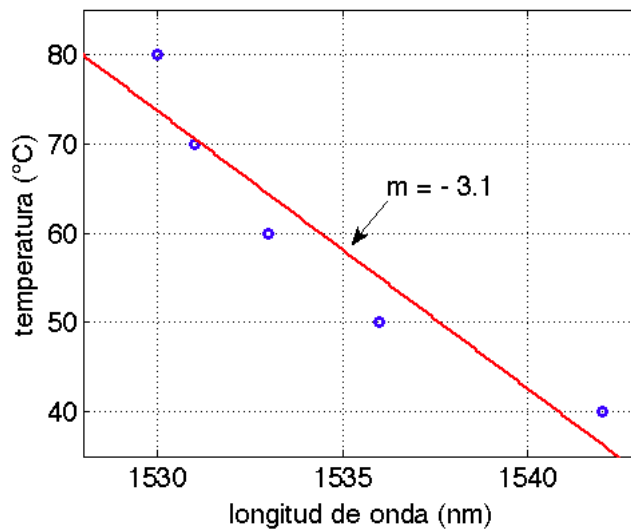


Figura 40: Esta gráfica muestra el cambio de la longitud de onda del pico de atenuación conforme cambia la temperatura. Sobre la gráfica se ajustó una recta utilizando la herramienta Basic Fitting de Matlab, y la pendiente de 3.1 obtenida representa un cambio de -0.32 nm por grado centígrado.

Conclusión y discusión de los resultados

Conclusión

En esta tesis se presenta la prueba de concepto de una *rejilla de fibra de periodo largo* (RFPL) producida por una fibra óptica adelgazada, de tipo monomodal, en combinación con una microestructura polimérica de bajo costo y rápida fabricación. En este trabajo se utilizó por primera vez, hasta donde tenemos conocimiento, el polímero polidimetilsiloxano (PDMS) para fabricar dicha microestructura. Las micro-rejillas que se habían utilizado antes utilizan materiales metálicos, y al utilizar el PDMS la fabricación del dispositivo se vuelve sencilla y de muy bajo costo, además de que al utilizar un polímero para producir la RFPL se brinda transparencia óptica, biocompatibilidad y además la posibilidad de incorporar este tipo de RFPL junto con otros dispositivos basados en polímeros, como pueden ser dispositivos ópticos y de microfluidos.

La idea para este proyecto de tesis surgió del deseo de investigar la interacción entre las microestructuras poliméricas de PDMS y las fibras ópticas adelgazadas. Ya se habían utilizado antes microestructuras metálicas para producir las RFPL en fibras ópticas adelgazadas, pero se encontró que, si en lugar de ellas se utilizaban microestructuras de PDMS, la fabricación se facilitaría enormemente y además una RFPL basada en PDMS tiene la posibilidad de utilizarse como un sensor de temperatura o de índice de refracción para aplicaciones que requieran de materiales altamente biocompatibles. Esta posible aplicación dentro del área biomédica fue lo que motivó finalmente la elección de este tema de tesis.

Discusión de los resultados

Al analizar los resultados de los experimentos con la *rejilla de fibra de periodo largo* (RFPL) se observaron varios puntos, siendo el primero que al variar la fuerza con que las micro-rejillas presionan a la fibra óptica se produjeron variaciones en la amplitud de los picos de atenuación del espectro de transmisión. El comportamiento de los picos de atenuación

consistió en que, conforme se aumentó la fuerza, la amplitud de los picos aumentó hasta alcanzar un máximo, y a partir de este máximo la amplitud comienza a disminuir, aunque se siga aumentando la fuerza. La fuerza se varió en un rango que fue desde los 86 mN hasta los 688 mN, lo que provocó que la magnitud del pico de atenuación de 1564 nm variara desde cero, cuando no se aplicaba ninguna fuerza, hasta alcanzar una atenuación máxima de 31.6 dB. La atenuación para cuando se utilizan micro-rejillas metálicas en vez de micro-rejillas de polímero PDMS es de ~ 21 dB [5], aunque en dicho artículo no se especifica si ésta es la atenuación máxima que se puede lograr.

Además de las pruebas de variación en la fuerza aplicada, también se realizó un experimento donde se varió la temperatura a la que se encontraba el dispositivo, con el propósito de caracterizar el funcionamiento de la RFPL como sensor. Se graficaron los desplazamientos de la longitud de onda del pico de atenuación con respecto a las variaciones de temperatura, sobre esta gráfica, se ajustó una recta cuya pendiente indica que la longitud de onda del pico de atenuación disminuyó 0.32 nm por cada grado que aumentó la temperatura, lo que representa una sensibilidad respecto a la temperatura de -0.32 nm/ $^{\circ}$ C (Figura 40). Esta sensibilidad es del mismo orden que los -0.24 nm/ $^{\circ}$ C que se obtienen cuando se utilizan micro-rejillas metálicas en vez de micro-rejillas de PDMS [5], por lo que la RFPL fabricada sí podrá ser utilizada como un sensor de temperatura. Sin embargo, para poder hacer una mejor comparación de la respuesta de ambos tipos de RFPL, sería deseable comparar el desplazamiento que experimenta el mismo pico de atenuación, ya que cada pico presenta diferentes sensibilidades con respecto a la temperatura, pues ésta afecta de forma distinta a las constantes de propagación β de cada uno de los modos de la fibra óptica [3]. Para determinar a qué modo del revestimiento corresponde el pico de atenuación que aparece en la Figura 39 se tendría que modificar el arreglo experimental, pues el utilizado sólo permite observar en forma clara uno de los picos de atenuación.

La RFPL basada en micro-rejillas de PDMS presentó una sensibilidad con respecto a la temperatura del mismo orden que las RFPL basadas en micro-rejillas de aluminio, sin embargo las características del PDMS cambian con la temperatura en forma distinta a como

cambian las características del aluminio, por lo que hace falta determinar si esto tendrá un efecto adverso en la RFPL que se produzca. Los cambios de temperatura en el PDMS producen dos efectos que pueden afectar el funcionamiento de la RFPL. El primero es la expansión térmica, que hace que el volumen del dispositivo aumente conforme aumenta la temperatura, lo que provocará que el periodo de las micro-rejillas también se incremente. El coeficiente de expansión térmica del PDMS es trece veces mayor que el del aluminio, por lo que el periodo de una micro-rejilla de PDMS aumentará más que el periodo de una micro-rejilla de aluminio. El coeficiente de expansión térmica del PDMS es de $\alpha = 0.0003^{\circ}\text{C}^{-1}$ [51], lo que significa que durante el experimento donde se obtuvo la Figura 39 el periodo de la micro-rejilla aumentó en un 1.2 %, desde el tamaño que tenía a 40°C hasta el tamaño que alcanzó a 80°C. Este aumento en el periodo produce que la longitud de onda del pico de atenuación se desplace hacia longitudes de onda menores [5], y como este desplazamiento ocurre en el mismo sentido que el desplazamiento producido por la sensibilidad a la temperatura del acoplamiento de modos, entonces la expansión térmica del PDMS tiende a incrementar la sensibilidad en el sensado de temperatura. El segundo efecto que produce la temperatura consiste en que el índice de refracción de PDMS disminuye conforme aumenta la temperatura [51]. Un decremento en el índice de refracción produce que la longitud de onda de los picos de atenuación se desplace hacia longitudes de onda menores [3], por lo que, al igual que en el caso de la expansión térmica, esta disminución en el índice de refracción tendería a aumentar la sensibilidad del sensor a los cambios de temperatura. Por lo tanto, el PDMS es un material que responde en forma diferente que el aluminio a los cambios de temperatura, sin embargo esta diferencia no afecta en forma adversa el funcionamiento de la RFPL sino que, al contrario, tiende a aumentar la sensibilidad del sensado de temperatura. Aún hace falta optimizar el diseño de las micro-rejillas de PDMS para poder afirmar que su sensibilidad resultó mayor que la que reportan las RFPL basadas en micro-rejillas de aluminio.

Otra de las ventajas de utilizar micro-rejillas poliméricas consiste en que su fabricación es de bajo costo. El costo de las micro-rejillas metálicas puede ser bajo cuando se produce un gran número de dispositivos, sin embargo el costo de producir unos cuantos prototipos

es generalmente elevado ya que la fabricación requiere de equipo y personal especializados. En cambio la fabricación de un número limitado de dispositivos con PDMS tiene un costo accesible, ya que el *kit* de 500 ml de *Sylgard 184* de la marca *Corning* cuesta \$60 dólares estadounidenses y con él se puede fabricar decenas de dispositivos, ya que cada uno ocupará aproximadamente 10 ml de PDMS. Los dispositivos de PDMS se pueden fabricar utilizando moldes de fotoresina SU-8 que pueden tener un costo elevado y requieren infraestructura tipo cuarto limpio, sin embargo para este trabajo se utilizaron moldes de *poliestireno termoplástico* (PST) que resultan de muy bajo costo, ya que el paquete con 10 láminas cuesta \$6 dólares, y se pueden fabricar de cuatro a seis moldes con cada lámina. Sumando el costo del PDMS y del molde de PST cada dispositivo tendrá un costo aproximado de \$1.35 dólares y el costo del material adicional que se requiere también es bajo, ya que este material se encuentra disponible en muchos laboratorios, como son cajas de Petri, jeringas, recipientes desechables, además de un horno convencional y de una campana de vacío o disecador y este equipo no requiere utilizarse dentro de un cuarto limpio.

Además de que los materiales utilizados en la fabricación de dispositivos de PDMS son de bajo costo, su rapidez de fabricación también ayuda a reducir el costo total de los dispositivos, ya que las micro-rejillas de PDMS se pueden obtener en unas cuantas horas, incluyendo la elaboración del molde. En cambio, los moldes basados en fotoresina SU-8 requieren del equipo y las instalaciones necesarias para realizar litografía óptica y el proceso es más elaborado, ya que requiere de varias etapas.

Sin embargo, el proceso de elaboración de los moldes de PST cuenta con algunos inconvenientes como que el factor de reducción de tamaño presenta variaciones y que los patrones impresos en las láminas pueden sufrir ligeras deformaciones durante el proceso de reducción de tamaño. La variabilidad que presentan los moldes de PST al encogerse es un inconveniente para fabricar dispositivos en grandes cantidades, sin embargo su bajo costo y rapidez de fabricación son ventajas muy importantes durante la etapa de pruebas de los diseños nuevos. Durante esta etapa se fabrican varios prototipos con variaciones en el diseño para poder comprobar que el diseño final que se elija funcionará correctamente. Por lo tanto la utilización

de moldes de PST es especialmente recomendable para la fabricación de prototipos y de un número limitado de dispositivos, ya que la fabricación rápida y a bajo costo hará posible que mayor número de grupos de investigación puedan probar el funcionamiento de conceptos novedosos antes de tener que invertir grandes cantidades en su desarrollo.

Además de que la fabricación de los moldes de PST es más sencilla que la fabricación de moldes de fotoresina SU-8, también existe la ventaja de que los moldes de PST permiten cambiar la forma de la sección transversal de los micro-canales. En particular se deseaba que los canales tuvieran una sección transversal en forma de *V*, para que la presión se ejerciera en forma puntual sobre la fibra óptica. Como los moldes de PST se imprimen cinco veces en forma consecutiva con la impresora láser, es posible variar el ancho de las líneas que se van sobre-imprimiendo, con el fin de controlar la forma de la sección transversal de los patrones impresos, como se presentó en la Figura 16 de la Sección 2.2 y en el Apéndice F. Debido a esto la utilización de moldes de PST permite obtener micro-canales con distintos perfiles de sección transversal, como pueden ser perfiles redondeados o en forma de *V*, mientras que los moldes basados en fotoresina SU-8 únicamente permiten obtener perfiles rectangulares.

Independientemente del tipo de molde que se utilice para fabricar los dispositivos de PDMS, este polímero cuenta con la ventaja de que es un material biocompatible [40]. Esta característica es importante dentro del área de los microfluidos, ya que para realizar ensayos biológicos es fundamental que el material utilizado no resulte tóxico para las células y proteínas utilizadas. El PDMS también es ampliamente utilizado en microfluidica debido a sus propiedades elásticas, ya que favorecen el sellado de canales y facilitan el funcionamiento de dispositivos tales como actuadores neumáticos. También se ha utilizado para desarrollar una gran cantidad de componentes microfluidicos como son válvulas, mezcladores y bombas, por lo que una rejilla óptica fabricada con PDMS será compatible con estos componentes. La utilización de micro-rejillas de PDMS en vez de micro-rejillas metálicas hace posible integrar este tipo de sensores en sistemas de microfluidos para aplicaciones biotecnológicas.

Otra de las ventajas del PDMS es su transparencia óptica. Esta transparencia existe desde el rango visible y hasta llegar a longitudes de onda cercanas a los 300 nm, en el rango del

ultravioleta [23]. Además la transmitancia de la luz es muy alta, mayor al 95 % [37]. Debido a estas características el PDMS se ha utilizado en la fabricación de distintos componentes ópticos, como son lentes y guías de onda [39, 37]. Las características ópticas del PDMS también son importantes para las aplicaciones con microfluidos, ya que muchos sistemas de diagnóstico a micro-escala se apoyan en métodos de sensado por luz y se beneficiarían enormemente de contar con vías de conducción de luz integradas. Por lo tanto la transparencia óptica del PDMS hace posible la utilización del sensor desarrollado en este trabajo dentro de sistemas que realizan la detección de sustancias mediante luz visible o luz ultravioleta, y también es posible la integración con sistemas que contengan otros componentes ópticos basados en PDMS.

Como se ha visto el polímero PDMS tiene ventajas sobre los materiales metálicos para la fabricación de rejillas ópticas, sin embargo es importante remarcar que no se pudo inducir la RFPL sin tener que presionar sobre la fibra óptica. Esta presión no es necesaria para las RFPL inducidas por micro-rejillas metálicas en fibras adelgazadas, ya que la onda evanescente que viaja a través de la fibra adelgazada se encuentra en contacto con el medio externo, por lo que puede detectar la presencia de la micro-rejilla aun sin estar en contacto con ella [5]. Esta necesidad de presionar puede ser debida a que los micro-canales de PDMS fabricados no cuentan con la profundidad suficiente, ya que su profundidad es de sólo una quinta parte del ancho que tiene el canal. Debido a esto es posible que las diferencias de índice de refracción en la superficie de la micro-rejilla no sean lo suficientemente grandes como para ser detectadas por la onda evanescente mas que cuando la micro-rejilla de PDMS se encuentra en estrecho contacto con la zona adelgazada de la fibra, lo que ocurre al aplicar presión sobre las micro-rejillas. Por lo tanto se sugiere como trabajo a futuro intentar aumentar la profundidad de los canales de la micro-rejilla de PDMS para poder inducir la RFPL sin tener que presionar a la fibra óptica, para lo cual se puede optimizar la fabricación de los moldes de PST, o también se pueden utilizar moldes de fotoresina SU-8.

Para disminuir la fuerza que se tenía que aplicar sobre la micro-rejilla de PDMS para producir la RFPL en la fibra óptica, se utilizaron dos micro-rejillas de PDMS en vez de una

sola. Aunque sí era posible inducir la RFPL con una sola micro-rejilla, se requería aplicar mucha fuerza, por lo que era difícil controlar el experimento. Debido a esto, se probó presionar a la fibra utilizando dos micro-rejillas de PDMS idénticas, colocando una debajo de la fibra y la otra por encima de ella. Al hacer esto la presión que se requirió fue mucho menor, con lo que se consiguió mayor control en el experimento. Hasta donde sabemos nunca antes se habían utilizado dos micro-rejillas en vez de una sola para inducir una RFPL, y como la alineación de las dos micro-rejillas afecta a los picos de atenuación en el espectro, esto se podría utilizar como base para el diseño de un sensor de desplazamiento.

Otra diferencia entre las micro-rejillas de PDMS y las micro-rejillas metálicas consiste en que el PDMS es un material más blando, lo que puede provocar que los micro-canales se deformen al ser presionados. Como se vio en la Sección 4.2, los picos de atenuación se incrementan hasta alcanzar un máximo, para luego disminuir. Esto puede deberse a que al pasar de cierta fuerza, las micro-estructuras de PDMS comiencen a deformarse y dejan de inducir la RFPL. Otra explicación es que este fenómeno se debe al comportamiento normal de las RFPL, ya que la función de transferencia de energía para los modos acoplados es del tipo sinc^2 (ver Sección 1.3.1). Para determinar cuál de las dos explicaciones es la correcta se puede partir del hecho de que, si se está dejando de inducir la RFPL por deformación del PDMS, entonces todos los picos de atenuación tendrán su máximo para una misma presión. En cambio, si la disminución de los picos se debe a la función de transferencia de energía de las RFPL, entonces cada uno de los picos de atenuación tendrá su máximo para presiones diferentes [6]. Por lo tanto, es posible que el hecho de que el PDMS sea un material más blando que los metales afecte la respuesta de la RFPL, sin embargo esto no se pudo verificar, ya que el ancho espectral de la fuente de luz utilizada no permite observar más que uno de los picos de atenuación en forma clara, por lo que se sugiere como trabajo a futuro la utilización de otra fuente de luz que permita observar al menos dos de los picos de atenuación.

Además de que el PDMS es más blando que los materiales metálicos, otra diferencia que tiene respecto a ellos consiste en que el rango de temperaturas que soporta es más limitado. En el caso del aluminio se puede llegar hasta los $+660^{\circ}\text{C}$. En comparación, el PDMS

tiene un rango de operación que va de los -50°C hasta los $+200^{\circ}\text{C}$ [52]. Aunque éste es un rango menor, sin embargo es adecuado para varias aplicaciones, como puede ser el análisis bioquímico con microfluidos, donde no es común que la temperatura exceda el punto de ebullición del agua.

Por otro lado, debido a las imperfecciones mencionadas en el proceso de fabricación no se logró controlar con exactitud el periodo de las micro-rejillas producidas. Este periodo es el que determina la longitud de onda a la cual se producen los picos de atenuación en el espectro óptico. Sin embargo, existe una técnica que se utiliza comúnmente para ajustar la longitud de onda de las RFPL producidas por micro-rejillas externas, que consiste en girar a la micro-rejilla de forma que los micro-canales que la componen cambien el ángulo que forman con el eje longitudinal de la fibra óptica. A partir de un ángulo de 90° , al ir girando a la micro-rejilla será como si su periodo fuera aumentando, pues ahora la fibra óptica ya no cortará a los micro-canales en forma transversal sino oblicua. Por lo tanto esta técnica para ajustar la longitud de onda de las RFPL puede utilizarse para solucionar el problema de que el factor de reducción de los moldes de PST no permite obtener exactamente el periodo deseado para la micro-rejilla.

Por último, con base en los puntos anteriores, se puede concluir que se cumplió el objetivo del trabajo experimental fabricando y caracterizando las micro-rejillas de polímero PDMS que produjeron una rejilla óptica de respuesta similar a las rejillas ópticas producidas por micro-rejillas metálicas, pero añadiendo características atractivas entre las que se encuentran la biocompatibilidad y la transparencia óptica, además de que la utilización de moldes de PST permitió una fabricación rápida, de bajo costo y al alcance de casi cualquier laboratorio.

Trabajo a futuro

El polidimetilsiloxano (PDMS) es un polímero homogéneo, isotrópico y durable. Además es químicamente inerte, por lo que otros polímeros no se le adhieren en forma irreversible ni reaccionan con su superficie. Es elástico, lo que facilita su desprendimiento del molde y puede servir para diversas pruebas mecánicas. La energía libre de su superficie (*interfacial free energy*) es baja, de alrededor de $21.6 \times 10^{-3} \text{ J m}^{-2}$, lo que permite que adquiera la forma de la superficie del molde. Esta energía libre también se puede modificar al aplicar plasma y luego una película de monocapas autoensambladas (SAM: *self-assembled monolayers*), con lo que la superficie se puede adaptar para que reaccione con diferentes materiales. En resumen, el PDMS es un material muy versátil, por lo que valdría la pena explorar las distintas posibilidades que existen para integrar al sensor desarrollado en este trabajo dentro de sistemas que aprovechen las otras ventajas del PDMS, en particular la posibilidad de modificar las características de la superficie de PDMS mediante películas SAM, o la fabricación de dispositivos con superficies que no son planas y que son muy difíciles de fabricar utilizando materiales no poliméricos.

Además de estas posibilidades, el trabajo a futuro que parece más prometedor es el desarrollo de un sensor de desplazamiento. Esto es debido a que la utilización de dos micro-rejillas en vez de una sola requiere que las micro-rejillas se encuentren alineadas para poder inducir la RFPL. El diseño de una RFPL que permita que las micro-rejillas se deslicen una respecto a la otra hará posible medir el desplazamiento, ya sea al cuantificar la forma en que aumenta y disminuye la amplitud de los picos de atenuación, o bien al cuantificar las veces que los picos de atenuación desaparecen y luego vuelven a aparecer conforme la alineación cambia de un canal al canal siguiente.

Otra posibilidad consiste en utilizar la RFPL como un biosensor. Los biosensores cuentan con una gran variedad de aplicaciones dentro de áreas como medicina, biología, procesamiento de alimentos y monitoreo ambiental. Ya se han creado biosensores basados en RFPL al inmovilizar sobre la superficie de la fibra óptica una película de bio-reconocimiento [8]. El elemento de bio-reconocimiento depende de la sustancia que se quiera sensor, y se

pueden utilizar enzimas, péptidos, hebras de ADN o hasta moléculas vivas. Para poder fijar un elemento de bio-reconocimiento sobre la RFPL producida por micro-rejillas de PDMS todavía hace falta resolver varios problemas, ya que las micro-rejillas dificultan el paso de las sustancias hacia la fibra óptica que realiza el bio-reconocimiento. Otra opción consistiría en investigar si el PDMS mismo puede contener al elemento de bioreconocimiento.

Dentro de las aplicaciones bio-tecnológicas y de microfluidos existen muchas posibilidades debido al PDMS que se utilizó en la fabricación de la RFPL, ya que es un material ampliamente utilizado en estas áreas. Las posibles aplicaciones se pueden agrupar en dos conjuntos. Para el primer conjunto se intentaría incorporar la RFPL como sensor dentro de un *chip* microfluídico de PDMS, donde la intención sería que la RFPL pudiera detectar parámetros como temperatura, índice de refracción o las deformaciones que experimente el dispositivo. Dentro del segundo conjunto se utilizaría un *chip* microfluídico de PDMS para modificar el funcionamiento de la RFPL. Un ejemplo sería el control de la longitud de onda a la que aparecen los picos de atenuación de la RFPL mediante modificaciones en el índice de refracción del medio que rodea la RFPL. Esto se podría lograr mediante la circulación de fluidos de índice de refracción diferentes.

Un punto que quedó pendiente dentro de este trabajo consistió en determinar si la disminución de la amplitud de los picos de atenuación ocurre debido a la deformación del PDMS o es la respuesta esperada de las RFPL inducidas por presión. Para determinar la causa se tendría que cambiar el arreglo experimental utilizado, ya que sólo permite observar con claridad uno de los picos de atenuación en el espectro. Para esto, se podría utilizar una fuente de luz con mayor ancho espectral, o también se podrían cambiar tanto el periodo de la micro-rejilla como el diámetro de la fibra adelgazada, ya que ambos factores afectan la distancia entre los picos de atenuación, con lo que se podría lograr que al menos dos picos aparecieran en forma clara dentro del espectro.

Como comentario final se puede añadir que la popularidad de las RFPL se ha incrementado en los últimos años debido a que su fabricación en serie es barata y también debido a que un gran número de dispositivos y sistemas basados en ellas se han demostrado para

múltiples aplicaciones en sensado y en comunicaciones de fibra óptica. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la mayoría de los dispositivos de sensado basados en las RFPL todavía se encuentran en una etapa temprana de desarrollo. Todavía hace falta resolver muchos aspectos prácticos antes de que puedan ser utilizadas en aplicaciones reales. En particular, el empaquetamiento y el evitar la detección de parámetros múltiples son dos problemas que resultan difíciles de resolver [53].

Apéndice A: Manuscrito publicado en la memoria del Congreso ICO 22

Referencia

Jorge A. Soto-Olmos, Laura Oropeza-Ramos and Juan Hernández-Cordero, “Low-cost and biocompatible long-period fiber gratings”, Proc. SPIE 8011, 80114S (2011); doi: 10.1117/12.902143

Low-cost and biocompatible long-period fiber gratings

Jorge A. Soto-Olmos¹, Laura Oropeza-Ramos¹, 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

In this paper, a low-cost long-period fiber grating (LPFG) induced by a polymeric microstructure is demonstrated. LPFGs are induced on a tapered optical fiber (TOF) when a periodic micro-grating comes into contact with the thin region of the fiber. The micro-grating device is made using polydimethylsiloxane (PDMS), an inexpensive, nontoxic and optically transparent polymer that is extensively used in microfluidics, organic electronics and biotechnological applications. Soft lithography, along with molds built from thermoplastic polystyrene sheets, makes the fabrication straightforward and extremely low-cost. Additionally, no precision machining is necessary and the resolution of the microstructures is limited only by the resolution of the laser printer used for patterning the polystyrene sheets.

The TOF and the micro-grating were dimensionally characterized using optical microscopy and white light interferometry, respectively. Variations on the optical spectrum due to pressure and temperature were observed and their magnitudes were similar to those obtained using metallic microstructures. Thus, LPFGs can be made in an inexpensive and expeditious way using PDMS and TOFs. These polymeric devices can be integrated into microfluidic and other lab-on-a-chip systems where biocompatibility is a valuable characteristic.

Keywords: Fiber optics component, fiber optics sensors, gratings, polymer, PDMS

1. INTRODUCTION

Long-period fiber gratings (LPFGs) have been used extensively in communications systems and in sensors¹ since they present distinct advantages over short-period Bragg gratings, particularly in development cost. The optical resonance principle also offers improved sensitivity over other types of optical fiber sensors. LPFGs additionally provide compactness and distributed sensing capabilities.²

A fiber grating consists of a periodic perturbation in the refractive index of the core of an optical fiber.¹ By using fiber-tapering techniques, it is possible to spread the field of the mode confined within the tapered fiber to the external medium. This allows for periodic refractive index perturbations to be produced on the cladding of the fiber^{3,4} or even in the surrounding medium employing an external micro-grating. A LPFG structure based on a tapered fiber with a side-contacted metal grating has been reported previously.⁵ This work motivated our interest to investigate the application of a polymeric external grating for inducing a LPFG on a tapered fiber. In particular, we investigate the use of a Polydimethylsiloxane (PDMS) grating microstructure to induce an extremely low-cost LPFG sensor.

PDMS is an inexpensive, nontoxic and optically transparent polymer. These properties make of PDMS a widely used material in areas such as biological microfluidics for automated laboratory-on-chip biochemical analysis and drug screening,⁶ optical waveguide fabrication⁷ and other optical devices.⁸ PDMS can also be micro-patterned using soft lithography methods.⁹ Efforts for developing an inexpensive molding method for soft lithography have been previously reported and these are based on pre-stressed thermoplastic polystyrene (TPS) molds, commercially known as Shrinky Dinks¹⁰. The pattern is transferred directly onto TPS sheets through a laser printer and its size shrinks when it is baked in a conventional oven. This procedure requires neither optical lithographic patterning (e.g. in SU8 resin) nor Deep Reactive Ion Etching (DRIE) on Silicon to form bulky trenches.

In this work, we demonstrate LPFGs induced by a polymeric microstructure on a tapered fiber. Our approach makes for LPFGs both inexpensive and suitable to be integrated into microfluidic and other lab-on-a-chip systems where biocompatibility is a valuable characteristic. The fabrication method is also straightforward and simpler than common LPFG fabrication methods like ultraviolet irradiation¹¹ or laser ablation of the fiber cladding.⁴ The use of external micro-grating devices additionally improves the sensitivity,⁵ provides tunability, and provides a LPFG that might be easily reconfigurable and erasable.¹²

2. LPFG PRINCIPLES

LPFGs work by coupling the guided fundamental mode in an optical fiber to forward-propagating cladding modes. These modes decay rapidly as they propagate along the fiber axis owing to scattering losses at the cladding-air interface and bends in the fiber. Since the coupling is wavelength-selective, the fiber grating acts as a wavelength-dependent loss element. As this wavelength depends also on environmental factors, LPFGs can be used in sensors for measuring strain, temperature and refractive index.¹¹

Figure 1 shows the diagram of the LPFG consisting of a tapered optical fiber with a couple of side-contacted polymer microstructure gratings. The light that propagates in the fundamental mode along the fiber is converted adiabatically to the fundamental mode in the fiber taper. When light reaches the region where the polymer micro-gratings are in contact with the fiber, mode coupling occurs when the phase-matching condition is satisfied. The loss bands in the transmission spectrum are produced when the coupled high-order modes are lost after the second tapered region.⁵

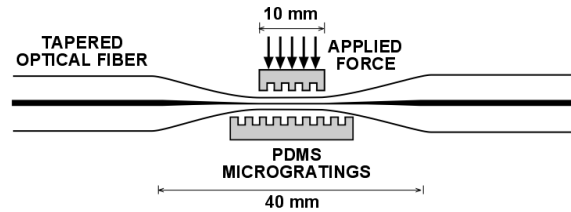


Figure 1. Schematic of a LPFG induced on a tapered optical fiber with a uniform waist and two PDMS micro-grating devices.

The micro-grating period (Λ) can induce transmission losses at wavelengths that satisfy the phase-matching condition. This can be expressed in terms of the intermodal dispersion function $\Phi(\lambda)$ defined by

$$\Phi(\lambda_m) = \frac{2\pi(n_{\text{eff},1} - n_{\text{eff},2})}{\lambda_m} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1)$$

where $n_{\text{eff},1}$ and $n_{\text{eff},2}$ are the effective indices of the two coupled modes, λ_m is the phase-matching wavelength to be determined, and Λ is the micro-grating period.⁵ The phase-matching wavelengths can be determined graphically as the intersections of the intermodal dispersion function with the grating spatial frequency $2\pi/\Lambda$, as shown in Figure 2. In this figure taken from [5], the over imposed horizontal line corresponds to a grating period $\Lambda=600\text{nm}$. This period will produce a LPFG within the 1550 nm wavelength region [5].

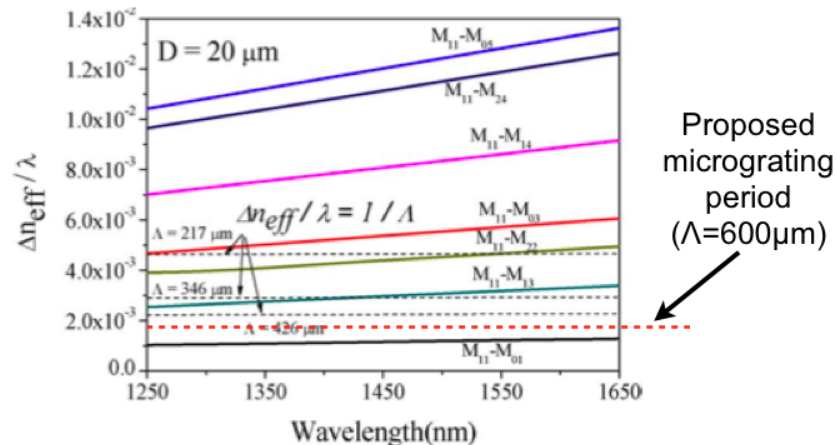


Figure 2. Micro-grating periods that satisfy the phase matching condition for different wavelength regions (taken from [5]). The over imposed line shows the period of a micro-grating that will produce loss bands in the 1550 nm wavelength region.

3. FIBER TAPERING METHOD

A fiber taper is made by heating and stretching an optical fiber thus forming a structure comprising a narrow stretched filament (the "taper waist") and two conical tapered sections. Optically, the taper transition transforms the local fundamental mode from a core mode in the fiber to a cladding mode in the taper waist.¹³ For our experiments, we employed a commercial workstation to fabricate the fiber tapers (Dowson OC-2010). This workstation employs the "flame brush" technique, in which a point-like heat source (a gas burner) travels with a constant speed in an oscillatory manner along the fiber. This produces a hot-zone where the glass becomes deformable. The ends of the taper are steadily pulled apart, so that the hot glass cylinder stretches to form a narrower cylinder, which becomes the taper waist.

The parameters that most influence the final profile of the fiber taper are the fiber elongation length, the hot-zone length, the speed of fiber elongation and the speed of oscillation of the gas burner. As long as the speed of oscillation of the gas burner is much faster than the speed of fiber elongation, a time-averaged hot-zone is produced. That leaves the fiber elongation length and the hot-zone length as optimization parameters for producing a uniform taper waist.

Table 1 shows three different fiber tapers obtained for the same elongation length of the fiber. As expected, the fiber waist diameter increases as the hot-zone length increases. Upon keeping the fiber elongation length constant we were able to obtain several fiber waist diameters by modifying the hot-zone length. The optimization procedure was carried out experimentally looking for an adequate fiber waist diameter with the proper elongation length to fit the micro-grating structures. This involved increasing the elongation length and subsequently trying several hot-zone lengths so as to obtain low losses and uniform taper waists.

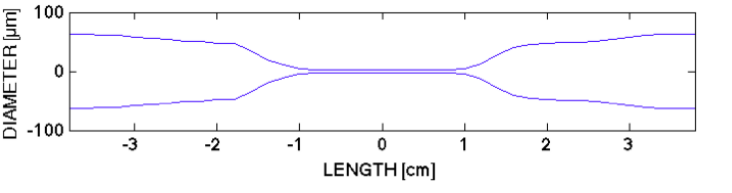
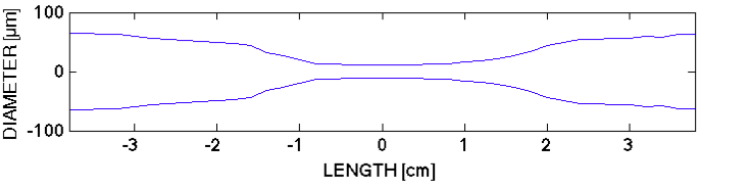
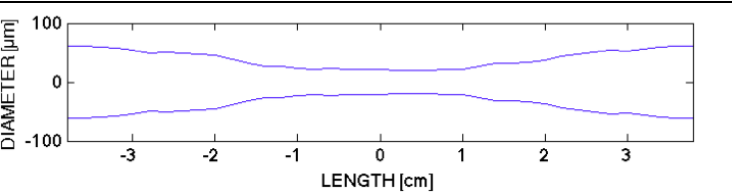
<p>(a) Fiber elongation length: 20 mm Hot-zone length: 6 mm Fiber waist length: 16 mm Fiber waist diameter: 4.57 μm</p>		
<p>(b) Fiber elongation length: 20 mm Hot-zone length: 8 mm Fiber waist length: 16 mm Fiber waist diameter: 23.80 μm</p>		
<p>(c) Fiber elongation length: 20 mm Hot-zone length: 10 mm Fiber waist length: 20 mm Fiber waist diameter: 42.48 μm</p>		

Table 1. Three different fiber tapers obtained using the same fiber elongation length. The fiber waist diameter is directly proportional to the "hot-zone" length. The taper shown in (b) was used to obtain our experimental results.

4. PDMS MICRO-GRATING FABRICATION AND CHARACTERIZATION

The PDMS micro-grating was made using soft lithography, which is a replica/molding technique.¹⁴ Soft lithography uses flexible organic molecules and materials rather than the rigid inorganic materials used in standard photolithography. The PDMS micro-grating is produced by casting the liquid PDMS prepolymer against a master mold that has a patterned relief microstructure in its surface. The elastic characteristic of PDMS (Sylgard 184 from Dow Corning) allows for it to be easily released from the master mold.⁹

Regardless of its advantages, the soft lithographic technique is limited by the availability of microfabricated masters, which generally requires photolithography, e.g., of SU8, or by micromachining Silicon or metallic structures.¹² To address this issue, we used inexpensive thermoplastic polystyrene sheets to cast master molds.¹⁰ These thermoplastic sheets are sold commercially as Shrinky-Dinks. The designed devices were printed directly with a laser printer (HP LaserJet 1320) on the thermoplastic sheets and these were subsequently placed in an oven. After heating for 3-5 minutes at 163°C, the thermoplastic sheets shrink isotropically by approximately 60% (Fig. 3). There is also an increase in height of the printed features by over 500%.¹⁰ This results in a micro-patterned mold that can be replicated in PDMS using the widely used soft lithography method. The whole process can be completed in a few hours.

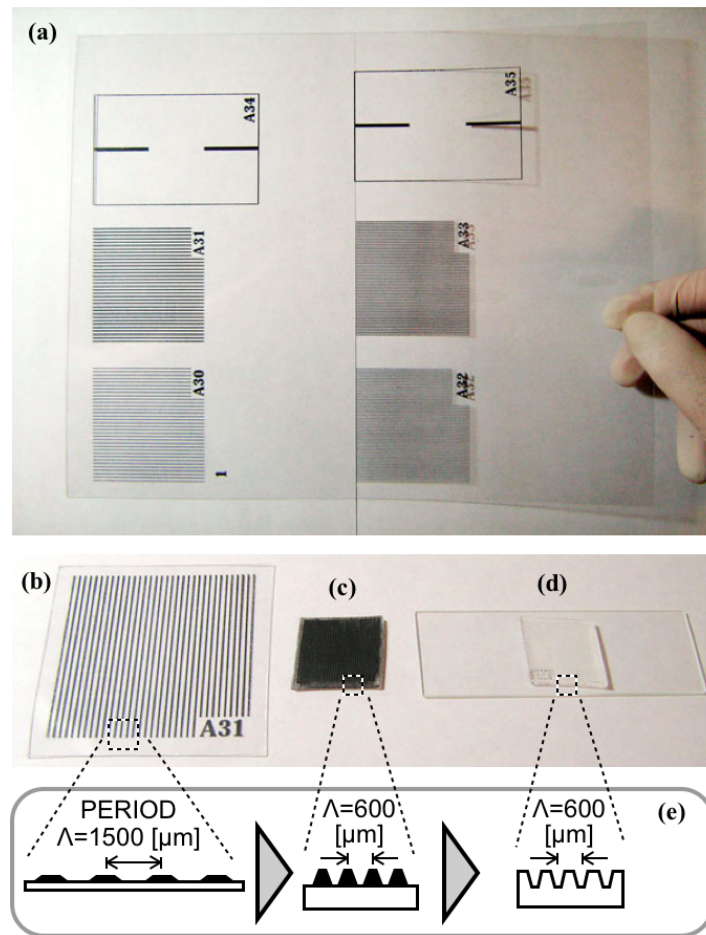


Figure 3. (a) The microstructure design was printed directly on a thermoplastic sheet using a laser printer. One of the thermoplastic masters is shown (b) before and (c) after shrinking in an oven. (d) The PDMS replica is shown mounted on a microscope slide. (e) The micro-grating period was reduced by 60% after shrinking.

The thermoplastic sheet was fed several times through the laser printer to increase the micro-channel depth. We were interested in obtaining sharp micro-channel cross-section shapes ("V" shapes) instead of the rectangular shapes produced by vertical walls. To achieve such profiles, we investigated the effects on the channel cross-sectional shape that are produced by changing the line width in each consecutive impression. Figure 4 shows several cross-sectional shapes for different line-width variation schemes. The shapes go from a deep "V" to round semi-circular channels.

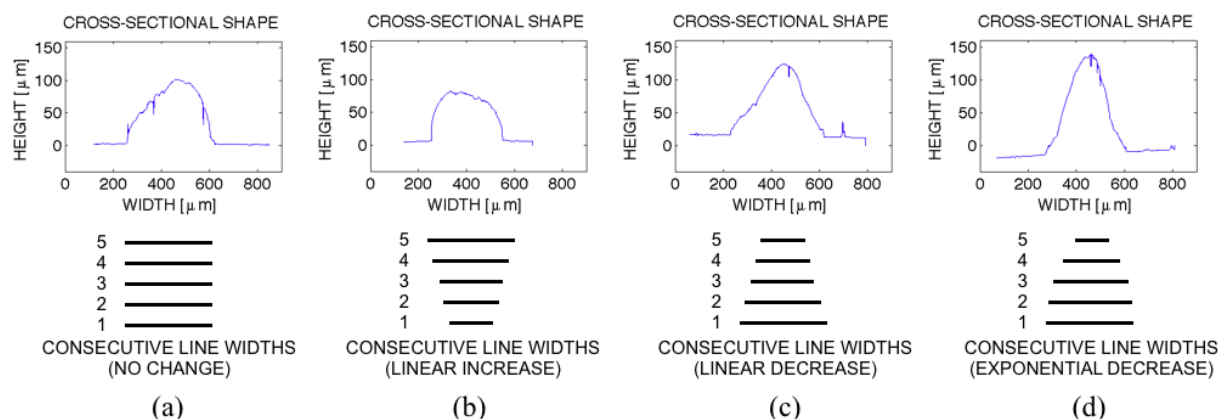


Figure 4. Four different approaches for printing five consecutive times on the thermoplastic sheets. The cross-sectional shape of the printed line (after shrinking the thermoplastic sheet) is dependent on the approach. (a) The line width of the design was kept constant through each consecutive impression. (b) The line width was increased linearly in each consecutive impression. (c) The line width was decreased linearly. (d) The line width was decreased exponentially.

Several PDMS microstructures were fabricated and subsequently characterized using the Topography Tool from Polytec, based on White Light Interferometry (MSA-400 model, Polytec, Inc.). Since the length of the devices is larger than the range covered by the MSA-400, the topographic information required post-processing using Matlab software. This is presented in Figure 5, and it can be seen that the obtained microstructures are well defined. The "V" shape that we chose for the cross-section of the micro-channels can also be observed in the figure. The 3D image shows that the surface is not as smooth as the micro-channels obtained using photoresist masters. This is probably because the laser printer does not deposit the toner structures in a completely uniform manner. Nonetheless, the fabricated microstructures performed well for our application.

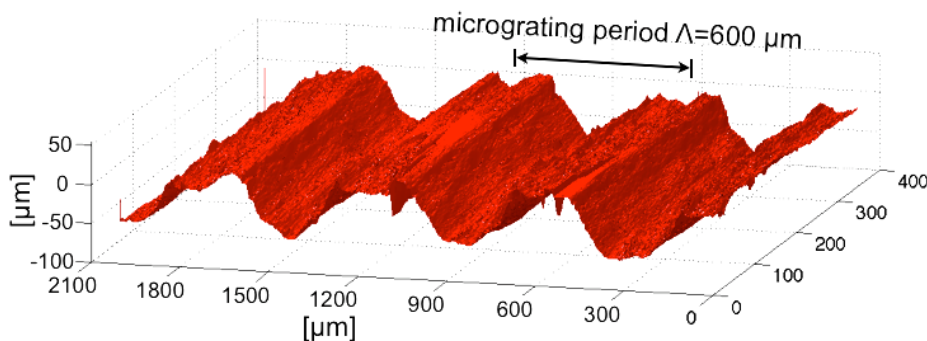


Figure 5. Microstructure topography characterization using white light interferometry.

5. EXPERIMENTAL RESULTS

The experimental arrangement employed to characterize the LPFG consisted of a 1550nm LED light source, the LPFG structure, and an Optical Spectrum Analyzer (OSA), which was used to monitor the transmission spectrum (Figure 6). The LPFG structure consists of a couple of PDMS micro-gratings with identical period. One was placed under the fiber taper waist, and the other was placed on the top of the fiber.

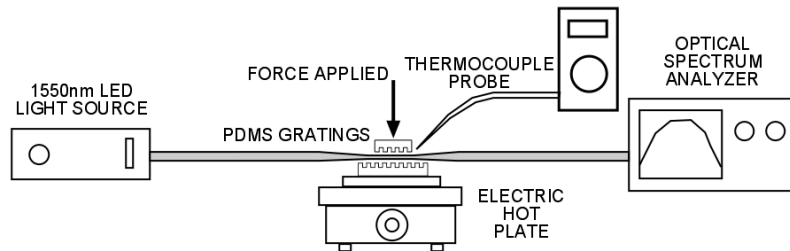


Figure 6. Experimental arrangement used for LPFG characterization.

As the top micro-grating was placed over the fiber, the transmission spectrum was slightly attenuated. When pressure (or distributed force) is applied, a transmission loss band began to appear. As the pressure was increased, the loss band increased in depth (Figure 7a), up to the point where the loss band depth began to decrease as the pressure was increased further. Figure 7a shows this behavior with applied pressure ranging from 86 mN to 688 mN. Variations of the transmission spectrum due to temperature changes (by means of an electrical hot plate) were also monitored. As the temperature is increased, the loss band shifted to shorter wavelengths, as expected (Figure 7b).

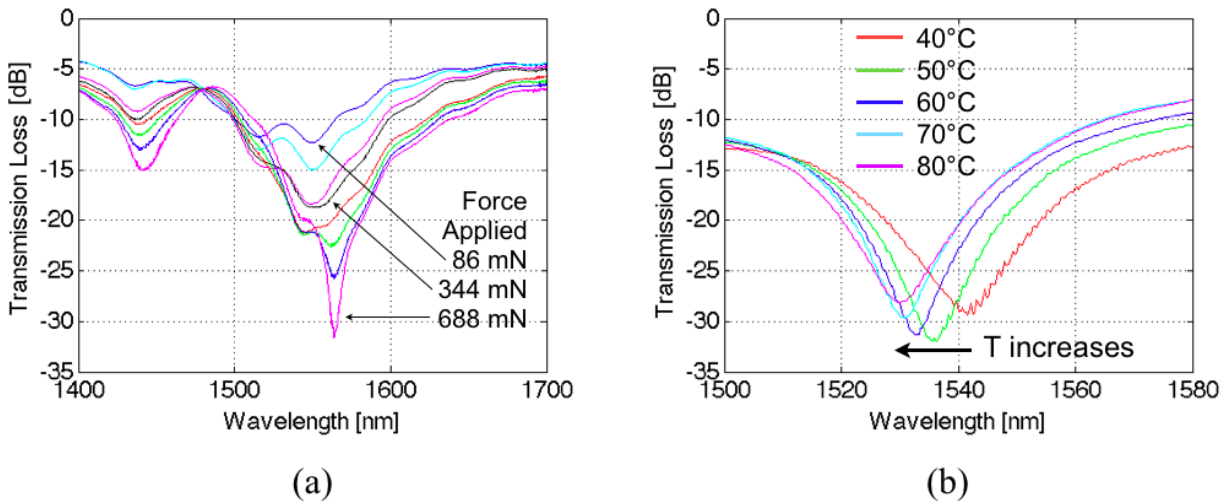


Figure 7. (a) Optical transmission spectrum of the stress-induced LPFG when increasing pressure on the micro-grating structure. (b) Experimental transmission spectra of the LPFG for different temperatures. The device parameters for both cases are fiber waist diameter $D = 20 \mu\text{m}$ and micro-grating period $\Lambda = 600 \mu\text{m}$.

6. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The LPFG structure with PDMS micro-gratings that we developed has a similar response due to temperature changes to what has been reported for LPFG structures with metallic micro-gratings.⁵ The response to variations in applied pressure is also similar.¹² Remarkably, our proposal offers a reduced fabrication cost and shorter production times. A micro-grating can be readily fabricated within hours and without the need of specialized equipment and installations, like those needed to build a micromachined metallic grating or a photoresist-based master mold.

PDMS provides excellent and proven biocompatibility,¹⁵ and offers also important advantages over other materials, including optical transparency, gas permeability and low-cost. On the other hand, PDMS microstructures are much more deformable than microstructures made of metal; this can certainly be a drawback of the proposed approach. Albeit being simple to use and inexpensive, the use of thermoplastic sheets has the disadvantage that the shrinkage tolerance from sheet to sheet is less-than-ideal for applications that require highly controlled channel sizes. Additionally, the resolution and the maximum depth of the microstructures are limited by the laser printer. Nonetheless, these resolution limits might be acceptable for a wide variety of applications involving microfluidics and LPFGs.

In conclusion, we have developed a LPFG structure with a PDMS micro-grating using a low-cost method. The performance of the proposed devices is similar to that previously shown for LPFG structures with metallic micro-gratings. Furthermore, shorter development times are evident with our approach, since materials processing is reduced compared to other methods. The use of PDMS greatly improves biocompatibility, and opens the possibility to incorporate this type of sensors in microfluidic systems, or to use PDMS waveguides and optical devices for LPFG sensor systems.

ACKNOWLEDGEMENTS

Jorge Soto-Olmos acknowledges support from the Coordinación de Estudios de Posgrado, UNAM. The authors are also grateful to the UNAMems Center (Engineering School-UNAM) where the optical topography characterization was carried out, as well as to the Biophysics of Excitable Systems Lab (Science School-UNAM) where the micro-gratings were fabricated. Technical support from Amado Velázquez-Benítez is greatly appreciated.

REFERENCES

- [1] James, S. W. and Tatam, R. P., "Optical fibre long-period grating sensors : characteristics and application," *Meas. Sci. Technol.*, 14, R49-R61 (2003).
- [2] Wang, Z. and Xiao, H., "Optical Intensity-Based Long-Period Fiber Grating Biosensors and Biomedical Applications," *IEEE Signal Proc. Mag.*, 26(2), 121-122, 124-127(2009)
- [3] Ding, W. and Andrews, S. R., "Modal coupling in surface-corrugated long-period-grating fiber tapers," *Opt. Lett.*, 33(7), 717-719 (2008).
- [4] Chen, N.-K., Hsu, D.-Y. and Chi, S., "Widely tunable asymmetric long-period fiber grating with high sensitivity using optical polymer on laser-ablated cladding," *Opt. Lett.*, 32(15), 2082-2084 (2007).
- [5] Hsu, K.-chu, Chen, N.-kuang, Lee, C.-ling, Chih, Y.-syun, Jhuang, P.-jhen and Lai, Y., "Spectral Response of Long-Period Fiber Grating Based on Tapered Fiber With Side-Contacted Metal Grating," *J. Lighthwave Technol.*, 28(7), 1057-1063 (2010).
- [6] Liu, C., "Recent Developments in Polymer MEMS," *Adv. Mater.*, 19(22), 3783-3790 (2007).
- [7] Chang-yen, D. A., Eich, R. K. and Gale, B. K., "A Monolithic PDMS Waveguide System Fabricated Using Soft-Lithography Techniques," *J. Lighthwave Technol.*, 23(6), 2088-2093 (2005).
- [8] Godin, J. M., Lien, V. and Y. Lo, "Two-Dimensional Lenses Microfabricated in PDMS for Integrated Fluidic Photonic Devices," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2006)*, paper JTuD29.

- [9] Xia, Y. and Whitesides, G. M., "Soft Lithography," *Angew. Chem. Int. Ed.*, 37, 550-575 (1998).
- [10] Grimes, A., Breslauer, D. N., Long, M., Pegan, J., Lee, L. P. and Khine, M., "Shrinky-Dink microfluidics: rapid generation of deep and rounded patterns," *Lab Chip*, 8(1), 170-172 (2008).
- [11] Vengsarkar, A. M., Lemaire, P. J., Judkins, J. B., Bhatia, V., Erdogan, T. and Sipe, J. E., "Long-Period Fibre Gratings as Band-Rejection Filters," *J. Lighthwave Technol.*, 14(1), 58-65 (1996).
- [12] Savin, S., Digonnet, M. J., Kino, G. S. and Shaw, H. J., "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings," *Opt. Lett.*, 25(10), 710-712 (2000).
- [13] Birks, T. A. and Li, Y. W., "The Shape of Fiber Tapers," *J. Lighthwave Technol.*, 10(4), 432-438 (1992).
- [14] Ziaie, B., "Hard and soft micromachining for BioMEMS: review of techniques and examples of applications in microfluidics and drug delivery," *Adv. Drug Deliver. Rev.*, 56(2), 145-172 (2004).
- [15] Belanger, M. C. and Marois, Y., "Hemocompatibility, Biocompatibility, Inflammatory and in Vivo Studies of Primary Reference Materials Low-Density Polyethylene and Polydimethylsiloxane: A Review," *J. Biomed. Mater. Res.*, 58(5), 467-477 (2001).

Apéndice B: Cartel presentado en el Congreso ICO 22

Low-cost and biocompatible long-period fiber gratings

Jorge A. Soto-Olmos¹, Laura Oropeza-Ramos¹, Juan Hernández-Cordero²

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

² Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México

Introduction

Long-period fiber gratings (LPFGs) have been used extensively in communications systems and in sensors. A fiber grating consists of a periodic perturbation in the refractive index of the core of an optical fiber. A LPFG structure based on a tapered fiber with a side-contacted metal grating has been reported previously. This work motivated our interest to investigate the application of a polymeric external grating for inducing a LPFG on a tapered fiber. In particular, we investigate the use of a Polydimethylsiloxane (PDMS) grating microstructure to induce an extremely low-cost LPFG sensor.

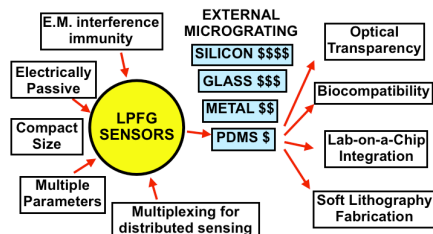


Figure 1. Compared with other types of sensors, LPFGs have several advantages, which are increased further by employing a PDMS external micro-grating.

LPFG principles

LPFGs work by coupling the guided fundamental mode in an optical fiber to forward-propagating cladding modes. These modes decay rapidly as they propagate along the fiber axis owing to scattering losses at the cladding-air interface and bends in the fiber. Since the coupling is wavelength-selective, the fiber grating acts as a wavelength-dependent loss element. As this wavelength depends also on environmental factors, LPFGs can be used in sensors for measuring strain, temperature and refractive index.

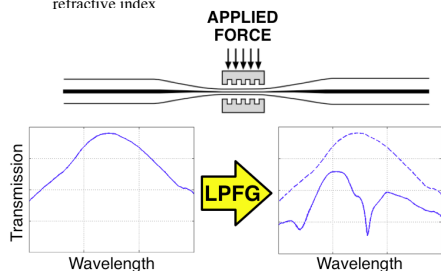


Figure 2. As the external micro-gratings induce the LPFG in the tapered optical fiber, transmission loss bands appear in the spectrum.

Fiber tapering method

A fiber taper is made by heating and stretching an optical fiber thus forming a structure comprising a narrow stretched filament (the "taper waist") and two conical tapered sections. For our experiments, we employed a commercial workstation to fabricate the fiber tapers (Dowson OC-209).

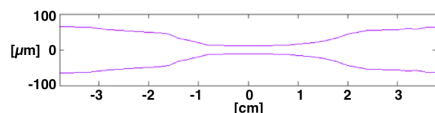


Figure 3. The characterization of the fiber tapers was made using an optical microscope.

PDMS devices fabrication and characterization

PDMS is an inexpensive, biocompatible and optically transparent polymer. The PDMS micro-grating was made using soft lithography, which is a replica molding technique. This technique is limited by the availability of microfabricated masters. To address this issue, we used inexpensive thermoplastic polystyrene (TPS) sheets to cast master molds. The whole process can be completed in a few hours.

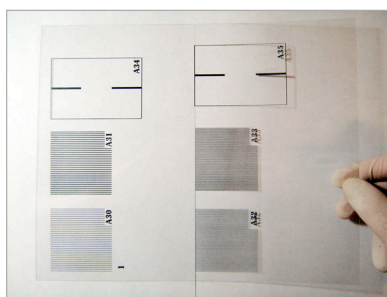


Figure 4. Several micro-grating devices were printed on the TPS sheet using a laser printer.

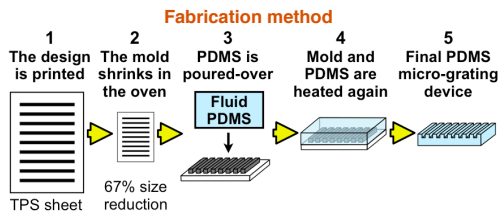


Figure 5. After printing the microchannels using a laser printer, the TPS sheet is shrunk in an oven. The PDMS is poured over and heated again to accelerate the polymerization process.

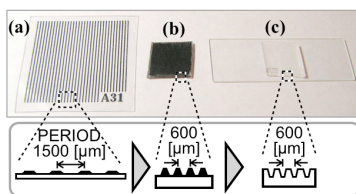


Figure 6. (a) TPS sheet after the micro-grating was printed with a laser printer. (b) The micrograting period was reduced by 67%, while the microstructures height increases by 500%. (c) PDMS replica on a microscope slide.

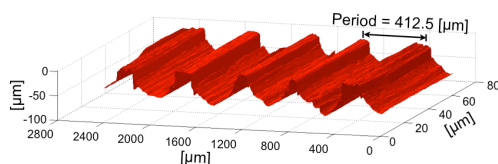


Figure 7. The micro-grating devices were characterized using the Topography Tool from Polytec, based on White Light Interferometry, with post-processing using Matlab software.

Experimental results

The LPFG structure consists of a couple of PDMS micro-gratings with identical period. One was placed under the fiber taper waist, and the other was placed on the top of the fiber.

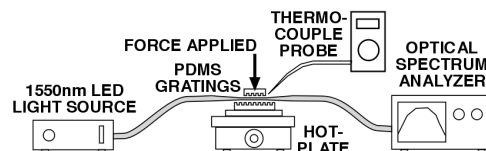


Figure 8. The experimental arrangement consisted of a LED light source, the LPFG structure, and an Optical Spectrum Analyzer.

The resonance peak increases with pressure

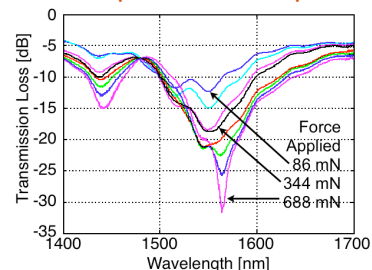


Figure 9. As the force applied on the micro-grating is increased, the loss-band increases in depth.

The resonance peak shifts with temperature

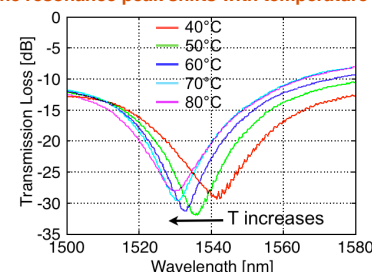


Figure 10. As the temperature increases, the resonance peak shifts to lower wavelengths.

Discussion and conclusions

We have developed a LPFG structure with a PDMS micro-grating using a low-cost method. The response due to temperature changes is similar to that previously shown for LPFG structures with metallic micro-gratings. The response to variations in applied pressure is also similar. Furthermore, shorter development times are evident with our approach, since materials processing is reduced compared to other methods. The use of PDMS greatly improves biocompatibility and opens the possibility to incorporate this type of sensors in microfluidic systems, or to use PDMS waveguides and optical devices for LPFG sensor systems.

Acknowledgments

Jorge Soto-Olmos acknowledges support from the Coordinación de Estudios de Posgrado, UNAM. The authors are also grateful to the Centro UNAMem, the Laboratorio de Biofísica de Sistemas Excitables, UNAM, and the Laboratorio de Sensores de Fibra Óptica y Fibras Ópticas Láser, UNAM.



Apéndice C: Resumen publicado en la memoria del Congreso de Fotónica Avanzada 2011

Referencia

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. <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=Sensors-2011-SMC6>

Characterization of a Low-Cost Long-Period Fiber Grating Induced by a Polymeric Microstructure

Jorge Alfonso Soto-Olmos¹, Juan Hernandez-Cordero², Laura Oropeza-Ramos¹

¹ Departamento de Electrónica, 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
sotoelectronica@gmail.com

Abstract: In this paper a low-cost long-period fiber grating induced by a polymeric microstructure is reported. Fabrication and characterization of the device and experimental results of the spectrum variations due to external pressures are presented.

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

1. Introduction

Long-period fiber gratings (LPFGs) have been used in diverse applications for telecommunication systems and optical fiber-based sensors. PDMS (polydimethylsiloxane) is an inexpensive, nontoxic and optically transparent polymer that is extensively used in microfluidics, biotechnological applications as well as in organic electronics. We report on the use of PDMS microstructures for inducing LPFGs on tapered optical fibers (TOFs).

Stress-induced LPFGs on TOFs yields an improved sensitivity to temperature and refractive index compared to conventional fiber devices [1]. Furthermore, upon using a proper TOF, small stresses may yield a suitable LPFG for sensing applications.

2. Fabrication and characterization

The PDMS-based periodic grating (fig.1a) is fabricated using soft lithography with molds built from thermoplastic polystyrene sheets [2]. The fabrication process is thus straightforward and low-cost compared to conventional fabrication methods. No precision machining is necessary and the resolution of the microstructures is limited only by the laser printer resolution used for patterning the sheets. The TOF and the micro-grating were dimensionally characterized using optical microscopy (fig.1b) and white light interferometry (fig.1c), respectively.

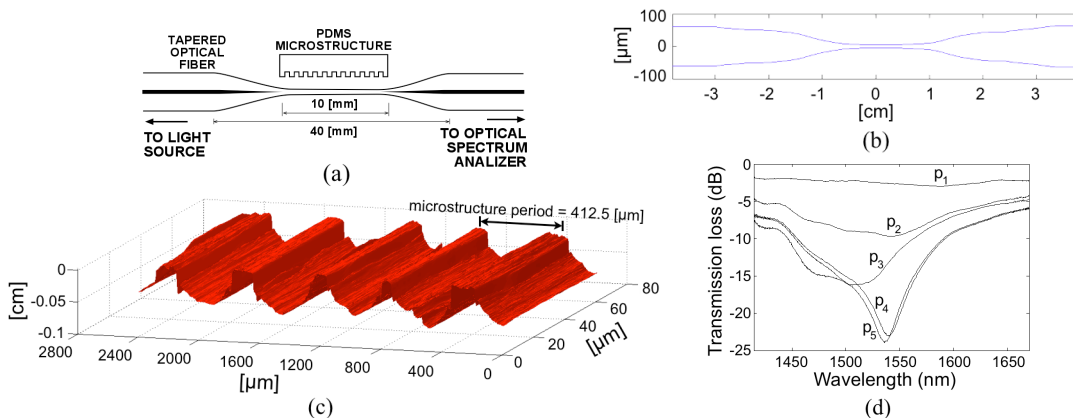


Fig. 1. (a) Experimental arrangement. (b) Tapered fiber characterization. (c) PDMS microstructure characterization. (d) Optical transmission spectrum of the stress-induced LPFG for increasing pressure.

3. Measurement results

A transmission loss band is apparent as pressure is applied on the micro-grating placed on the TOF (Fig. 1d). Variations on the peak transmission loss due to environmental fluctuations of this polymeric-based system were comparable to those reported for metallic microstructures [1]. LPFGs can thus be made in an inexpensive and expeditious way using PDMS and tapered optical fibers. These polymeric devices can be integrated into micro-fluidic and other lab-on-a-chip systems where biocompatibility is a valuable characteristic.

References

- [1] K.-C. Hsu, et al., *J. Lightwave Technol.* **28**, 1057-1063 (2010).
- [2] A. Grimes, et al., *Lab Chip* **8**, 170-172 (2008).

Apéndice D: Código de Matlab para graficar el corte transversal de los micro-canales


```

% perfilPdms5a2_V2.m
% basado en 5a2.m
% 21-9-11
% Version para anexos de la tesis de maestria
% Jorge Alfonso Soto Olmos
% sotoelectronica@gmail.com

clear all;
clf;
set(0,'defaultaxesfontsize',16);

load perfilVar.mat;

% las matrices A11_1_2a, A11_1_2b, A11_1_2c, A11_1_2d
% se cargan en Matlab antes de correr el codigo
% si se salvaron antes en un archivo .mat, la linea de arriba las carga

% Estas lineas sirven para determinar el numero de columnas de pixeles
% que tiene la imagen capturada, utilizando el DATA CURSOR
% de la ventana donde aparece la grafica
% plot([1:length(A11_1_2a)],A11_1_2a(:,1))
% pause;
% Se obtiene el valor de 1392 que se coloca en la parte de abajo

offx1 = 0;      % aqui es donde se pone manualmente el offset
offy1 = 0;      % para que todos los canales queden alineados
                % se van probando distintos valores hasta que se
offx2 = 425;    % alinean
offy2 = 0;

offx3 = 855;
offy3 = 0;

offx4 = 1275;
offy4 = 0;

numElem1 = 1392;           % numero de pixeles de la imagen en el eje X
numElem2 = 1392;
numElem3 = 1392;
numElem4 = 1392;

indice1 = 8;              % aqui se elige el valor de Y de la imagen
indice2 = 8;              % por donde pasaran los cortes transversales
indice3 = 8;
indice4 = 20;

primero1 = numElem1*indice1 + 1;
primero2 = numElem2*indice2 + 1;

```

```
primero3 = numElem3*indice3 + 1;
primero4 = numElem4*indice4 + 1;
```

```
ultimo1 = primero1 + numElem1 - 1;
ultimo2 = primero2 + numElem2 - 1;
ultimo3 = primero3 + numElem3 - 1;
ultimo4 = primero4 + numElem4 - 1;
```

```
% Al multiplicar por 1000 se obtienen las dimensiones en micrometros
```

```
plot( offx1 + A11_1_2a(primero1:ultimo1,1)*1000 , ...
      offy1 + A11_1_2a(primero1:ultimo1,3)*1000 , ...
      offx2 + A11_1_2b(primero2:ultimo2,1)*1000 , ...
      offy2 + A11_1_2b(primero2:ultimo2,3)*1000 , ...
      offx3 + A11_1_2c(primero3:ultimo3,1)*1000 , ...
      offy3 + A11_1_2c(primero3:ultimo3,3)*1000 , ...
      offx4 + A11_1_2d(primero4:ultimo4,1)*1000 , ...
      offy4 + A11_1_2d(primero4:ultimo4,3)*1000 )
```

```
title('Dispositivo A11-1 Zona 1, unidades en micras, periodo = 410.6
um', 'FontSize', 18)
axis([0, 2170, -100, 50])
```

```
% CON data cursor de la ventana donde aparece la figura se obtiene el periodo
PERIODO = ( 1.896 - 0.2536 ) / 4
% PERIODO = 410.6 um
```

Apéndice E: Código de Matlab para graficar la superficie tridimensional de los micro-canales

```

% canalesTridim3_V2.m
% basado en canalesTridim3.m
% 24-9-11
% Version para anexos de la tesis de maestria
% Jorge Alfonso Soto Olmos
% sotoelectronica@gmail.com

clear all;
clf;
set(0,'defaultaxesfontsize',16);

% La informacion con cada uno de los canales a graficar se importa de los
% archivos .csv creados con software de hoja electronica. Una vez
% importados en Matlab se pueden guardar en formato .mat, para que sean
% cargados automaticamente mediante la instruccion siguiente

load DatosPolytec/perfilVarB.mat;

% El numero de columnas se determino anteriormente, y el valor obtenido de
% 1392 se escribe en el codigo de abajo, que re-crea la imagen
% tridimensional a partir de las matrices

z1temp = reshape(A31_1_1a(:,3),1392,(length(A31_1_1a)/1392));
z2temp = reshape(A31_1_1b(:,3),1392,(length(A31_1_1b)/1392));
z3temp = reshape(A31_1_1c(:,3),1392,(length(A31_1_1c)/1392));

% Este filtro MEDIAN elimina los picos ocasionados por el ruido

z1temp = medfilt2(z1temp, [5 5]);
z2temp = medfilt2(z2temp, [5 5]);
z3temp = medfilt2(z3temp, [5 5]);

% Aqui se van ajustando los valores de offset por prueba y error

z1 = z1temp(1:900,:);
z2 = z2temp(1:1050,:)+.01;
z3 = z3temp +.01;

% Se juntan los tres canales en una sola superficie que luego se grafica

z = [z1;z2;z3];

surf(z,'FaceColor',[1 0 0],'EdgeColor','none');camlight(0,40); lighting phong

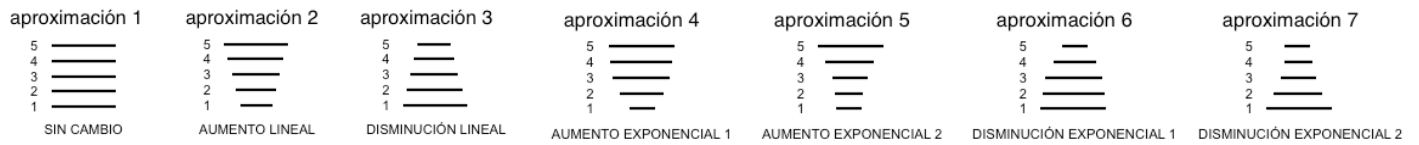
view([-75 40])      % angulo en que se observa la imagen
                   % el default es -37.5, 30
                   % para ver de perfil 90 0

```

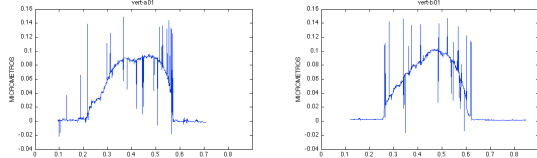
Apéndice F: Secciones transversales obtenidas mediante variaciones en el ancho de las líneas que se sobre-imprimen en los moldes de *poliestireno termoplástico*

Caracterización de microestructuras

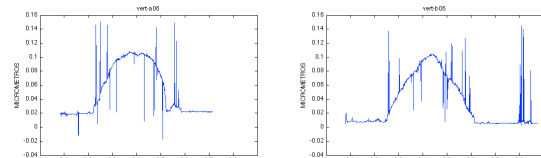
Cambio en el ancho de las líneas que se van sobre-imprimiendo



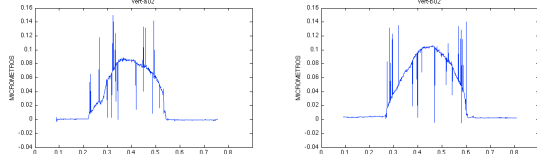
aproximación 1, ancho de líneas de 250 μm



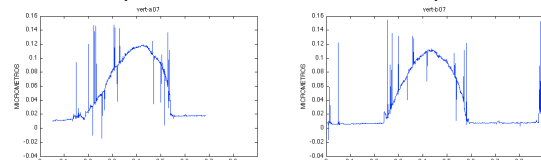
aproximación 4, de 160 a 250 μm



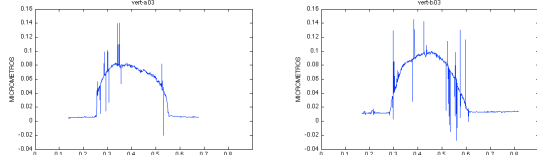
aproximación 2, de 160 a 250 μm



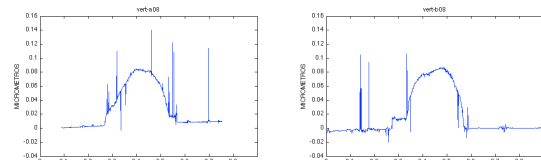
aproximación 5, de 160 a 250 μm



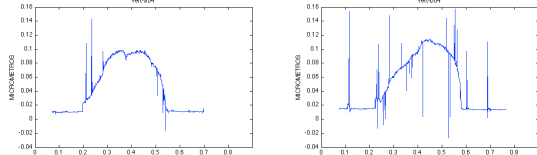
aproximación 2, de 120 a 250 μm



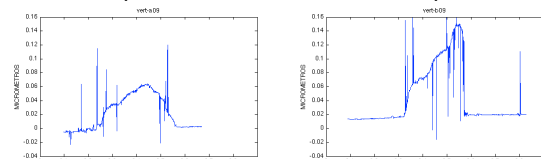
aproximación 4, de 120 a 250 μm



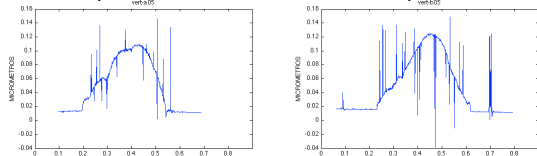
aproximación 3, de 250 a 160 μm



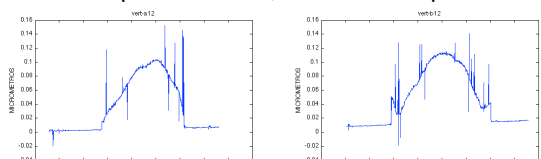
aproximación 5, de 120 a 250 μm



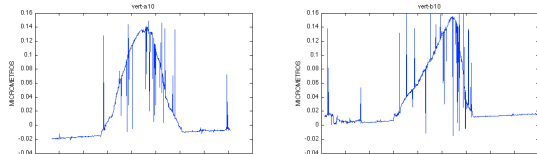
aproximación 3, de 250 a 120 μm



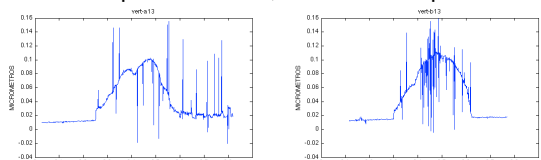
aproximación 6, de 250 a 120 μm



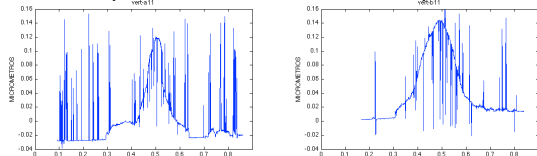
aproximación 6, de 250 a 160 μm



aproximación 7, de 250 a 120 μm



aproximación 7, de 250 a 160 μm



Referencias

- [1] 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.
- [2] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of photonics*. Hoboken, New Jersey: J. Wiley, 2nd ed. ed., 2007.
- [3] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, and J. E. Sipe, “Long-Period Fibre Gratings as Band-Rejection Filters,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 58–65, 1996.
- [4] *Fiber optics basics tutorial (2011)*. Newport Corporation. Consultado el 15 de Noviembre de 2011 de <http://www.newport.com/store/genContent.aspx/Tutorial-Fiber-Optic-Basics/978863/1033>.
- [5] 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.
- [6] S. Savin, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino, and H. J. Shaw, “Tunable mechanically induced long-period fiber gratings.,” *Optics letters*, vol. 25, pp. 710–2, May 2000.
- [7] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg gratings : fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. Boston, Massachusetts: Artech House, 1999.
- [8] Z. Wang and H. Xiao, “Optical Intensity-Based Long-Period Fiber Grating Biosensors and Biomedical Applications,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 26, no. 2, pp. 121–122, 124–127, 2009.
- [9] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, “Fiber grating sensors,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1442–1463, 1997.

- [10] B. Lee, "Review of the present status of optical fiber sensors," *Optical Fiber Technology*, vol. 9, pp. 57–79, Apr. 2003.
- [11] S. Pascual-Vázquez and J. Hernández-Cordero, "Fibras ópticas láser : cómo cocinar vidrio para generar luz," *Materiales Avanzados*, no. 9, pp. 5–14, 2007.
- [12] R. A. Potyrailo, S. E. Hobbs, and G. M. Hieftje, "Optical waveguide sensors in analytical chemistry: today's instrumentation, applications and trends for future development," *Fresenius' journal of analytical chemistry*, vol. 362, pp. 349–373, Oct. 1998.
- [13] D. Lee, Y. Jung, Y. S. Jeong, K. Oh, J. Kobelke, K. Schuster, and J. Kirchhof, "Highly polarization-dependent periodic coupling in mechanically induced long period grating over air-silica fibers.," *Optics letters*, vol. 31, pp. 296–8, Feb. 2006.
- [14] A. M. Velázquez-Benítez, *Acopladores de fibra óptica con recubrimientos de azopolímero*. Tesis de licenciatura, 111 pp., Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, 2010.
- [15] D. Marazuela and M. C. Moreno-Bondi, "Fiber-optic biosensors—an overview.," *Analytical and bioanalytical chemistry*, vol. 372, pp. 664–82, Mar. 2002.
- [16] N.-K. Chen, K.-C. Hsu, S. Chi, and Y. Lai, "Tunable Er³⁺-doped fiber amplifiers covering S and C+L bands over 1490-1610 nm based on discrete fundamental-mode cutoff filters.," *Optics letters*, vol. 31, pp. 2842–4, Oct. 2006.
- [17] K.-C. Hsu, N.-K. Chen, S.-Y. Chou, S.-K. Liaw, Y. Lai, and S. Chi, "Bandpass Filter With Variable Bandwidth Based on a Tapered Fiber With External Polymer Cladding," *Technology*, vol. 21, no. 13, pp. 935–937, 2009.
- [18] W. Ding and S. R. Andrews, "Modal coupling in surface-corrugated long-period-grating fiber tapers," *Optics Letters*, vol. 33, no. 7, pp. 717–719, 2008.

- [19] K.-W. Chung and S. Yin, "Analysis of a widely tunable long-period grating by use of an ultrathin cladding layer and higher-order cladding mode coupling.," *Optics letters*, vol. 29, pp. 812–4, Apr. 2004.
- [20] B. Ziaie, A. Baldi, M. Lei, G. Yuandong, and R. A. Siegel, "Hard and soft micromachining for BioMEMS: review of techniques and examples of applications in microfluidics and drug delivery," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 56, pp. 145–172, Feb. 2004.
- [21] A. C. Richards Grayson, R. S. Shawgo, A. M. Johnson, N. T. Flynn, Y. Li, M. J. Cima, and R. Langer, "A BioMEMS Review: MEMS Technology for Physiologically Integrated Devices," *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, pp. 6–21, Jan. 2004.
- [22] M. J. Madou, *Fundamentals of microfabrication : the science of miniaturization*. Boca Raton, Florida: CRC, 2nd ed., 2002.
- [23] Y. Xia and G. M. Whitesides, "Soft Lithography," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 37, pp. 550–575, Aug. 1998.
- [24] M. Geissler and Y. Xia, "Patterning: Principles and Some New Developments," *Advanced Materials*, vol. 16, pp. 1249–1269, Aug. 2004.
- [25] X. Gong and W. Wen, "Polydimethylsiloxane-based conducting composites and their applications in microfluidic chip fabrication.," *Biomicrofluidics*, vol. 3, p. 12007, Jan. 2009.
- [26] J. M. K. Ng, I. Gitlin, A. D. Stroock, and G. M. Whitesides, "Components for integrated poly(dimethylsiloxane) microfluidic systems.," *Electrophoresis*, vol. 23, pp. 3461–73, Oct. 2002.
- [27] 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.

- [28] C.-S. Chen, J. Pegan, J. Luna, B. Xia, K. McCloskey, W.-c. Chin, and M. Khine, “Shrinky-dink hanging drops: a simple way to form and culture embryoid bodies.,” *Journal of visualized experiments : JoVE*, pp. 6–7, Jan. 2008.
- [29] 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, pp. 1379–85, Aug. 2008.
- [30] A. Tan, K. Rodgers, J. P. Murrehy, C. O’Mathuna, and J. D. Glennon, “Rapid fabrication of microfluidic devices in poly(dimethylsiloxane) by photocopying.,” *Lab on a chip*, vol. 1, pp. 7–9, Sept. 2001.
- [31] 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, pp. 170–2, Jan. 2008.
- [32] L. Oropeza-Ramos, A. Macías, S. Juárez, A. Falcón, A. Torres, M. Hautefeuille, and H. González, “Low cost micro-platform for culturing and stimulation of cardiomyocyte tissue,” in *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2011 IEEE 24th International Conference on*, no. 3, pp. 912–915.
- [33] C. Liu, “Recent Developments in Polymer MEMS,” *Advanced Materials*, vol. 19, pp. 3783–3790, Nov. 2007.
- [34] G. M. Whitesides, “The origins and the future of microfluidics.,” *Nature*, vol. 442, pp. 368–73, July 2006.
- [35] C. Monat, P. Domachuk, and B. J. Eggleton, “Integrated optofluidics: A new river of light,” *Nature Photonics*, vol. 1, pp. 106–114, Feb. 2007.
- [36] B. R. Acharya, T. Krupenkin, S. Ramachandran, Z. Wang, C. C. Huang, and J. A. Rogers, “Tunable optical fiber devices based on broadband long-period gratings and pumped microfluidics,” *Applied Physics Letters*, vol. 83, no. 24, p. 4912, 2003.

- [37] 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.
- [38] 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, pp. 1380–1385, Jan. 1996.
- [39] J. Godin, V. Lien, and Y.-H. Lo, "Two-Dimensional Lenses Microfabricated in PDMS for Integrated Fluidic Photonic Devices," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, pp. 1–2, 21–26, 2006.
- [40] M. C. Belanger and Y. Marois, "Hemocompatibility, Biocompatibility, Inflammatory and in Vivo Studies of Primary Reference Materials Low-Density Polyethylene and Polydimethylsiloxane: A Review," *Journal of Biomedical Materials Research*, vol. 58, no. 5, pp. 467–77, 2001.
- [41] T. Vo-Dinh and B. Cullum, "Biosensors and biochips: advances in biological and medical diagnostics.," *Fresenius' journal of analytical chemistry*, vol. 366, no. 6-7, pp. 540–51, 2008.
- [42] C. L. Lago, C. Neves, D. P. Jesus, H. D. T. DaSilva, J. G. A. Brito-Neto, and J. A. F. da Silva, "Microfluidic devices obtained by thermal toner transferring on glass substrate," *Electrophoresis*, vol. 25, no. 21-22, pp. 3831–3831, 2004.
- [43] *Micro System Analyzer MSA 400 Hardware Manual*. Polytec Corporation.
- [44] *Topography Measurement System 2.0 Software Manual*. Polytec Corporation.
- [45] H. Tsoi, W. Wong, and E. Pun, "Polymeric long-period waveguide gratings," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, pp. 721–723, May 2003.

- [46] K. S. Chiang, C. K. Chow, H. P. Chan, Q. Liu, and K. P. Lor, "Widely tunable polymer long-period waveguide grating with polarisation-insensitive resonance wavelength," *Electronics Letters*, vol. 40, no. 7, 2004.
- [47] *Dowson OC-2010 Optical Coupler Manufacturing System Operation Manual*. Shanghai Dowson Communication Co., Ltd., 2003.
- [48] S.-Y. Chou, K.-A. Hsu, N.-K. Chen, S.-K. Liaw, Y.-S. Chih, Y. Lai, and S. Chi, "Analysis of Thermo-Optic Tunable Dispersion-Engineered Short-Wavelength-Pass Tapered-Fiber Filters," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, pp. 2208–2215, July 2009.
- [49] T. A. Birks and Y. W. Li, "The Shape of Fiber Tapers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, no. 4, pp. 432–438, 1992.
- [50] *Corning SMF-28e Optical Fiber Product Information*. Corning Incorporated, 2007.
- [51] B. A. Grzybowski, S. T. Brittain, and G. M. Whitesides, "Thermally actuated interferometric sensors based on the thermal expansion of transparent elastomeric media," *Review of Scientific Instruments*, vol. 70, no. 4, pp. 2031–2037, 1999.
- [52] *Sylgard 184 Data Sheet*. Dow Corning, Ref. no. 10-1204A-01 [Online], <http://www.dowcorning.com/>.
- [53] L. Zhang, W. Zhang, and I. Bennion, "In-Fiber Grating Optic Sensors," in *Fiber optic sensors* (S. Yin, P. B. Ruffin, and F. T. Yu, eds.), ch. 4, p. 477, Boca Raton, Florida: CRC, 2nd ed., 2008.