



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES
FACULTAD DE CIENCIAS

**“FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GUÍAS DE ONDA
POLIMÉRICAS PARA DESARROLLAR
MICROCHIPS ÓPTICOS”**

TESIS

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

PRESENTA:

FÍS. DANIEL PÉREZ CALIXTO

TUTOR PRINCIPAL:

DR. MATHIEU HAUTEFEUILLE
FACULTAD DE CIENCIAS

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

DR. JUAN HERNÁNDEZ CORDERO
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

DR. VÍCTOR VELÁZQUEZ AGUILAR
FACULTAD DE CIENCIAS

México, D.F. Mayo 2016.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Este trabajo se realizó en el
Taller de Óptica Láser de la Facultad de Ciencias de la
Universidad Nacional Autónoma de México.

Agradecimientos

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, mi alma mater y mi segundo hogar

Al **CONACyT**, por el apoyo brindado a través de las becas nacional y mixta que permitieron la realización de este trabajo.

A los proyectos **CONACyT 264202, 271573 y 246988** y a los proyectos **DGAPA-PAPIIT IN116914 y TA100315**, por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

Al programa de apoyo a estudios de posgrado (**PAEP**) **2015**, por el apoyo en la realización de mi estancia de investigación.

A mi tutor **Dr. Mathieu Hautefeuille**, por todo su apoyo, consejos y guía, por enseñarme algo más que sólo ciencia.

A mi **Comité Tutor, Dr. Víctor y Dr. Juan**, por todo su tiempo ayudándome.

A los **Miembros del Jurado**, por el tiempo dedicado para la revisión de este trabajo.

Al **Dr. Fernando Ramírez Martínez**, quien confió en mí, en el inicio de mi formación.

A **Diego Zamarrón Hernández**, por su inigualable ayuda, consejos en el proyecto y apoyo en el manejo del perfilómetro.

Al **Laboratorio de Análisis y Arquitectura de Sistemas del CNRS** en Toulouse, Francia, donde realicé mi estancia de investigación, en especial al grupo de Nanobiosistemas que me recibió.

A la **Dra. Aline Cerf**, por ser mi tutora durante mi estancia y por toda la ayuda que me brindó.

Al **Dr. Laurent Malaquin**, por todo el conocimiento, tiempo y apoyo que me compartió.

Al **Dr. Christophe Vieu, Dr Christophe Thibault y Dra Emmanuelle Trevisiol**, por su paciencia y apoyo en el LAAS.

A **Aarón Cruz Ramírez**, por su ayuda en la fabricación de los moldes de acrílico.

Al **Dr. Erick Flores Romero**, por las facilidades brindadas en el uso del equipo Metricon.

Dedicatoria

A **Jehová el *Shadday*** porque de su plenitud tomamos todos.

A mis padres **Gilberto y Eleazar**, por todo su amor, paciencia y apoyo incondicional

A **Paulina**, por ser mi hermana, amiga y por confiar siempre en mí.

y

A aquellos con quienes he compartido y compartiré una parte de este camino llamado vida

A **Samuel, Jonathan, Benjamín, Valeria y Karla**, por todos estos años de amistad.

A **Angie**, por lo mucho que me has enseñado.

A **Miguel**, por su apoyo, ayuda y amistad.

A **Clementine**, por ser la mejor persona que conozco.

A la banda microfab, a **Aarón, Diego, Edgar, Majo, Luci, Lidia, Cindy, Erika y Jehú** por hacer el laboratorio un gran lugar,

A la banda Física, **Paco, Diego, Iris, Rodrigo, Pablo, Joaquín, Viridiana y Adrián** porque con ustedes y de ustedes aprendí,

A mis **compañeros de maestría**, con quienes compartí camino.

y

A **Kayum, Hèléne, Maxime, Lin, Sophie, Julie, Aurore y Lucie** porque en un lugar lejano me brindaron su amistad.

Índice

Resumen	1
Capítulo 1.....	2
Introducción.	
1.1 MEMS y Lab on a Chip.	3
• Objetivo General.....	7
• Objetivos particulares.....	7
1.2 Estructura de los capítulos.....	8
Capítulo 2.....	10
Tecnologías de microfabricación.	
2.1 Ablación láser.	11
2.2 Fotolitografía.....	13
2.3 Polimerización por dos fotones.	14
2.4 Litografía suave.....	15
Capítulo 3.....	17
Guías de onda.	
3.1 Ley de Snell-Descartes (Ondas en una interfaz)	17
3.2 Ecuaciones de Fresnel.	20
3.2.1 Coeficientes de Amplitud.....	22
3.3 Reflexión Total Interna (RTI).....	23
3.4 Apertura numérica y atenuación.....	24
3.4.1 Ángulo de aceptación y apertura numérica.	24
3.4.2 Atenuación.	26
3.5 Número de modos.	27

Capítulo 4.....	29
Método de fabricación de guías de onda poliméricas.	
4.1 Poli(dimetilsiloxano)(PDMS).....	30
4.2 Diseño geométrico de los patrones a utilizar.	33
4.3 Fabricación del molde maestro.	34
4.3.1 Preparación del molde.....	35
4.3.2. Transferencia del diseño.....	36
4.3.3. Limpieza del molde.....	38
4.3.4 Inspección visual y caracterización.....	39
4.4 Proceso molde-réplica.....	39
4.4.1 Materiales y equipos necesarios.	40
4.4.2 Descripción del proceso	41
Capítulo 5.....	48
Caracterización y resultados	
5.1 Caracterización de los moldes para replica.....	48
5.1.1 Molde para atenuación.....	49
5.1.2 Molde del divisor de haz.	51
5.2 Arreglo óptico.....	53
5.3 Pruebas de Guiado.	54
5.4 Pérdidas y coeficiente de atenuación.	57
5.4.1 Pérdidas por varios canales.	57
5.4.1 Pérdida en un solo canal cortado.....	59
Capítulo 6.....	62
Conclusiones.	
Referencias.....	66
Anexo A	69

Reacción de polimerización del poli(dimetilsiloxano)(PDMS)	
Anexo B.....	70
Parámetros a considerar.	

Resumen

Presentamos un método de diseño y fabricación de guías de onda utilizando poli(dimetilsiloxano)(PDMS). El método propuesto es sencillo y de bajo costo, está basado en la microestructuración de un molde rígido de acrílico mediante ablación láser, el cual se utilizó para obtener réplicas de PDMS integrando las guías con geometrías deseadas y realizadas bajo diseño según la aplicación. Con este método se obtuvieron dos tipos distintos de guías de onda (tipo embebida y tipo escalón). Por las características del material empleado y la practicidad del método es fácil integrar las guías de onda en sistemas tipo *Lab on a chip*. Para el desarrollo del método se midió el índice de refracción del PDMS variando la proporción en peso de la base con el agente curante y la temperatura de curado en la preparación. Se logró una diferencia del índice de refracción entre la cubierta y el núcleo de 0.0093% que es un cambio de 0.0013 UIR (unidades del índice de refracción). Se caracterizó el molde de acrílico por medio de perfilometría para verificar la calidad de la superficie de las guías. Se midió la atenuación en las guías de onda: para la guía embebida la atenuación fue de 1.27dB/cm y para la tipo escalón fue de 2.36dB/cm, estos valores se aproximan a lo reportado en la literatura [13-15] donde utilizaron métodos convencionales (fotolitografía) para la producción del molde maestro. Como prueba final de guiado se fabricó un divisor de haz en el rango del espectro visible ~630nm.

Capítulo 1.

Introducción.

“There’s plenty of room at the bottom”

(“Hay mucho espacio al fondo”)

Richard Feynman.

Varias son las definiciones de micro y nano-tecnologías, pero si se busca información acerca de sus orígenes aparece inequívocamente la conferencia del 29 de diciembre de 1959 impartida en el CALTECH por Richard Feynman [1] titulada *Hay mucho espacio al fondo*, "Me gustaría describir un campo", comenzaba en su discurso, “en el cual muy poco ha sido hecho hasta el momento... de lo que quiero hablar es del problema de manipular y controlar objetos a muy pequeña escala”. Este nuevo campo hace referencia a la posibilidad de crear tecnología desde una nueva perspectiva, basada en la manipulación de objetos a una escala tan pequeña como la atómica, pues ésta no está negada en la física.

Como era de esperarse, los retos lanzados por Feynman en esta conferencia de la sociedad americana de física, como el desarrollo de un motor eléctrico de 1/64 de pulgada, se cumplieron al siguiente año, y el desarrollo de métodos de microfabricación vio un gran auge en la tecnología microelectrónica.

En 1979 investigadores de la universidad de Stanford desarrollan el primer acelerómetro basado en tecnología MEMS, el cual se convierte en un gran éxito comercial, ya que para el año dos mil había vendido más de treinta millones de unidades.[2]

1.1 MEMS y Lab on a Chip.

Los “Sistemas Microelectromecánicos” (*Microelectromechanical Systems*, MEMS), “Micro sistemas” (MST) en Europa y “Micro máquinas” (MM) en Japón, se refieren a la tecnología micrométrica, nanométrica y a sus productos.

Los MEMS pueden definirse de diversas maneras pero en general el acrónimo MEMS se refiere a la tecnología que permite fabricar un dispositivo de tamaño ~100nm a 1mm integrando diversos componentes, con diferentes funciones y utilizando varios procesos de microfabricación. Históricamente se refiere a la integración de partes mecánicas con partes eléctricas usando métodos de la manufactura de circuitos impresos, lo cual llevó a grandes éxitos comerciales como el acelerómetro antes mencionado.

El auge de la miniaturización en otros campos de aplicación llevó a los MEMS a expandirse rápidamente a áreas como la detección química, bioquímica, etc, no sin complicaciones, pues su aplicabilidad se ve limitada por la lista de materiales y procesos comúnmente compatibles con la industria de semiconductores. La figura 1.1 muestra un dispositivo de este tipo, donde se hace uso de la tecnología MEMS para transferir genoma o ADN de una especie a otra, lo que juega un papel importante en la investigación médica.

Ante la necesidad de tener a disposición microsistemas y dispositivos de escalas micrométricas para aplicaciones que no requieren de fabricación masiva de lotes de microchips, se ha requerido un cambio en la manera de fabricar microestructuras. Con nuevos materiales y métodos sencillos se ha alcanzado mayor flexibilidad para desarrollar estructuras de forma más modular, con prototipado rápido y maquinado más suave que usando ataques químicos. El conjunto de estas técnicas se conoce hoy en día como litografía suave [28].

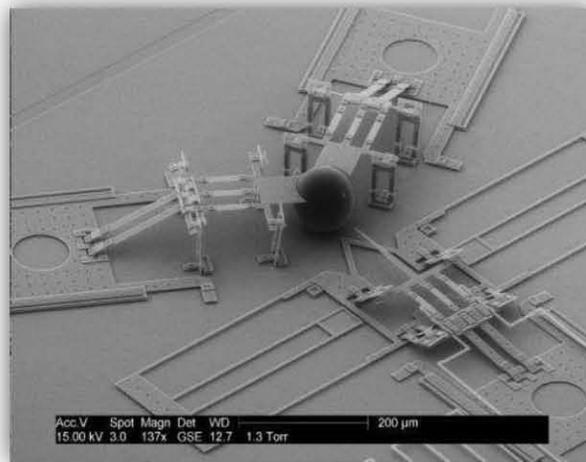


Fig. 1.1 Nanoinjector para modificación genética de células[8].

Para el desarrollo de los dispositivos antes mencionados, también se necesita microfluídica, que es la manipulación y el control del flujo de un fluido a escala micrométrica. Este es un término amplio que describe sistemas tales como: microcanales, válvulas, mezcladores, etc. [3] Un chip microfluídico fabricado en nuestro grupo de trabajo por un estudiante de Licenciatura se muestra en la figura 1.2. Los sistemas microfluidicos tienen múltiples ventajas sobre su contraparte a macro escala, ya que disminuyen el volumen de muestra y de los reactivos utilizados, reducen los costos de fabricación, facilitan la automatización y hacen más eficiente los análisis, siendo además una rama de la microtecnología muy sencilla de desarrollar.

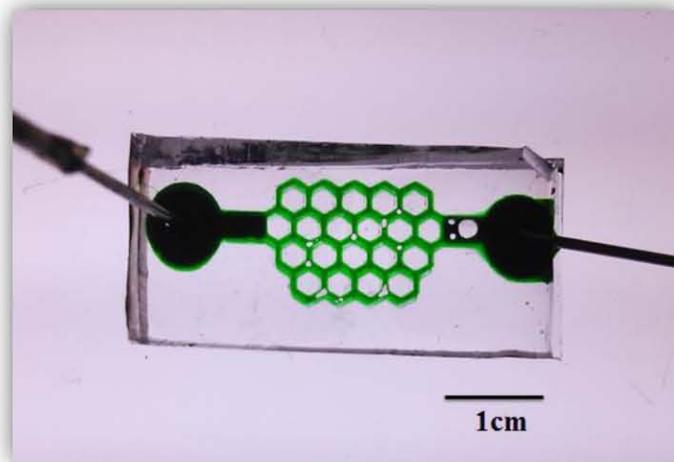


Fig. 1.2 Chip microfluídico fabricado con polidimetilsiloxano en nuestro laboratorio.

La detección óptica es un método usado en ciencias de la salud y en el análisis químico para detectar productos de diferentes técnicas como separación por electroforesis, citometría de flujo y la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), entre otras. Dichas técnicas son realizadas por equipos convencionalmente grandes y costosos que requieren un volumen grande de muestra y de reactivos, por lo que miniaturizarlas e integrarlas en un solo dispositivo recibe el nombre de “ μ TAS” por sus siglas en inglés (*micro Total Analysis Systems*), que es un subconjunto de los MEMS [4].

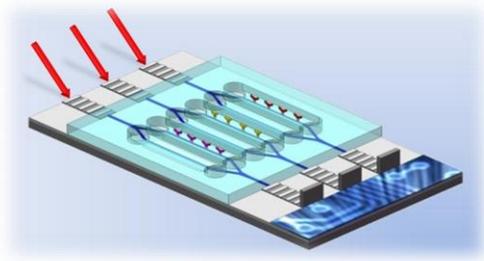


Fig. 1.3 Diseño de Biosensor Lab on a Chip, basado en detección óptica[9]

Los dispositivos tipo *Lab on a Chip* (LoC) figura 1.3 son un tipo de “ μ TAS” y se refiere sólo al proceso de análisis, en otras palabras, es un dispositivo que llega a medir hasta unos cuantos centímetros cuadrados e integra varias funciones de un laboratorio en un chip.

Las fibras ópticas y las guías de onda son atractivas para su uso en estos dispositivos dada su capacidad intrínseca para direccionar la luz y acoplarla de fuentes comerciales y hacia detectores. Sin embargo, alinearlas con canales microfluídicos y con sitios de detección puede ser problemático, ya que cualquier defecto en la alineación puede resultar en grandes pérdidas en la señal.

En los sistemas LoC las guías de onda proveen un número importante de funciones, como eliminar la necesidad de alineación con los sistemas ópticos y fluídicos pues esta se realiza en el propio diseño. También reduce el camino óptico y el número de interfaces, minimizando así las pérdidas. Además, usando arreglos tales como divisores de haz y conectores multiplexores se pueden llevar a cabo múltiples análisis en paralelo con diferentes muestras.

Tomando ventaja de técnicas bien establecidas y procesos desarrollados por la microelectrónica, muchos LoCs se desarrollaron en silicio, vidrio [5] y diversos tipos

de materiales que han sido usados para la integración de guías de onda y microfluídica, como un núcleo de oxinitruro de silicio recubierto de dióxido de silicio [6]. Sin embargo polímeros tales como los adhesivos ópticos SU8, polimetilmetacrilato (PMMA) y poli(dimetilsiloxano) (PDMS) son preferidos debido a los procesos de fabricación y a su bajo costo. Los polímeros se han vuelto el centro de atención debido a la creciente tendencia de biochips desechables.

El PDMS en particular es de bajo costo, fácil de manipular y tiene excelentes propiedades mecánicas y ópticas ya que es transparente en el UV- visible (230nm – 700 nm), además de haber sido usado ampliamente en aplicaciones microfluídicas [7].

La forma más común de fabricar guías de onda de PDMS para LoCs, es fabricar canales que serán llenados con un líquido o un material sólido con un índice de refracción mayor. Para los núcleos líquidos se ha usado prepolímero de PDMS con un alto índice de refracción y glicerina [10-12], para núcleos sólidos se han usado resinas con un alto índice de refracción, curables con UV [17], las cuales se introducen en los canales y es curada en ellos.

Recientemente se ha usado el mismo PDMS para fabricar el núcleo de la guía junto con su revestimiento. El índice de refracción del PDMS se ha modificado de diferentes maneras, ya sea cambiando el tiempo y la temperatura de curado [13], modificando la proporción en peso al mezclar el prepolímero con el agente curante [14], añadiendo “*silicone oil*” a la base [15], entre otros.

Un ejemplo de una guía fabricada con estos métodos se muestra en la figura. 1.4.

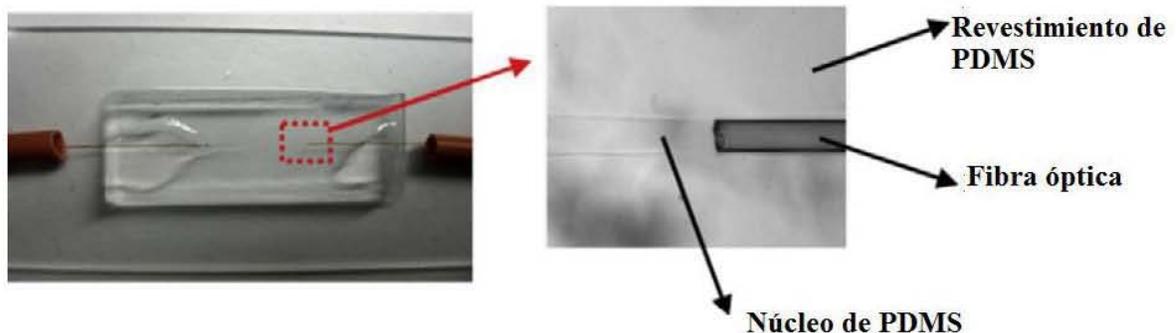


Fig. 1.4. Guías de onda fabricadas con PDMS, adaptada de [14].

La forma más común de fabricar un molde para réplica de PDMS es la fotolitografía. El molde maestro que se muestra en la figura 1.5 se diseñó en nuestro laboratorio y se fabricó en el LAAS-CNRS, Toulouse, Francia, donde realicé una estancia de investigación. Consiste en microestructuras realizadas por fotolitografía en la resina fotosensible SU8 (*MicroChem*) [35] sobre una oblea de silicio. Las condiciones para la fabricación de estos moldes son muy específicas ya que es necesario equipo especializado para fotolitografía y el uso de un ambiente controlado, es decir, un cuarto limpio. Por ello este método de fabricación resulta laborioso y costoso.

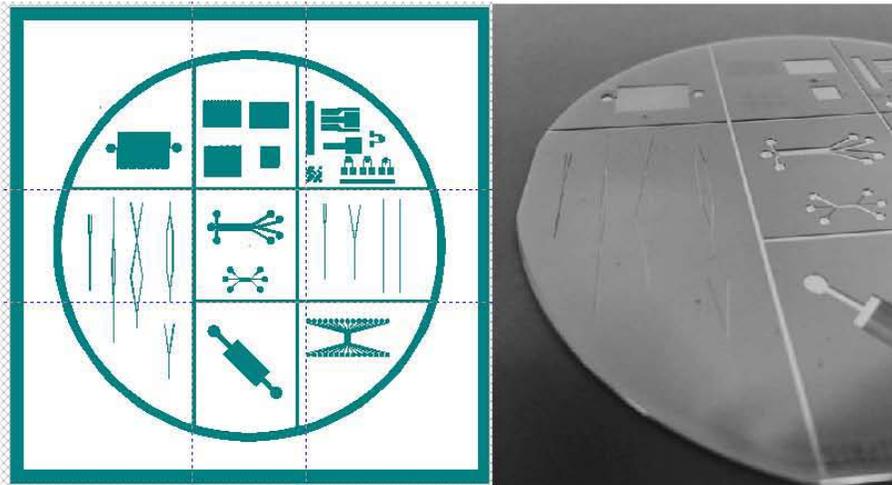


Fig 1.5. Diseño y SU8 (espesor de $100\mu\text{m}$ y una resolución de $20\mu\text{m}$) sobre oblea de silicio [4]

Tomando todo esto como panorama inicial, se plantearon los siguientes objetivos para esta tesis.

- **Objetivo General.**

Desarrollar un proceso de microfabricación a la medida de chips ópticos integrados (guías de onda poliméricas).

- **Objetivos Particulares.**

1. Optimizar el proceso de fabricación para que sea sencillo y de bajo costo.
2. Caracterizar las guías de onda obtenidas mediante pruebas de guiado y el cálculo del coeficiente de atenuación.

Estos objetivos se cumplieron con el desarrollo de un método de fabricación simple que consiste en un proceso molde-réplica. Se utilizó un proceso diferente en un solo paso para la producción del molde maestro en el que no se necesita un ambiente controlado y el equipo usado es más accesible comparado con los equipos de fotolitografía convencionales, por esta forma de producción del molde y el tipo de material empleado (PDMS) se considera que es un proceso de bajo costo.

Para optimizar el método propuesto se midió el índice de refracción del PDMS variando la proporción en peso del prepolímero con el agente curante y modificando la temperatura de curado, con el fin de encontrar las mejores condiciones de curado para el núcleo de la guía, el cual debe poseer un índice de refracción mayor que el del revestimiento. Se midió un cambio máximo del índice de refracción de 0.0025 RIU (unidad del índice de refracción).

Como resultado del método propuesto se obtuvieron dos tipos de guías de onda a las que denominamos tipo escalón y tipo embebida según la etapa de fabricación y la aplicación deseada.

Los chips obtenidos se caracterizaron por medio de pruebas de guiado y la medición de las pérdidas para obtener el coeficiente de atenuación con dos métodos diferentes. Finalmente como prueba de la utilidad del método se fabricó un divisor de haz.

1.2 Estructura de los capítulos.

En el siguiente capítulo se enuncian y describen diferentes técnicas de la microfabricación como fotolitografía, polimerización por dos fotones, grabado por ablación láser y un conjunto de técnicas de microfabricación que se denominan litografía suave.

En el capítulo 3 se describe el fenómeno físico bajo el cual funcionan las guías de onda que es reflexión total interna. Se obtienen expresiones prácticas a tomar en cuenta para el diseño de las guías de onda y para la caracterización de las mismas.

En el capítulo 4 se presenta la caracterización óptica del material empleado (PDMS) por medio de mediciones del índice de refracción al variar las condiciones de curado (temperatura y proporción en peso de base-agente curante) y se hace una

descripción detallada de cada etapa (diseño, fabricación del molde y proceso molde-réplica) del método propuesto.

En el capítulo 5 se muestran las guías de onda fabricadas, el protocolo usado para la caracterización del molde de acrílico, el dispositivo óptico con el que se caracterizaron las guías, los resultados obtenidos de las pérdidas y la obtención del coeficiente de atenuación.

Las conclusiones y el trabajo a futuro conforman el capítulo 6.

Capítulo 2.

Tecnologías de microfabricación.

Al conjunto de técnicas, procesos y métodos para producir sistemas o estructuras con dimensiones micrométricas se le llama microfabricación. Un gran número de estas técnicas vio su origen en la microelectrónica, que está basada en la industria de semiconductores y circuitos integrados.

Los procesos de microfabricación se pueden clasificar según su origen en tecnologías de microsistemas (MST: *MicroSystems Technology*) y tecnologías de microingeniería (MET: *MicroEngineering Technology*). Los procesos MET se basan en procesos mecánicos para la producción de moldes y superficies microestructuradas [25]. Dentro de las tecnologías de la microingeniería también se incluye a los procesos de fabricación para MEMS, que básicamente consisten en:

- Preparación del sustrato.
- Deposición (*Deposition*):

Depósito de películas delgadas por diversas técnicas tales como CVD (depósito por vapor químico), PVD (depósito por vapor físico), *Sputtering*, *Spin coating*, Electrodeposición, etc.

- Transferencia del diseño (*Patterning*).

Ya sea por fotolitografía, ablación laser, entre otras.

- *Etching*:

Grabado en superficie y grabado en volumen.

- Producto terminado.

En el presente capítulo se hará una breve descripción de algunas de las tecnologías de microfabricación a las que se tienen acceso en nuestro grupo de trabajo y que se pueden utilizar para la elaboración de las guías de onda.

2.1 Ablación láser.

Una de las técnicas usadas para el desarrollo de este método de fabricación es la ablación laser local o fotoablación, que consiste en remover o extraer localmente parte de un material sólido al irradiar la superficie con un láser.

Al irradiar el material, los fotones del láser incidente (L) son absorbidos provocando un aumento en la energía vibracional de los enlaces de las moléculas o átomos en la superficie, lo que desencadena un aumento en la temperatura. Si la energía incidente es mayor que el umbral de ablación (UA: mínima energía necesaria para provocar un cambio en la superficie del material), se genera un cambio de fase en estas partículas y la expulsión de una porción de ellas en estado líquido (M) y gaseoso (V). Ya sea el campo eléctrico inducido por la intensidad del láser, o un súbito aumento en la temperatura ioniza las moléculas o átomos que sufrieron un cambio de fase generando un plasma de alta densidad (DP), que permite la absorción parcial de la energía ayudando a la transformación del material circundante a este. Al estar en contacto con capas debajo de la superficie, el plasma les transfiere energía provocando una micro “explosión” causando lo que se conoce como salpicadura (*splashing*). A continuación, el plasma baja su densidad (LDP) debido a que sufre una expansión adiabática por la micro “explosión”, para finalmente colapsar en el cráter de ablación.

Una forma de ablación que usa un láser pulsado para generar el plasma puede visualizarse en la figura 2.1; es importante remarcar que tanto el tiempo de la expansión dinámica del plasma, la profundidad de penetración y la cantidad de materia que sufre un cambio de fase dependen de las propiedades ópticas y termodinámicas del material. Además, el área donde ocurre este cambio de fase es el área que abarca el ancho del haz incidente. Al usar un láser pulsado para generar el plasma el tiempo del pulso tiene que ser menor que el tiempo de difusión térmica del material (que es el cociente de la conductividad térmica por unidad de volumen, por la capacidad térmica por unidad de masa [29]), ya que si el tiempo del pulso es mayor el calor será disipado por el material.

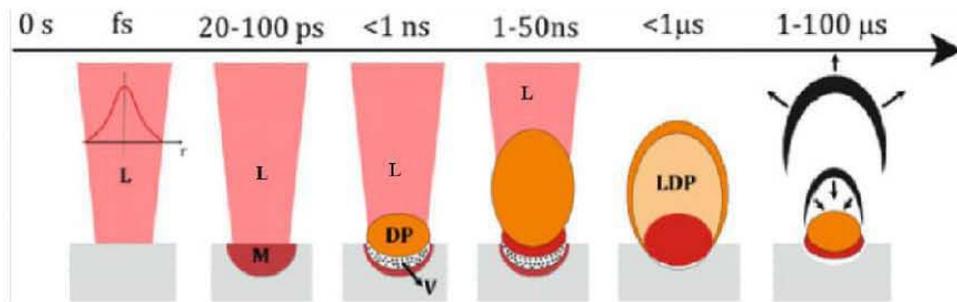


Fig 2.1 Proceso de ablación láser, adaptada de [19 pag. 165].

Las dimensiones del cráter de ablación dependerán de la cantidad de energía de la luz incidente: a mayor cantidad de energía, mayor cantidad de material resolidificado habrá dentro del cráter. Para fines tecnológicos esto no es deseable, ya que genera cierta rugosidad en el material. Para reducir el impacto térmico en el material se utilizan tiempos de irradiación ultracortos, es decir, pulsos láser de nano hasta femtosegundos.

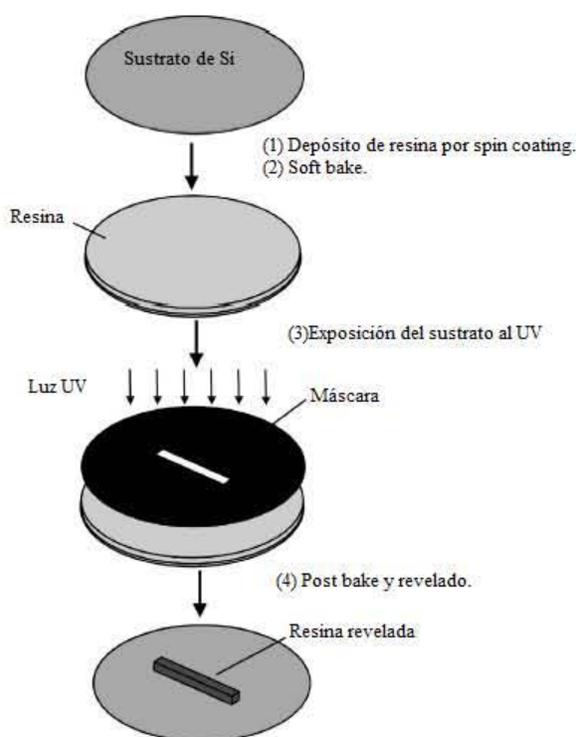
Tecnológicamente las dimensiones y forma del cráter se pueden controlar con parámetros propios del láser, como son tiempo, potencia y número de pulsos. Estas cualidades hacen a esta técnica muy valiosa en la industria y en la investigación. En el capítulo 4 se aborda las características técnicas del equipo de ablación láser utilizado.

Para el uso de este equipo y debido a la poca absorción de algunos materiales, en su mayoría transparentes, es difícil aumentar la temperatura localmente por medio de un láser, a menos que este sea de alta potencia y de tiempos ultracortos, pero el costo de estos equipos resulta ser elevado. Como solución se ha optado por recubrir dichos materiales con nanopartículas de materiales absorbentes como oro y carbón [20]. En particular, el carbón tiene un espectro de absorción que abarca desde el UV hasta el infrarrojo ($\sim 250\text{nm}-2500\text{nm}$) [36], por lo que se pueden usar diferentes longitudes de onda, como la de un fotodiodo de un láser DVD cuya longitud de onda se encuentra en el infrarrojo (780nm) [23].

2.2 Fotolitografía.

La fotolitografía es un proceso desarrollado por la industria de semiconductores y circuitos impresos y deriva de la técnica más general llamada litografía, usada en los trabajos de impresión. Este proceso consiste en transferir un patrón por medio de una máscara a una resina fotosensible depositada sobre un sustrato que comúnmente es una oblea de silicio. La fuente usada para irradiar es una lámpara de luz ultra violeta (UV) colimada.

La calidad del proceso depende de ciertos parámetros como la resolución de la máscara empleada, el tiempo de exposición, la colimación de la luz, su potencia y el tipo de resina fotosensible; al haber varios ciclos fotolitográficos la alineación de la máscara es crucial. En la figura 2.2 se muestra un proceso típico fotolitográfico



Este ciclo comienza por la preparación del sustrato, el cual se limpia de cualquier contaminante para ser sometido a un proceso que lo hará apto para la adhesión de la resina.

Después se deposita sobre él cierto volumen de resina que será esparcida uniformemente por *spin coating* (1).

Posteriormente se puede aplicar un horneado suave llamado *soft bake* (2) para mejorar la adhesión de la resina con el sustrato.

Al terminar, se alinea la máscara sobre el sustrato y se expone a la luz UV (3).

Después de la exposición a la luz se lleva a cabo el revelado.

Fig. 2.2 Proceso fotolitográfico, adaptada de [14].

Al terminar se efectúa un horneado a mayor temperatura y durante más tiempo llamado *hard bake* (4) para fijar los cambios que la exposición realizó.

Al concluir estos pasos, el sustrato está listo para aplicar ácidos fuertes como ácido nítrico, dejando a la oblea con los patrones transferidos por la máscara.

Los parámetros como el espesor de la resina depositada, el tiempo y temperatura del *soft y hard bake*, el tiempo de revelado, tipo de revelador, tiempo de exposición e intensidad de la luz dependen de cada resina e influirán en el resultado final, por lo que el proceso debe optimizarse para cada tipo de resina.

La máscara empleada es una estructura formada por patrones opacos y transparentes que impiden o permiten el paso de la luz, y puede producirse con diferentes materiales, flexibles o rígidos, dependiendo de la resolución requerida.

La resina fotosensible sólo responde a ciertas longitudes de onda, provocando que las partes expuestas a la luz cambien sus propiedades físico-químicas. Generalmente al ser irradiada, la resina cambia su acidez, haciéndola más ácida o alcalina en comparación con las partes no expuestas a la luz. Si la parte expuesta se hace más ácida se dice que es una resina positiva y si se hace más alcalina se dice que es negativa. La resina es revelada por medio de una solución alcalina que elimina las partes expuestas si la resina es positiva o las no expuestas si la resina es negativa.

Se pueden utilizar varios ciclos fotolitográficos sobre un sustrato para obtener complejas estructuras tridimensionales de varias capas.

2.3 Polimerización por dos fotones.

En esta técnica la luz se utiliza para desencadenar una reacción química que conduce a la polimerización de un material fotosensible. A diferencia de otras técnicas de curado, conocidas como polimerización por un fotón, esta técnica utiliza un láser pulsado de femtosegundos que irradia en el infrarrojo cercano 800 nm (Fig. 2.3). En el punto focal, un fotoiniciador absorbe dos fotones de 800 nm y emite uno de 400nm, el cual inicia la reacción de polimerización [21]

Para que los procesos no lineales dominen sobre los lineales se necesita una mayor energía que la requerida por el proceso lineal, por lo que la birrefringencia del material sólo estará presente en el punto focal, provocando que la polimerización sea localizada y otras regiones del material permanezcan sin alterar.

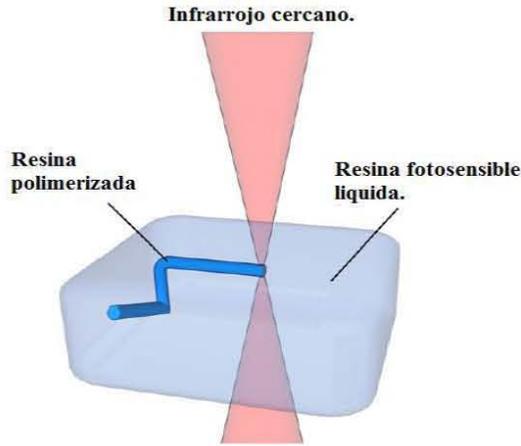


Fig 2.3 Polimerización por dos fotones adaptada de [22]

Este enfoque tiene posibles resoluciones de solidificación por debajo del límite de difracción de la luz. Al mover el foco del láser, se permite la fabricación de un "verdadero" objeto tridimensional directamente en el volumen del material fotosensible. Es posible crear objetos de tamaño micrométrico, reproducibles con una resolución inferior a 100 nm, siendo por tanto superior a muchas otras técnicas de prototipado rápido con respecto a la precisión y la resolución.

2.4 Litografía suave.

La litografía suave es un conjunto de técnicas para la fabricación o replica de estructuras utilizando moldes, sellos elastoméricos y fotomáscaras. Es llamada suave porque usa polímeros para la realización de las réplicas, que no requieren de ataques por ácidos fuertes. Algunas de las técnicas clasificadas como litografía suave [28] son:

- Molde replica (REM: *REplica Molding*)

Una parte importante del proceso de fabricación de esta tesis se basó en esta técnica, que consiste en replicar las geometrías de un molde con un elastómero (PDMS). Este proceso está descrito a detalle en el capítulo 4.

- Impresión por microcontacto (μ CP: *Micro-Contac Printing*)
- Micro moldeo con solvente (*SAMIM: Solved-Assisted Micro Molding*)
- Estampado (*Hot embossing*)

- Moldeado por inyección (*Injection molding*)

La litografía suave presenta múltiples ventajas sobre otras formas de litografía como fotolitografía y EBL (*electron beam lithography*). Algunas son:

- Menor costo de producción en masa.
- El uso de materiales biocompatibles.
- Adecuada para la reproducción de superficies no planares.
- Muchas más opciones en cuanto a técnicas para la transferencia del diseño.
- Alta resolución.

Por lo que se convierte en una técnica útil para aplicaciones en LoCs, biotecnología, MEMS y biosensores.

Capítulo 3.

Guías de onda¹.

A lo largo de la historia de la óptica de rayos, la luz es transmitida desde un lugar a otro utilizando diversas clases de arreglos ópticos. Si se supone un haz colimado, usando distintas clases de lentes y espejos se puede “elegir” la trayectoria que el haz luminoso ha de seguir. Sin embargo, los componentes ópticos empleados son estorbosos y grandes, por lo que algún objeto puede interferir en la trayectoria del haz. Por ello en algunas circunstancias la mejor opción para “dirigir” la trayectoria de un haz es usar el propio medio (dieléctrico) de propagación. A la tecnología que surge de este acto se le conoce como guías de onda.

El concepto de guiar la luz en un dieléctrico estrecho se conoce desde hace tiempo: John Tyndall (1870) demostró que un fino flujo de agua podía contener y guiar la luz. Poco después se utilizaron otros materiales como fibra de vidrio, pero no fue hasta la década de 1950 que comenzaron los primeros estudios serios sobre materiales para la fabricación de guías de onda y en la década de los 60's con la invención del L.A.S.E.R. se apreció el potencial de esta tecnología al utilizar la luz en lugar de las corrientes eléctricas para transmitir información.

Las guías de onda que propagan y confinan la luz en un dieléctrico se denominan guías de onda clásicas y funcionan mediante reflexión total interna (RTI).

3.1 Ley de Snell-Descartes (Ondas en una interfaz).

Para comprender el mecanismo físico por el cual la luz queda confinada y es guiada en una guía de onda clásica, conocido como reflexión total interna, se necesita describir ciertos aspectos del comportamiento de la luz en un dieléctrico y en una interface entre dos materiales con diferentes índices de refracción. Se tomará la

¹ La teoría desarrollada en este capítulo puede consultarse más detalladamente en [24]

naturaleza ondulatoria de la luz y su planteamiento electromagnético (ecuaciones de Maxwell) para alcanzar este fin.

Si se supone una onda electromagnética plana monocromática incidente, esta tendrá la forma simple.

$$\bar{\mathbf{E}}_i = \mathbf{E}_{0i} \cos(\bar{\mathbf{k}}_i \cdot \bar{\mathbf{r}} - \omega_i t) \quad (3.1)$$

Supongamos que $\frac{dE_{0i}}{dt} = 0$ i.e. la onda incidente es linealmente polarizada o polarizada en un plano, lo cual no representa ninguna restricción ya que cualquier onda polarizada puede representarse como la combinación lineal de dos ondas linealmente polarizadas y ortogonales entre sí. Además como el tiempo $t=0$ es arbitrario, al igual que el origen espacial O donde $r=0$ sin suposiciones en su frecuencia, longitud de onda, fase o amplitud, se pueden formular las ondas reflejada y transmitida.

$$\bar{\mathbf{E}}_r = \mathbf{E}_{0r} \cos(\bar{\mathbf{k}}_r \cdot \bar{\mathbf{r}} - \omega_r t + \varepsilon_r) \quad (3.2)$$

$$\bar{\mathbf{E}}_t = \mathbf{E}_{0t} \cos(\bar{\mathbf{k}}_t \cdot \bar{\mathbf{r}} - \omega_t t + \varepsilon_t) \quad (3.3)$$

Donde ε_r y ε_t son constantes relativas a $\bar{\mathbf{E}}_n$ y se introducen debido a que la posición del origen no es única. La figura 3.1 muestra la onda incidente en la vecindad de una interfaz plana entre dos medio homogéneos dieléctricos con dos índices de refracción distintos n_1 y n_2 .

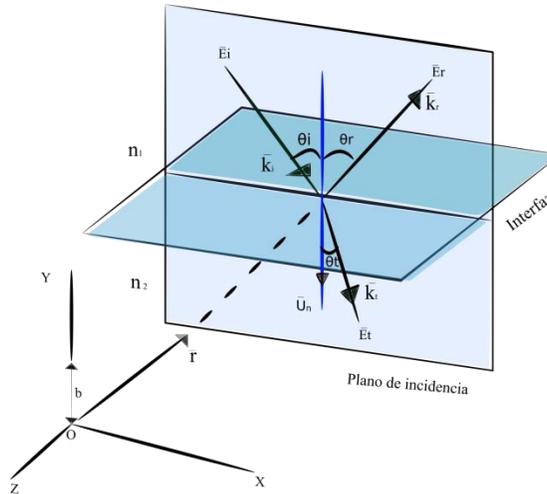


Fig. 3.1 Ondas en una interfaz.

Al tomar las ecuaciones de Maxwell, estas imponen ciertas restricciones a los campos. Las condiciones a la frontera obligan a que la componente del campo

eléctrico $\bar{\mathbf{E}}_{\mathbf{n}}$, que es tangente a la interfaz, deba ser continua a través de ella (lo mismo para $\bar{\mathbf{H}}_{\mathbf{n}}$), en otras palabras, la componente tangencial de $\bar{\mathbf{E}}_{\mathbf{n}}$ debe ser la misma en ambos lados de la frontera. Dado $\hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{n}}$ que es el vector unitario normal a la superficie, independientemente de la dirección del campo $\bar{\mathbf{E}}_{\mathbf{n}}$ que hay en el frente de onda, el producto vectorial de $\bar{\mathbf{E}}_{\mathbf{n}}$ con $\hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{n}}$ será perpendicular a $\hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{n}}$ y por lo tanto tangente a la superficie.

Así que:

$$\hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{n}} \times \bar{\mathbf{E}}_{\mathbf{i}} + \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{n}} \times \bar{\mathbf{E}}_{\mathbf{r}} = \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{n}} \times \bar{\mathbf{E}}_{\mathbf{t}} \quad (3.4)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.1) a (3.3) queda.

$$\hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_{0i} \cos(\bar{\mathbf{k}}_{\mathbf{i}} \cdot \bar{\mathbf{r}} - \omega_i t) + \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_{0r} \cos(\bar{\mathbf{k}}_{\mathbf{r}} \cdot \bar{\mathbf{r}} - \omega_r t + \varepsilon_r) = \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_{0t} \cos(\bar{\mathbf{k}}_{\mathbf{t}} \cdot \bar{\mathbf{r}} - \omega_t t + \varepsilon_t) \quad (3.5)$$

Esta relación debe mantenerse en todo instante y en todo punto de la interfaz, en particular ($y=b$), esto quiere decir que los campos \mathbf{E} tienen la misma dependencia en t y r , lo cual implica que.

$$(\bar{\mathbf{k}}_{\mathbf{i}} \cdot \bar{\mathbf{r}} - \omega_i t)|_{y=b} = (\bar{\mathbf{k}}_{\mathbf{r}} \cdot \bar{\mathbf{r}} - \omega_r t + \varepsilon_r)|_{y=b} = (\bar{\mathbf{k}}_{\mathbf{t}} \cdot \bar{\mathbf{r}} - \omega_t t + \varepsilon_t)|_{y=b} \quad (3.6)$$

La expresión (3.6) anula los cosenos de la expresión (3.5) dejando la relación (3.7) que es independiente de t y r como debe de ser.

$$\hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_{0i} \hat{\mathbf{i}} + \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_{0r} \hat{\mathbf{r}} = \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_{0t} \hat{\mathbf{t}} \quad (3.7)$$

Donde $\hat{\mathbf{r}}$ es el vector unitario en la dirección del haz reflejado y $\hat{\mathbf{t}}$ el vector unitario en la dirección del haz transmitido, además (3.6) debe cumplirse para todos los instantes de tiempo, por lo tanto los coeficientes de t deben ser iguales y así se obtiene.

$$\omega_i = \omega_r = \omega_t \quad (3.8)$$

Entonces

$$(\bar{\mathbf{k}}_{\mathbf{i}} \cdot \bar{\mathbf{r}})|_{y=b} = (\bar{\mathbf{k}}_{\mathbf{r}} \cdot \bar{\mathbf{r}} + \varepsilon_r)|_{y=b} = (\bar{\mathbf{k}}_{\mathbf{t}} \cdot \bar{\mathbf{r}} + \varepsilon_t)|_{y=b} \quad (3.9)$$

Las partículas en el medio que interactúan con la luz son electrones, que están sujetos a vibraciones lineales forzadas a la frecuencia de la onda incidente, por lo que cualquier luz que sea dispersada, tendrá la misma frecuencia. De la ecuación (3.9) $\bar{\mathbf{r}}$ termina en la interfaz. Los valores de ε_r y ε_t corresponden a determinada posición del origen y por lo tanto la relación (3.9) es válida independientemente del origen. De los dos primeros términos de la relación anterior se obtiene,

$$|(\bar{\mathbf{k}}_i - \bar{\mathbf{k}}_r) \cdot \bar{\mathbf{r}}|_{y=b} = \varepsilon_r \quad (3.10)$$

Entonces como $(\bar{\mathbf{k}}_i - \bar{\mathbf{k}}_r)$ está sobre el plano de incidencia, al igual que $\hat{\mathbf{u}}_n$, son paralelos.

$$(\bar{\mathbf{k}}_i - \bar{\mathbf{k}}_r) \times \hat{\mathbf{u}}_n = 0 \Rightarrow \bar{\mathbf{k}}_i \times \hat{\mathbf{u}}_n = \bar{\mathbf{k}}_r \times \hat{\mathbf{u}}_n \Rightarrow k_i \text{sen} \theta_i = k_r \text{sen} \theta_r \quad (3.11)$$

Y eso sucede sí y solo sí:

$$\theta_i = \theta_r \quad (3.12)$$

Que se conoce como ley de reflexión.

Ahora, si se toma la otra parte de la relación (3.9)

$$|(\bar{\mathbf{k}}_i - \bar{\mathbf{k}}_t) \cdot \bar{\mathbf{r}}|_{y=b} = \varepsilon_t \quad (3.13)$$

Esta implica que $\bar{\mathbf{k}}_t$ es co-planar a $\bar{\mathbf{k}}_i$, $\hat{\mathbf{u}}_n$ y $\bar{\mathbf{k}}_r$ y por lo tanto estos vectores son paralelos, obteniendo la expresión.

$$k_i \text{sen} \theta_i = k_t \text{sen} \theta_t \quad (3.14)$$

Como $\omega_i = \omega_t$, se puede multiplicar ambos lados por $\frac{c}{\omega_i}$ llegando a la relación.

$$n_i \text{sen} \theta_i = n_t \text{sen} \theta_t \quad (3.15)$$

Que es conocida como la ley de refracción de Snell-Descartes.

3.2 Ecuaciones de Fresnel.

En la sección anterior se encontró la relación entre las fases de los campos $\bar{\mathbf{E}}_n$ en la interfaz (condiciones a la frontera). También existe una interdependencia

compartida en las amplitudes de $\bar{\mathbf{E}}_n$, que se puede conocer calculando las componentes paralelas y ortogonales de los campos $\bar{\mathbf{E}}_i$, $\bar{\mathbf{E}}_r$ y $\bar{\mathbf{E}}_t$.

Dado que son ondas electromagnéticas, debe haber continuidad tanto en $\bar{\mathbf{E}}_n$ como en $\bar{\mathbf{B}}_n$. Puesto que no es el propósito de esta tesis, no se hará una deducción detallada de estas ecuaciones pero sí se remarcarán las hipótesis importantes.

Haciendo uso de las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) y recordado que los cosenos son los mismos en $y=b$, se puede manejar la forma escalar de estos campos.

- Componentes paralelas.

Como se muestra en el diagrama Fig. 3.1, el campo eléctrico se encuentra en el plano incidente. Las condiciones a la frontera de las componentes tangenciales de $\bar{\mathbf{E}}_n$ llevan a,

$$E_{0i} \cos \theta_i - E_{or} \cos \theta_r = E_{0t} \cos \theta_t \quad (3.16)$$

De la continuidad de las componentes tangenciales de $\bar{\mathbf{B}}_n$ y recordando que $\mathbf{E}=\nu\mathbf{B}$, se obtiene,

$$\frac{1}{\mu_i \nu_i} E_{0i} + \frac{1}{\mu_r \nu_r} E_{or} = \frac{1}{\mu_t \nu_t} E_{0t} \quad (3.17)$$

Como el campo incidente y el reflejado se encuentran en el mismo medio $\mu_i = \mu_r$ y por (3.12), se pueden combinar ambas ecuaciones para obtener así dos ecuaciones de Fresnel.

$$r_{\parallel} = \left(\frac{E_{or}}{E_{0i}} \right)_{\parallel} = \frac{\frac{n_t}{\mu_t} \cos \theta_i - \frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_t}{\frac{n_t}{\mu_t} \cos \theta_i + \frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_t} \quad (3.18)$$

$$t_{\parallel} = \left(\frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)_{\parallel} = \frac{2 \frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_i}{\frac{n_t}{\mu_t} \cos \theta_i + \frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_t} \quad (3.19)$$

- Componentes ortogonales

Supongamos $\bar{\mathbf{E}}_n$ ortogonal al plano de incidencia, lo que lleva a que $\bar{\mathbf{k}} \times \bar{\mathbf{E}}_n = v\bar{\mathbf{B}}_n$ y $\bar{\mathbf{k}} \cdot \bar{\mathbf{E}}_n = 0$.

De las mismas condiciones a la frontera de los campos eléctricos y magnéticos.

$$E_{oi} + E_{or} = E_{ot} \quad (3.20)$$

$$\frac{1}{\mu_i v_i} (E_{oi} - E_{or}) \cos \theta_i = \frac{1}{\mu_t v_t} E_{ot} \cos \theta_t \quad (3.21)$$

Al combinar ambas ecuaciones se obtienen las componentes ortogonales.

$$r_{\perp} = \left(\frac{E_{or}}{E_{oi}} \right)_{\perp} = \frac{\frac{n_t \cos \theta_t - n_i \cos \theta_i}{\mu_t} \frac{n_i \cos \theta_i}{\mu_i}}{\frac{n_t \cos \theta_t + n_i \cos \theta_i}{\mu_t} \frac{n_i \cos \theta_i}{\mu_i}} \quad (3.22)$$

$$t_{\perp} = \left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}} \right)_{\perp} = \frac{2 \frac{n_i \cos \theta_i}{\mu_i}}{\frac{n_t \cos \theta_t + n_i \cos \theta_i}{\mu_t} \frac{n_i \cos \theta_i}{\mu_i}} \quad (3.23)$$

Las afirmaciones (3.18), (3.19), (3.22) y (3.23) llamadas ecuaciones de Fresnel son absolutamente generales y se aplican en un medio homogéneo, isotrópico y lineal.

Para altas frecuencias como es el caso de la luz visible $\mu_i \approx \mu_t \approx \mu_0$; en consecuencia la forma de las ecuaciones de Fresnel para dieléctricos es:

$$r_{\parallel} = \left(\frac{E_{or}}{E_{oi}} \right)_{\parallel} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (3.24a) \quad t_{\parallel} = \left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}} \right)_{\parallel} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (3.24b)$$

$$r_{\perp} = \left(\frac{E_{or}}{E_{oi}} \right)_{\perp} = \frac{n_t \cos \theta_t - n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_t + n_i \cos \theta_i} \quad (3.25a) \quad t_{\perp} = \left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}} \right)_{\perp} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_t + n_i \cos \theta_i} \quad (3.25b)$$

3.2.1 Coeficientes de Amplitud.

A una incidencia casi normal ($\theta_i \approx 0$), como el plano de incidencia ya se especifica cuando $\theta_i = 0$ ambos coeficientes son iguales.

$$[r_{\parallel}]_{\theta_i=0} = [-r_{\perp}]_{\theta_i=0} \quad (3.26 \text{ a})$$

$$[t_{\parallel}]_{\theta_i=0} = [t_{\perp}]_{\theta_i=0} \quad (3.26 \text{ b})$$

De aquí se puede demostrar que para todo ángulo:

$$t_{\perp} + (-r_{\perp}) = 1 \quad (3.27)$$

Y sólo para incidencia normal $r_{\parallel} + t_{\parallel} = 1$ (3.28)

3.3 Reflexión Total Interna (RTI).

En la situación en la que el medio incidente es más denso ($n_1 > n_2$), por ley de Snell,

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

Se llega a $\theta_2 > \theta_1$, esto implica por la ecuación (3.25a) que r_{\perp} será siempre positivo, y aumentará desde su valor inicial en $\theta_1 = 0$ hasta +1 en lo que se denomina ángulo crítico $\theta_1 = \theta_c$. Concretamente θ_c es el valor para el cual $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$. Del mismo modo, r_{\parallel} comenzará negativamente en $\theta_1 = 0$ hasta alcanzar el valor de +1 en $\theta_1 = \theta_c$.

Dicho de otra forma, los coeficientes r_{\perp} y r_{\parallel} aumentan al aumentar θ_1 y, por consiguiente, t_{\perp} y t_{\parallel} disminuirán hasta desaparecer, Esto se nota directamente de los coeficientes de amplitud (Anexo B) y visualmente en la figura 3.2 que es el ejemplo más común en una interface aire-vidrio.

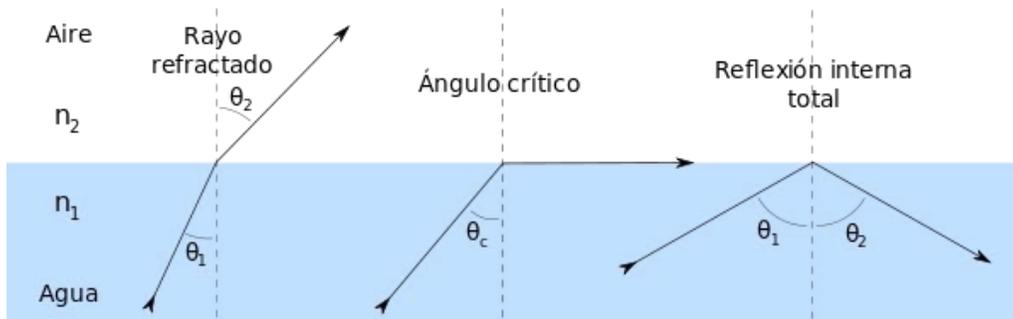


Fig. 3.2 Reflexión total interna RTI adaptada de [30]

Para ángulos incidentes mayores o iguales a θ_c , toda la energía incidente se reflejará de nuevo hacia el medio incidente en un proceso conocido como reflexión total interna. Esta transición tiene lugar sin ninguna discontinuidad, Mientras θ_1 aumenta, el haz reflejado aumenta en intensidad y el haz transmitido se hace más débil hasta que este último desaparece.

3.4 Apertura numérica y atenuación.

3.4.1 Ángulo de aceptación y apertura numérica.

Para diseñar guías de onda y utilizarlas correctamente en la práctica, es importante determinar su ángulo de aceptación y apertura numérica. Las guías de onda fabricadas, son varias veces más grandes que la longitud de onda a guiar, esto favorece el cálculo de las siguientes relaciones que se deducen en el dominio de envolvente de rayos.

Al funcionar por RTI, el núcleo es de un material con un índice de refracción (n_c) más grande y el material envolvente de un índice de refracción (n_e) más bajo.

Obsérvese en la figura 3.3 que hay un ángulo máximo θ_{max} de θ_i para el cual el rayo interno incidirá con el ángulo crítico θ_c .

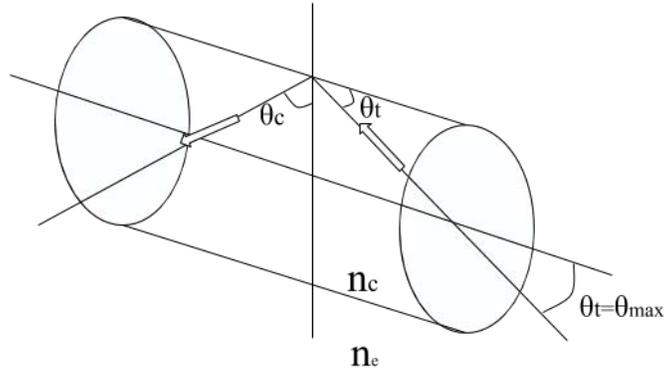


Fig. 3.3 Rayos en una guía

Los rayos incidentes en las caras con ángulos mayores que θ_{max} , incidirán en la pared interior con ángulos inferiores a θ_c , reflejándose sólo parcialmente en cada encuentro con la interfaz núcleo-cubierta y abandonarán rápidamente la guía, por lo tanto θ_{max} , denominado **ángulo de aceptación**, define el semiángulo del cono de aceptación de la guía.

Se determina partiendo de la ley de Snell:

$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_e}{n_c} = \text{sen } (90^\circ - \theta_t) \quad (3.29)$$

$$\text{Así } \frac{n_e}{n_c} = \cos \theta_c \text{ o } \frac{n_e}{n_c} = (1 - \text{sen}^2 \theta_c)^{\frac{1}{2}} \text{ entonces } \text{sen} \theta_{max} = (1 - \text{sen}^2 \theta_c)^{\frac{1}{2}} \quad (3.30)$$

Utilizando nuevamente ley de Snell y ajustando los términos se obtiene.

$$\text{sen} \theta_{max} = \frac{1}{n_i} (n_c^2 - n_e^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.31)$$

La cantidad $n_i \text{sen} \theta_{max}$ se denomina **apertura numérica** o NA (del inglés *numerical apertur*) cuyo cuadrado es una media del poder colector de luz en la guía de onda.

Entonces:

$$NA = (n_c^2 - n_e^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.32)$$

El lado izquierdo de la ecuación (3.31) no puede ser más grande que 1 y el lado derecho el medio de incidencia con el índice más pequeño es aire y su índice es casi 1, por lo que el valor más grande de NA es 1.

3.4.2 Atenuación.

A medida que la luz se propaga a lo largo de una guía de onda, sufre una atenuación, debida a pérdidas tanto extrínsecas como la geometría, rugosidad de las paredes, esparcimiento, retro esparcimiento y modos de radiación e intrínsecas como la absorción, reflexión y transición del material.

Suponiendo una atenuación débil las pérdidas (IL) por unidad de longitud (L_w) pueden escribirse como $IL = e^{\alpha L_w} = e^{(\alpha_a + \alpha_r + \alpha_b)L_w}$ donde α es la absorción que está compuesta por la absorción pura del material (α_a) y factores asociados a la rugosidad de las paredes (α_r, α_b).

La rugosidad es una propiedad física inevitable que produce una fluctuación en la onda provocando un cambio en el índice de refracción efectivo. Se origina en el método de fabricación (litografía) y es influenciado por el tipo de litografía (suave o dura) y el tipo de material usado para su fabricación. [31].

El decibel (dB) es la unidad habitual que se utiliza para designar la relación entre dos niveles de potencia, la potencia de salida (P_o) y la potencia de entrada (P_i).

El número de decibelios en una relación 1:10 está dado por:

$$dB = -10 \text{Log} \left(\frac{P_o}{P_i} \right) \quad (3.33)$$

La atenuación α se relaciona con las pérdidas en decibeles por unidad de longitud (L , en centímetros) es:

$$\alpha L = -10 \text{Log} \left(\frac{P_o}{P_i} \right) \quad (3.34)$$

Esta ecuación (3.34) es una relación lineal entre las pérdidas y la longitud de la guía cuya constante de proporcionalidad (pendiente) es el coeficiente de atenuación.

3.5 Número de modos.

Según el ángulo de llegada al interior de la guía pueden existir varias centenas, incluso millares, de trayectorias de rayos o modos diferentes por los que puede propagarse energía en el núcleo, tal como se muestra en la figura 3.4

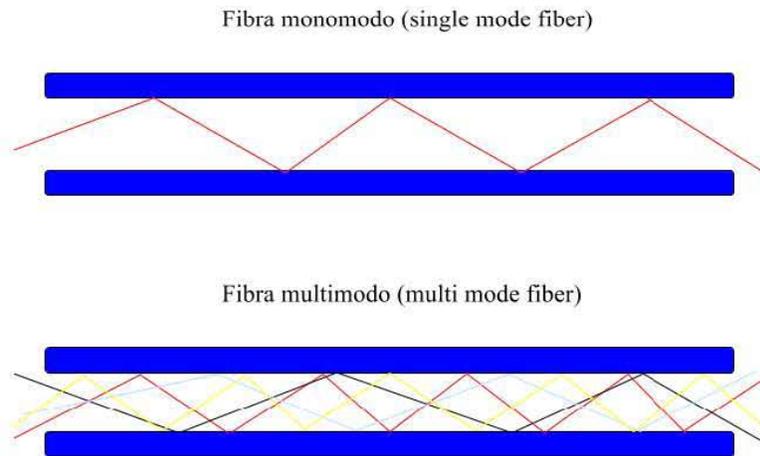


Fig. 3.4 Modos de propagación

A cada una de las posibles configuraciones o trayectorias que adoptan las ondas electromagnéticas que viajan a través de la guía de ondas se le conoce como modo de propagación, cada modo se caracteriza por satisfacer ciertas condiciones a la frontera.

En una guía de onda existen modos longitudinales y transversales que se pueden clasificar en: Transversal Eléctrico (TE: no existe ninguna componente del campo eléctrico en la dirección de propagación), Transversal Magnético (TM: no existe ninguna componente del campo magnético en la dirección de propagación) y Transversal Electromagnético (TEM: no existe ninguna componente del campo eléctrico ni magnético en la dirección de propagación), lo cuales dependen de las dimensiones de la guía de onda, de la longitud y polarización de la luz.

Para calcular el número de modos en un dieléctrico se asume una guía de onda de sección trasversal rectangular de ancho "a" y de largo "b", con índice de refracción

en el núcleo n_c y un índice n_e del recubrimiento y un rayo incidente de longitud de onda $\lambda_0 = \frac{\lambda}{n_c}$.

Utilizando la figura 3.5 donde se observa la geometría de la guía y su espacio fase, se puede deducir lo siguiente:

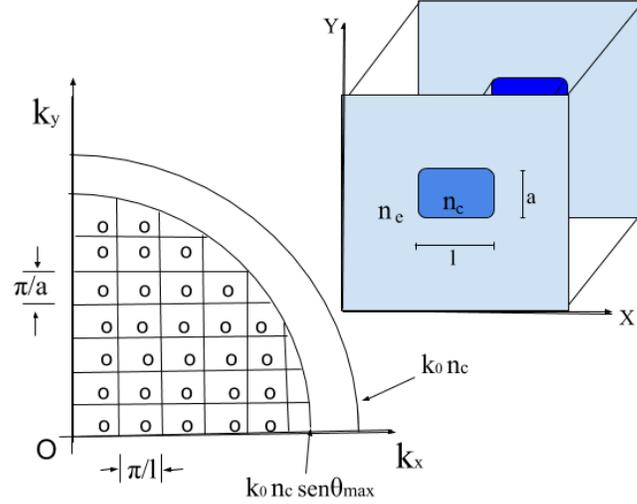


Fig. 3.5 Geometría de una guía de onda rectangular

Los vectores de ondas en las direcciones “x” y “y” no están uniformemente espaciados, sin embargo, guardan una relación entre el ancho y largo, entonces el número de modos puede aproximarse en un número continuo de puntos en una esfera, promediando una separación de $\frac{\pi n_c}{l}$ en la dirección k_x y $\frac{\pi n_c}{a}$ en la dirección k_y donde $k_n = \frac{2\pi}{\lambda}$. Así:

$$M \approx \frac{\left(\frac{\pi}{4}\right)(n_c k_0 \text{sen } \theta_{\max})^2}{\left(\frac{n_c \pi}{l}\right)\left(\frac{n_c \pi}{a}\right)} \quad (3.35)$$

Usando la ecuación (3.31) y la relación del vector de onda se llega a:

$$M \approx \left(\frac{\pi}{\lambda^2}\right)(a * l)(NA)^2 \quad (3.36)$$

Esta aproximación es correcta si se asume M grande.

Capítulo 4.

Método de fabricación de guías de onda poliméricas.

El método desarrollado para la fabricación de guías de onda consiste en la elaboración de un molde por medio de ablación láser y su réplica con PDMS utilizando una técnica de litografía suave. Este tipo de proceso molde-réplica presenta todas las ventajas que se mencionaron en el capítulo 2 como fácil manejo, biocompatibilidad y bajo costo.

El método propuesto se explicará detalladamente a lo largo del capítulo y consta de las siguientes etapas:

- Diseño del patrón de guiado por software utilizando las consideraciones del capítulo anterior.
- Transferencia por grabado láser del patrón en un sustrato plano de acrílico. (molde maestro)
- Caracterización del molde y verificación de la transferencia al acrílico.
- Transferencia del diseño en PDMS (polidimetilsiloxano) proceso molde-réplica.
- Caracterización del chip de PDMS.

Con este procedimiento se puede fabricar dos tipos de guías de onda:

1. Guía de onda tipo escalón
2. Guía de onda embebida

Finalmente, se optimizaron diversos parámetros como las temperaturas y tiempos de curado, dependiendo de si trata del núcleo o el revestimiento de la guía, para

buscar ofrecer el mejor control posible, con alta tasa de reproducibilidad, del índice de refracción (ya que depende fuertemente de estos parámetros como fue reportado en [5] y [14]).

4.1 Poli(dimetilsiloxano)(PDMS).

También conocido como dimeticona, el PDMS es un polímero perteneciente a la familia de los compuestos de organosilicio, sustancias comúnmente conocidas como siliconas [26]. Su estructura molecular se muestra en la figura 4.1.

Sus aplicaciones varían desde lentes de contacto y aditivos para alimentos hasta elastómeros.

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, el PDMS posee múltiples ventajas tales como:

- Biocompatible
- Estable térmicamente
- Flexible
- Estable mecánicamente
- Transparente en el UV-visible
- Índice de refracción “ajustable”
- Fácil de manipular
- Bajo costo

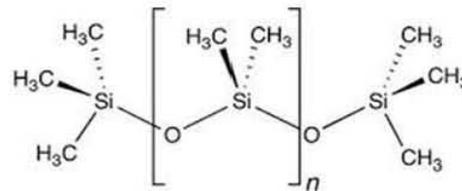


Fig. 4.1 Estructura del PDMS

Puesto que es el material elegido para manufacturar las guías de onda, es importante mencionar los siguientes aspectos: el PDMS utilizado fue SYLGARD® 184 SILICONE ELASTOMER KIT (lote 0007824281), el cual consta de dos frascos, como se muestra en la Imagen 4.1, uno es la base (frasco grande) y el otro el agente curante (frasco pequeño), para una mezcla en proporción en peso P/p 10:1. El mecanismo de polimerización se encuentra en el anexo A. El peso molecular del PDMS en una P/p 10:1 es de 207g/mol [32].

Del capítulo anterior se sabe que para fabricar una guía de onda que funcione por medio de reflexión total interna se necesitan dos índices de refracción diferentes, es decir el núcleo debe ser de un material con un índice de refracción mayor al del recubrimiento.

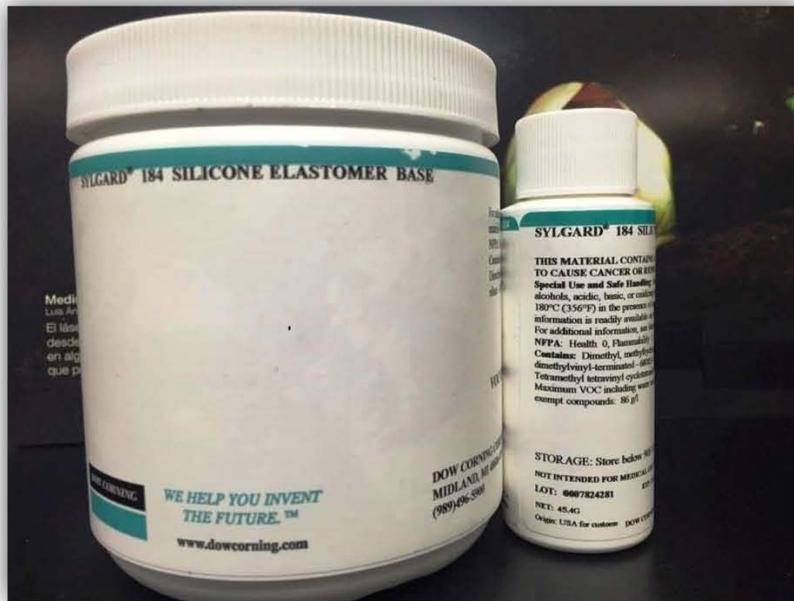
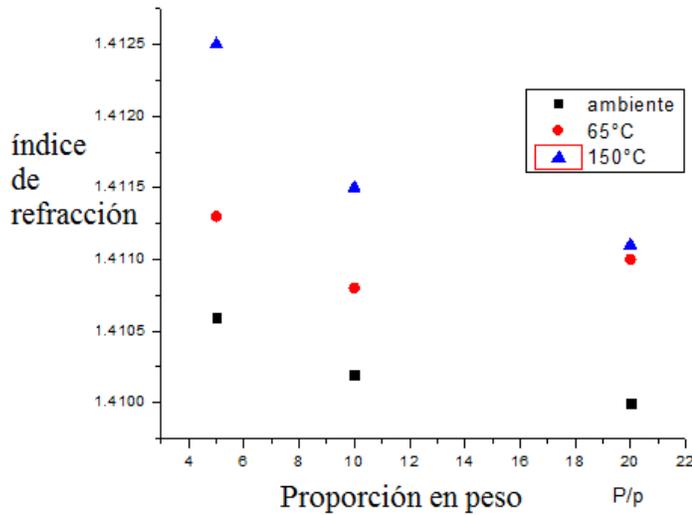


Imagen 4. Kit Sylgard 184 de fabricación del Poli(dimetilsiloxano).

De la literatura se sabía que al cambiar la temperatura de curado del PDMS [5] se modifica el índice de refracción, al igual que al variar la proporción en peso P/p [14]. Por lo tanto, se midió el índice de refracción del PDMS midiendo el ángulo de reflexión al acoplar una muestra de PDMS con un prisma del que se conoce su índice. Se produjeron varias muestras de PDMS variando la temperatura y la proporción en peso del PDMS simultáneamente. Las temperaturas de curado se eligieron de la siguiente forma: 65°C (temperatura máxima a la cual los portaobjetos de acrílico utilizados como moldes para réplica en este trabajo pueden ser sometidos sin deformarse), temperatura ambiente (~22°C) y 150°C, ya que a estas temperaturas, reportadas en [5], el PDMS presenta un mayor cambio en su índice de refracción.

El índice de refracción del PDMS se midió en el Instituto de Física UNAM con un equipo METRICON 2010-Prism Coupler que utiliza un láser He-Ne (0.8mW, 632.8nm) a las temperaturas de curado previamente mencionadas y con diferentes proporciones en peso. Estas muestras se produjeron con un espesor de alrededor de 5mm sobre un sustrato de acrílico, se midió el índice de refracción en el centro de la muestra para que factores como esfuerzos provocados por efectos de superficie no alteraran la medición que se realizó con una fuerza promedio de sujeción de 29psi. Los valores (tabla 4.1) del índice de refracción se graficaron (gráfica 4.1).



T \ P/p	Ambiente	65°C	150°C
5:1	1.4106	1.4113	1.4125
10:1	1.4102	1.4108	1.4115
20:1	1.4100	1.4110	1.4111

Tabla 4.1 Índice de refracción del PDMS, el error del equipo es de ± 0.0002 [37].

Graf. 4.1 índices de refracción del PDMS en función de las condiciones de preparación

Se puede notar que el índice de refracción aumenta al aumentar la concentración del agente curante y la temperatura, esto puede deberse a que al aumentar la concentración del entrecruzante del polímero se incrementa el número de moléculas (n) por unidad de volumen lo cual modifica la longitud del camino libre medio " l ", que está relacionado con el número de partículas y la sección transversal por la ecuación (4.1) [33].

$$l = \frac{1}{n\sigma} \quad (4.1)$$

De la ecuación anterior se nota que si " n " aumenta y la sección eficaz " σ " permanece constante o aumenta (lo cual es cierto ya que al aumentar el número de partículas por unidad de volumen la dispersión permanece constante o aumentará) disminuirá el camino libre medio en el material.

Otra forma de la expresión del camino libre medio es:

$$v = \frac{l}{t} \quad (4.2)$$

donde t es el tiempo que tarda una partícula en recorrer la longitud l a una velocidad v , y recordando que el índice de refracción es

$$n = \frac{c}{v} \quad (4.3)$$

Uniendo (4.2) y (4.3) se obtiene una expresión para el índice de refracción en función del camino libre medio,

$$n = \frac{ct}{l} \quad (4.4)$$

Como l disminuye para el mismo tiempo t entonces el índice de refracción aumenta. Que es lo que sucede con los valores medidos en la tabla 4.1,

4.2 Diseño geométrico de los patrones a utilizar.

Esta es la primera parte del método de fabricación: el diseño de los patrones a guiar se realiza por medio de software, lo que es una gran ventaja por los múltiples programas que existen para diseño gráfico y que permiten la sencilla manipulación de múltiples parámetros, tales como ángulos, longitudes de arista y el empleo de una gran variedad de formas geométricas.

El software usado fue Inkscape en su versión 0.91, porque es un software libre y emplea vectores para la creación de las formas geométricas, lo que representa una gran ventaja en la resolución de la imagen.

Para la prueba de concepto del método de fabricación se utilizaron diseños sencillos para pruebas de guiado tales como líneas rectas y codos, además las rectas se utilizaron para medir la atenuación de las guías de onda en función de la longitud de la guía.

Con el método de fabricación optimizado se diseñó un divisor de haz. Para su diseño, se tomaron en cuenta algunos parámetros calculados matemáticamente, con los valores del índice de refracción del PDMS medidos (tabla 4.1) se calculó el ángulo crítico θ_c , la apertura numérica **NA** y el semiángulo de aceptación θ_{max} . Con estos valores se optimizó el ángulo de apertura de los brazos de un divisor de haz como se muestra en la Fig. 4.2. El cálculo numérico de estos valores se encuentra en Anexo B.

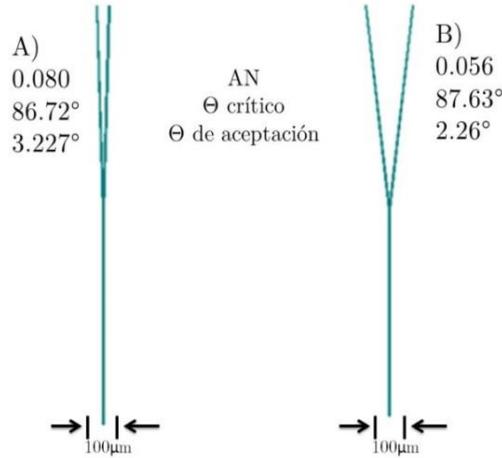


Fig. 4.2 Diseño de divisores de haz con diferente ángulo de apertura entre sus brazos.

Debe tomarse en cuenta que entre mayor sea el contraste entre los índices de refracción, más grande será el valor de θ_{max} , por lo tanto mayor será la separación de los brazos del divisor.

Para la transferencia del patrón diseñado con el equipo de ablación láser a un portaobjetos de acrílico se utiliza una imagen cuadrada tipo mapa de bits monocromático.

4.3 Fabricación del molde maestro.

Esta es la segunda parte del método de fabricación en la que no se profundizará ya que existen trabajos describiendo el método usado [23, 25]. Sólo se expondrán los puntos importantes y los pasos a seguir para la fabricación del molde maestro.

El proceso usado para fabricar el molde maestro consiste en transferir el diseño de la guía a un portaobjetos de acrílico por medio de ablación láser local.

El equipo para ablación se muestra en la figura 4.3.

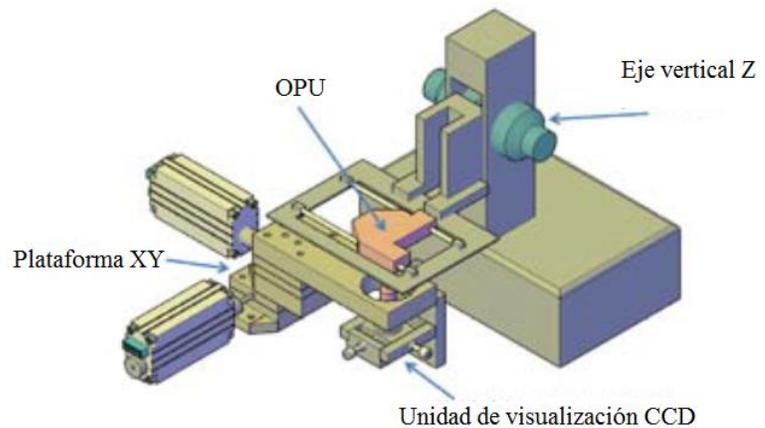


Fig. 4.3 Esquema del equipo de ablación láser adaptada de [25].

Este equipo consta de un arreglo de motores para posicionar una plataforma en los ejes XY. El enfoque de la OPU (*optical pickup unit*) sobre la muestra se hace de forma manual con la ayuda de la unidad de visualización CCD. Esta unidad está conectada a una unidad de control y esta a su vez a una computadora donde se controla el equipo. Mediante el software del equipo la unidad de control puede hacer uso de los siguientes parámetros:

- Desplazamiento lineal en el eje X.
- Desplazamiento lineal en el eje Y.
- Modo del láser (continuo o pulsado).
- Duración y número del pulso(s).

Y se deduce la resolución (equivalencia entre micras por pixel) que depende de los parámetros anteriores.

4.3.1 Preparación del molde.

Para la fabricación del molde maestro se utilizó un portaobjetos de acrílico (~ 5.5cm x 2.5cm x 0.3cm).

El método usado para preparar el portaobjetos y realizar ablación laser sobre él es el siguiente.

- Limpiar el portaobjetos con alcohol isopropílico.

Se vierte alcohol isopropílico sobre el portaobjetos, se limpia y seca cuidadosamente con papel libre de polvo, pelusa, etc. Se debe tener especial cuidado en no dañar con rayones la superficie al frotar con el papel usado para secar ya que cualquier defecto o rayón visible en el molde será replicado por el PDMS, lo que pudiera provocar pérdidas en la guía.

- Recubrimiento con nano-partículas de carbono.

Esta etapa es de especial importancia ya que la calidad de la transferencia del patrón al molde depende de la uniformidad de la capa de nanopartículas de carbono depositadas.

Las nanopartículas de carbono usadas son Carbon nanopowder, <100 nm particle size (TEM) de Sigma-Aldrich (633100 Aldrich).

Para depositar las partículas de carbono se coloca una gota de alcohol isopropílico sobre el portaobjetos, que tiene un volumen aproximado de 1mL~1gr de masa, después, en una proporción en peso 1:10 se coloca en masa las nanopartículas de carbono ~10gr las cuales se pesan antes de ser colocadas en él portaobjetos, se mezclan cuidadosamente hasta lograr una mezcla homogénea entre el alcohol y las nanopartículas. Con un cilindro metálico de ~10cm de largo y un diámetro de ~0.25cm de radio se esparcen las nanopartículas sobre superficie del acrílico hasta dejar una capa uniforme donde no se pueda percibir a simple vista la transmisión de luz a través del carbono depositado. Abajo una imagen figura 4.5 con un portaobjetos con nanopartículas de carbono ya depositadas y listo para grabar sobre él. Esta también pueden usarse en otros materiales como PDMS y PMMA.



Fig 4.5. Portaobjetos con nanopartículas de carbono depositadas el área homogénea será usada para grabar el patrón.

4.3.2. Transferencia del diseño.

Una vez que se obtiene una capa uniforme de nanopartículas sobre el portaobjetos se procede a transferir el diseño con el equipo de ablación láser de la siguiente manera:

- Encender el equipo; computadora y fuente de voltaje del circuito.

Antes de comenzar se debe revisar en la fuente que la diferencia de potencial del láser sea 0. En la computadora se accede a los programas CNC-LASER-vPCB y QualityCapture para verificación del tiempo real del grabado.

- Colocar el portaobjetos sobre la plataforma XY.

Este se alinea con las marcas colocadas en la plataforma XY para este fin.

- Enfocar la unidad de visualización CCD.

La unidad de visualización CCD debe enfocarse en la interfaz acrílico-nanopartículas, para visualizar la imagen en el ordenador se utiliza el programa QualityCapture, la imagen obtenida debe ser nítida.

- Enfocar el haz láser la OPU sobre la interfaz.

Se prende el láser encendiendo la fuente de voltaje a un voltaje menor al seleccionado para grabar, después se mueve la plataforma en Z para modificar la distancia del láser con la interfaz acrílico-nanopartículas hasta observar ablación. El enfoque del haz se verifica con un punto de ablación encendiendo el láser a la corriente de umbral de grabado.

- Cargar el o los archivos *.xls a grabar.

En el programa CNC-LASER-vPCB de la computadora se introducen los archivos *.xls generados previamente con el programa bmt2xlsx4.

- Seleccionar parámetros.

En el programa CNC-LASER-vPCB del equipo se definen los siguientes parámetros optimizados para el grabado del molde maestro con la resolución deseada de 4 micrómetros por pixel;

1. Número de pulsos: 20 pulsos por pixel
2. Tiempo del pulso; 5.8 ms

- Grabar

Con todos los parámetros verificados y la unidad OPU enfocada sobre la interfaz se procede a grabar el portaobjetos.

- Verificar ablación

Para garantizar ablación en el acrílico se debe ver en la región del pulso una chispa azul.

En la Figura 4.6 se muestra un portaobjetos de acrílico con el diseño de un divisor de haz ya grabado.

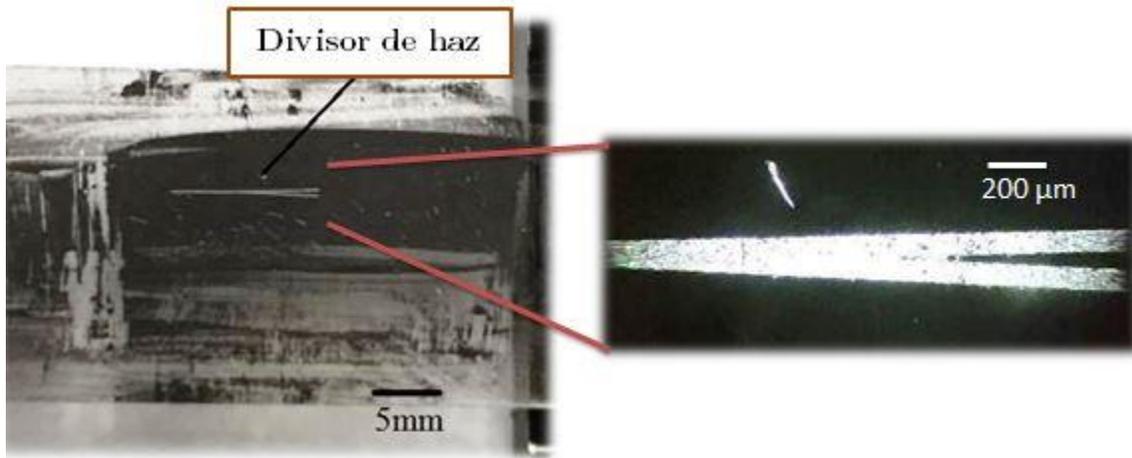


Fig. 4.6 Molde para la fabricación de un divisor de haz.

4.3.3. Limpieza del molde.

Cuando el equipo de grabado haya finalizado se procede a sacar el molde de la unidad para su limpieza. Esta se realiza en dos pasos.

1. Con un hisopo y alcohol isopropílico se limpian las nanopartículas de carbono hasta ver el portaobjetos transparente.
2. Se realiza una réplica en PDMS 10:1² para retirar el excedente de carbono en los canales, esto se repite hasta que no haya residuos de carbono en la réplica.

²En la sección 4.4 se explica cómo realizar la réplica en PDMS

La figura 4.7 muestra un ejemplo de un molde de acrílico limpio,

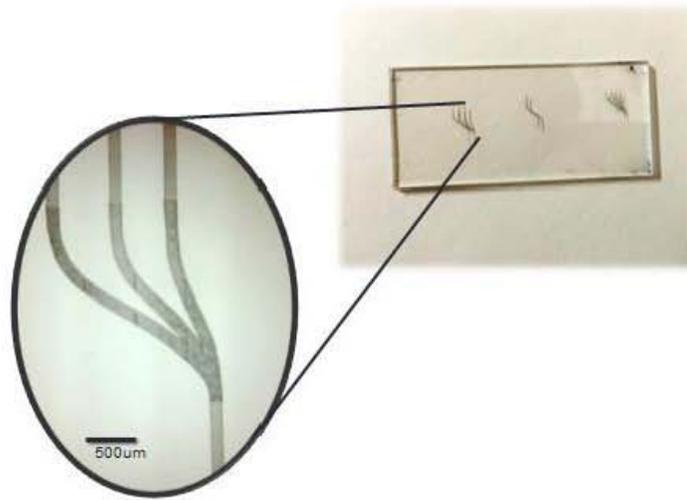


Fig. 4.7 Molde de acrílico limpio.

4.3.4 Inspección visual y caracterización.

Con el molde limpio se procede a una inspección visual del grabado con un microscopio óptico buscando defectos en la transferencia tales como discontinuidades en el grabado, desalineación, etc.

Una vez realizada la inspección visual se procede a caracterizar el molde de acrílico con perfilometría. Para este proceso se mide la profundidad, el ancho, la longitud y la rugosidad de los canales.

Se deben de realizar varias mediciones sobre distintas zonas del molde para obtener un promedio de estas medidas. Los resultados de esta caracterización se muestran en el siguiente capítulo.

4.4 Proceso molde-réplica.

Esta es la última etapa del proceso de fabricación. Se debe procurar que en todo momento el molde de acrílico y las réplicas obtenidas estén libres de contaminantes como polvo, pelusa etc. Por ello se recomienda el uso de bata de laboratorio y guantes de nitrilo.

Antes de comenzar la fabricación se debe verificar que todos los materiales y equipos necesarios se encuentren disponibles y en un lugar accesible.

Para la validación de este método se presentarán los resultados obtenidos en el siguiente capítulo.

4.4.1 Materiales y equipos necesarios.

El material a usar debe limpiarse con alcohol isopropílico y tener especial cuidado en que permanezca limpio durante el proceso de fabricación.

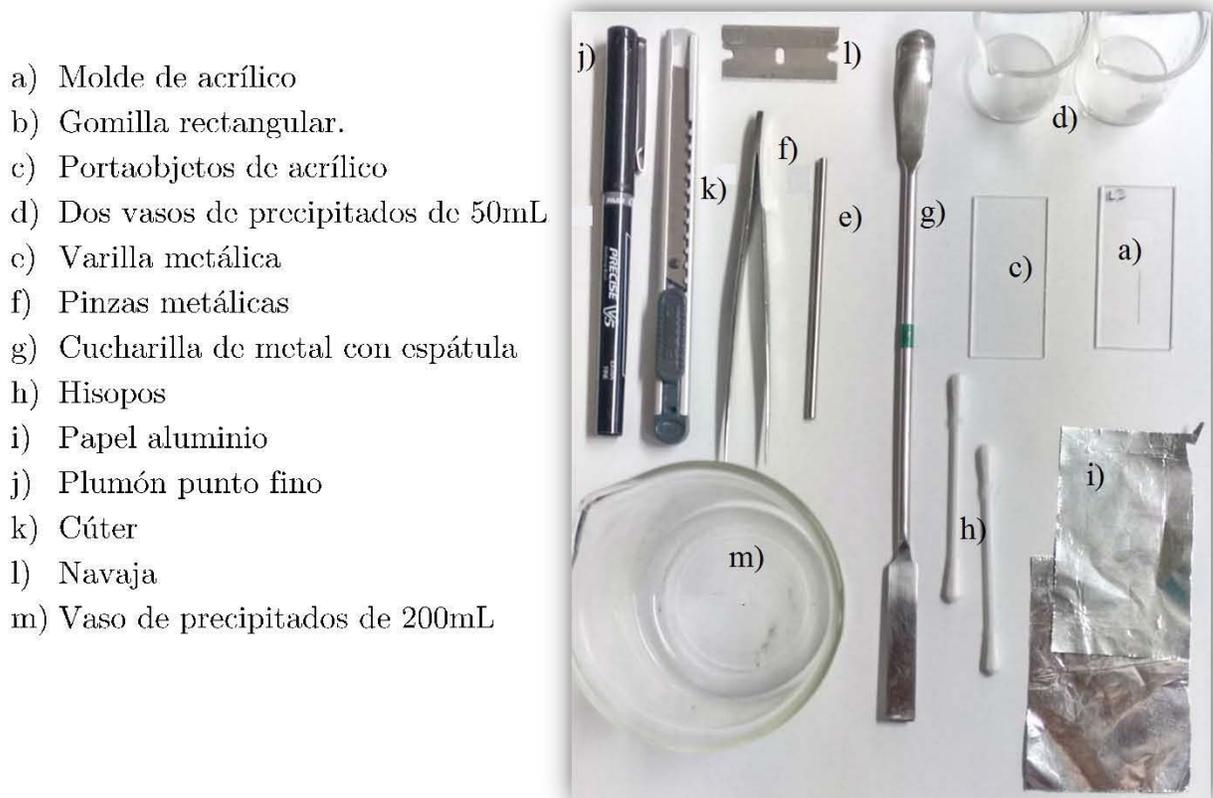


Fig. 4.8 Materiales requeridos para la fabricación de guías de onda.

Además de estos materiales se necesitan los siguientes equipos.

- 1) Horno eléctrico
- 2) Báscula
- 3) Dremel (agitador o revolvedor)

- 4) Desecador
- 5) Bomba de vacío

Como ya se ha mencionado anteriormente se utilizarán algunos reactivos químicos como alcohol isopropílico y acetona.

4.4.2 Descripción del proceso.

En la figura 4.9 se muestra el proceso desarrollado. Cada paso es explicado detalladamente a continuación.

PROCESO MOLDE-REPLICA

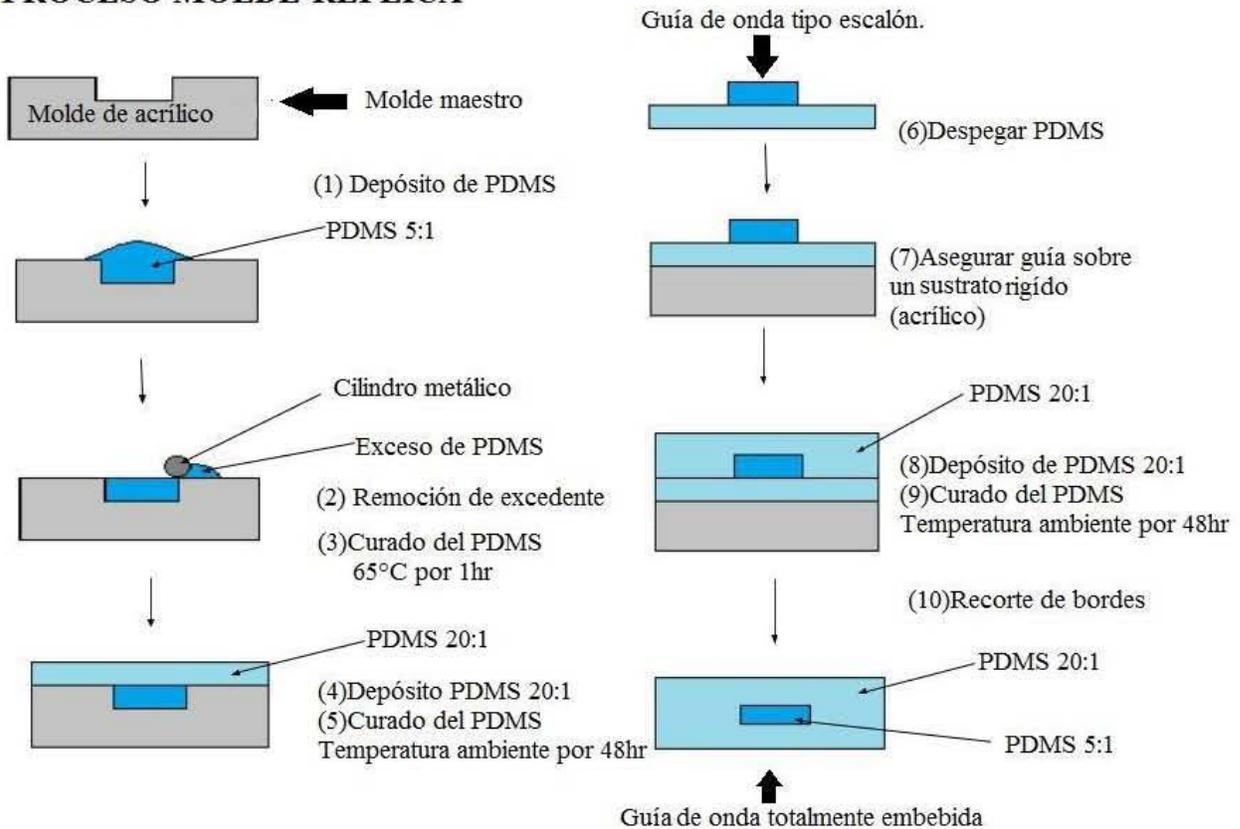


Fig. 4.9 Descripción del proceso molde-réplica.

Se inicia por preparar PDMS en cierta proporción en peso (5:1 o 20:1, dependiendo si es para el núcleo o para el revestimiento). Se coloca un vaso de precipitados de 50mL sobre la báscula, se tara la misma y se vierte dentro el

prepolímero o base, después se agrega el agente curante con ayuda de la espátula en la proporción correcta. Se mezclan con el dremel (modelo 220) a 1000rpm durante 1 min como se muestra en la figura 4.10.



Fig. 4.10 Mezclado de PDMS.

Esto se hace para asegurar una buena homogeneización de la mezcla con este volumen (una buena reproducibilidad), ya que mezclar a mano puede dar resultados diferentes dependiendo del operador. Se debe preparar al menos 2 gr de PDMS para asegurar una buena mezcla y no alterar las propiedades ópticas del material.

Al terminar, el vaso de precipitados se introduce en el desecador por aproximadamente 15 minutos para la extracción de las burbujas de aire del PDMS. Una vez que el PDMS esté libre de burbujas está listo para ser usado.

- 1) Con la varilla metálica se toma PDMS 5:1 y se deposita sobre los canales del molde de acrílico cubriéndolos en su totalidad, figura 4.11.

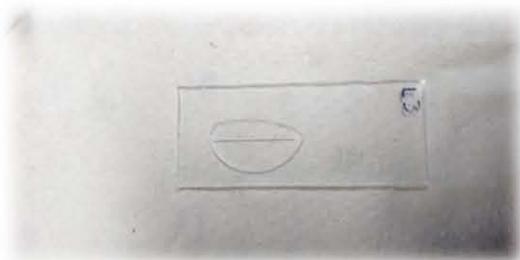


Fig 4.11, Depósito del PDMS 5:1 sobre los canales del molde maestro.

- 2) Después de unos pocos minutos (~1min-2min) se procede a remover el excedente de PDMS de los canales, utilizando el cilindro metálico o la gomilla rectangular, para esto se sujeta el portaobjetos con una mano y una toalla de papel y con la mano libre se coloca la varilla (gomilla) en posición paralela y en contacto con el molde de acrílico y se ejerce presión uniforme sobre este al moverlo en una dirección como indican las flechas en la figura 4.12.

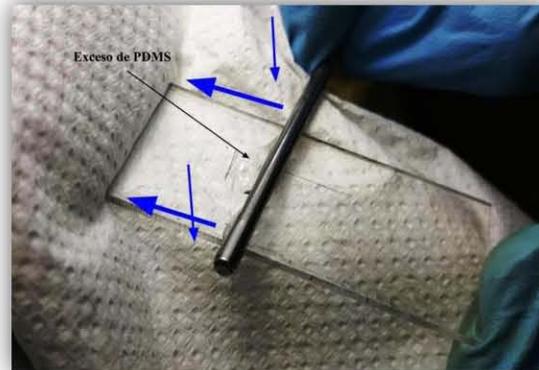


Fig. 4.12 Remoción del exceso de PDMS.

- 3) Una vez retirado el exceso, el molde con los canales rellenos de PDMS 5:1 se introduce en el horno a 65°C. Durante este tiempo se procede a preparar PDMS en una proporción en peso 20:1, para cada recubrimiento se preparan 2.5 g de este.
- 4) Con el polímero curado se procede a depositar una capa uniforme de PDMS con una proporción en peso 20:1 siguiendo el mismo procedimiento que se utilizó con el PDMS 5:1. Para poder realizar el depósito, con el papel aluminio se hace un contenedor alrededor del portaobjetos como se muestra en las siguientes imágenes.

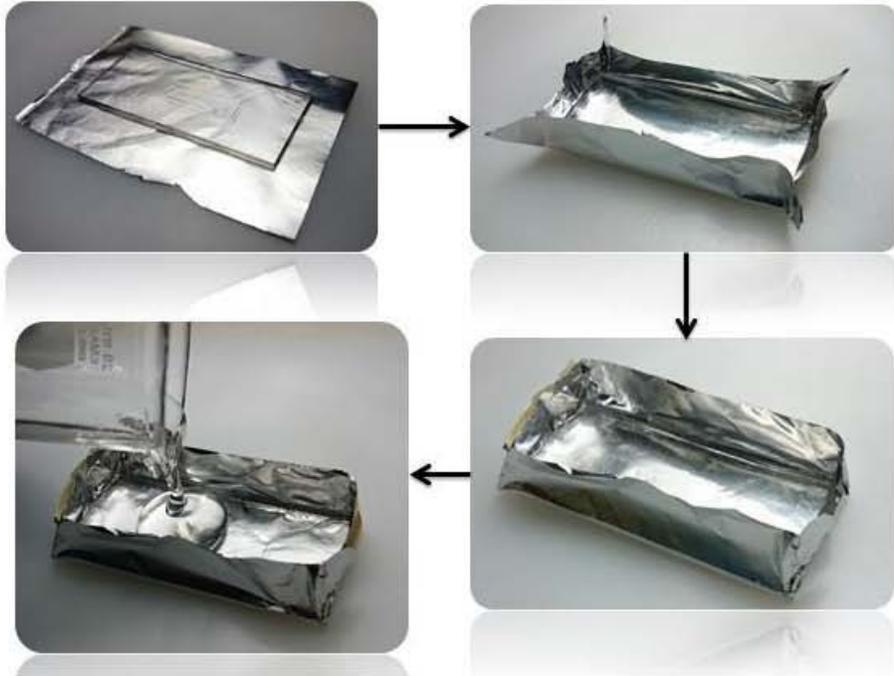


Fig. 4.13 Depósito de PDMS 20:1

- 5) La capa de PDMS anteriormente depositada se cura a temperatura ambiente durante 48hrs. Para tener un mejor control sobre las condiciones de manufactura, el molde se introdujo al horno con una temperatura de 22°C lo que se definió como temperatura ambiente.
- 6) Una vez que la capa de PDMS se encuentra polimerizada, se procederá a desprender el contenedor de aluminio para después despegar el PDMS del molde maestro y con el cúter cortar sus bordes. Estos pasos se muestran en la figura 4.13.

Es importante tener en cuenta que la réplica en PDMS es altamente electrostática, por lo que cualquier partícula de polvo o basura, será atraída a su superficie. Se recomienda que una vez despegada la réplica sea protegida de una posible contaminación y manipulada con guantes y pinzas. Una vez que el PDMS haya sido despegado del molde se debe marcar el lado de la réplica sobre el cual este el canal con PDMS 5:1.

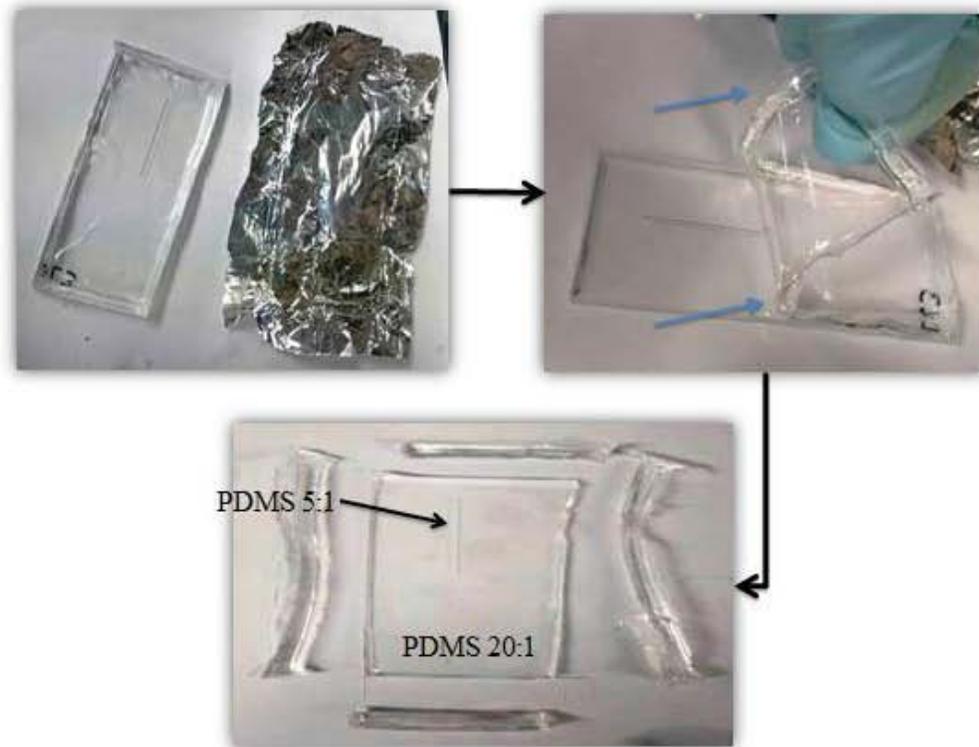


Fig. 4.14. Guía de onda tipo escalón.

Hasta este paso del proceso de fabricación se obtiene una guía de onda tipo escalón.

La siguiente parte del proceso se sigue para obtener una guía de onda totalmente embebida en PDMS.

- 7) Utilizando el portaobjetos de acrílico sin grabar como base se coloca la réplica PDMS con el canal de PDMS 5:1 hacia arriba y se marcan las entradas de dichos canales con el plumón de punto fino. Un esquema se presenta en la figura 4.15.



Fig. 4.15. Marcado de los canales de PDMS 5:1.

Para los pasos (8), (9) y (10) se repiten exactamente los pasos (4), (5) y (6) respectivamente.

Después de haber concluido el paso (10), la guía de onda necesita ser cortada de manera más precisa y sin deformaciones superficiales en la entrada para poder ser acoplada con luz. Esto se lleva a cabo por medio de una guillotina Fig. 4.16.

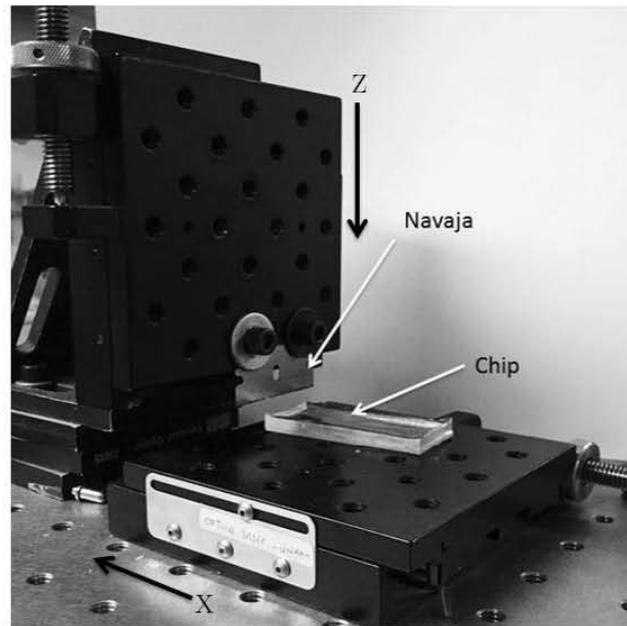


Fig. 4.16 Guillotina para corte de guías de onda.

Una vista de la sección transversal de una guía totalmente embebida se muestra a continuación.

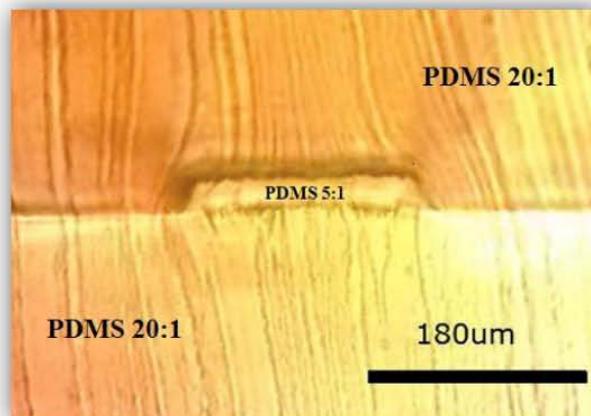


Fig. 4.17 Corte transversal de una guía de onda.

Este método de fabricación de guías de onda permitió la producción de diferentes geometrías como se verá en el capítulo 5 y 6, además es reproducible ya que ha sido

usado por un estudiante de licenciatura para fabricar guías de onda donde también se observa confinado y guiado de luz. Con las mediciones del índice de refracción del PDMS se concluye que el mayor contraste de los índices de refracción son el PDMS P/p 20:1 curado a temperatura ambiente y el PDMS P/p 5:1 curado a 150°C donde se logra un contraste del índice de refracción de ~0.018%.

Para las guías de onda fabricadas con el molde de acrílico se logra un contraste de ~0.0093% ya que se usó PDMS 5:1 curado a 65°C para no deformar el molde y PDMS 20:1 curado a temperatura ambiente, se recomienda utilizar un horno para mantener una temperatura constante de ~22°C, ya que si se deja literalmente en el ambiente la temperatura cambia a lo largo del día provocando un cambio en las condiciones de curado del polímero variando el índice de refracción a lo largo de la muestra.

Como conclusión de este capítulo: el material empleado es versátil y de fácil manejo, es decir, se puede manipular su índice de refracción de forma sencilla, lo que deriva en un proceso de fabricación simple y altamente reproducible.

Capítulo 5.

Caracterización y resultados

En el capítulo anterior se detalló el procedimiento a seguir para obtener guías de onda de PDMS por medio del método molde-réplica, mediante el cual se fabricó un molde maestro de acrílico con el patrón deseado y se replicó con PDMS. Una vez producidos los moldes para guías de onda, es importante verificar la transferencia del diseño y su caracterización con perfilometría (sección 4.3.4).

Las guías poliméricas se validaron por medio de pruebas de guiado. Para esto, se diseñó y montó un arreglo óptico que permite el acoplamiento de la luz de un láser (638nm) a la guía de onda de PDMS por medio de una fibra óptica monomodal de 630nm-860nm. Este arreglo óptico también se usó para medir la atenuación en los chips de PDMS producidos.

5.1 Caracterización de los moldes para réplica.

Una vez concluido el proceso de grabado, se procede a limpiar el molde de acrílico (sección 4.3.3), para después hacer una inspección visual y caracterizar los patrones obtenidos por medio de perfilometría. Se midió la profundidad promedio, el ancho promedio, longitud y la rugosidad de los canales grabados.

Se presenta a continuación la caracterización de dos diseños: uno es el molde utilizado para fabricar guías de onda rectas con diferente longitud para medir la atenuación en las guías con el mismo material y el segundo es un divisor de haz, que se presenta como aplicación directa del método de fabricación desarrollado.

5.1.1 Molde para atenuación.

La medición del coeficiente de atenuación es imprescindible al caracterizar una guía de onda (sección 3.4.2), de ahí la relevancia de este molde, presentado en la figura 5.1, que consta de 4 canales con una longitud de 1cm, 1.5 cm, 2 cm y 2.1 cm respectivamente. La ventaja de este diseño es que se caracterizar guías de onda de diferente longitud, fabricadas con el mismo material y el mismo método sin arriesgar que el corte de una sola guía larga modifique las condiciones iniciales en cada medición y genere ruido debido a un corte mal realizado, esto también permite la medición estadística de la potencia al acoplar luz con cada canal.

Para su fabricación se realizó dos veces el proceso de depósito de nanopartículas y de grabado (secciones 4.3.1 y 4.3.2) cuidando la alineación del portaobjetos. El segundo depósito y grabado se realizaron para aumentar la profundidad de los canales en el molde, los parámetros usados en el equipo de ablación para la fabricación de este molde se encuentran en la sección 4.3.2. La figura 5.1 muestra el molde fabricado.

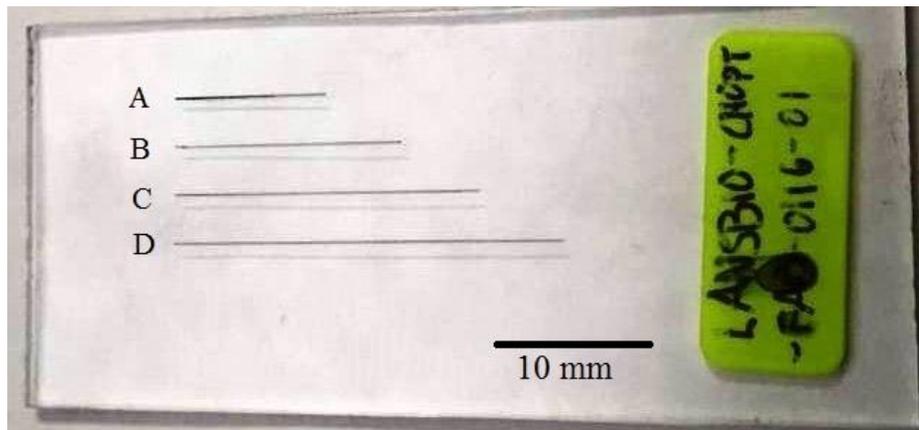


Fig.5.1 Molde de acrílico para guías de onda rectas.

Para obtener las dimensiones de cada canal se utilizó un perfilómetro KLA Tencor AlphaStep D-600. La fuerza de barrido en la punta del perfilómetro para realizar las mediciones fue de 0.1467N^3 (15 mg fuerza) con una velocidad de barrido de 0.10mm/s. En la figura 5.2 se muestran los perfiles completos de cada canal obtenidos a partir del barrido mencionado, en los que se midió la longitud, profundidad promedio, ancho y rugosidad promedio en cada canal (tabla 5.1).

³ El valor de la aceleración usado fue 9.78 m/s^2

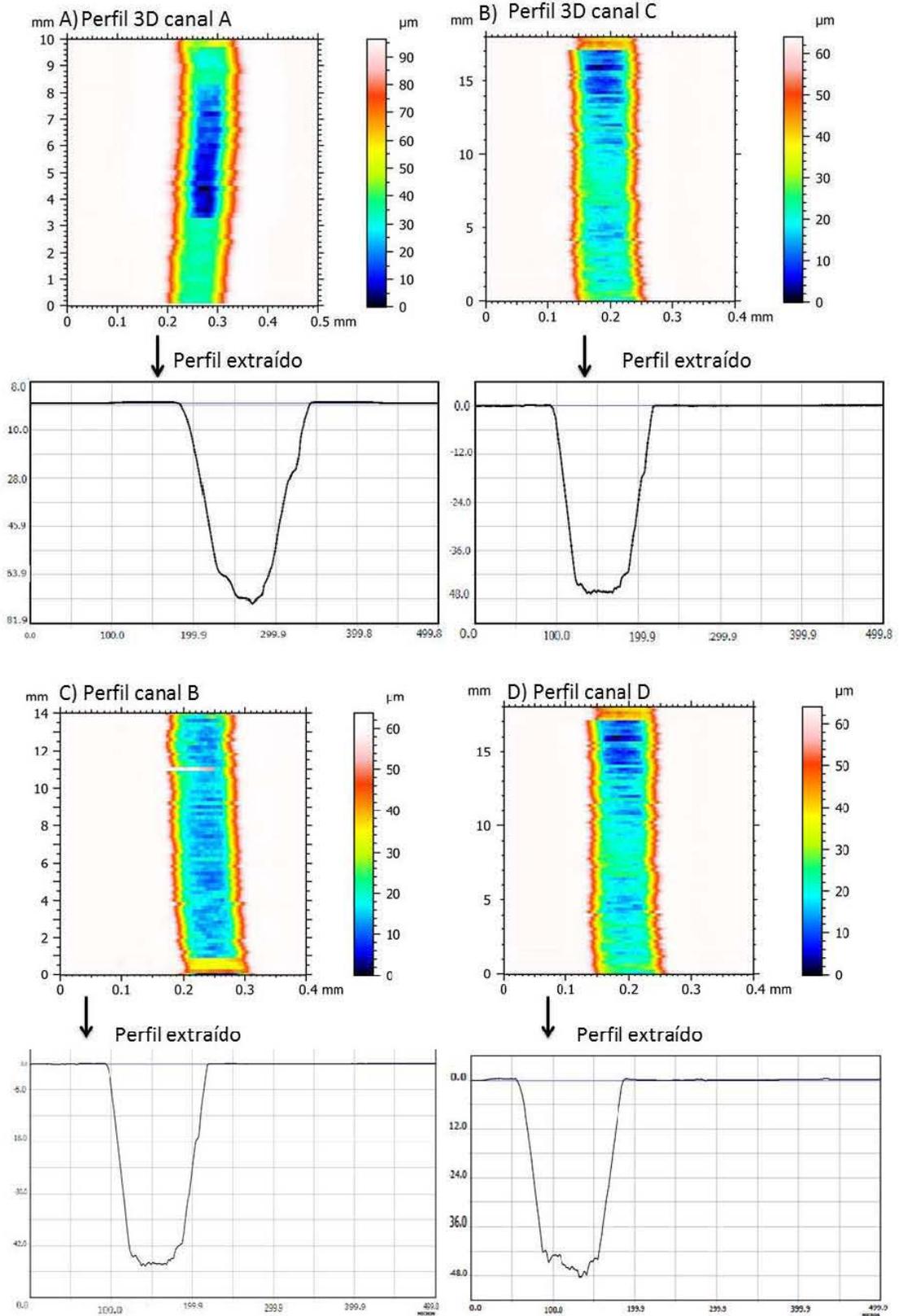


Fig. 5.2 Perfiles 3D del molde para atenuación y perfil extraído para caracterización.

Para realizar las mediciones se extrajo un perfil (figura 5.2) del canal cada 0.2 mm generando 5 perfiles por milímetro, por lo que por cada centímetro hay 50 perfiles en los que se midió la profundidad y ancho en cada uno de ellos. Con estas mediciones se obtuvo la longitud promedio, profundidad promedio junto con su desviación estándar.

Para medir la rugosidad se obtuvo un perfil a lo largo del canal y se filtró con un filtro pasa altos de $2518.7\mu\text{m}$ para generar un segundo perfil, después se obtiene la diferencia punto a punto entre estos dos perfiles y el promedio de estas diferencias es lo que se toma como rugosidad [33].

	Canal A μm	Canal B μm	Canal C μm	Canal D μm
Longitud	9838.70 (6.29)	14641.00(6.29)	19382.00(6.29)	24506.00(6.29)
Ancho promedio	86.23(4.82)	89.67(3.67)	90.00 (2.44)	101.08(2.21)
Profundidad promedio	59.72(7.25)	37.81(2.93)	39.68(5.90)	35.93(5.70)
Rugosidad promedio	5.48(1.26)	7.33(1.26)	4.51(1.26)	4.51(1.26)

Tabla 5.1 Perfilometría del molde para atenuación, la desviación estándar esta entre paréntesis.

Como podemos ver en la figura 5.2 los canales no conservan una forma geométrica regular, es decir, sus paredes no son totalmente verticales, esto puede deberse a un problema de alineación en el segundo proceso de grabado. Es importante notar que la rugosidad de los canales es de casi el 20% del valor de la profundidad en algunos casos lo que se verá reflejado en pérdidas extrínsecas por esparcimiento. De la figura 5.2 como se puede notar hay algunos perfiles desfasados, los cuales no se tomaron en cuenta para realizar los promedios

5.1.2 Molde del divisor de haz.

También se fabricó un molde con un divisor de haz (figura 5.3) para validar el proceso de fabricación ya que la geometría de un divisor de haz es más compleja, por lo que representa una prueba factible para demostrar guiado y confinamiento de la luz. Se realizaron las mismas mediciones en los canales del molde correspondiente al divisor de haz con el método previamente mencionado.



Fig. 5.3 Molde para divisor de haz.

La figura 5.4 muestra los perfiles de la guía B. Se generó una imagen 3D con los perfiles obtenidos para una mejor visualización del molde. Los datos de los perfiles se presentan en la tabla 5.2.

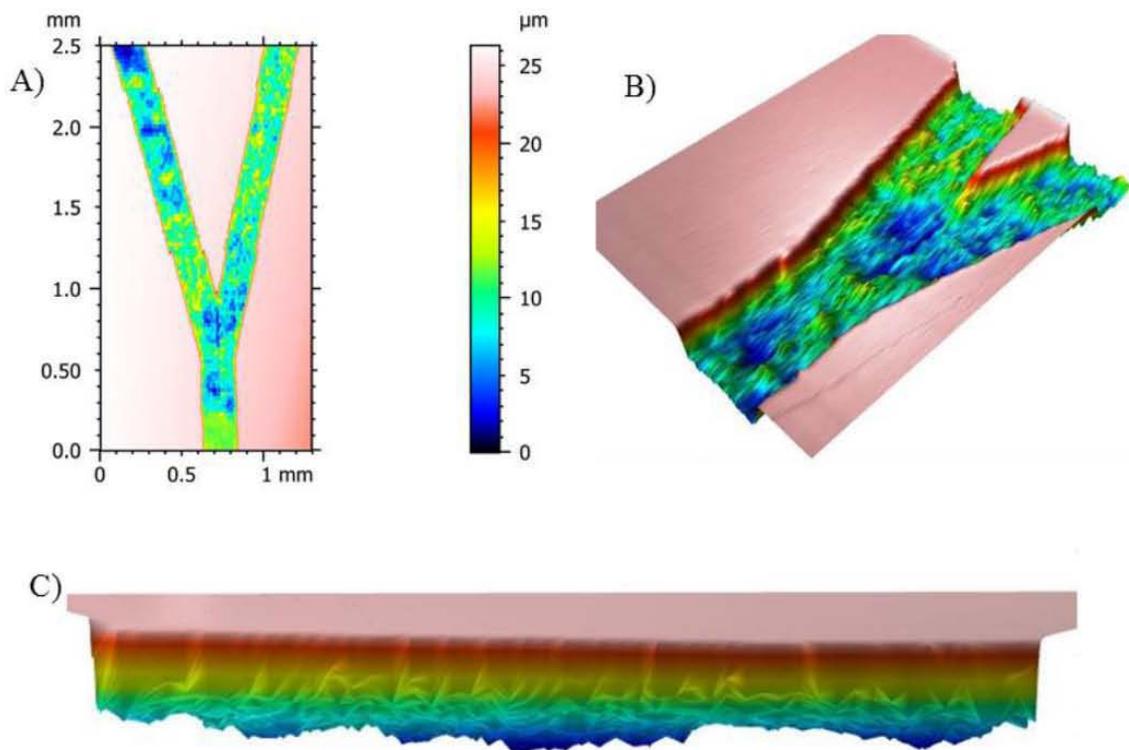


Fig 5.4 Diferentes vistas de la guía B, a) superficie b) imagen 3D y c) perfil.

	Brazo de entrada (μm)	Brazo D (μm)	Brazo I (μm)
Longitud	3121.60(7.81)	4205.20(7.81)	4639.50(7.81)
Ancho promedio	202.25(8.69)	205.67(2.55)	199.69(9.65)
Profundidad promedio	14.99(0.29)	14.67(0.79)	16.61(1.33)
Rugosidad promedio	1.20(0.55)	2.17(0.55)	2.15(0.55)

Tabla 5.2 Perfilometría del molde del divisor

Una característica deseable del molde producido es que los brazos del divisor tengan aproximadamente el mismo ancho, lo cual es cierto si se toma en cuenta la desviación estándar. Esta característica es deseable en este tipo de dispositivos ya que si se tienen los mismos parámetros se puede lograr una división 50/50. De la figura 5.4 (c) y de los datos de la tabla anterior la profundidad mínima es $\sim 15\mu\text{m}$ así como una mayor profundidad en el origen de los brazos. En promedio este molde presenta menor rugosidad que el molde para atenuación por lo cual se espera observar menor esparcimiento.

5.2 Arreglo óptico.

Por el bajo contraste de los índices de refracción entre núcleo y el revestimiento en la guía de PDMS (Tabla 4.1) se requirió un arreglo óptico que permitiera una adecuada alineación entre la entrada del chip de PDMS y la luz proveniente de la fibra ya que el ángulo de aceptación calculado es de 2.6° para la guía fabricada. Esto implica que una buena alineación es de suma importancia para observar el fenómeno de guiado.

Este arreglo consiste en un láser de diodo THORLABS de 638.2nm (CPS635R)⁴, con una potencia de 1.2 mW, montado sobre una plataforma de dos ejes (X, Z), dirigido a un objetivo de microscopio Olympus Plan Fluorite (RMS20X-PF)⁵ de 20X, con una apertura numérica (NA) de 0.50 y una distancia de trabajo (WD) de 1.60mm, montado sobre una plataforma de tres ejes (X, Y, Z) que acopla la luz proveniente del láser a una fibra óptica monomodal (S630-HP)⁶ de 630-860nm y de $125\mu\text{m}$ de diámetro del núcleo con una atenuación máxima de 10db/km y una NA 0.12. El otro extremo de la fibra se monta en una plataforma de 3 ejes (X, Y, R) cuya salida apunta a una plataforma de 4 ejes (X, Y, Z, R).

⁴ Número de parte THORLABS

⁵Ídem

⁶ Ídem

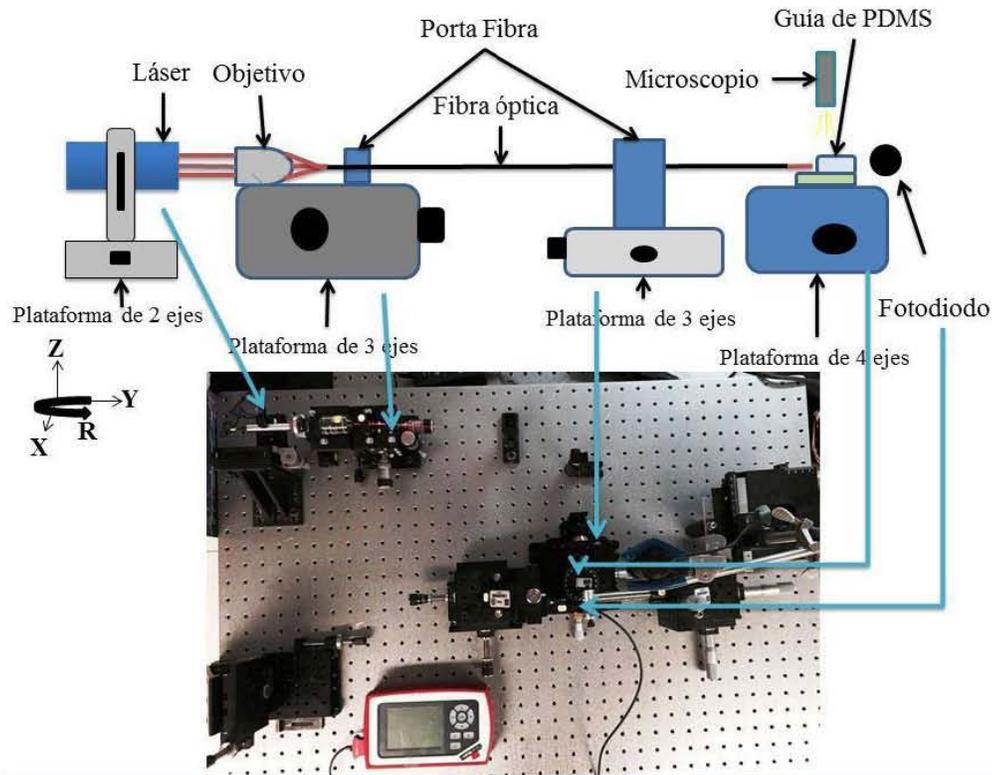


Fig. 5.5 Diagrama del arreglo óptico para pruebas de guías.

Sobre la plataforma de 4 ejes se colocó un portaobjetos que servirá de base para colocar los chips ópticos: a esta parte del arreglo se le nombró plataforma de prueba.

Este tipo de arreglo cuenta con 7 grados de libertad (4 de la plataforma de prueba y 3 de la plataforma donde está montada la salida de la fibra), que facilitan la alineación entre los canales y la fibra, ya que ambos tienen un ancho de unas centenas de micras, lo que hace complicado obtener una buena alineación. Además, se instaló un microscopio digital sobre la plataforma de prueba para ayudar con la alineación manual entre la fibra óptica y la guía de PDMS.

5.3 Pruebas de Guiado.

Las guías fabricadas se colocan sobre la plataforma de prueba, figura 5.5, y se alinea la entrada de la guía con la salida de la fibra óptica. El ángulo de entrada de la luz no debe de ser mayor a 2.8° si se desea un confinamiento total. Las siguientes imágenes muestran las pruebas de guiado de diversas guías de PDMS.

Para poder distinguir si existe confinado y guiado de luz en el chip se colocó un microscopio digital a la salida de este, si con el microscopio se observa que el perfil del salida del chip tiene una geometría regular como un rectángulo o se encuentra la salida de la luz en el PDMS 5:1 sin que haya esparcimiento a lo largo del canal se puede decir que existe guiado y confinado de luz de forma eficiente como se observa en el divisor de haz de la figura 5.6, el esparcimiento a la salida es provocado por las marcas de entrada en los canales. Se observa que al variar la posición y ángulo de la fibra, se modifica el acoplamiento de la luz con los brazos del divisor (figura 5.6 A y B).

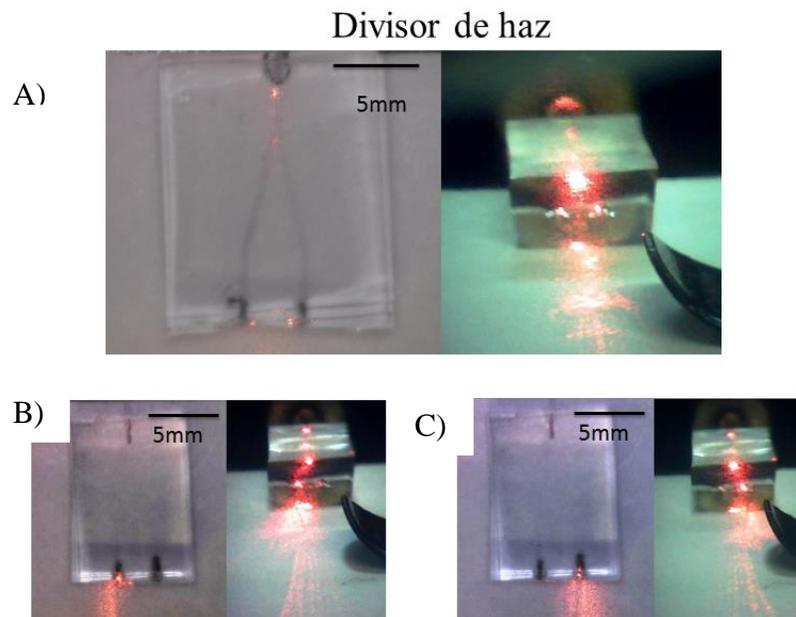


Fig. 5.6 Prueba de guiado en el divisor de haz.

En la figura 5.6 c) puede observarse claramente la sombra de la marca del canal con un ángulo diferente al normal lo que suponemos es el ángulo de salida de uno de los modos de propagación (sección 3.5).

Para disminuir el esparcimiento en los puntos de entrada y salida se modificará el tipo de marcas empleadas para señalar los canales de PDMS 5:1, aunque esto no eliminaría por completo el esparcimiento, por lo que se propone embeber la fibra óptica directamente en el canal, lo que eliminaría también problemas con la alineación y la dificultad de acoplar la luz al chip de PDMS

En las siguientes imágenes se muestran las réplicas en PDMS del molde para atenuación. En estas guías se puede observar esparcimiento a lo largo de los canales, debido a que poseen una mayor sección transversal y mayor rugosidad (sección 5.1.1) que los canales del divisor de haz (sección 5.1.2).

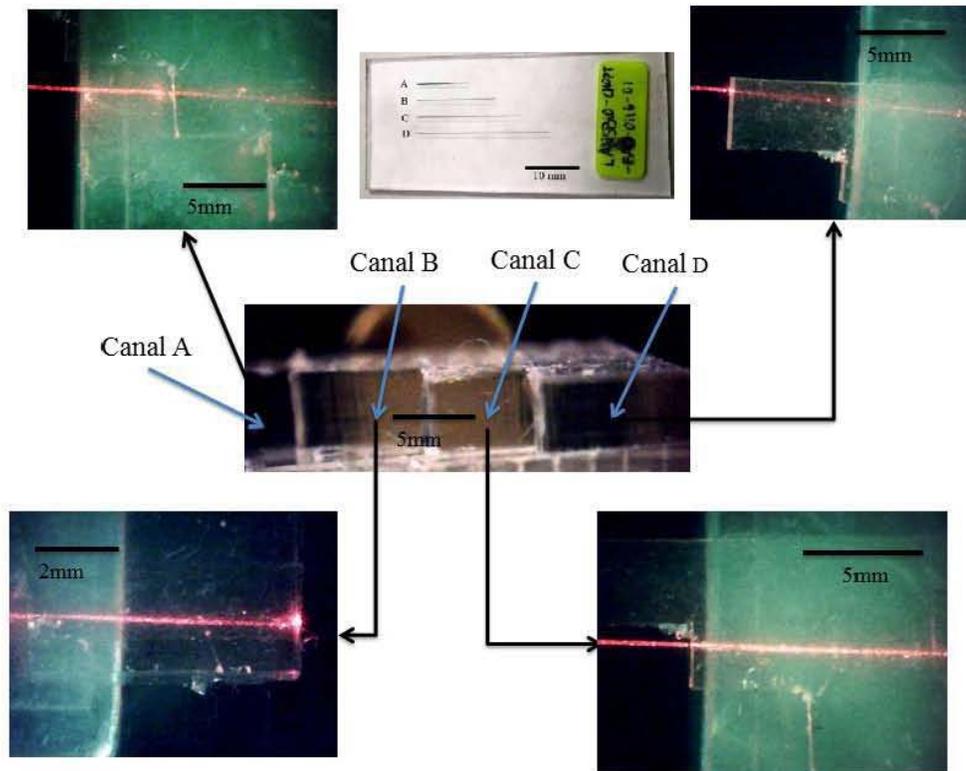


Fig. 5.7 Guías de PDMS, réplica del molde de atenuación (consta de 4 canales con diferente longitud).



Fig. 5.8 Perfil de salida del canal A.

El perfil de salida (figura 5.8) muestra claramente el confinamiento de la luz en el canal ya que este posee una forma rectangular y la forma del haz proveniente de la fibra tiene forma circular, por lo que se puede concluir que existe guiado y confinamiento de luz en las guías de onda fabricadas con el método propuesto. Por las observaciones anteriores se demuestra que un cambio de 0.0093% del índice de

refracción entre el núcleo y el revestimiento es suficiente para observar el fenómeno de guiado de luz en un chip de PDMS.

5.4 Pérdidas y coeficiente de atenuación.

La atenuación es un parámetro importante para evaluar el desempeño de una guía de onda, pues las pérdidas en un dispositivo de este tipo como se mencionó en el capítulo 3 sección 3.4.2 pueden deberse a diferentes factores, incluyendo la absorción intrínseca del material, el esparcimiento causado por la rugosidad de las paredes, dispersión de Rayleigh y defectos en la fabricación, etc [12].

Se utilizaron dos métodos distintos para medir la atenuación en cada tipo de guía de onda fabricada y compararla con la literatura para validar nuestro método de manufacturación de microguías, los métodos usados son:

1. Medir la potencia de entrada y salida en distintos canales con diferente longitud [15].
2. Medir la potencia de entrada y salida en una guía de onda cuando es cortada, reduciendo su longitud pero manteniendo las condiciones de entrada sin alterarla [13, 16].

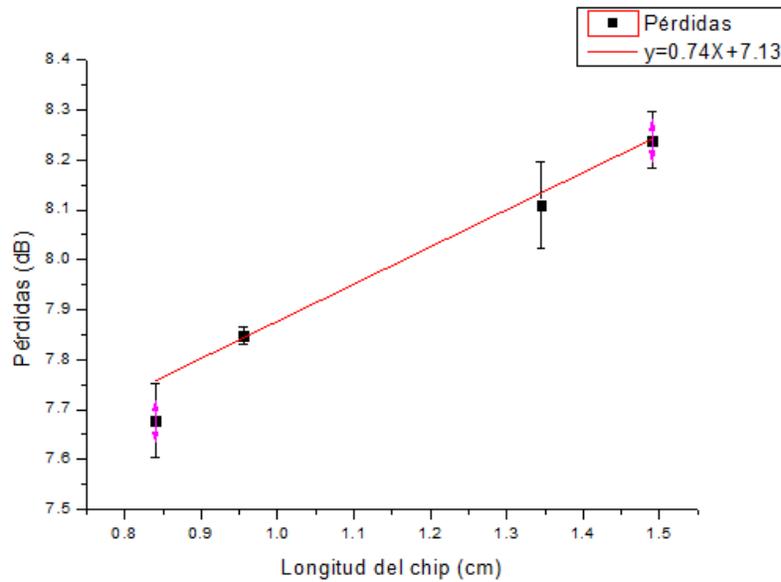
Para medir la potencia de la luz se montó un fotodiodo en el otro extremo de la plataforma de prueba (figura 5.5), que mide la potencia óptica de longitudes de onda desde los 200 nm a los 1100 nm (S120VC) y se conecta a un medidor digital de potencia óptica (PM100D). El fotodiodo se colocó al final del arreglo óptico (figura 5.5).

5.4.1 Pérdidas por varios canales.

Estas mediciones se realizaron en diferentes chips de PDMS replicados del molde de atenuación, las pérdidas obtenidas en decibeles se calcularon con la ecuación 3.33 y el coeficiente de atenuación se calculó con la ecuación 3.34, la cual es una relación lineal entre las pérdidas y la longitud de la guía teniendo como constante de proporcionalidad α (atenuación), por ello se ajustó una regresión lineal a los puntos graficados cuya pendiente es la atenuación en la microguías de PDMS.

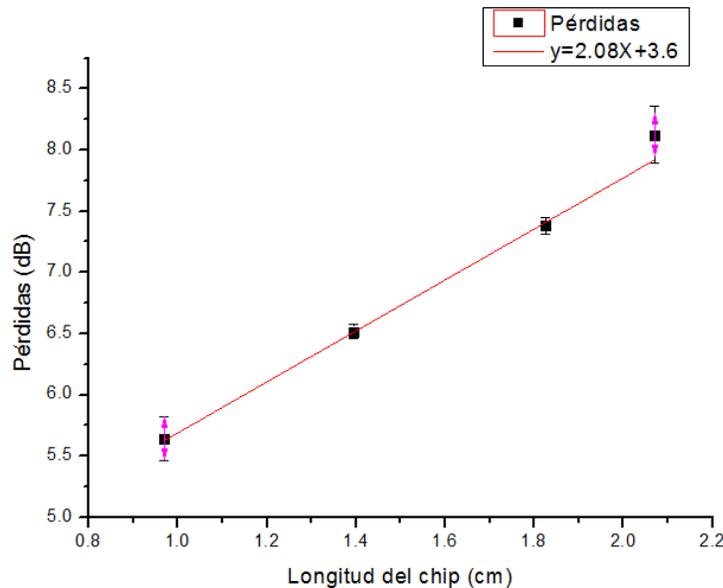
La grafica 5.1 nos da la atenuación en los canales A y B de dos chips tipo escalón, ya que los canales C y D resultaron irregulares al cortar. Para asegurar una buena medición se desalineó y alineó en cada canal en 5 ocasiones midiendo la potencia

de salida y esperando a que la lectura en el potenciómetro fuera estable. Con estas mediciones se calculó la desviación estándar la cual se colocó como barras de error.



Grafica 5.1 Atenuación por ajuste lineal método 1, guía de onda tipo escalón, coeficiente de correlación $r^2=0.96$.

La pendiente α tiene unidades de decibeles por unidad de longitud. La grafica 5.2 es la atenuación en una guía tipo embebida y se midió de igual manera en los canales A y B de dos chips embebidos diferentes.



Grafica 5.2 Atenuación por ajuste lineal método 1, guía de onda tipo embebida, coeficiente de correlación $r^2=0.99$.

La atenuación resulto de 0.74dB/cm para las guías tipo escalón y de 2.08dB/cm para la tipo embebida. Esto puede deberse a la diferencia de contraste de los índices de refracción ya que la tipo escalón presentó mejor confinamiento por su mayor contraste pues tres caras del escalón están rodeadas por aire, el cual tiene un índice de refracción de ~ 1 lo que es un contraste en el índice de $\sim 10\%$ que comparado al 0.03% de contraste entre el PDMS 20:1 y PDMS 5:1 representa un cambio dos órdenes de magnitud, si se comparan estos resultados obtenidos con la literatura utilizando el mismo método que es de 0.249db/cm[15] para una guía de PDMS con el núcleo mezclado con aceite de silicón para aumentar el contraste en el índice de refracción. Esta diferencia del índice de refracción de la literatura con las mediciones obtenidas también se debe a la rugosidad del molde para replica ya que causa varias pérdidas por esparcimiento como puede notarse en la figura 5.7.

5.4.1 Pérdida en un solo canal cortado.

De este método de medición, que es el más usado, se obtiene el valor de la atenuación en una sola guía fabricada. Se usó el canal C del molde de atenuación para producir la guía para medir. El valor obtenido es el más confiable ya que al no modificar las condiciones iniciales se obtiene una medida propia de la guía, aunque mantener las condiciones iniciales inalteradas resulta complicado al momento de cortar la guía. Por ello, se colocó un imán en la plataforma de prueba y se añadió una capa de PDMS mezclado con limadura de hierro en la parte inferior del chip (figura 5.9), que también se pegó con cinta doble cara a la plataforma con el imán. Como es un método destructivo, ya que se corta la guía, se decidió colocar también en la punta una gota de pegamento para asegurar el mantener las condiciones iniciales. Para realizar el corte se utilizó un bisturí y alcohol para lubricación. Se procuró mantener la misma distancia entre la salida del chip y el fotodiodo, con lo que se mantiene la misma atenuación provocada por el aire al medir la potencia de salida.

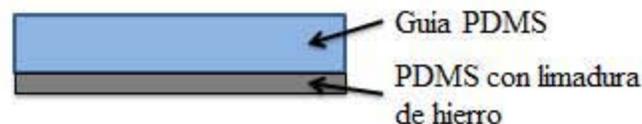
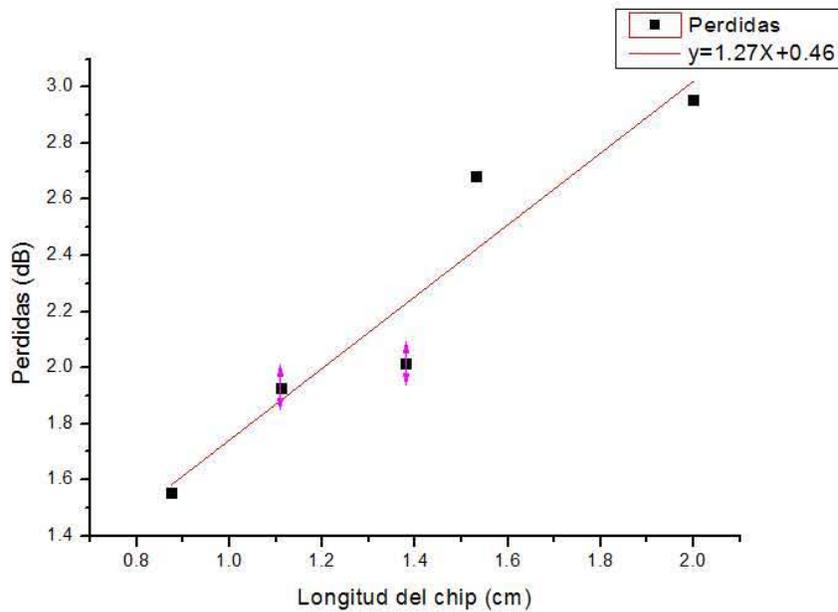
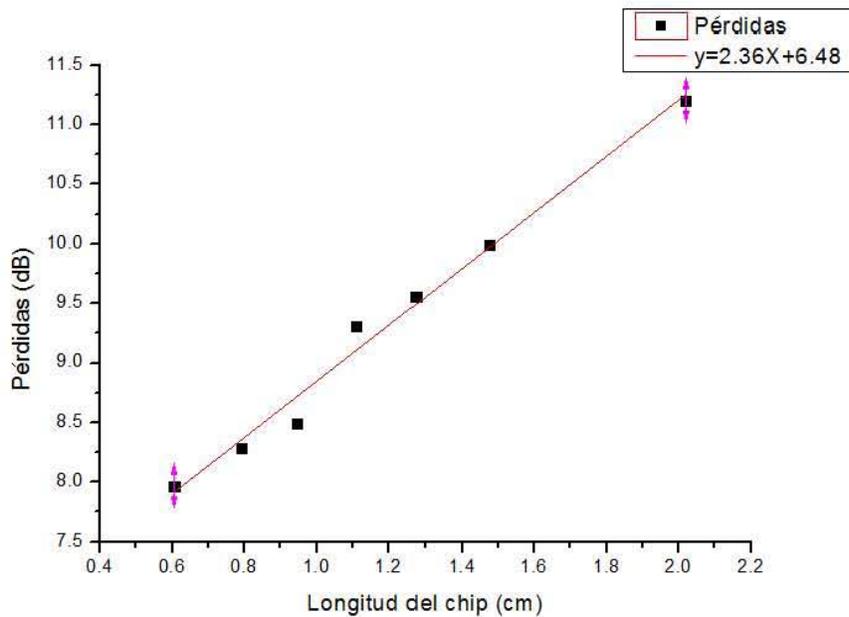


Fig. 5.9 Guía con limadura de hierro.



Gráfica 5.3 Atenuación por ajuste lineal método 2, guía de onda tipo embebida, coeficiente de correlación $r^2=0.88$.

La grafica 5.3 es la atenuación en una guía tipo embebida que se cortó con el método previamente mencionado. La grafica 5.4 es la atenuación en una guía tipo escalón. Por las características de este método de medición no se obtuvo estadística ya que cualquier realineación modificaría las condiciones iniciales.



Gráfica 5.3 Atenuación por ajuste lineal método 2, guía de onda tipo escalón, coeficiente de correlación $r^2=0.98$.

El valor obtenido fue de 1.27 dB/cm para la guía tipo embebida y de 2.38dB/cm para la tipo escalón. Esta diferencia en los coeficientes encontrados se debe a la alineación, que pese a que la guía tipo escalón tiene un mayor contraste del índice de refracción, una mala alineación con la fibra óptica resultaría en pérdidas, esto se reflejó en los valores de las pérdidas que para el chip tipo escalón son a partir de 8dB aproximadamente mientras que para la embebida son a partir de 1.5dB, esto marca que una buena alineación es imprescindible, cabe resaltar que el ángulo de aceptación es de 2.8° el cual es difícil percibirlo visualmente. El valor de medición obtenido por la guía embebida es prácticamente el mismo que el reportado en la literatura de 1.1dB/cm para guías hechas con PDMS y métodos convencionales como litografía[13, 14].

Es importante considerar que la ecuación 3.34 puede tomarse como la ecuación de una recta cuya ordenada al origen es cero, esta ecuación sólo toma en cuenta las pérdidas por unidad de longitud en una guía de onda, lo que implica que si no hay guía de onda no hay pérdidas en la señal, lo cual no ocurre en el arreglo experimental usado, ya que el fotodiodo que es colocado en la salida del chip está a cierta distancia de este (figura 5.5), entonces la potencia medida también sufrirá pérdidas por la absorción del medio de propagación (aire) y no sólo del material. Entonces decimos que la ordenada al origen resultante de la regresión lineal realizada en las gráficas anteriores se relaciona con las pérdidas por factores externos tales como la absorción del aire y el acoplamiento de la luz proveniente de la fibra con la entrada del canal ya que al ser alineadas se pudo observar retro esparcimiento.

De los valores obtenidos con este método se puede deducir que las guías de onda fabricadas pueden ser usadas para aplicaciones tipo Lab on a Chip ya que estos dispositivos miden hasta unos cuantos centímetros por lo que la señal en un chip de 2.5cm no se verá reducida en más del 50%.

Capítulo 6.

Conclusiones.

Para concluir, a lo largo de este trabajo de tesis se presentó un método de fabricación a la medida de chips ópticos poliméricos. Cuyas etapas mencionadas en el capítulo 4, se resumen en:

1. Diseño.
2. Fabricación del molde.
3. Caracterización.
4. Proceso Molde-Réplica.

Aunado a la versatilidad del material y los costos de producción del molde, se puede inferir que se obtuvo un proceso sencillo y de bajo costo comparado con los métodos convencionales que utilizan fotolitografía para la producción del molde.

Del material utilizado (PDMS) en el que se midió la variación del índice de refracción en muestras con diferente temperatura de curado y diferentes proporciones en peso se comprobó que al aumentar la temperatura de curado y la concentración del agente entrecruzante, aumenta el índice de refracción, lo cual se explicó al relacionar el camino libre medio con el número de partículas (ecuación 4.1) concluyendo que debido al aumento del peso molecular disminuye el camino libre medio que resulta en un aumento en el índice de refracción.

Los resultados de la fabricación con este método están resumidos en la figura 6.1 que muestra el diseño, el molde y la réplica de un chip para prueba de concepto, además en la misma imagen se puede observar que el fenómeno de guiado y confinado de luz en los canales del chip (figura 6.1 A) y B)) depende del ángulo de entrada de la luz incidente como se dedujo en el capítulo 3.

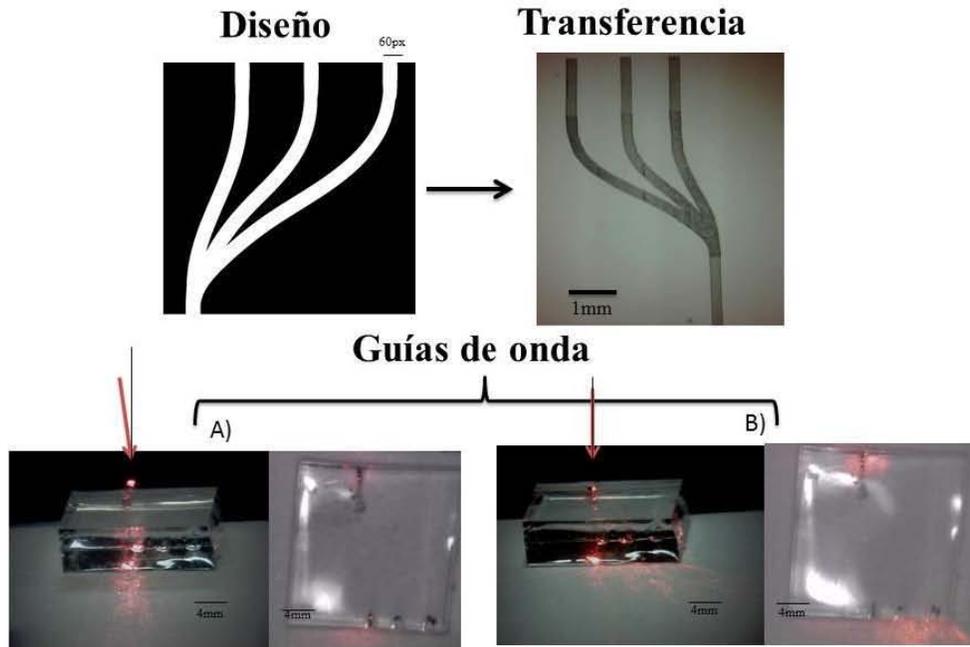


Fig. 6.1 Resultados de las etapas principales de fabricación de un chip óptico.

Otra ventaja del método propuesto es que según su etapa de fabricación se obtienen dos tipos de guías de onda mostradas en la figura 6.2.

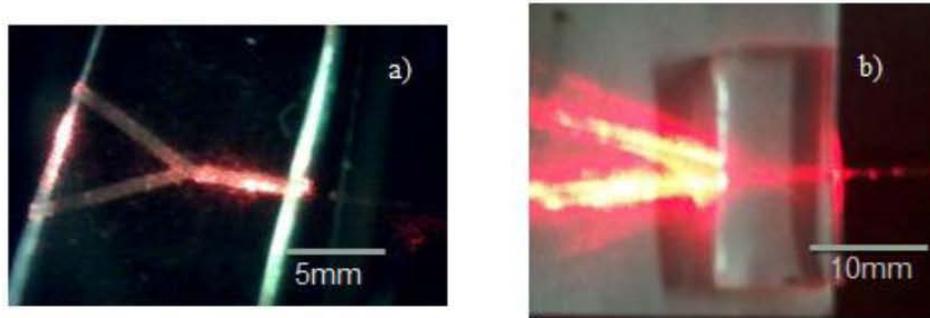


Fig. 6.2 Tipos de guías de onda fabricadas, a) guía tipo escalón, b) guía tipo embebida.

Se caracterizaron los moldes producidos con ablación láser por medio de perfilometría obteniendo sus dimensiones de longitud, ancho, profundidad y rugosidad, asociándoles una desviación estándar, por ello también se concluye que el equipo de ablación láser reprodujo las medidas establecidas en el diseño.

Para el diseño geométrico de las guías se tomaron en cuenta los parámetros mencionados en la tabla 6.1.

	Δn 0.018%	Δn 0.0093%
NA	0.0805743	0.0557104
θ critico	86.72	87.63
θ aceptación	3.27	2.26

Tabla 6.1 Parámetros importantes de diseño.

Finalmente las guías de onda tipo embebidas se caracterizaron al medir su atenuación por dos métodos diferentes, obteniendo los valores presentados en la tabla 6.2.

	Método 1 (dB/cm)	Método 2 (dB/cm)
Tipo Escalón	0.74	2.36
Tipo Embebida	2.08	1.27

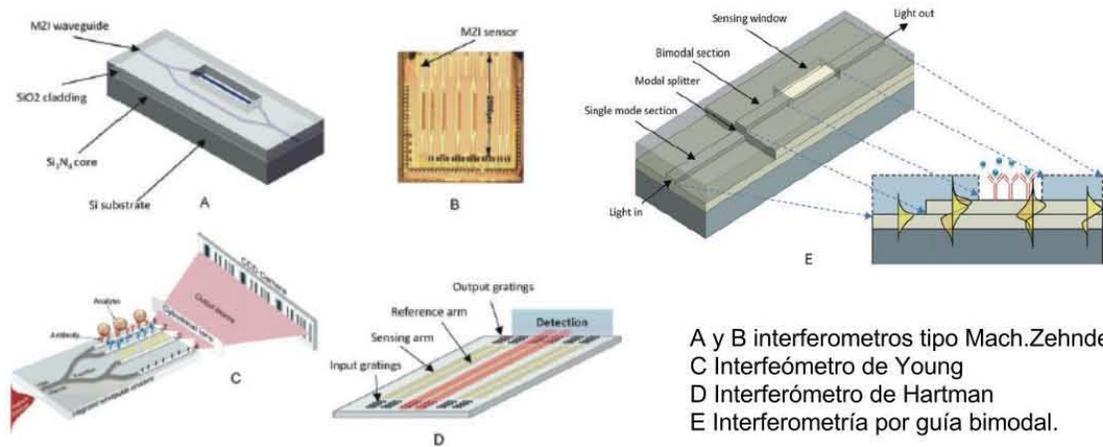
Tabla 6.2 Valores del coeficiente de atenuación.

De los valores del coeficiente de atenuación α pudimos comprobar que la rugosidad de las paredes del núcleo y la alineación juegan un papel importante al cuantificar las pérdidas.

El proceso de fabricación, puede mejorarse de diferentes maneras, tales como:

1. Fabricar moldes menos rugosos y con menos variación en su perfil geométrico, para lograr esto proponemos un número mayor de repeticiones del proceso de depósito y grabado del molde (Capítulo 4).
2. Para reducir la dificultad al alinear, se propone introducir la fibra óptica en el canal y curar el PDMS sobre esta, lo que elimina la necesidad de marcado de los canales de entrada y salida ya que producen esparcimiento.
3. Aumentar el contraste del índice de refracción entre núcleo y revestimiento por medió de fabricar los canales en un molde que soporte mayores temperaturas de curado.

A la par de estas modificaciones se trabajará en la caracterización de algunas propiedades del PDMS y su relación con el índice de refracción así como el envejecimiento de las muestras.



A y B interferómetros tipo Mach.Zehnder
 C Interferómetro de Young
 D Interferómetro de Hartman
 E Interferometría por guía bimodal.

Figura 6.3 Interferómetros para biosensado, adaptada de [9].

Como trabajo a futuro se planea fabricar algunos interferómetros (tipo *Speckle*) como los de la figura 6.3 cuyos usos van desde el biosensado hasta aplicaciones en la óptica cuántica.

Como conclusión general, se puede enunciar que los objetivos de esta tesis se cumplieron al proponer un método de fabricación para guías de onda, de las cuales destaca la tipo embebida ya que no se encontraba reportada en la literatura. Además el método propuesto es sencillo y de bajo costo, tiene una aplicación directa en la producción de elementos ópticos (divisor de haz, multiplexor, etc) en sistemas tipo Lab on a Chip.

Referencias

- [1] Feynman, R.P. "There's plenty of room at the bottom (data storage)". *Journal of Microelectromechanical Systems* **1** (1): 60–66 (1992).
- [2] <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/213/4/A4.pdf>.
- [3] A. Manz, N. Graber, and H.M. Widmer. Miniaturized total chemical analysis systems: a novel concept for chemical sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1(1):244–248, (1990).
- [4] K.B. Mogensen, H. Klank, J.P. Kutter, Recent developments in detection for microfluidic systems, *Electrophoresis* 25 3498–3512 (2004).
- [5] Friis P, Hoppe K, Leistiko O, Mogensen K B, Hubner J and Kutter J P, Monolithic integration of microfluidic channels and optical waveguides in silica on silicon *Appl. Opt.* **40** 6246–51 (2001).
- [6] K.B. Mogensen, Y.C. Kwok, Jan.C.T. Ejikel, N.J. Petersen, A. Manz, J.P. Kutter, A microfluidic device with an integrated waveguide beam splitter for velocity measurements of flowing particles by Fourier transformation, *Anal. Chem.* 75 4931–4936. (2003)
- [7] Klapperich C M, Microfluidic diagnostics: time for industry standards *Expert Rev. Med. Devices* **6** 211–3(2009).
- [8] Quentin T. Aten, Brian D. Jensen, Sandra H. Burnett, and Larry L. Howell, A Self-Reconfiguring Metamorphic Nanoinjector for Injection into Mouse Zygotes, *Review of Scientific Instruments* (2014)
- [9] M. C. Estevez, M. Alvarez, L. M. Lechuga, Integrated optical devices for lab-on-a-chip biosensing applications , *Laser & Photonics Reviews*, **6**, 463–487, (2012).
- [10] Bliss C L, Backhouse C J and McMullin J N Two-colour microparticle detection in PDMS biochips with integrated optics *Proc. SPIE* **6796** 67960A1–A6, (2007).
- [11] Bliss C L, McMullin J N and Backhouse C J Rapid fabrication of a microfluidic device with integrated optical waveguides for DNA fragment analysis *Lab Chip* **7** 1280–7, (2007).
- [12] Bliss C L, McMullin J N and Backhouse C J, Integrated wavelength-selective optical waveguides for microfluidic-based laser-induced fluorescence detection *Lab Chip* **8** 143–51, (2008).

- [13] D.A. Chang-yen, R.K. Eich, B.K. Gale, A monolithic PDMS waveguide system fabricated using soft-lithography techniques, *Journal of Lightwave Technology* 23 2088–2093, (2005).
- [14] Ziliang Cai, Weiping Qiu, Guocheng Shao, Wanjun Wang, A new fabrication method for all-PDMS waveguides, *Ziliang, Sensors and Actuators A* 20 44– 47, (2013).
- [15] Jack Sheng Kee, Daniel Puiu Poenar, Pavel Neuzil, Levent Yobas, Monolithic integration of poly(dimethylsiloxane) waveguides and microfluidics for on-chip absorbance measurements, *Sensors and Actuators B: Chemical*, (2008).
- [16] Jack Sheng Kee, Daniel Puiu Poenar, Pavel Neuzil, and Levent Yobas, Design and fabrication of Poly(dimethylsiloxane) single-mode rib waveguide, *Optics Express* 11739,(2009)
- [17] H. Hosseinkhannazer, L.W. Kostiuk, J.N. McMullin, Two-species microparticle detection in optofluidic biochips with polymeric waveguides, *Proceedings of the SPIE* 70990H, 6 pp, (2008).
- [18] Róbert Horváth, Lars R Lindvold and Niels B Larsen, Fabrication of all-polymer freestanding waveguides, *J. Micromech. Microeng.* **13** 419–424 (2003).
- [19] Sugioka Kogi, Meunier Michel, Piqué Alberto. *Laser precision Microfabrication*, Springer series in materials sciences, Springer (2010).
- [20] R. Pimentel-Dominguez, “terapia Fototérmica como alternativa en oncología”. *Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM* (2013).
- [21] Liska R, Schuster M, Infuhr R, Turecek C, Fritscher C, Seidl B, et al. *Photopolymers for rapid prototyping. J Coat Technol*; 4:505e10 (2007).
- [22] Thomas Billiet, Mieke Vandenhaute, Jorg Schelfhout, Sandra Van Vlierberghe, Peter Dubruel, A review of trends and limitations in hydrogel-rapid prototyping for tissue Engineering, *Biomaterials* 33 6020e6041(2012).
- [23] Cabriaes Torrijos, Ana Lucia; “Estudio de la microestructuración del polidimetilsiloxano por grabado láser y sus aplicaciones”, *Tesis de Licenciatura, UNAM* (2015)
- [24] Hetch Eugene, *Óptica, ADDISON-WESLEY*, 1999.
- [25] Jiménez Zenteno, Alejandro Kayum; “Fabricación de microsistemas y máscaras de alta resolución con tecnología láser”, *Tesis de Licenciatura, UNAM* (2012).
- [26] "Linear Polydimethylsiloxanes" *Joint Assessment of Commodity Chemicals*, September 1994 (Report No. 26) ISSN 0773-6339-26

- [27] J.F. Bauters, M.J.R. Heck, D. John, D. Dai, M. Tien, J.S. Barton, et al., Ultra-low-loss high-aspect-ratio Si₃N₄ waveguides, *Optics Express* 19 3163–3174, (2011).
- [28] Y. Xia, G. M. Whitesides, SOFT LITHOGRAPHY, *Annual Review of Materials Science* Vol. 28: 153-184, (1998).
- [29] Lide, David R., (90th ed.). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Boca Raton, Florida: CRC Press. p. 2-65 (2009).
- [30] https://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi%C3%B3n_interna_total .
- [31] Daniele Melati, Andrea Melloni and Francesco Morichetti, Real photonic waveguides: guiding light through imperfections, *Advances in Optics and Photonics* 6, 156–224 (2014).
- [32] <http://www.scielo.org.mx/pdf/sv/v22n3/v22n3a13.pdf> .
- [33] REIF, Física Estadística (Berkeley Physics Course, volumen 5). Editorial Reverté, 1993.
- [34] Manual perfilómetro KLA Tencor AlphaStep D-600.
- [35] <http://www.microchem.com/pdf/SU-82000DataSheet2025thru2075Ver4.pdf>
- [36] Han D, Meng Z, Wu D, Zhang C, Zhu H, Thermal properties of carbon black aqueous nanofluids for solar absorption, *Nanoscale Res Lett* (2011).
- [37] Especificadores técnicas equipo Metricon <http://www.metricon.com/specifications/>

Anexo A

Reacción de polimerización del poli(dimetilsiloxano)(PDMS)

Esta reacción se llevó a cabo bajo la presión atmosférica de la ciudad de México, esto es importante mencionarlo ya que esta diferencia en las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo, modifican los parámetros intrínsecos del PDMS como el índice de refracción, actualmente en nuestro grupo de trabajo se están llevando a cabo experimentos para estandarizar el método de mezclado y curado y como se ven afectados algunos parámetros del material como módulo de Young e índice de refracción. La siguiente imagen muestra la reacción resultante de la polimerización del PDMS que utiliza un catalizador de platino.

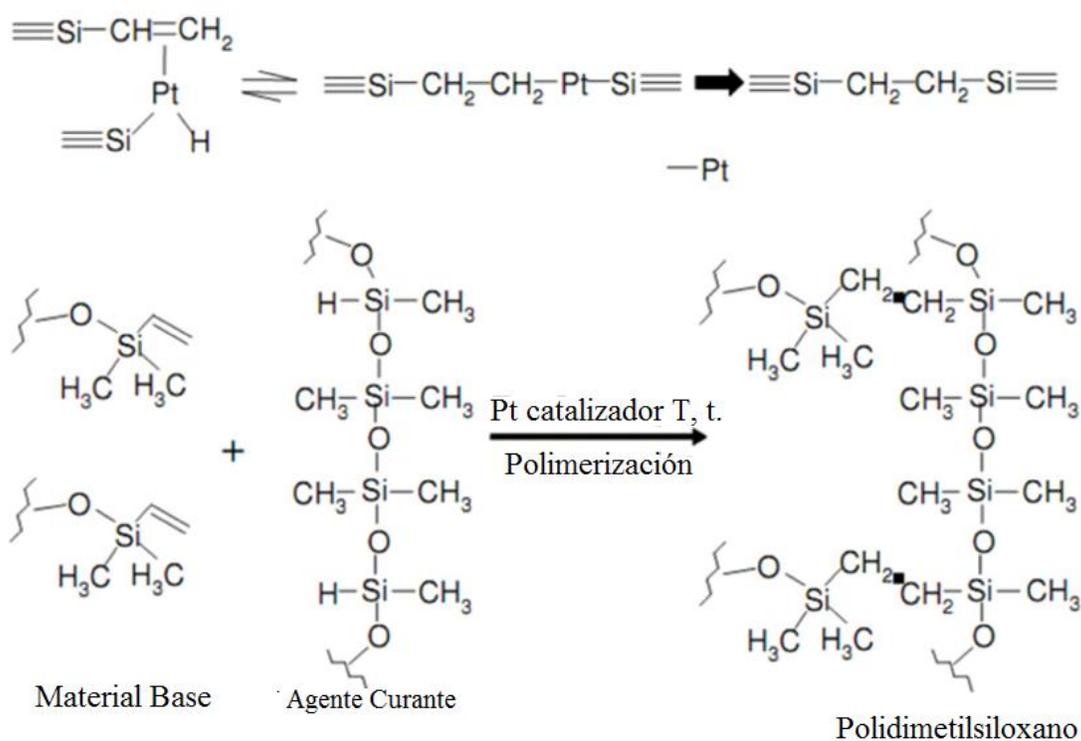


Imagen B.1 Reacción de polimerización del PDMS.

Anexo B

Parámetros a considerar.

Utilizando Wolfram Mathematica 9 se calcularon algunos parámetros físicos como la apertura numérica, los ángulos de aceptación y crítico, además se graficó el coeficiente de atenuación. El código generado junto con los valores es el siguiente:

Constantes Físicas

Los índices de refracción medidos son:

Temperatura ambiente

5:1 1.4106 10:1 1.4102 20:1 1.41

Temperatura °65

5:1 1.4113 10:1 1.4108 20:1 1.411

Temperatura °150

5:1 1.4125 10:1 1.4115 20:1 1.4111

En una guía de onda cuyo molde es acrílico el núcleo contiene PDMS 5:1 @°65 y el revestimiento es PDMS 20:1@ambiente

En una guía de onda cuyo molde es SU8 el núcleo contiene PDMS 5:1 @°150 y el revestimiento es PDMS 20:1@ambiente

```
paraA = {nc -> 1.4113, nr -> 1.4102, λ -> 630 × 10-9}
```

```
paraS = {nc -> 1.4125, nr -> 1.4102, λ -> 630 × 10-9}
```

```
{nc -> 1.4113, nr -> 1.4102, λ ->  $\frac{63}{100\,000\,000}$ }
```

```
{nc -> 1.4125, nr -> 1.4102, λ ->  $\frac{63}{100\,000\,000}$ }
```

Apertura numérica.

```
NA1 = Sqrt[nc2 - nr2] /. paraA
```

```
0.0557104
```

```
NA2 = Sqrt[nc2 - nr2] /. paraS
```

```
0.0805743
```

Ángulo aceptación.

En grados

```
Aθmax = 90 - θca1
```

```
2.26231
```

```
Sθmax = 90 - θca2
```

```
3.27014
```

Ángulo crítico.

```
θc1 = ArcSin[(nr / nc)] /. paraA
```

```
1.53131
```

En grados

```
θca1 = (180 / π) * θc1
```

```
87.7377
```

```
θc2 = ArcSin[(nr / nc)] /. paraS
```

```
1.51372
```

```
θca2 = (180 / π) * θc2
```

```
86.7299
```

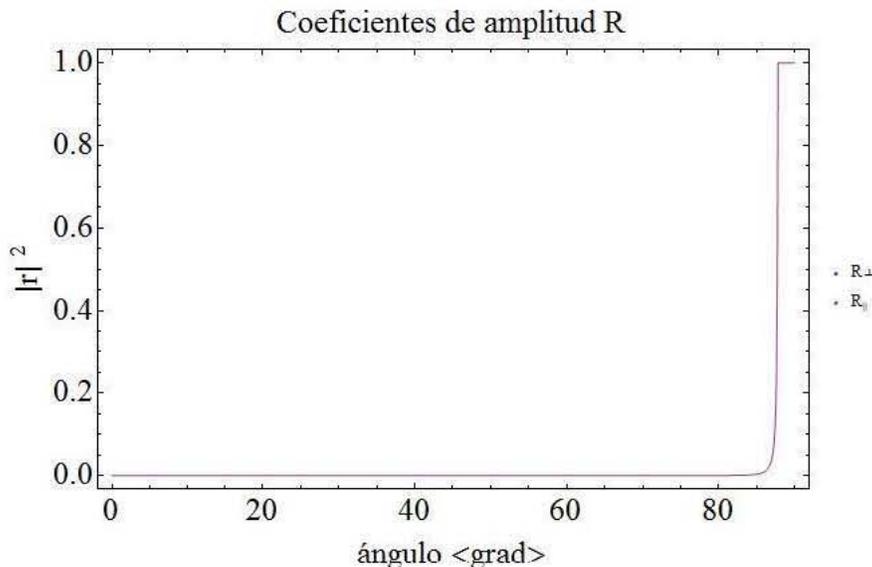
Coeficientes de Amplitud

Usando ley de Snell para calcular los coeficientes de reflexión y transmisión paralelos y ortogonales, las unidades estan en radianes

```

 $\theta_i = \text{Range}[0, 90, .1] * (\text{Pi} / 180);$ 
 $\theta_{i1} = \{\text{Range}[0, 90, .1]\};$ 
 $r[\theta_i] := \text{ArcSin}[(n_2 / n_1) * \text{Sin}[\theta_i]] /. \text{paraA};$ 
 $\theta_t = \text{Map}[r, \theta_i];$ 
 $\theta_{tg} = (180 / \text{Pi}) * \theta_t;$ 
 $r_{\text{orto}}[c_, r_] := (n_1 * \text{Cos}[c] - n_2 * \text{Cos}[r]) / (n_1 * \text{Cos}[c] + n_2 * \text{Cos}[r]) /. \text{paraA};$ 
 $t_{\text{orto}}[c1_, r1_] := (2 * n_1 * \text{Cos}[c1]) / (n_1 * \text{Cos}[c1] + n_2 * \text{Cos}[r1]) /. \text{paraA};$ 
 $r_{\text{para}}[c2_, r2_] := (n_1 * \text{Cos}[r2] - n_2 * \text{Cos}[c2]) / (n_1 * \text{Cos}[c2] + n_2 * \text{Cos}[r2]) /. \text{paraA};$ 
 $t_{\text{para}}[c3_, r3_] := (2 * n_1 * \text{Cos}[c3]) / (n_1 * \text{Cos}[c3] + n_2 * \text{Cos}[r3]) /. \text{paraA};$ 
 $\text{Amr}_{\text{orto}} = \{\text{MapThread}[r_{\text{orto}}, \{\theta_i, \theta_t\}]\};$ 
 $\text{MqrT} = \text{Abs}[\text{Amr}_{\text{orto}}]^2;$ 
 $\text{Amt}_{\text{orto}} = \{\text{MapThread}[t_{\text{orto}}, \{\theta_i, \theta_t\}]\};$ 
 $\text{MqtT} = \text{Abs}[\text{Amt}_{\text{orto}}]^2;$ 
 $\text{Amr}_{\text{para}} = \{\text{MapThread}[r_{\text{para}}, \{\theta_i, \theta_t\}]\};$ 
 $\text{MqrP} = \text{Abs}[\text{Amr}_{\text{para}}]^2;$ 
 $\text{Amt}_{\text{para}} = \{\text{MapThread}[t_{\text{para}}, \{\theta_i, \theta_t\}]\};$ 
 $\text{MqrT} = \text{Abs}[\text{Amt}_{\text{para}}]^2;$ 
 $\text{CoefAmpr}_{\text{orto}}[n_] := \text{MapThread}[\{\#1, \#2\} \&, \{\#[[n]] \& / \theta_i, \#[[n]] \& / \text{MqrT}\};$ 
 $\text{CAMpr}_{\text{orto}} = \text{Flatten}[\text{Map}[\text{CoefAmpr}_{\text{orto}}, \text{Range}[\text{Length}[\theta_i]], 1];$ 
 $\text{CoefAmp}_{\text{orto}}[n1_] := \text{MapThread}[\{\#1, \#2\} \&, \{\#[[n1]] \& / \theta_i, \#[[n1]] \& / \text{MqtT}\};$ 
 $\text{CAmp}_{\text{orto}} = \text{Flatten}[\text{Map}[\text{CoefAmp}_{\text{orto}}, \text{Range}[\text{Length}[\theta_i]], 1];$ 
 $\text{CoefAmpr}_{\text{para}}[n2_] := \text{MapThread}[\{\#1, \#2\} \&, \{\#[[n2]] \& / \theta_i, \#[[n2]] \& / \text{MqrP}\};$ 
 $\text{CAMpr}_{\text{para}} = \text{Flatten}[\text{Map}[\text{CoefAmpr}_{\text{para}}, \text{Range}[\text{Length}[\theta_i]], 1];$ 
 $\text{CoefAmp}_{\text{para}}[n3_] := \text{MapThread}[\{\#1, \#2\} \&, \{\#[[n3]] \& / \theta_i, \#[[n3]] \& / \text{MqrT}\};$ 
 $\text{CAmp}_{\text{para}} = \text{Flatten}[\text{Map}[\text{CoefAmp}_{\text{para}}, \text{Range}[\text{Length}[\theta_i]], 1];$ 
ListPlot[\{\text{CoefAmpr}_{\text{orto}}, \text{CAMpr}_{\text{para}}\}, Joined  $\rightarrow$  True, PlotRange  $\rightarrow$  All, FrameLabel  $\rightarrow$  \{\{"|r|^2"}, {"ángulo <grad>"}, "Coeficientes de amplitud R"}\}, Frame  $\rightarrow$  True, LabelStyle  $\rightarrow$  Directive[\b>Large], PlotLegends  $\rightarrow$  \{"R+", "R_|\}"}\}, ImageSize  $\rightarrow$  600]

```



Número de modos en el molde de caracterización.

Longitud y profundidad de los canales:

```
 $\lambda_0 = .6382 * 1.4113$ 
```

```
0.900692
```

```
dimA = {86.23, 59.72}
```

```
dimB = {89.67, 37.81}
```

```
dimC = {90, 39.68}
```

```
dimD = {101.08, 35.93}
```

```
{86.23, 59.72}
```

```
{89.67, 37.81}
```

```
{90, 39.68}
```

```
{101.08, 35.93}
```

```
NM[{{l_, a_}] := ( $\pi$  / (( $\lambda_0$ ) ^ 2)) (l * a) (NA1);
```

```
NMcanalA = NM[dimA]
```

```
1111.
```

```
NMcanalB = NM[dimB]
```

```
731.455
```

```
NMcanalC = NM[dimC]
```

```
770.457
```

```
NMcanalD = NM[dimD]
```

```
783.531
```
