



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Implementación de método de escritura directa
láser para fabricación de dispositivos fotónicos
quirales y su aplicación como guías de onda**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero en telecomunicaciones

P R E S E N T A

Eloy Montesinos Garrido

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Amado Manuel Velázquez Benítez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

**Implementación de método de escritura
directa láser para fabricación de dispositivos
fotónicos quirales y su aplicación como
guías de onda**

PARA SURCAR MEJOR LAS AGUAS, DESPLIEGA AHORA SUS VELAS
LA NAVECILLA DE MI INGENIO, HABIENDO NAVEGADO YA POR
ESPANTOSOS MARES.

DANTE ALIGHIERI

RESUMEN

En este trabajo se trata la fabricación de guías de onda con estructura quiral mediante el método de escritura directa láser en resinas fotosensibles y, su posible utilización como acopladores direccionales. El proceso de fabricación se basa en fotolitografía híbrida, una combinación novedosa del método que incluye una doble exposición, primero en luz visible y posteriormente en luz ultravioleta. El procedimiento de fabricación parte del depósito controlado de películas delgadas mediante un proceso de spin-coating. Posteriormente sobre la película uniforme se realiza el grabado de la estructura con escritura directa láser utilizando luz visible. Las propiedades físicas de las estructuras son seleccionadas mediante el control de la polarización del haz de escritura. Como resultado se obtienen estructuras quirales y rectas, con propiedades birrefringentes. Posteriormente se embeben con exposición a luz ultravioleta. Finalmente se prueba y analiza cualitativamente el confinamiento de luz visible y las características de propagación y acoplamiento entre estructuras demostrando su utilidad como guías de onda y acopladores direccionales, además, selectivos bajo diferentes estados de polarización.

AGRADECIMIENTOS

Durante el desarrollo de este trabajo hubo muchas personas que me aportaron los conocimientos, las herramientas o la motivación para no decaer y terminar este proceso. Sin duda hay mucho que agradecer y pocas palabras que puedan expresar lo significativo que fue para mi recibir su apoyo.

Primero quiero agradecer a mis padres y mis hermanos porque gracias a ellos empecé y terminé una formación académica, sin su ejemplo no habría concluido este proceso.

Al Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM por ofrecer por medio de sus instalaciones, equipo y personal, las herramientas para trabajar en este proceso y la motivación para terminarlo.

Al Dr. Naser Qureshi por las herramientas, materiales y conocimientos brindados desinteresadamente.

A la Dra. Celia Sánchez por su ayuda y atención; sin su aportación de conocimientos, experiencia y material este trabajo no podría haberse terminado.

Al Dr. Juan Hernández Cordero por direccionarme a la realización de este trabajo y por la orientación y ayuda brindada durante mi proceso de investigación.

Al Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica, LUCE_ICAT_UNAM y a la Dra. Selene Rubí Islas Sánchez por la ayuda, capacitación y caracterización de muestras mediante la técnica de microscopía óptica.

A la coordinación de Becas del CCADET por su apoyo a través del Programa de Becas para Realización de Tesis de licenciatura.

Al Proyecto DGAPA-PAPIIT IA104318 “Microfabricación tridimensional mediante grabado directo con láser”

Gracias a la Secretaría de Atención a la Comunidad Universitaria y a la Dirección General de Orientación y Atención Educativa por apoyo brindado a través del Programa de Becas Para Proyectos de Investigación para la UNAM.

Al Dr. Amado Manuel Velázquez Benítez por su minuciosa labor como investigador, asesor y persona. Por acercarme a la causa y solución de muchos de los problemas de la vida: la investigación.

A mis compañeros de laboratorio porque a través de sus observaciones, consejos y su música culminé este trabajo de investigación.

CONTENIDO

RESUMEN.....	I
AGRADECIMIENTOS	II
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS.....	1
1.1.1 <i>Objetivos Específicos</i>	1
1.2 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN	1
1.2.1 <i>Líneas de transmisión</i>	3
1.3 TRABAJOS PREVIOS	4
1.3.1 <i>Micro fabricación</i>	5
2 TEORÍA	9
2.1 POLARIZACIÓN.....	9
2.2 BIRREFRINGENCIA	10
2.3 QUIRALIDAD	11
2.4 ACOPLAMIENTO POR ONDA EVANESCENTE	12
2.5 FOTOLITOGRAFÍA	12
2.5.1 <i>Método de absorción de un fotón</i>	13
3 SISTEMA DE ESCRITURA DIRECTA LÁSER.....	16
3.1 CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE ESCRITURA DIRECTA LÁSER (DLW)	16
3.1.1 <i>Subsistema mecánico</i>	18
3.1.2 <i>Subsistema eléctrico/electrónico</i>	19
3.1.3 <i>Subsistema óptico</i>	19
3.2 CONTROL DE POLARIZACIÓN	22
4 MÉTODO DE FABRICACIÓN	25
4.1 PREPARACIÓN DE RESINAS SU-8	25
4.2 PROCESO DE FABRICACIÓN.....	30
4.3 PRUEBAS DE ESCRITURA DIRECTA LÁSER.....	34
4.4 ENCAPSULAMIENTO CON SU-8.....	35
4.5 CARACTERIZACIÓN DE PATRONES GENERADOS POR ESCRITURA LÁSER.....	36
4.5.1 <i>Uso de funciones de caracterización</i>	42
5 APLICACIÓN DEL MÉTODO EN FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS	44
5.1 SISTEMA DE ACOPLAMIENTO DE LUZ.....	44
5.2 ESTRUCTURAS RECTAS.....	46
5.2.1 <i>Guías de onda rectas</i>	46
5.2.2 <i>Acopladores rectos</i>	48
5.2.3 <i>Simulaciones</i>	50
5.2.4 <i>Acoplador circular cilíndrico</i>	51
5.2.5 <i>Acoplador birrefringente</i>	52
5.3 ESTRUCTURAS QUIRALES.....	53

5.3.1	<i>Guías de onda quirales</i>	55
5.3.2	<i>Acoplador quiral</i>	56
6	CONCLUSIONES	60
6.1	TRABAJO A FUTURO	61
	APÉNDICES	63
	APÉNDICE 1: CONCEPTOS FUNDAMENTALES	63
	CONFINAMIENTO DE LUZ	63
	<i>Guía de onda</i>	64
	<i>Modos de propagación en guías de onda</i>	66
	EFFECTO FOTOELÉCTRICO	68
	APÉNDICE 2: DESCRIPTION OF SU-8	69
	APÉNDICE 3: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DIODO LÁSER THORLABS DJ532-40	73
	APÉNDICE 4: LOGRANDO UNA POLARIZACIÓN CIRCULAR.....	75
	APÉNDICE 5: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SU-8.....	76
	REFERENCIAS	85

1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan algunos fundamentos que sustentan la relevancia de la luz como señal portadora de información. Se destaca la necesidad de dispositivos puramente ópticos que representen alternativas a los medios electrónicos de la actualidad y se hace énfasis en la miniaturización de los dispositivos para el futuro. Finalmente se presentan algunas técnicas que podrían resolver estas necesidades.

1.1 OBJETIVOS

El desarrollo de este trabajo plantea la fabricación de dispositivos quirales mediante el método de escritura directa láser. Dado que la quiralidad en una estructura se asemeja a una silueta helicoidal, y el comportamiento de una señal transmitiéndose a través de ella es dependiente de la polarización, estos dispositivos pueden utilizarse como guías de onda igualmente dependientes de la polarización, transformadores de polarización o como acopladores por onda evanescente pasivos, puramente fotónicos y de dimensiones reducidas (micrométricos). Estos dispositivos fotónicos se realizarán sobre sustratos de vidrio y totalmente embebidos en la misma resina en que se fabrican, SU – 8, la cual es el material más utilizado en los procesos de fotolitografía.

1.1.1 Objetivos Específicos

- ❖ Demostrar la factibilidad de implementación un método de fotolitografía con reducción de costos respecto a los trabajos que se referencian en el desarrollo y con resultados comparables.
- ❖ Demostrar la posibilidad de confinamiento de luz visible en estructuras o guías de onda fabricadas con este método y con bajo contraste de índice de refracción.
- ❖ Evaluar la posibilidad de utilizar las guías de onda para la fabricación de acopladores por onda evanescente.
- ❖ Lograr un proceso de fabricación más sencillo para guías de onda óptica mediante fotolitografía híbrida en SU - 8 utilizando luz ultravioleta ($\lambda = 365 \text{ nm}$) y luz visible ($\lambda = 532 \text{ nm}$).
- ❖ Fabricar guías de onda quirales (o semejantes) mediante la alteración de la orientación de polarización del haz de escritura durante el proceso de exposición de los patrones diseñados.
- ❖ Comprobar la afectación del estado u orientación de la polarización del haz de luz propagado a la salida de un dispositivo quiral respecto a un dispositivo recto.

1.2 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

La historia de las comunicaciones es paralela a la historia de la humanidad y el desarrollo de las civilizaciones humanas. El uso de la luz como elemento portador de información es casi tan antiguo como los primeros asentamientos humanos en donde utilizaban espejos, señales de fuego o humo con un significado único que solo los usuarios conocían [1].

A partir del siglo XVIII, el uso de banderas, lámparas y otros dispositivos visibles se popularizó en las ciudades alrededor del mundo. En el siglo XIX este aspecto se vio revolucionado por el telégrafo, el teléfono y los sistemas de radio, dominando el sector de las comunicaciones gracias a la alta tasa de transmisión y la capacidad de cubrir grandes distancias de manera casi instantánea. Fue hasta 1960 que la luz se consideró seriamente como una alternativa gracias a la invención del láser, presentando un avance enorme ya que es una fuente de luz que además de ser cuasi monocromática, es coherente espacial y temporalmente. La aparición del láser permitió comprobar teorías propuestas anteriormente para la descripción de muchos fenómenos y permitió tasas de transmisión muy superiores a las de los sistemas electrónicos conocidos hasta el momento [1]. En la Fig. 1.1 se muestran los inventos base de las telecomunicaciones y como han aumentado exponencialmente la tasa de transmisión de información.

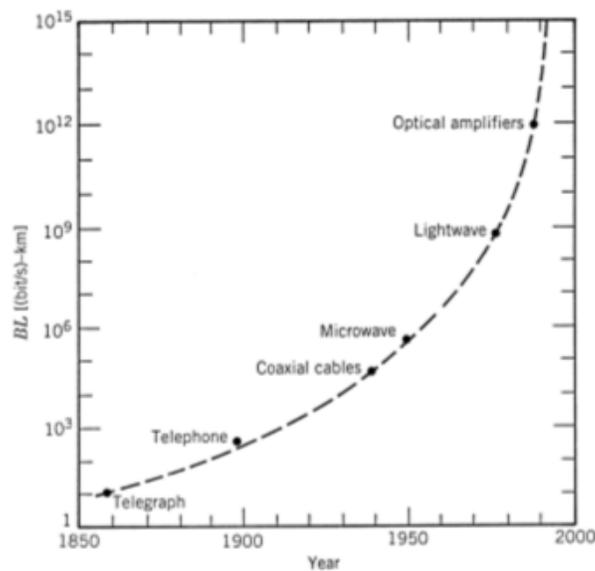


Fig. 1.1: Evolución de la tasa de transmisión permitida por los sistemas de comunicaciones [1].

Además de impulsar los sistemas de comunicación, la luz también se plantea como una gran herramienta para ciencias biológicas, médicas, físicas y en la industria, a través de sensores y dispositivos capaces de confinar, propagar y permitir la manipulación de las características de la luz. Es aquí donde aparecen las guías de onda planas con funcionalidad similar a una fibra óptica, pero de tamaño muy reducido y la posibilidad de integrar múltiples elementos en arreglos capaces de modificar la luz confinada. Sin duda estas razones convierten a las guías de onda planas en materia de investigación y desarrollo tecnológico.

1.2.1 Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión son generalmente sistemas a base de conductores, semiconductores, dieléctricos o combinaciones de ellos que pueden utilizarse para propagar ondas eléctricas o electromagnéticas. El análisis de líneas de transmisión une la teoría de propagación de campos con el análisis de circuitos [2, 3]. A diferencia de un medio de transmisión las líneas confinan y guían una señal, mientras los medios solo permiten la propagación a través de ellos. En las líneas de transmisión electromagnéticas, sus propiedades tales como materiales y dimensiones definen la naturaleza y características de la onda electromagnética que guiarán, por ejemplo: pérdidas, ancho de banda y tasa de transferencia de información.

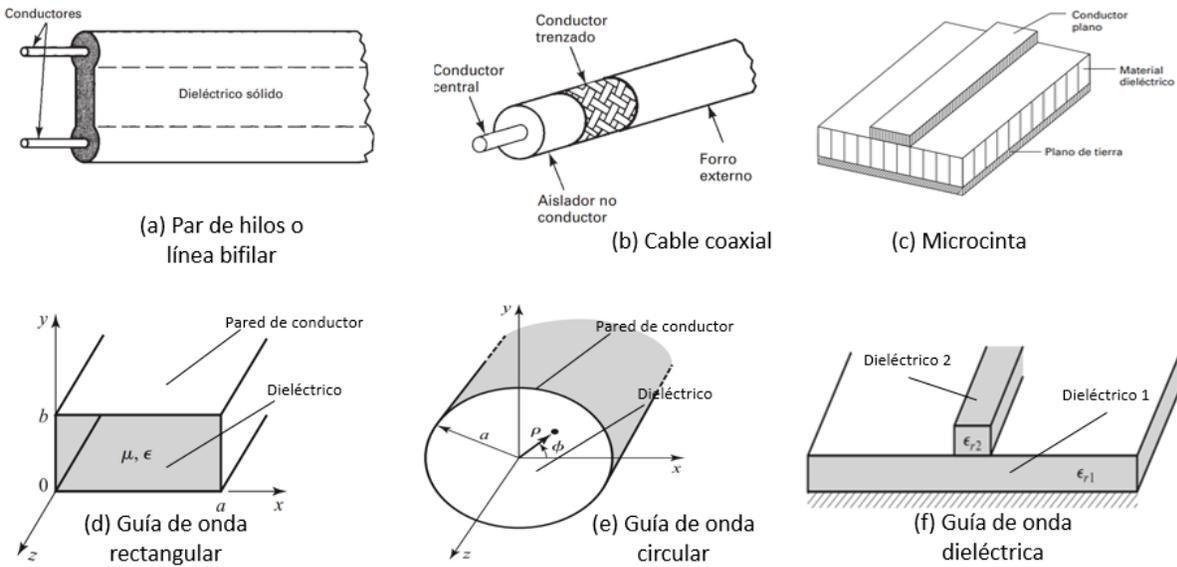


Fig. 1.2: Corte transversal de líneas de transmisión más comunes [1, 2].

Existe una gran diversidad de líneas de transmisión y configuraciones [3]. Para la transmisión de señales con frecuencias bajas, desde cero hasta cientos de MHz, generalmente se utilizan conductores eléctricos. Los elementos más comunes para este rango de frecuencias son elementos bifilares, placas paralelas o cables coaxiales. Al transmitir frecuencias más altas, en el rango de los GHz, se comienzan a encontrar ciertas limitaciones y la geometría comienza a ser un factor importante para poder transmitir las señales electromagnéticas. Para distancias cortas de transmisión se pueden utilizar microcintas de conductores, siendo esta la técnica más utilizada en microelectrónica. Otro tipo de líneas de transmisión son las basadas en guías de onda tubulares donde se pueden transmitir señales por mayores distancias. Estas guías de onda pueden ser construidas con materiales conductores o una combinación de conductores y dieléctricos, adoptando geometrías rectangulares, circulares o elípticas.

Para la transmisión de señales electromagnéticas de mayores frecuencias en el rango de los cientos de THz o superiores, los materiales conductores comienzan a ser ineficientes presentando problemas de atenuación. Tal es el caso de las señales ópticas visibles y en el cercano infrarrojo que se encuentran en el rango de frecuencias de 0.3 a 300 THz donde las guías de onda utilizadas se basan en materiales dieléctricos. La tecnología más popular que utiliza estos materiales son las fibras ópticas

y guías de onda planas resultando en la subrama de líneas de transmisión ópticas. Cada uno de los rangos de frecuencias definidos anteriormente y las guías de onda aplicables a cada uno de ellos se ilustran en la Fig. 1.3.

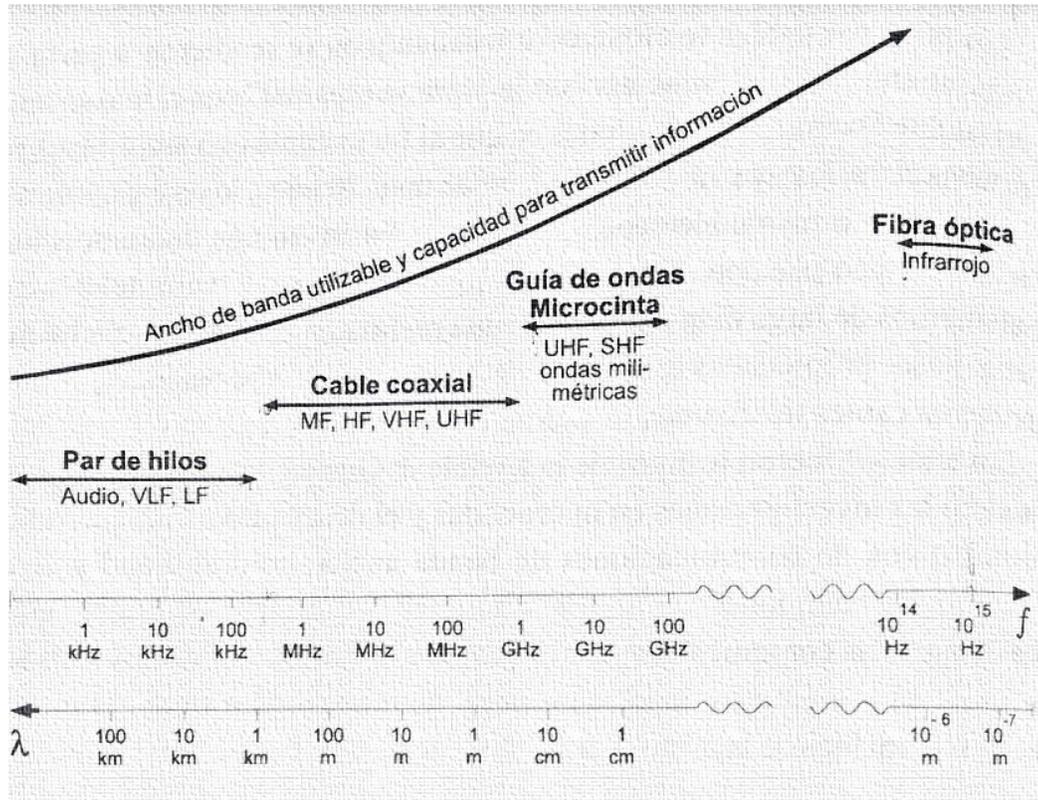


Fig. 1.3: Líneas de transmisión asociadas a su rango de frecuencias [3].

Tomando como base las tecnologías basadas en ondas de luz, existe la tendencia de reemplazar los sistemas electrónicos en enlaces de alta capacidad y de largas distancias terrestres por sistemas fotónicos. Es decir, utilizar elementos y dispositivos capaces de transmitir y alterar la luz basados en guías de onda ópticas para realizar el procesamiento de información. Debido a esta propuesta, se enfrenta la necesidad de adaptar las técnicas de fabricación existentes o encontrar nuevas para la obtención de estos elementos y dispositivos.

1.3 TRABAJOS PREVIOS

En las páginas siguientes se analizan publicaciones de investigaciones similares a la que se desarrolla en este trabajo y se muestran los datos que se consideraron significativos para el desarrollo y utilizados como base de las actividades realizadas.

1.3.1 Micro fabricación

La micro fabricación es un tema estudiado con gran detalle en los últimos años con el fin de lograr alternativas para fabricar a escalas más pequeñas y utilizando diversos materiales. La posibilidad de construir dispositivos de dimensiones micrométricas y además robustos, es sin duda atractiva para diferentes ramas de la ciencia desde la biología hasta la ingeniería, y como parte de esta última a las telecomunicaciones. La fotolitografía es un método de micro fabricación que utiliza la interacción de la luz con los materiales en el cual se replica un diseño establecido. Las técnicas disponibles para este fin consisten en la escritura directa láser y el uso de máscaras; estas dos técnicas de fotolitografía se explican detalladamente en la sección 2.5.

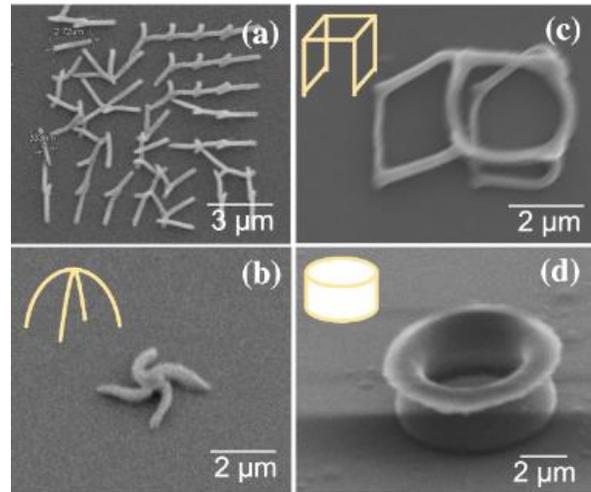


Fig. 1.4: Imágenes por microscopía electrónica de barrido (SEM) de estructuras 3D nanométricas. (a) Arreglo de pilares ($3 \mu\text{m}$ de altura). (b) – (d) Ejemplos de estructuras en 3D [5].

Utilizando técnicas de fotolitografía investigadores del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT por sus siglas en inglés), han logrado la fabricación de guías de onda plana con dimensiones de hasta $0.5 \mu\text{m}$ y pérdidas menores a 1 dB/cm [4]. Avanzando aún más hacia la miniaturización se han reportado métodos para fabricar estructuras nanométricas en dos y tres dimensiones [5]. El método se describe como una variación de fotolitografía convencional lineal utilizando luz visible y objetivos de microscopio con gran apertura numérica, pero trabajando en la región de baja absorción. Como resultado obtienen estructuras complejas de polímero con resolución de algunas centenas de nanómetros [5]. La Fig. 1.4 muestra ejemplos de las estructuras que pueden fabricarse con el método que describen en esta publicación.

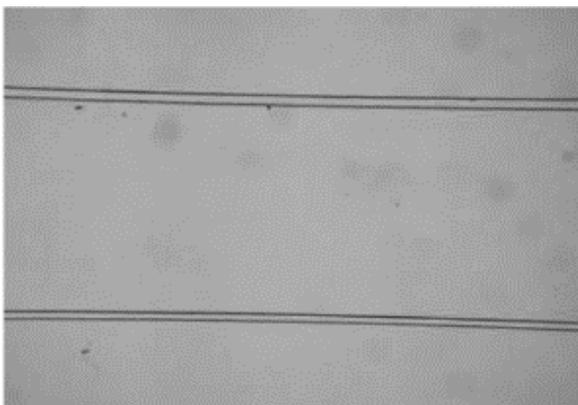


Fig. 1.5: Guías de onda plana en SU-8 de entre 30 y $50 \mu\text{m}$ de espesor y 25 mm de largo fabricadas mediante el proceso de litografía convencional [6].

Un material muy utilizado para la fabricación de micro y nano estructuras con fotolitografía es la resina polimérica SU-8. Entre sus características se encuentran el ser transparente a la luz visible, químicamente estable y resistente a la mayoría de los ácidos y solventes más comunes. Un ejemplo de su aplicación para guías de onda ópticas es la fabricación por medio de máscaras de transferencia de patrones utilizando una fuente de luz ultravioleta (UV). Estas estructuras lograron confinar luz visible con longitud de

onda de 632.8 nm [6]. Además, estas guías presentan pérdidas de 5.6 dB en una extensión de 22 mm y con 5 μm de ancho.

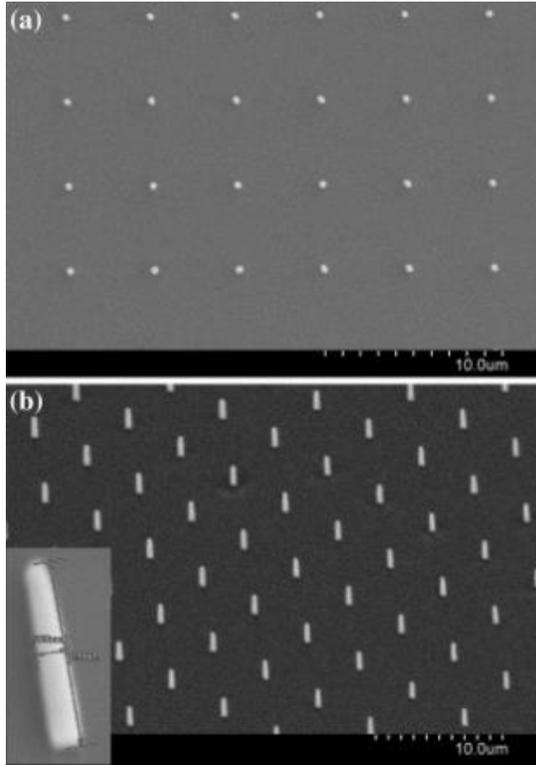


Fig. 1.6: Imagen de microscopía electrónica SEM de pilares fabricados con escritura directa láser en región de baja absorción utilizando luz visible. Vistas (a) superior y (b) lateral con acercamiento en pilar de 300 nm de radio y 2000 nm de altura [7].

En la Fig. 1.5 se pueden ver dos guías de onda sobre un sustrato de vidrio y expuestas al aire con espesor de 30 y 50 μm .

Con la misma resina, pero utilizando una fuente de luz visible para llevar a cabo la solidificación del material y en conjunto con objetivos de microscopio para aumentar la densidad de potencia en la región de baja absorción, las dimensiones de las estructuras polimerizadas llegan a algunos micrómetros o incluso debajo del micrómetro [7]. Según el reporte publicado por Trang Do en 2014, la concentración de la luz con longitud de onda de 532 nm en un spot muy reducido da como resultado regiones de resina solidificada muy pequeñas [7]. En este trabajo se utilizó como fuente de luz un diodo láser semiconductor estándar de $\lambda = 532$ nm y potencia óptica de 2.5 mW de emisión. En esta longitud de onda la absorción de la resina es muy baja y por eso es necesario utilizar objetivos de microscopio para lograr una densidad de energía suficiente para generar el proceso de solidificación. Como se ve en la Fig. 1.6 los pilares que se obtienen miden alrededor de 300 nm y solamente son visibles utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM).

Siguiendo con la línea de desarrollo en SU-8 también existe fotolitografía híbrida, es decir, utiliza tanto mascareras con patrones como la escritura directa por láser [8]. Utilizando esta combinación de técnicas se pueden lograr estructuras que incluyan grandes áreas polimerizadas de baja resolución y pequeñas guías de onda, con alta resolución. Tal como se muestra en la Fig. 1.7 se presenta un dispositivo con dos electrodos, uno en la parte superior y otro en la parte inferior, los cuales se realizaron con máscara de transferencia y exponiendo a luz UV (máxima absorción). A la salida de cada electrodo se aprecian delgadas líneas grabadas con escritura directa láser con $\lambda = 532$ nm (baja absorción) y alta densidad de potencia. La ventaja de esta técnica es precisamente la posibilidad de

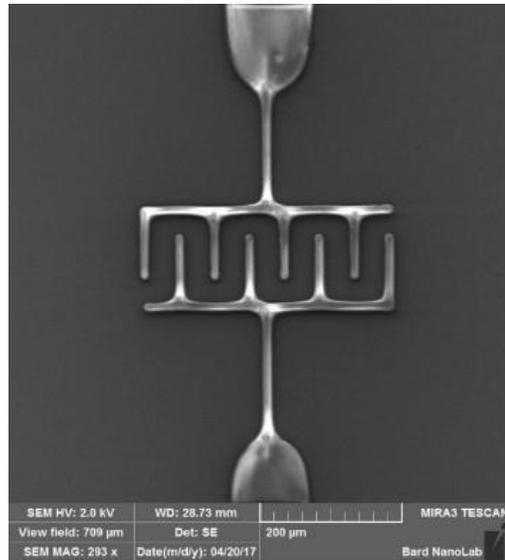


Fig. 1.7: Estructura fabricada en resina SU-8 con fotolitografía híbrida [8].

polimerizar tanto áreas grandes como pequeñas en dispositivos integrados, logrando diferentes resoluciones y estructuras.

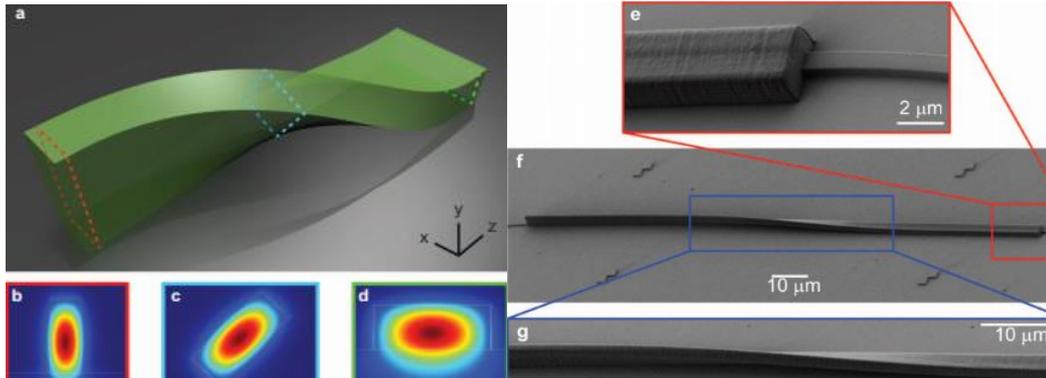


Fig. 1.8: Guía de onda rotadora de polarización. (a) Representación de la estructura fabricada al rotar polarización del haz de escritura; las líneas punteadas corresponden a la sección transversal mostradas en b, c y d. (b - d) Simulaciones de la evolución de la distribución de intensidad de luz debido a la orientación de la guía de onda en diferentes secciones transversales. (e - g) Imágenes con microscopía electrónica SEM del rotador de polarización acoplado a guías de onda nanométricas [9].

Utilizando las técnicas de fotolitografía híbrida hay desarrollos de chips para sistemas de comunicaciones ópticas capaces de controlar ciertas características de propagación de la señal de luz que confinan. Un ejemplo de este tipo de desarrollos es un rotador de polarización que presentan un grupo de investigadores del *Instituto de Física Aplicada (CFN)* y el *Instituto de Nanotecnología (INT)*, ambos de Alemania [9]. En la Fig. 1.8 se muestra el dispositivo mencionado, el cual consiste en una guía de onda óptica plana rectangular que es fabricada de tal manera que rota a lo largo de su extensión en el eje de propagación. Como consecuencia de esto, la señal óptica transmitida obedece a esta estructura afectando la distribución de energía y polarización de la señal óptica. El propósito de estos dispositivos es la fabricación de resonadores o acopladores nanométricos integrados en un chip con selectividad en polarización.

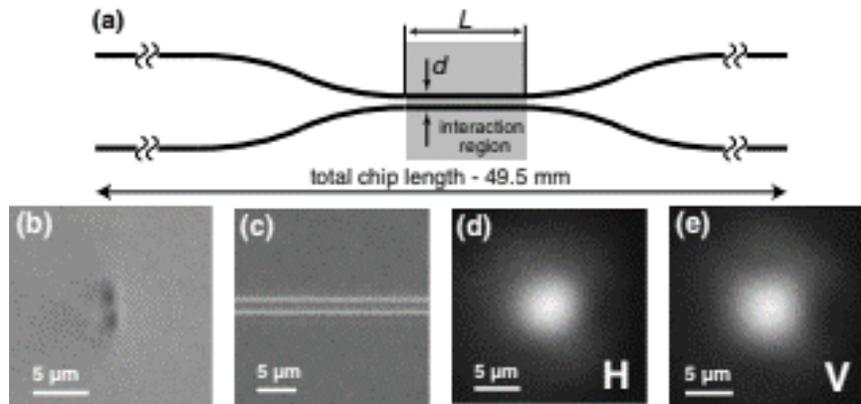


Fig. 1.9: Acoplador direccional fabricado con escritura directa láser. (a) Diagrama de estructura de acoplador, (b) vista frontal de acoplador en zona de interacción, (c) vista superior de acoplador con microscopía óptica, (d - e) perfiles modales a la salida para señales con polarización horizontal y vertical respectivamente [10].

Continuando con la fabricación de dispositivos se ha reportado también el desarrollo de un acoplador direccional mediante escritura directa láser. Este dispositivo se creó utilizando un láser pulsado para lograr estructuras submicrométricas con propiedades de propagación de luz dependientes de la señal

proporcionada a la entrada. En este caso la estructura creada divide la señal de luz según sea la polarización del haz de entrada en cada uno de los brazos de salida [10] (Fig. 1.9). La creación de este acoplador con dependencia en la señal de entrada significó una reducción en los tamaños de fabricación, menos de 50 mm de longitud, y con pérdidas de 16 y 20 dB.

En el desarrollo de este capítulo se estudiaron algunas tecnologías de los sistemas de comunicaciones terrestres de larga distancia. Con fundamento en las tasas de transmisión de información que permiten los sistemas ópticos, se concluyó que estos son los que mayor potencial tienen en el futuro (para aplicaciones que permitan su uso). Además, se exploró el desarrollo de técnicas de fabricación de dispositivos fotónicos. Con estos datos se justifica el objetivo de éste trabajo y se exponen técnicas y avances actuales para fabricación de dispositivos fotónicos mediante escritura directa láser.

2 TEORÍA

En este capítulo se realiza un estudio de los principios físicos referentes a teoría electromagnética y propagación de ondas de luz que son fundamentales para la comprensión, realización del trabajo experimental y análisis de resultados. Conceptos básicos como confinamiento de luz y guía de onda se definen en el Apéndice 1.

2.1 POLARIZACIÓN

La teoría electromagnética elaborada por Maxwell se basa en la presencia de cargas eléctricas en el medio que forman un campo electromagnético. Este campo puede ser representado por los vectores de: campo magnético (\mathbf{B}) y campo eléctrico (\mathbf{E}). Para describir las interacciones entre los campos y la materia, Maxwell introdujo los vectores densidad de corriente eléctrica, densidad de flujo eléctrico y densidad de flujo magnético definidos como \mathbf{J} , \mathbf{D} y \mathbf{H} , respectivamente. En las Ecuaciones 2.1 a 2.4 se observa el planteamiento de Maxwell en forma diferencial para medios con pérdidas. [2, 11, 12]

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$\mathbf{B} = 0 \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

La polarización de una onda electromagnética es definida por David M. Pozar [2] como “*La orientación del vector de campo eléctrico, que puede estar en una dirección fija o puede cambiar con el tiempo*”. Por lo tanto, para el estudio de ondas en propagación y en este trabajo ondas de luz, se utiliza la orientación del vector de campo eléctrico como vector de referencia.

Una onda electromagnética se puede tomar en su forma más simple como una onda plana conformada por los vectores \mathbf{E} y \mathbf{B} , siendo estos ortogonales entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación. En una onda electromagnética plana y armónica¹ los campos \mathbf{B} y \mathbf{E} tienen componentes en los ejes cartesianos X y Y . Las Ecuaciones 2.5 [11] describen el comportamiento de las componentes campo eléctrico de una onda EM propagándose en un medio.

$$\begin{aligned} E_x &= a_1 \cos(\tau + \delta_1) \\ E_y &= a_2 \cos(\tau + \delta_2) \end{aligned} \quad \text{Ecuaciones 2.5}$$

¹ En una onda plana armónica los campos \mathbf{E} y \mathbf{B} oscilan sinusoidalmente con dependencia del tiempo.

en donde $a_{1,2}$ representan las amplitudes de las componentes, τ representa la parte variable del vector de fase y δ representa una componente de fase. Para estas ecuaciones existen cuatro casos posibles que describen la distribución geométrica del campo eléctrico:

$$E_x = 0; E_y \neq 0 \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$E_x \neq 0; E_y = 0 \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$E_x \neq 0; E_y \neq 0; E_x \neq E_y \quad \text{Ecuación 2.8}$$

$$E_x = E_y \neq 0 \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Los primeros dos casos presentados en las Ecuaciones 2.6 y 2.7 corresponden a una polarización lineal en Y y en X , respectivamente. El tercer caso (Ecuación 2.8) corresponde a una polarización elíptica ya que tiene componentes de diferente amplitud en los dos ejes coordenados. El cuarto y último caso (Ecuación 2.9) corresponde a una polarización circular en donde las componentes en X y Y son idénticas.

2.2 BIRREFRINGENCIA

La polarización de una onda de luz puede ser afectada por la materia con que interactúa debido a las reflexiones y refracciones, ocasionando cambios de fase. Por ejemplo, puede suceder que una onda con polarización circular cambie a polarización elíptica o lineal al verse afectada por el medio en que se transmite. Este tipo de alteraciones a la onda se puede provocar con materiales birrefringentes, es decir, que tienen diferentes valores de índice de refracción en sus ejes coordenados [13] (ver Fig. 2.1). La Ecuación 2.10 determina la magnitud de la birrefringencia \mathcal{B}^2 del material con los índices de refracción de cada eje [12].

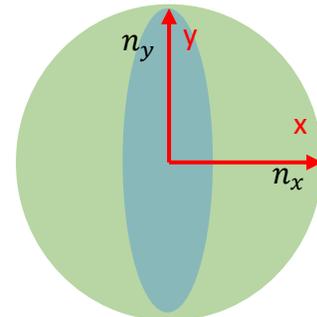


Fig. 2.1: Corte transversal de cuerpo birrefringente.

$$\mathcal{B} = |n_x - n_y| = \Delta n \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Esto implica que la constante de propagación³ (β) en el medio depende de la orientación de polarización de entrada de la onda. En un material birrefringente en el que incide una onda polarizada circularmente, una de las componentes continuará con la trayectoria del haz entrante, mientras que la componente en el eje ortogonal presentará una desviación debido a la variación del índice de refracción del medio, afectando la constante de propagación y por consiguiente la velocidad de

² No confundir \mathcal{B} con \mathbf{B} , esta última hace referencia al campo magnético.

³ La constante de propagación expresa el comportamiento de la amplitud y cambio de fase de una onda en la dirección de propagación de esta.

propagación de esa componente. El primer caso (componente no afectada) se le conoce como componente ordinaria, mientras que la segunda se le conoce como componente extraordinaria [14].

Debido a que las ondas de luz propagándose por una estructura birrefringente presentan afectaciones en polarización, la birrefringencia puede ser utilizada de muchas formas en una línea de transmisión. Una propiedad que se basa en la birrefringencia y que es de especial interés para este trabajo es la quiralidad.

2.3 QUIRALIDAD

Un cuerpo o estructura quiral es aquella que no puede hacerse coincidir con su reflejo [15]. La quiralidad en tres dimensiones se asocia con la hélice, de esta forma una estructura quiral en tres dimensiones puede ser la trayectoria que describe una hélice desplazándose en un eje [16, 17, 18].

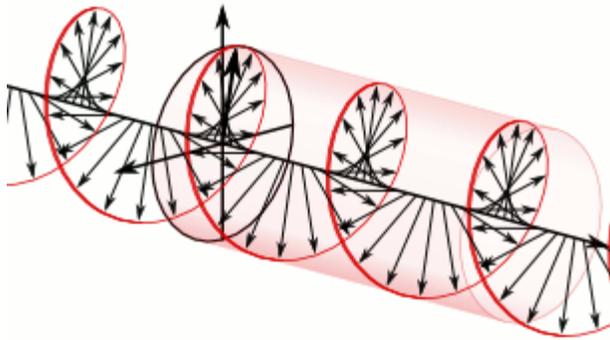


Fig. 2.2: Quiralidad y hélice.

Si se toma la birrefringencia descrita anteriormente como un aspa (ver Fig. 2.1), y se hace rotar a lo largo de un eje entonces se forma una estructura quiral, en otras palabras, una estructura con evolución en el índice de refracción a lo largo del eje de propagación.

En la Fig. 2.2 la hélice se representa con flechas negras y la quiralidad con la trayectoria roja

Una estructura quiral afecta de forma diferente a una señal dependiendo de la polarización de entrada.

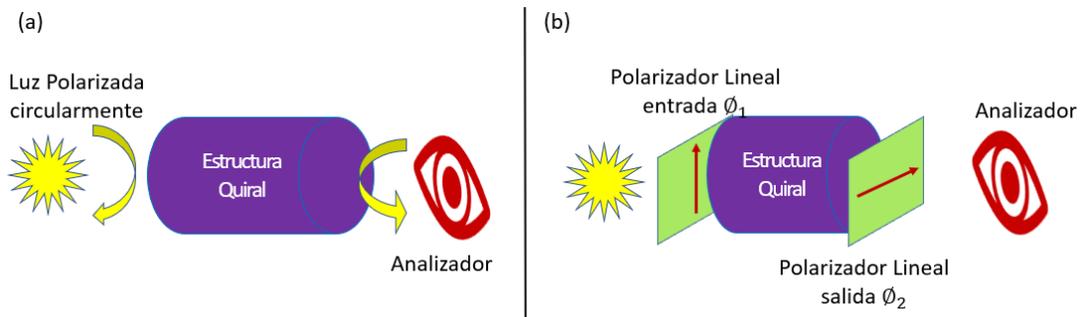


Fig. 2.3: Cambios ocasionados por estructuras quirales a señales polarizadas. (a) inversión de sentido a polarización circular de entrada, (b) cambio de orientación a polarización lineal de entrada.

En la Fig. 2.3 se ejemplifican dos alteraciones que una estructura quiral puede generar a una onda polarizada. En (a) se tiene una señal de entrada con polarización circular, al analizar la señal en la salida se observa una polarización circular en sentido inverso al de entrada. Esta alteración depende del sentido de la quiralidad [19]. En (b) se tiene una señal de entrada con polarización lineal y en la salida la polarización ha rotado su orientación sin afectar su estado de polarización [17]. En otras palabras, la quiralidad puede utilizarse para modificar las características del estado de polarización de una señal, pero no para cambiar el propio estado de polarización.

2.4 ACOPLAMIENTO POR ONDA EVANESCENTE

Para entender el acoplamiento de luz primero es conveniente mencionar como se forma y bajo qué circunstancias existe la onda evanescente. La onda evanescente es un fenómeno presente en guías de onda dieléctricas y es aprovechado para transferir energía entre múltiples guías.

Analizando la propagación de la luz mediante la teoría electromagnética se observa que debe de existir una continuidad de la onda en la interfaz de los materiales. Estableciendo las condiciones de frontera entonces resulta que una parte del campo eléctrico penetra en el revestimiento. Esta porción de campo se le denomina onda evanescente y posee un decaimiento exponencial conforme se aleja radialmente de la interfaz [13].

Debido a la penetración de la onda evanescente en el medio circundante durante la propagación es posible que la onda se acople a una segunda guía. Esto se ejemplifica en la Fig. 2.4, en donde además se muestra el perfil de distribución de energía (en rojo) de la onda de luz propagada por etapas, primero confinada en la guía 1, después distribuida en la guía 1, en el medio entre guías y finalmente acoplada en la guía 2, La onda evanescente es aquella fracción de la distribución de energía (rojo) que viaja fuera de los límites de la guía 1 y 2.

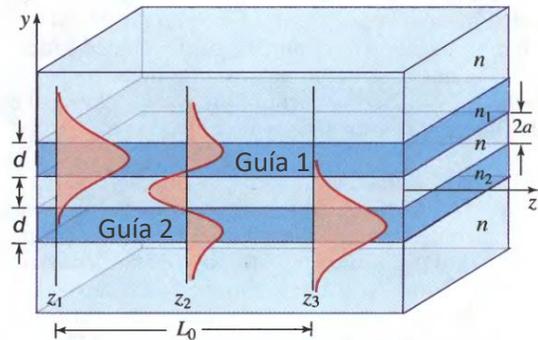


Fig. 2.4: Acoplamiento por onda evanescente entre guías de onda planas paralelas [20].

Las distancias d , L_0 y $2a$ representan el espesor de las guías de onda, longitud de acoplamiento y la separación entre guías respectivamente. Dichos parámetros son determinados en función de los materiales y por tanto de los índices de refracción n , n_1 y n_2 [20]. En este caso los índices de refracción de ambas guías de onda pueden ser diferentes, generando que la transferencia de energía no sea total.

Las distancias d , L_0 y $2a$ representan el espesor de las guías de onda, longitud de acoplamiento y la separación entre guías respectivamente. Dichos parámetros son determinados en función de los materiales y por tanto de los índices de refracción n , n_1 y n_2 [20]. En este caso los índices de refracción de ambas guías de onda pueden ser diferentes, generando que la transferencia de energía no sea total.

2.5 FOTOLITOGRAFÍA

La fotolitografía es una técnica de fabricación que se basa en la utilización de la luz como herramienta de transferencia o grabado para la formación de estructuras. Esta técnica permite fabricación en dos y tres dimensiones de tamaños que van desde varios centímetros hasta algunos cuantos nanómetros. Recientemente se ha probado esta técnica para estructuras submicrométricas con éxito, utilizando variaciones y adaptaciones de los métodos de fotolitografía con escritura directa láser en un fotón [6] y en dos fotones [8].

La fotolitografía basa gran parte de su funcionamiento en la teoría de absorción de la luz y en niveles de energía discretos, fundamentos de la mecánica cuántica. Hoy se conoce que la radiación electromagnética tiene naturaleza ondulatoria pero también presenta comportamiento de partícula [13], el efecto fotoeléctrico explica este principio de la mecánica cuántica y al mismo tiempo ayuda a entender el proceso de fotolitografía. (ver Apéndice 1)

Si se hace un análisis de la resina comúnmente utilizada en fotolitografía SU - 8, se tiene que poner atención a las reacciones químicas que suceden durante la exposición a la luz. En el mecanismo principal para polimerizar el SU-8 se requiere tomar electrones de cierta banda o nivel de energía y llevarlos a un nivel más alto. En éste proceso los electrones *abandonan* la molécula base del polímero en forma de cadena y quedan libres, siendo consecuentemente atraídos y atrapados por una molécula diferente formando un compuesto ácido [21], Este ácido sirve como catalizador de una reacción llamada *deprotección térmica* y origina el entrecruzamiento; este proceso químico y su se explica detalladamente en el Apéndice 2.

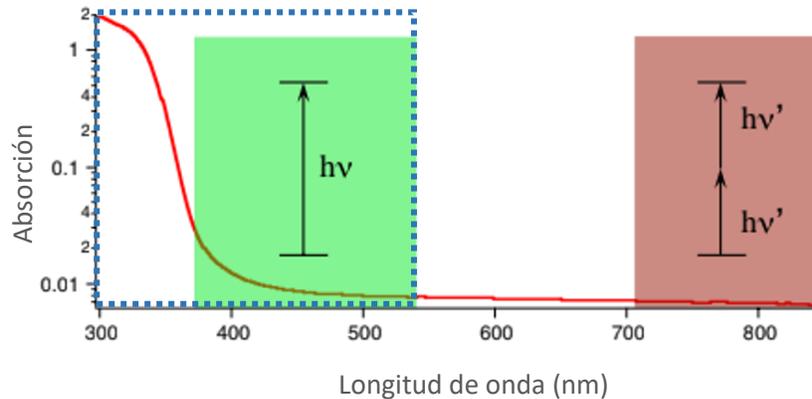


Fig. 2.5: Curva Espectro de absorción del SU-8 señalando las regiones de fotolitografía: absorción con un fotón (punteada), un fotón en baja absorción (verde) y dos fotones (rojo) [7].

Para conocer las características de la señal óptica necesaria para generar el efecto de entrecruzamiento se requiere analizar las regiones del espectro electromagnético que son absorbidas por este material. En la Fig. 2.5 se ve el espectro de absorbancia del SU-8 donde se pueden identificar dos regiones para generar el efecto de entrecruzamiento de la resina: absorción por un fotón con luz visible y dos fotones. En este trabajo se emplea la fotolitografía de un fotón, por lo tanto, el análisis del método de dos fotones resulta irrelevante.

2.5.1 Método de absorción de un fotón

En este método la energía para llevar un solo electrón de un nivel a otro proviene de un único fotón. Como muestra la Fig. 2.6, un haz de luz incide en un átomo de un compuesto, si la energía asociada a la longitud de onda del fotón es suficiente para expulsar un electrón de la banda de valencia, entonces, el efecto logrado es la excitación de un electrón desde un nivel de energía 1 hacia el nivel 2. La totalidad de la energía del fotón ha sido transferida según la ecuación de Einstein (Ecuación 2.11) [13].

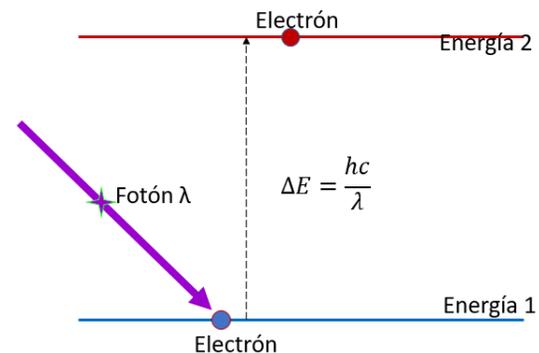


Fig. 2.6 Diagrama de niveles de energía en fotolitografía de absorción de un fotón.

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Ecuación 2.11

La ficha técnica de *Microchem* para el *SU-8* indica que su máxima absorción se encuentra en la luz ultravioleta con aproximadamente una $\lambda = 365$ nm [22]. En esta longitud de onda los fotones son absorbidos de manera eficiente para generar los procesos químicos de entrecruzamiento. La fotolitografía de un fotón es comúnmente utilizada con fuentes de luz ultravioleta en un rango de 360 – 405 nm y mascarar de transferencia que sirven como *patrón* a grabarse en la resina.

2.5.1.1 Régimen de baja absorción

En la Fig. 2.5 se ve un decaimiento exponencial en la absorción al aumentar la longitud de onda, indicando una menor eficiencia en la cantidad de fotones que transfieren su energía para el entrecruzamiento. En la región contenida en la sección verde con un rango de longitudes de onda entre 400 y 550 nm, a pesar de que la absorción es muy baja, aún se pueden aplicar procesos de fotolitografía mediante un fotón incrementando la potencia de la fuente de luz.

En esta variación del método se utilizan objetivos de microscopio con gran apertura numérica con el fin de concentrar fotones en un área reducida para obtener una gran densidad de potencia. Al realizar este enfocamiento la energía es comparable a la obtenida en la longitud de onda de máxima absorción y se logra el mismo efecto fotoinducido sobre las moléculas de la resina [7]. Al mismo tiempo, este efecto posibilita entrecruzar regiones diminutas únicamente en la región del foco del objetivo. Esto permite penetrar profundo en la resina y lograr el entrecruzamiento por debajo de la superficie de resina.

Aprovechando esta característica se pueden construir estructuras en dos y tres dimensiones con escalas micrométricas de resina con un método relativamente sencillo. La Fig. 2.7 ejemplifica las dimensiones en (a) y tipo de estructuras logradas en (b) con fotolitografía de un fotón en el régimen de baja absorción usando luz de $\lambda = 532$ nm [7].

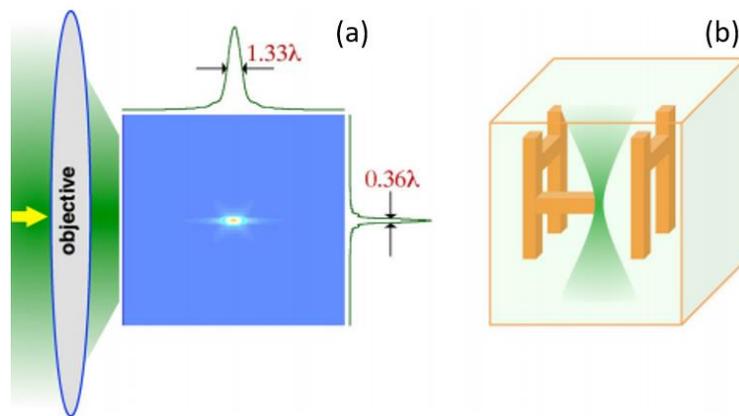


Fig. 2.7: Fotolitografía de un fotón en régimen de baja absorción. (a) Región de enfoque de luz verde con objetivo de microscopio de $NA = 1.3$. (b) Bosquejo de estructura polimerizada dentro de resina [7].

Durante este capítulo se estudiaron conceptos de propagación de ondas EM, se analizaron trabajos recientes referentes a escritura directa láser, guías de onda y dispositivos fotónicos. Además, se revisó la relación del efecto fotoeléctrico y su relación con los procesos de fotolitografía que se utilizarán más adelante.

Con base en las indagaciones mencionadas se definieron los requerimientos que demanda el desarrollo experimental de este trabajo y se tomaron en cuenta consideraciones y aspectos tanto generales como específicos en los que se debiera establecer un límite o abrir el tema para encontrar y/o demostrar nuevas alternativas. Todos estos aspectos se tomaron en cuenta para el diseño de un sistema de grabado propio en el desarrollo del capítulo siguiente y en los subsecuentes para el proceso experimental.

3 SISTEMA DE ESCRITURA DIRECTA LÁSER

La fabricación de guías de onda se realizó mediante el proceso de fotolitografía sin máscara usando el método de absorción de un solo fotón en la región de baja absorción. Este método se eligió porque presenta la posibilidad de fabricación de estructuras relativamente complejas de una manera sencilla, y permite resoluciones pequeñas (desde centenas de nanómetros hasta algunos micrómetros) de forma más simple respecto al mismo método en región de alta absorción. La intención de utilizar este método es el poder generar estructuras de diferentes características físicas (dimensiones e índice de refracción) en una sola etapa de fabricación. Para lograr una correcta implementación del método primero se tuvo que establecer toda una metodología de fabricación compuesta de los siguientes puntos:

1. Caracterización del sistema electromecánico de escritura láser.
2. Caracterización del sistema de control de polarización.
3. Procedimiento de preparación de sustratos.
4. Caracterización de resinas fotosensibles.
5. Fabricación de guías de onda óptica y dispositivos fotónicos.
6. Caracterización de los dispositivos fabricados.

Basado en esto, a continuación, se describe el sistema utilizado para el proceso de fotolitografía.

3.1 CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE ESCRITURA DIRECTA LÁSER (DLW)

Los requerimientos deseados del sistema para fotolitografía por escritura directa láser (DLW por sus siglas en inglés, *Direct Laser Writing*) debe de cumplir con las siguientes características:

- 1) Estabilidad, versatilidad y adaptabilidad para sustentar cualquier requerimiento del método o modificación de este para fabricar estructuras diversas.
- 2) La resolución del sistema debería de mantenerse siempre en el rango de cientos de nanómetros hasta unos cuantos micrómetros.
- 3) La mayoría de los materiales, equipo y elementos de construcción deberían ser asequibles y funcionales.

Para cumplir los requerimientos establecidos del método de fabricación se propuso un sistema de grabado que puede tratarse como tres subsistemas trabajando en conjunto: mecánico, eléctrico/electrónico y óptico. Estos subsistemas comparten elementos entre ellos para lograr un proceso controlado y preciso. El diagrama de la Fig. 3.1 ejemplifica la integración de los subsistemas y los componentes fundamentales que se comparten entre cada uno de ellos. Cabe mencionar que este sistema es un prototipo para estudiar la capacidad del método de fabricación propuesto y de esta manera establecer futuras mejoras al proceso. La Fig. 3.2 muestra un esquema del prototipo de grabado completo mencionando los elementos más importantes y en la Tabla 3.1 se enlista todo el material y equipo utilizado para la construcción de éste.

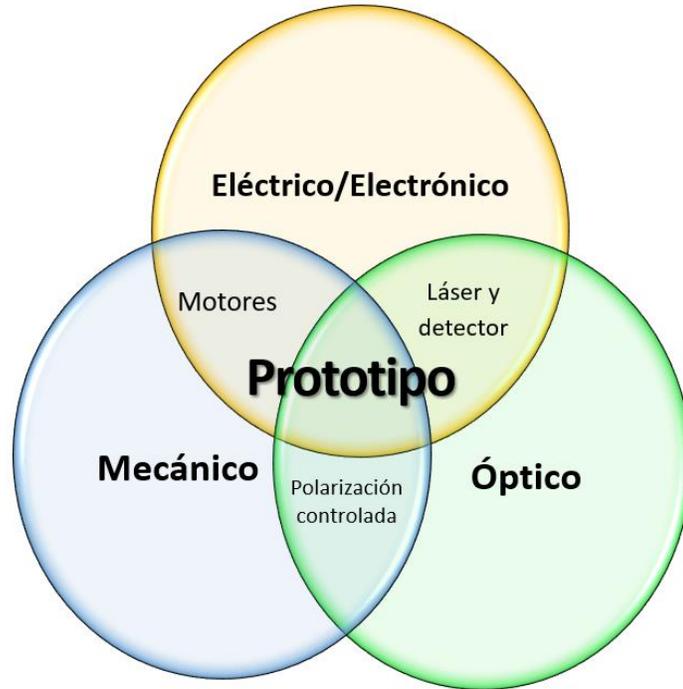


Fig. 3.1: Diagrama de integración del sistema de escritura directa láser diseñado.

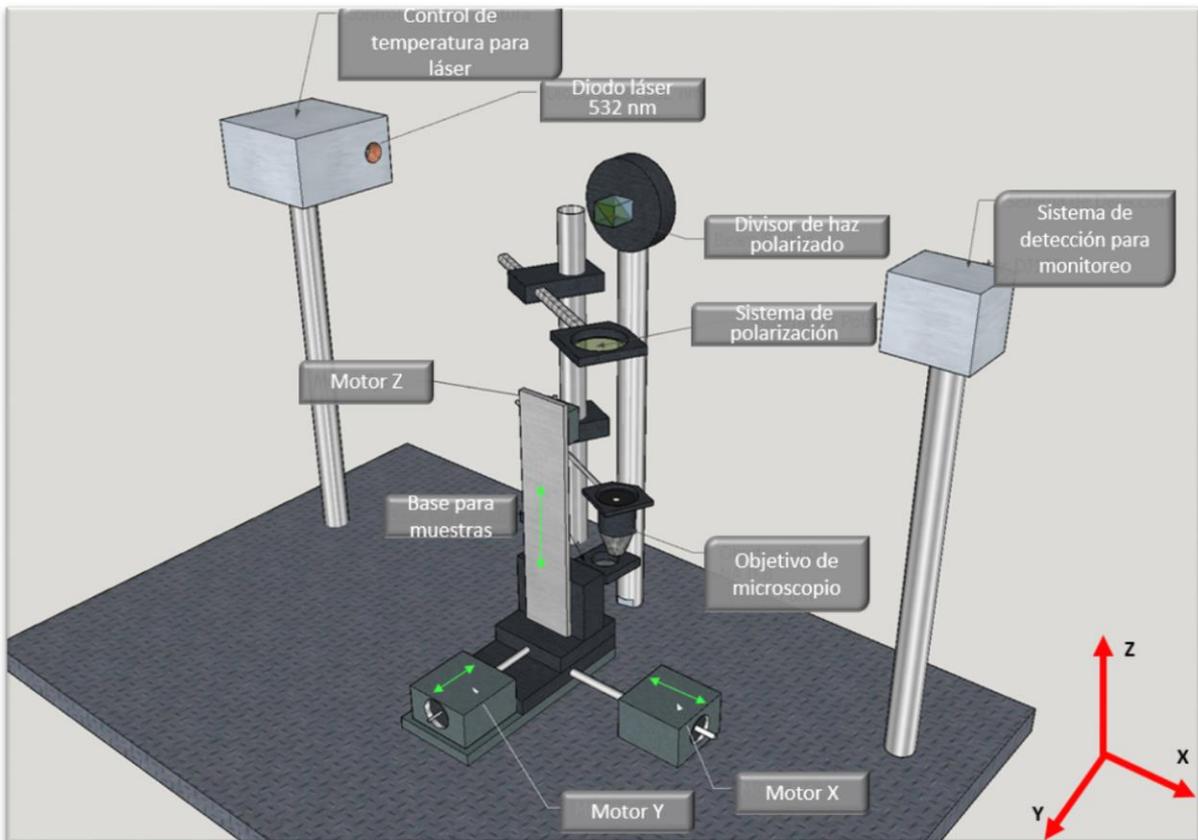


Fig. 3.2: Esquema del prototipo de sistema de escritura directa láser en tres dimensiones.

Tabla 3.1: Material de ensamble del sistema de escritura directa láser.

	Elemento	Descripción	Función
1	Thorlabs DRV013 (x2)	Motor a pasos con actuador lineal y 25 mm de carrera	Mueven montura de la muestra en el plano XY
2	Applied Motion 5014-897 (x2)	Motor a pasos	Mueven platina de muestra en el eje Z y rotan el polarizador lineal
3	Thorlabs MTB1B	Platina lineal con carrera de ½ " y ajustador para ¼ ". 20 vueltas	Elemento de desplazamiento lineal en el eje Z
4	Thorlabs PBS121	Divisor de haz polarizado ½" con rango espectral de 480-620 nm	Separa el haz de láser en 2 caminos: de referencia y escritura, con polarización vertical y horizontal, respectivamente
5	WPQ05M-532	Retardador de $\lambda/4$ a 532 nm	Transforma polarización lineal del haz de escritura en polarización circular
6	LPVISE200-A	Polarizador lineal en $\lambda=400-700$ nm	Orienta la polarización incidente en la resina de grabado
7	Nikon CFI Achrom 60X	Objetivo de microscopio 60X, NA=0.8, WD=0.25 mm	Enfoca el haz de escritura sobre la muestra
8	Thorlabs DJ532-40	Diodo láser de semiconductor 40 mW $\lambda=532$ nm	Láser de escritura
9	Thorlabs FDS100 (x2)	Fotodiodos con rango espectral de 350-1100 nm	Detección de potencia de referencia y potencia de escritura

A continuación, se describe cada uno de los subsistemas del prototipo de escritura directa láser utilizado para el proceso de fotolitografía.

3.1.1 Subsistema mecánico

El subsistema mecánico consiste en todos los elementos que permiten la movilidad al sistema, siendo estos los números (1-3) listados en la Tabla 3.1. Estos elementos principales que lo comprenden son tres platinas motorizadas con desplazamiento lineal para otorgar movimiento en los ejes X, Y y Z. En la Fig. 3.3 se muestra un esquema del ensamblaje del subsistema mecánico. Adicionalmente se diseñaron y fabricaron bases, acopladores y piezas de ensamble mecánico en aluminio y latón con las herramientas y equipo del taller de fabricación del grupo de Fotónica de microondas del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la UNAM.

Al combinar el subsistema mecánico y sus motores con el control electrónico de micro pasos del subsistema eléctrico – electrónico, se logran desplazamientos de 328 nm en el plano XY y de 164 nm en el eje Z, de esta forma se logra una resolución menor a la longitud de onda del haz de escritura. Así, se habilita también la posibilidad de desplazamientos precisos en tres dimensiones para obtener estructuras complejas.

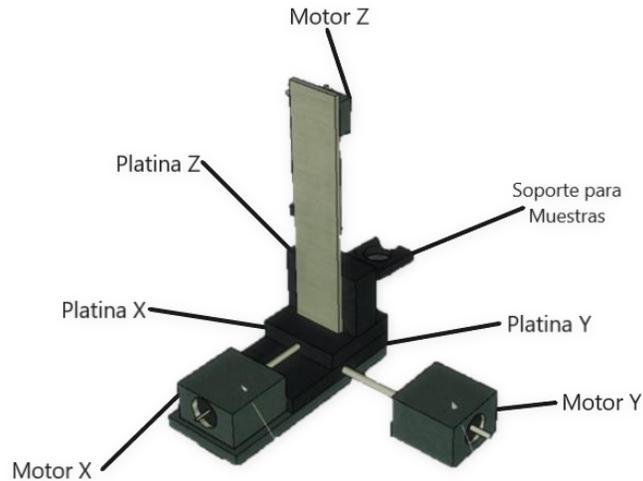


Fig. 3.3: Subsistema mecánico del prototipo de escritura directa láser formado por tres platinas motorizadas para el movimiento en XYZ.

3.1.2 Subsistema eléctrico/electrónico

Constituido por todos los elementos que permiten el control, monitoreo y operación del sistema de grabado. Dentro de este subsistema se encuentran los equipos especializados de Thorlabs para suministrar corriente al diodo láser, los equipos de monitoreo de potencia óptica y todo el ensamble de control diseñado para el sistema. Los fotodetectores incluidos en el sistema monitorean en todo momento la potencia óptica del haz de escritura.

Para el movimiento de los motores el sistema utilizado contaba con los controladores A4988 de la marca Allegro. Estos controladores dividen cada paso de los motores utilizados en fracciones de 1/16, permitiendo que el movimiento de cada elemento mecánico sea de una mayor resolución.

Parte fundamental de este sistema es una microcomputadora Raspberry Pi modelo B+, que funge como interfaz para el control del sistema. La tarjeta de esta microcomputadora tiene diversos puertos de entrada/salidas digitales que se comunican con todos los elementos del sistema. Adicionalmente, se hicieron programas en lenguaje de programación Python para controlar el sistema de fabricación de estructuras.

3.1.3 Subsistema óptico

Es formado por todos los componentes del sistema de escritura que involucra la trayectoria del haz láser y la modificación de sus características de propagación; siendo los elementos 4 - 9 de la Tabla 3.1 (Ver Fig. 3.4). Inicialmente este cuenta con una fuente de luz la cual pasa por un divisor de haz polarizado para obtener una porción del haz que se utilizará para escritura y otro para el monitoreo mediante un fotodetector. Posteriormente en el camino del haz de escritura se cuenta con diversos elementos para el control de polarización y finalmente se enfoca sobre la muestra utilizando un objetivo de microscopio.



Fig. 3.4: Subsistema óptico. Extracto del sistema completo de escritura directa láser para fabricación de guías de onda.

El objetivo de microscopio de 60X y NA = 0.8 es fundamental para el método de fotolitografía, ya que estas características permiten enfocar el haz láser y aumentar significativamente la densidad de potencia óptica en la región de exposición. De acuerdo al método de fotolitografía por absorción de un solo fotón en la región de baja absorción, se requieren energías relativamente altas para lograr el entrecruzamiento de la sección de resina polimérica iluminada.

El diodo láser utilizado es de la marca Thorlabs modelo DJ532-40, con una longitud de onda de emisión típica de 532 nm y máxima de 533 nm operando a 40 mW y 50 mW, respectivamente [23]. Por tal motivo, la totalidad de este subsistema está diseñada para operar correctamente a una $\lambda = 532$ nm y planeada para el método de fabricación con resinas poliméricas usualmente diseñadas para UV. La Fig. 3.5 muestra el espectro de emisión del diodo láser en la corriente de bombeo especificada dentro del rango de emisión. Este espectro fue obtenido con un espectrómetro OceanOptics, registrando un valor de intensidad máxima en $\lambda = 531.6$ nm con una desviación de 0.075 % respecto a la especificación del fabricante y un ancho espectral al 50% de potencia $\Delta\lambda = 1.93092$ nm. Los detalles técnicos el diodo láser se pueden consultar en el Apéndice 3.

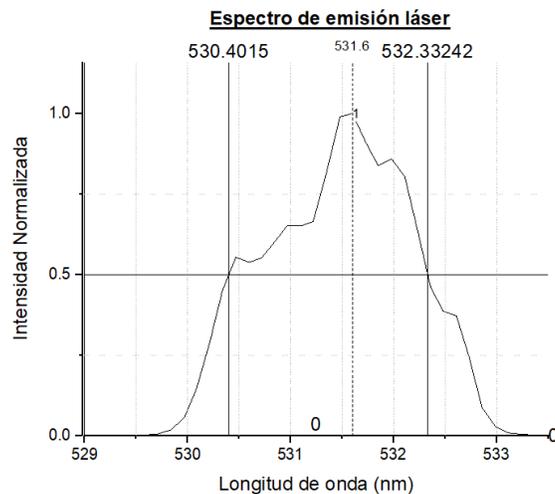


Fig. 3.5: Espectro de emisión del diodo láser Thorlabs DJ532-40 bombeado con una corriente de bombeo típica.

3.1.3.1 Análisis de pérdidas

Para caracterizar la trayectoria del haz se analizaron las pérdidas tomando lecturas en puntos específicos de prueba, en la Fig. 3.6 se muestra un diagrama de la trayectoria del haz con los puntos de prueba correspondientes a:

- A. Salida del diodo láser.
- B. Entrada de fotodetector de lectura de referencia(FDS100).
- C. Inicio de camino vertical.
- D. Salida del arreglo de polarización.
- E. Salida del objetivo de microscopio (sin arreglo de polarización).
- F. Salida del objetivo de microscopio (con arreglo de polarización)⁴.

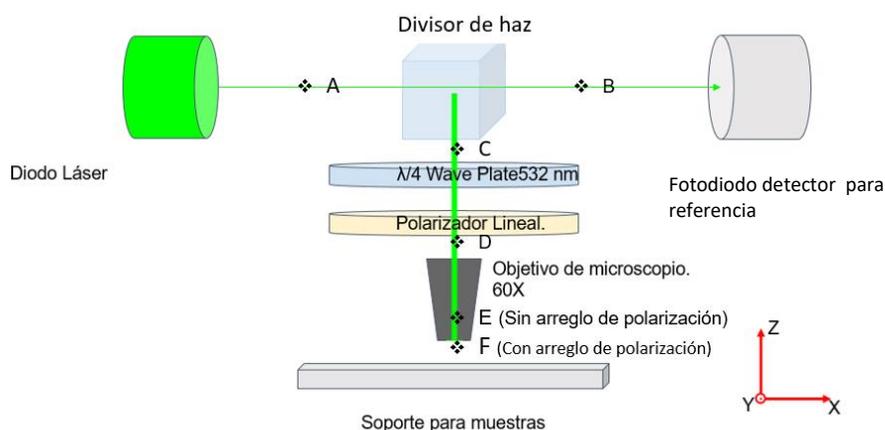


Fig. 3.6: Trayectoria del haz de escritura.

Se midió la potencia colocando un fotodetector de silicio acoplado a un medidor de potencia óptica (Thorlabs SJ151C y PM100D, respectivamente). Los datos obtenidos y el cálculo de pérdidas en cada una de las etapas se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Análisis de pérdidas en diferentes puntos del sistema de escritura láser con 330 mA de corriente de bombeo.

PUNTO DE MEDICION	POTENCIA LEÍDA (mW)	SEGMENTO	PÉRDIDAS DE SEGMENTO (dB)
A	19.8	-----	-----
C	14.6	A-C	1.32
D	3.3	C-D	6.45
F	1.6	D-E	3.42
TOTAL			11.19
PUNTOS ADICIONALES			
B	4.8	A-B	6.15
E	5.1	C-F	4.56

⁴ Se tomaron medidas con y sin arreglo de polarización para determinar posible dependencia de polarización del objetivo y para futuras posibilidades de fabricación con polarización estática.

Las medidas mostradas en la tabla muestran el promedio de muestreo de 6000 muestras tomadas por el detector en un minuto.

La tabla se divide en dos partes, la parte superior es el análisis de pérdidas de la trayectoria del haz desde la fuente de emisión láser hasta la montura para muestras. Por lo tanto el total indica las pérdidas a considerar en una prueba de escritura con una potencia de emisión asignada. La parte inferior muestra puntos adicionales que se utilizan de control. Comparando el punto B y C se infiere que el divisor de haz orienta verticalmente 73.7% y horizontalmente 24.4% lo que indica una relación aproximada 3:1 (camino vertical:camino horizontal).

3.2 CONTROL DE POLARIZACIÓN

Dentro del subsistema óptico del sistema de escritura una parte fundamental, y que podría considerarse como otro subsistema por sí mismo, es el control de polarización. El control de polarización se compone de elementos mecánicos, ópticos y electrónicos que modifican polarización y orientación del haz de escritura.



Fig. 3.7: Silueta de la distribución de energía del haz de luz láser según el estado de polarización.

La polarización del haz se ve reflejada en la distribución de energía del haz láser resultante [7, 20]. El control de polarización implementado en el sistema expande esta característica con la finalidad de permitir la modificación y manipulación de orientación de dicha distribución que incidirá sobre la resina. El sistema de control permite una resolución de 0.01406° o 25,600 pasos por revolución del polarizador.

Considerando que en el método de absorción de un solo fotón en la región de baja absorción la polimerización de la resina ocurre solamente en el área de mayor densidad de potencia óptica, el hecho de iluminar la resina con una distribución de energía específica generará una forma característica en la resina polimerizada, es decir, las estructuras generadas tendrán una geometría conforme a la del estado de polarización del haz con que se ilumine, la Fig. 3.7 ilustra la silueta de la energía del haz láser según la polarización que se le aplique.

3.2.1.1 Diseño y funcionamiento del control de polarización

Previo al diseño del control de polarización se analizó el comportamiento del estado de polarización del haz emitido por el diodo láser. Este análisis consistió en colocar un polarizador lineal a la salida del diodo láser y medir la potencia transmitida para diferentes posiciones de este; en la Fig. 3.8 a) se representa el arreglo experimental implementado. El polarizador lineal se montó sobre una platina

rotatoria graduada y se cambió su orientación manualmente en incrementos de $\Delta\theta = 20^\circ$. Los datos adquiridos por el detector de silicio se registraron en una tabla y se graficaron radialmente (ver Fig. 3.8 b)). Aproximando el contorno de la emisión radial después de ser filtrada por el polarizador lineal, se puede observar una correspondencia a una polarización elíptica.

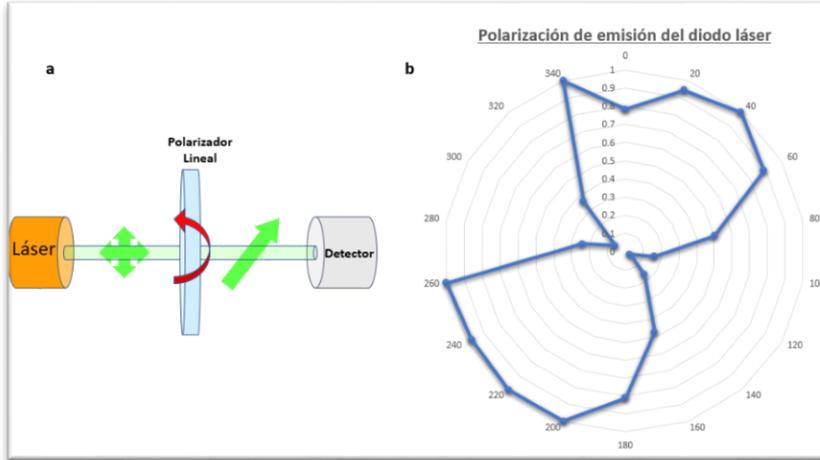


Fig. 3.8: Caracterización de emisión láser. a) Arreglo experimental para la caracterización. b) Gráfica radial de datos capturados.

Una vez definida la polarización se procedió a instalar los elementos que ayudarían a controlar la polarización del haz de escritura. Los elementos son un arreglo de una placa retardadora de $\lambda/4$ y un polarizador lineal, listados 5 y 6 en la Tabla 3.1

La Fig. 3.9 ilustra todos los elementos que intervinieron en la trayectoria del haz y su polarización antes y después de cada elemento. La función de cada elemento se describe en la Tabla 3.3.

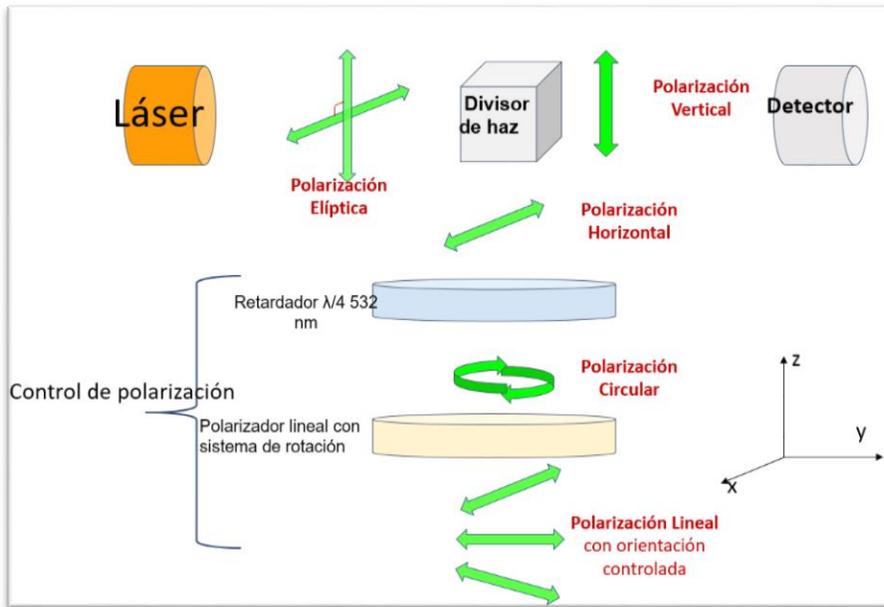


Fig. 3.9: Diagrama del trayecto del haz con control de polarización en el sistema de escritura láser.

Tabla 3.3: Elementos que intervienen en la trayectoria del haz y su función.

ELEMENTO	FUNCIÓN
DIODO LÁSER	Es la fuente de emisión de luz con $\lambda = 532$ nm; la polarización que emite es elíptica. Se orientó radialmente de manera que la potencia después del divisor de haz fuese mayor en el camino que va hacia la muestra.
DIVISOR DE HAZ POLARIZADO	Al ser un elemento dependiente de la polarización, separa las componentes de la polarización que emite el diodo láser dividiendo en dos caminos: referencia y escritura (polarización vertical y horizontal, respectivamente como se ilustra en la Fig. 3.9. El diodo láser se orientó radialmente para conseguir una proporción aproximada de 70/30 (escritura/referencia).
RETARDADOR DE $\lambda/4$	Convierte la polarización lineal proveniente del divisor de haz en una polarización circular. Es indispensable orientar el eje rápido del retardador exactamente a 45° respecto la orientación de la polarización lineal de entrada, el procedimiento preciso de orientación se muestra en el Apéndice 4.
POLARIZADOR LINEAL	(OPCIONAL) Permite el paso del haz de luz con una sola polarización lineal hacia la muestra. Está montado en una platina rotatoria acoplada a un sistema de engranes y a un motor a pasos (<i>Applied motion</i> 5014-897) gracias al control electrónico de micro pasos, alcanza una resolución de giro igual a 0.0157° .

Es importante aclarar que mediante los elementos ópticos mencionados existe la opción de obtener una polarización lineal en una orientación específica utilizando todo el arreglo de control de polarización. Otra posibilidad es obtener un haz con distribución espacial uniforme mediante el uso de una polarización circular al retirar el polarizador lineal del control de polarización

Durante este capítulo se ensambló el prototipo de sistema de escritura directa láser conforme a los requerimientos establecidos al inicio del capítulo para el método de fabricación predefinido. El ensamblaje del prototipo de escritura láser contempló todas las especificaciones para fabricar estructuras fotónicas en dos y tres dimensiones y con suficiente versatilidad para adaptarse a diferentes estrategias y requerimientos de fabricación. Más adelante en este trabajo el prototipo se utilizó en procesos experimentales de fabricación y caracterización de estructuras exitosamente, en el siguiente capítulo se detalla la adaptación mutua entre método de escritura láser y prototipo.

4 MÉTODO DE FABRICACIÓN

Durante el desarrollo de este capítulo se implementan diferentes pruebas para caracterizar parámetros de fabricación y compatibilidad entre el prototipo de escritura directa láser y el método de fotolitografía de un fotón en región de baja absorción. Al terminar estas pruebas se conocerán los parámetros y procedimiento completo de fabricación para aplicarlo en estructuras con varias geometrías mismas que se utilizarán más adelante como guías de onda.

4.1 PREPARACIÓN DE RESINAS SU-8

Durante el desarrollo experimental de este trabajo se utilizaron dos resinas de la familia SU - 8 fabricadas por *MicrosChem*: *SU- 8 100* y *SU-8 2002*. La principal diferencia entre estas familias es la viscosidad que a su vez define el rango del espesor de la película a depositar sobre el sustrato. La resina SU - 8 100 se recomienda para películas de 100 a 250 μm [22], y la SU-8 2002 para películas de 10 a 100 μm . En ambos casos es posible expandir el rango según los datos de las gráficas de los fabricantes, estas y los detalles técnicos de cada resina se pueden consultar en el Apéndice 5.

Las resinas SU-8 están compuestas a base de epoxi o termoestables [22], una resina de este tipo se forma por cadenas de moléculas con enlaces covalentes fuertes. Al elevarse la temperatura las cadenas se compactan y solidifican la estructura completa. Son resinas químicamente amplificadas, esto quiere decir que el polímero tiene grupos sensibles a ácidos. En el mismo polímero hay una proporción mínima de compuestos que producen un ácido cuando la resina absorbe energía luminosa.

Al exponer la resina a la luz se forma una película de ácido en la superficie de la resina. Esto sirve como catalizador para los grupos sensibles al ácido que se van desprendiendo de las cadenas moleculares del polímero al tener contacto con el ácido [21]. Este ácido no es absorbido por el compuesto y continúa con una reacción en cadena. Para terminar la reacción se eleva la temperatura de todo el polímero; este calentamiento posterior a la exposición luminosa se realiza con dos propósitos: 1) evaporar el ácido producido y 2) contraer las moléculas termoestables para solidificar por completo la región de la resina expuesta a la luz.

Con el fin de conocer las resinas SU-8 utilizadas se definieron una serie de pruebas que también sirvieron para definir el proceso de fabricación adecuado al método. Las pruebas contemplan diferentes escenarios de fabricación con base en la receta proporcionada por *MicroChem*, la cual es resumida en el diagrama de la Fig. 4.1, los pasos de la receta y su propósito en el proceso se enlistan a continuación:

1. Limpieza del sustrato: preparación de la superficie para la adherencia adecuada de la resina.
2. Deposición: aplicación de una capa uniforme y dimensiones deseadas sobre el sustrato mediante la técnica de spin-coating.
3. Horneado suave (*soft bake*): eliminación del solvente restante en la superficie de resina.
4. Exposición: detona el entrecruzamiento generando ácidos que a su vez sirven como catalizador para la reacción en cadena en la resina.

5. Horneado post exposición: evapora los ácidos generados con la exposición y comprime las cadenas del polímero para solidificarlo.
6. Revelado: disuelve la resina no expuesta y por lo tanto no solidificada.
7. Enjuague y secado: elimina los residuos de solvente y ácido.
8. Horneado duro: seca la estructura polimerizada.

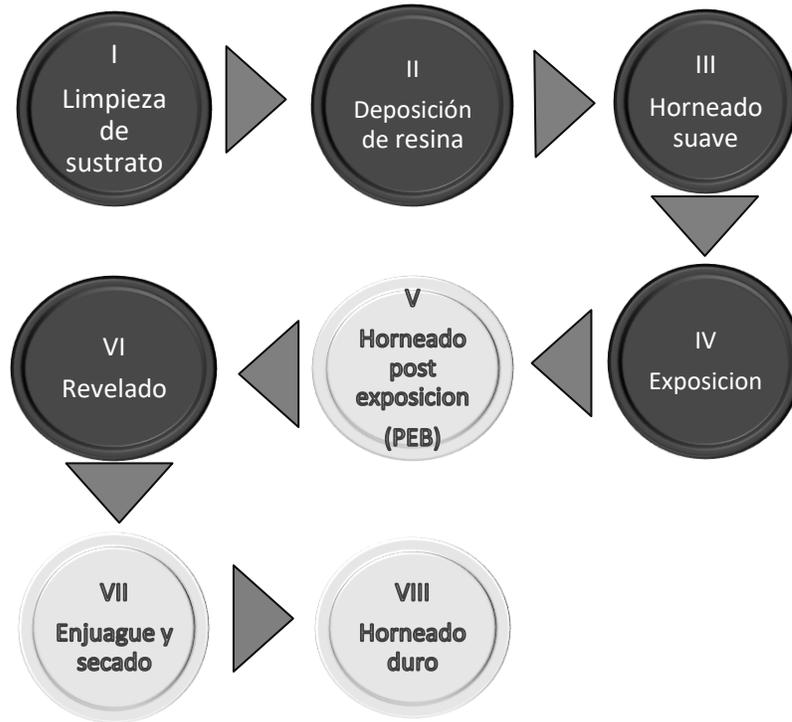


Fig. 4.1 Proceso de fabricación de fotolitografía propuesto por MicroChem para resinas SU-8 [24, 25].

En base al proceso sugerido por el fabricante de la resina y con la finalidad de adaptar el proceso de fabricación para el método propuesto, se realizaron diversas pruebas de caracterización. Dichas pruebas se enfocaron en los puntos que se identificaron como fundamentales para el método de fabricación (verdes en la Fig. 4.1). De este análisis se obtuvieron los pasos y parámetros del proceso de fabricación a utilizar. En las siguientes subsecciones se describen las pruebas de caracterización realizadas.

I. Espesor de capa y solidificación

Primeramente, se verificó la correcta deposición de las resinas identificando los tiempos de spin-coating, horneado suave, exposición y horneado duro de ambas resinas utilizando vidrio como sustrato. En primer lugar, siguiendo los datos técnicos en tablas y gráficas proporcionadas por el fabricante de las resinas SU-8 utilizadas, se obtuvieron los parámetros para depositar ciertos espesores deseados. Esto incluyó tanto los tiempos de spin-coating como los tiempos de horneado suave requeridos, los cuales son listados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Parámetros para obtener capas uniformes de SU-8 según el espesor aproximado de la película.

Resina	Espesor de película deseada (μm)	Spin-coating (rpm)	Horneado suave 95°C (minutos)
SU-8 100	75	3300	20-30
	90	3100	25-30
	100	2900	30
	200	1300	70
SU-8 2002	0.5	3000	1
	2	200	1

Posteriormente se validó el proceso de horneado suave para generar un estado óptimo de las resinas para ser expuestas al haz de escritura. Específicamente el horneado suave es la parte del proceso que prepara el SU - 8 para exponerse. Su función es evaporar la capa superficial del solvente que queda después de depositar la resina en el sustrato y de densificar la película. El calentamiento se analizó en dos formas posibles: dentro de un horno y sobre una parrilla. En las películas de 0.5 y 2 μm calentadas con el horno se notaron deformaciones e irregularidades, mientras las calentadas sobre la parrilla se observaron más uniformes en la mayoría de los casos. Para el caso de las películas de 75, 90, 100 y 200 μm calentadas en el horno se mantuvieron uniformes y la diferencia respecto a las calentadas mediante la parrilla fue mínima, demostrando que a mayor espesor menor diferenciación de método de calentado. Sin embargo, en ambos casos se notó que la resina tiende a agruparse en zonas preferenciales ocasionando cráteres en la superficie de resina, en algunos casos tan profundos que el sustrato resultaba expuesto. Después de estas observaciones se consideró importante una prueba de adherencia en sustratos diferentes. Esta prueba se detalla en el inciso II de esta sección.

Por último, para probar la solidificación de las muestras mediante luz UV y su revelado, se ideó un procedimiento en el que se cubría parcialmente la película con una máscara de aluminio y se exponía a una fuente de luz ultravioleta.

Tabla 4.2: Tiempos de preparación de las películas según su espesor para los procesos de: exposición en luz UV, horneado post exposición (PEB) y revelado.

ESPESOR (μM)	TIEMPO DE EXPOSICIÓN (mm:ss)	TIEMPO DE PEB A 95°C (mm:ss)	TIEMPO DE REVELADO (mm:ss)
0.5	01:00	01:00	01:00-01:30
2	01:00	01:00	01:00-01:30
75	04:00	08:00	10:00-11:00
90	04:00	08:00	10:00-12:00
100	04:30	10:00	11:00-12:30
200	04:30	14:00	12:00-14:00

Como fuente de luz UV se empleó el sistema de curado CS2010 de Thorlabs que proporcionó una iluminación estable y controlable con longitud de onda central de $\lambda = 365 \text{ nm}$. Para la prueba de entrecruzamiento se variaron tiempos y potencias de exposición para cada espesor, los resultados obtenidos en esta prueba se muestran en la Tabla 4.2. En esta tabla también se muestra el tiempo de horneado post exposición (PEB, por su nombre en inglés *Post Exposure Bake*) para cada muestra según aproximaciones obtenidas de la hoja de datos del fabricante. En esta parte del proceso se evapora el

ácido producido y se densifica la película dejándola lista para sumergirla en el revelador y eliminar las regiones de película no curadas.

El comportamiento observado al sumergir las muestras en el revelador fue en la mayoría de las pruebas normal de acuerdo a lo especificado. En ciertos casos particulares la película de resina se desprendió del sustrato o presentó una deformación de la superficie dejando de ser plana. Estos defectos se atribuyeron a la posible presencia de impurezas en la superficie del sustrato, humedad del ambiente y el choque térmico en el cambio de horneado a inmersión en revelador por la repentina disminución de temperatura. Al terminar estas pruebas se conocieron espesores y sus tiempos asociados para cada parte del proceso que permitieran obtener películas uniformes según especifica el fabricante de las resinas.

II. Adherencia en sustratos

En esta prueba se realizó la evaluación de la adherencia de la resina SU-8 siguiendo el procedimiento de fabricación propuesto por el fabricante en diferentes sustratos:

- Vidrio (cubreobjetos y portaobjetos para microscopio con espesor de 80-100 μm y 2 mm respectivamente).
- Silicio (2 mm).
- Silicón o polidimetilsiloxano (PDMS) (2-4 mm).

Tabla 4.3: Prueba de adherencia de SU-8 sobre diferentes sustratos.

SUSTRATO	ESTADO DEL PROCEDIMIENTO	RESULTADO
VIDRIO	Completo ⁵	Estructuras grandes (alrededor de 2 mm) se adhieren. Al terminar el proceso es posible despegar la película aplicando estrés al sustrato, es posible provocar fracturas en la película de SU-8. Estructuras pequeñas (menores a 100 μm) se adhieren ligeramente; movimientos, roces o corrientes de aire pueden despegarlas
SILICIO	Completo ⁶	Estructuras grandes y pequeñas se adhieren fuertemente al sustrato.
SILICÓN	Incompleto ⁶	El SU-8 tiende a agruparse en conglomerados rápidamente al ser depositado sobre el sustrato, incluso después del horneado suave. Al aplicar el proceso de spin-coating la mayoría de la resina se desprende y la escasa que queda en el sustrato no resulta en una capa uniforme. La adherencia es extremadamente baja.

⁵ Un procedimiento completo considera deposición, horneado suave, exposición, y revelado. Cualquier falla en alguna de las partes del procedimiento se considera incompleto.

Los resultados de adhesión después de la etapa de revelado y observaciones se muestran en la Tabla 4.3. De estos resultados se concluyó que el silicio es la opción más segura para generar una correcta adhesión del SU-8. Sin embargo, para los fines de las estructuras deseadas a fabricar, resulta más factible utilizar vidrio por las siguientes razones: transparencia en luz visible (para observar en microscopio óptico de transmisión), mayor facilidad de procesado del sustrato, mayor disponibilidad, la posibilidad de remover sin complicaciones la estructura fabricada y compatibilidad con señales ópticas para su futura incorporación en sistemas integrados.

Como resultado de las observaciones en pruebas realizadas, se obtuvieron las siguientes consideraciones indispensables para el proceso de fabricación con alta probabilidad de éxito.

A. Limpieza y preparación de sustratos

Se requiere un procedimiento especial de limpieza para los sustratos, independientemente del material que se elija. Dicho procedimiento debe asegurar la eliminación de humedad y partículas de polvo o impurezas en la superficie, con el fin de mejorar la adherencia y uniformidad de la película depositada.

B. Tiempos de reposo

Para garantizar estabilidad en forma y adherencia entre película y sustrato se deben respetar tiempos de estabilización y enfriamiento.

1. Cinco minutos entre depósito de resina y spin-coating.
2. Esperar a que la película se encuentre a temperatura ambiente antes de exponerse a la luz y de sumergirse en revelador.

C. Incrementos graduales de temperatura

Con el fin de evitar choque térmico o irregularidades en la superficie, cualquier procedimiento de calentamiento debe hacerse por incrementos graduales. Para realizar el calentamiento debe colocarse el sustrato en una parrilla precalentada a 30°C. Con el sustrato ya dispuesto se eleva la temperatura a 60°C y se espera tres minutos. Posteriormente se inician los incrementos en escalones de 5°C con aproximadamente 20 segundos de reposo previos al próximo incremento. Una vez alcanzada la temperatura final empieza a contar el tiempo de calentamiento que especifique la etapa del procedimiento.

D. Contaminación proveniente del ambiente

La película es susceptible a atrapar partículas de polvo y humedad del ambiente. Tener un espacio controlado y medidas de higiene adecuadas mejoraran la calidad de las películas y por consiguiente la de las estructuras resultantes. Con base en esto se decidieron los siguientes puntos:

1. Eliminar corrientes de aire durante el proceso de fabricación.
2. Utilizar bata limpia y cubre bocas o máscara en todo momento.

3. Utilizar guantes y pinzas cuando se requiera manipular el sustrato y/o materiales del proceso de fabricación.
4. Mantener la muestra cubierta en una caja de Petri o contenedor cerrado en todo momento que no esté siendo manipulada o al desplazarla.
5. Limpiar frecuentemente las superficies y material que esté en contacto con la muestra.

Estas consideraciones deben respetarse y mantenerse durante todo el proceso de fabricación ya que se orientan en la estandarización de procedimientos con seguridad y calidad.

4.2 PROCESO DE FABRICACIÓN

Como resultado de las pruebas realizadas con las resinas y sustratos en conjunto con las propuestas del fabricante, se estableció un método de fabricación. Específicamente se enfocó en realizar el grabado de guías de onda ópticas. El esquema general del proceso se puede observar a continuación (Fig. 4.2):

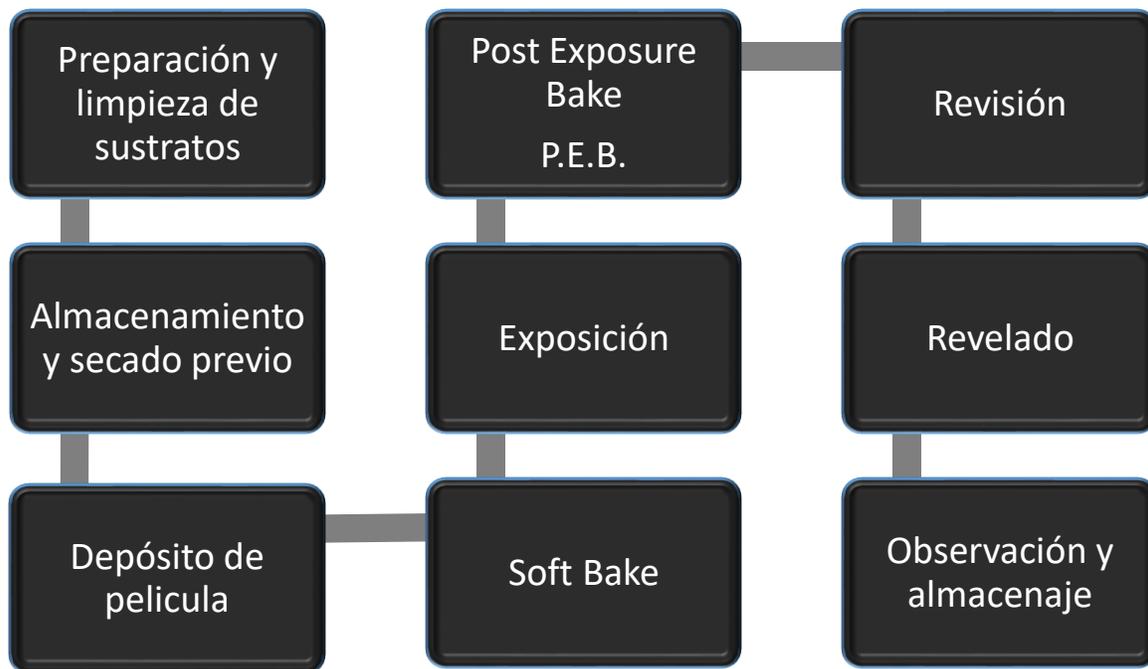


Fig. 4.2: Proceso de fabricación con resinas SU-8.

Los detalles de cada etapa del proceso se describen a continuación; previo a iniciar es indispensable asegurar la aplicación de las consideraciones finales de la sección 4.1.

1. **Preparación de sustratos:** Cortar sustratos de vidrio cuadrados de aproximadamente 20 mm de lado. Grabar mediante rayado una marca característica que servirá para identificar la muestra y su orientación en etapas subsecuentes del proceso.

2. **Limpieza de sustratos:** El procedimiento de limpieza en los sustratos garantiza calidad y adherencia para la película depositada.
 - I. Limpiar el sustrato con alcohol isopropílico y toallas de papel libres de polvo (KimWipes).
 - II. Sumergir el sustrato en acetona y agitar gentilmente por al menos un minuto.
 - III. Secar los restos de acetona con nitrógeno de alta pureza (99.99 % puro).
 - IV. Sumergir el sustrato en alcohol isopropílico y agitar gentilmente por un minuto.
 - V. Secar con nitrógeno de alta pureza.
 - VI. Colocar dentro del horno eléctrico precalentado a 60°C y subir la temperatura a 150°C, hornear mínimo cuatro horas. Esto eliminará la humedad.
 - VII. Dejar reposar el sustrato dentro de un recipiente hasta alcanzar temperatura ambiente.
3. **Almacenamiento y secado previo del sustrato:** Esta etapa se realiza únicamente si la deposición de resina se realizará varias horas después de la limpieza del sustrato.
 - I. Para almacenar el sustrato por hasta dos semanas⁶ debe colocarse dentro de un recipiente con tapa hermética y sobre una superficie limpia. Colocar algún desecante en el interior del recipiente, cuidando que el desecante nunca tenga contacto con el sustrato. El recipiente debe almacenarse en un lugar fresco y seco.
 - II. Previo a la deposición de la resina en un sustrato que ha sido almacenado, este se rocía con alcohol isopropílico y nitrógeno, posteriormente se hornea a 150°C por al menos una hora. Se cubre y se deja en reposo hasta que baje su temperatura a la del ambiente.
4. **Depósito de película:** A partir de esta etapa deben eliminarse las fuentes de luz que pudieran interferir el proceso de absorción de la resina, en su lugar debe mantenerse una iluminación con longitud de onda superior a 532 nm (amarilla o roja).
 - I. En una superficie plana y estable depositar una gota de resina en el centro del sustrato utilizando una jeringa con aguja. Dejar reposar en una caja de Petri cubierta por al menos tres minutos, hasta que la resina fluya por si sola y forme una disposición uniforme sobre el sustrato.
 - II. Colocar y asegurar el sustrato en el spin-coater e iniciar el programa predefinido según la resina y el espesor deseado.
 - III. Dejar reposar la muestra entre uno y dos minutos en una plancha precalentada a 30° C. Esta medida favorece la eliminación de los bordes y rugosidades que pudieron haberse formado.
5. **Horneado suave:** Elimina la capa superficial de ácido del polímero que pudiera haber quedado sobre la película. Debe de hacerse en una caja de Petri abierta o bien, sobre papel aluminio

⁶ Después de dos semanas el sustrato capturó suficientes partículas del desecante para considerar que requería pasar a la etapa de limpieza nuevamente.

en una parrilla eléctrica. La muestra no debe de cubrirse para que el ácido evaporado no regrese a la superficie de la película. El calentamiento debe de realizarse como se indica en el inciso C de la sección 4.1.

6. **Exposición:** Para la exposición se diseñaron dos procedimientos: uno para luz UV (356 nm) y otro para escritura directa láser (532 nm).

Escritura directa láser

- I. Colocar la muestra en el sistema de escritura sobre la montura especial para el sustrato justo debajo del objetivo de microscopio (ver Fig. 4.3). Verificar que las platinas de desplazamiento tengan suficiente carrera en sus todos los sentidos.
- II. Ubicar la marca de referencia y orientarla según sea conveniente.
- III. Encender la fuente de alimentación del diodo láser y activar la emisión para que el haz sea apenas visible (0.7 a 1 mW.)
- IV. Enfocar el haz en la superficie de la película e interrumpir la exposición.
- V. Iniciar el programa de escritura según la estructura deseada.

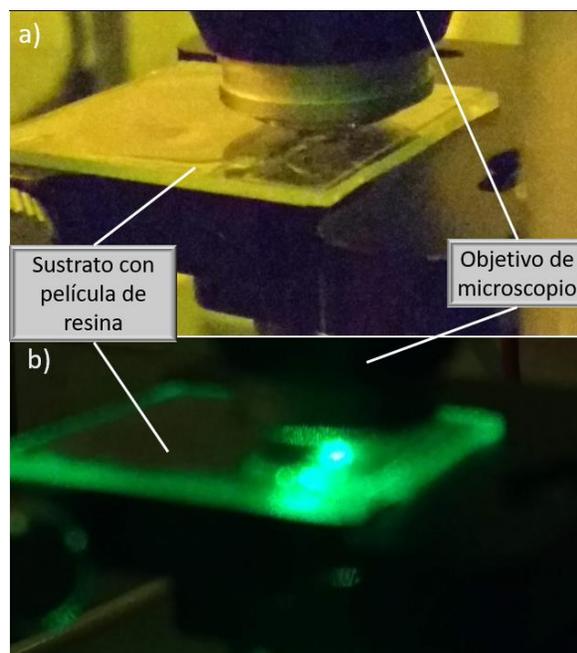


Fig. 4.3: Fabricación de estructuras mediante escritura directa láser. a). Previo a iniciar la escritura y b) realizando instrucciones de escritura.

Exposición con luz UV (opcional): Sirve para polimerizar una sección grande o el resto de la resina una vez terminada la escritura láser.

- I. Definir áreas de exposición en la película.
- II. Limitar el área a exponer con una máscara de papel aluminio o papel negro que absorba la luz.
 - Si las dimensiones del área a delimitar son reducidas, es conveniente utilizar un microscopio para posicionar esta máscara
- III. Colocar la muestra con la máscara correspondiente debajo de la lámpara de luz UV y comenzar con el programa de curado indicado según en la Tabla 4.2. En caso de utilizar papel aluminio cuidar que el ángulo de incidencia⁷ sea de 90°.

⁷ El ángulo de incidencia el que forma la tangente de la superficie y el rayo de luz proveniente de la fuente de iluminación.

7) Post-horneado: Evapora el ácido generado durante la exposición y detiene la catalización de la resina, además comprime las cadenas de las moléculas y para densificar el polímero. Como resultado, la película expuesta termina su solidificación. Para este proceso también existen ciertas consideraciones:

- I. Si la película solo se ha expuesto por escritura directa láser, el paso de PEB puede omitirse. En la exposición a la alta densidad de potencia óptica se considera una reacción demasiado local [7], por lo cual el PEB no es estrictamente necesario. Sin embargo, resulta inconveniente interrumpir el proceso en este punto, hacerlo podría ocasionar alteraciones en la forma plana de la superficie de resina.
- II. En una caja de Petri ventilada realizar el proceso de horneado de la sección 4.1.
- III. Terminar el programa de PEB como se muestra en la Tabla 4.2.

8) Inspección: Después de la exposición o el PEB, mientras la muestra se enfría puede observarse con un microscopio óptico, aquí se define si la exposición se realizó correctamente o si es necesario repetir el proceso de exposición. NOTA: Un leve cambio de color en la zona expuesta indica que el proceso se realizó exitosamente.

9) Revelado: Elimina el excedente de resina no expuesta. La muestra debe estar a temperatura ambiente dentro de una caja de Petri.

- I. Con una jeringa o pipeta, agregar a la caja de Petri el revelador especial para SU-8 hasta cubrir por completo la película.
- II. Agitar la caja de Petri suavemente en círculos pequeños para mantener el revelador en movimiento sobre la película. Este proceso se debe realizar durante el tiempo requerido según el espesor de la película como se muestra en la Tabla 4.2.
- III. Cumplido el tiempo requerido extraer la muestra del revelador con pinzas y quitar el exceso de revelador soplando con nitrógeno limpio.
- IV. Rociar alcohol isopropílico sobre la muestra y observar:
 - a. Si la muestra se pone opaca es necesario retirar todo el alcohol isopropílico y llevarla nuevamente al revelador. Repetir cada 30 o 60 segundos.
 - b. Si la muestra no cambia de color debe retirarse el exceso de alcohol isopropílico con aire o nitrógeno limpio y colocar en la parrilla para el proceso de horneado duro.
- V. Colocar la muestra limpia dentro de una caja de Petri limpia y seca sobre una parrilla precalentada a 30°C y realizar el calentamiento descrito en la sección 4.1 hasta 150°C por 10 minutos.
- VI. Dejar reposar la muestra cubierta hasta temperatura ambiente.

10) Inspección y almacenaje: Con un microscopio óptico observar y medir las características físicas de la muestra. La muestra debe etiquetarse con fecha y características de resina (tipo de resina)

y espesor) por el lado opuesto a la película. Para almacenar la muestra puede colocarse en una caja plástica cerrada, preferiblemente de forma individual. Almacenar en un lugar sin humedad.

4.3 PRUEBAS DE ESCRITURA DIRECTA LÁSER

Con un proceso de fabricación establecido, el siguiente paso fue definir la fabricación estructuras que comprobaran la factibilidad de escritura directa láser en régimen de baja absorción ($\lambda = 532 \text{ nm}$). Se idearon dos estructuras diferentes: *muros* y *pilares*. A continuación, se describen estos dos tipos de estructuras.

Muros

Los muros son estructuras verticales y largas idealmente en un plano y construidas a base de múltiples desplazamientos lineales del foco del haz de escritura a diferentes profundidades dentro de la resina. La Fig. 4.4 a) y b) muestran la trayectoria que sigue el haz de escritura enfocado dentro de la muestra en el plano YZ y el tipo de estructura que se generaría al realizar el desplazamiento indicado, respectivamente. En c) muestra estructuras generadas usando este proceso de escritura, siendo observadas mediante un microscopio óptico. Las estructuras fueron fabricadas sobre sustratos de vidrio y reveladas utilizando el procedimiento correspondiente.

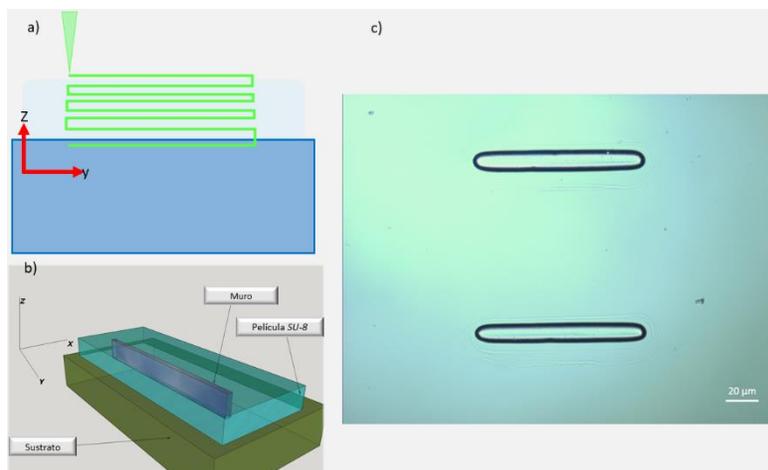


Fig. 4.4: Muros de SU-8 generados con escritura directa láser a $\lambda = 532 \text{ nm}$. a) Trayectoria del haz de escritura dentro la muestra, b) ilustración de la estructura generada y c) vista superior de un muro fabricado observado con microscopio óptico.

Pilares

Los pilares son estructuras verticales construidas únicamente desplazando en el eje Z en diferentes puntos de la resina. El punto focal del haz de escritura fue situado inicialmente dentro del sustrato, al iniciar el programa, el punto focal se desplazará hacia arriba hasta salir de la resina. Este tipo de estructuras sirve para obtener una caracterización de los parámetros de fabricación si se generan con diferentes parámetros como velocidad de exposición o potencia del haz de escritura. También se utilizaron este tipo de estructuras para observar los efectos ocasionados debido a variaciones en la

dirección de orientación del polarizador lineal del control de polarización, fabricando estructuras dependientes de la polarización.

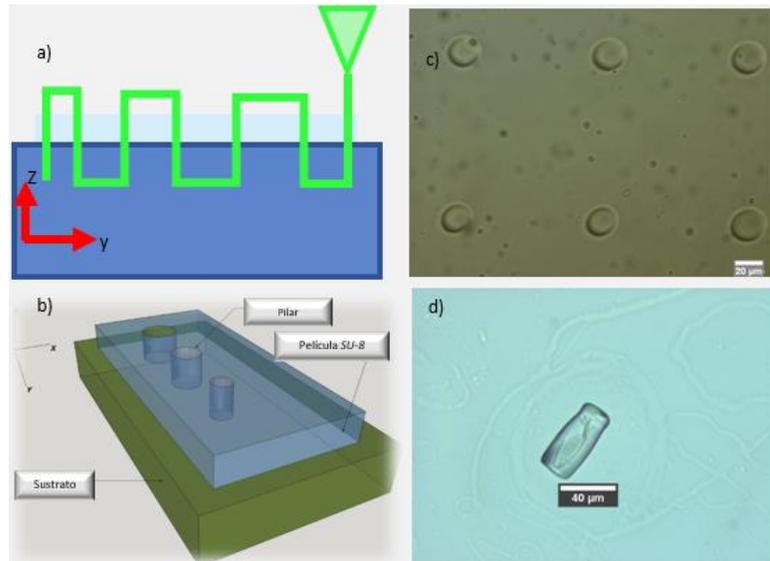


Fig. 4.5: Pilares de SU-8 generados con escritura directa láser a $\lambda = 532 \text{ nm}$. a) Trayectoria del haz de escritura sobre la muestra, b) ilustración de estructuras generadas, c) vista superior con microscopio óptico de pilares de diferente forma y tamaño, d) vista lateral de pilar.

En la Fig. 4.5 a) y b) se muestra la trayectoria a seguir del haz de escritura y una ilustración del tipo de estructuras planeadas, respectivamente. En c) se muestra una imagen de microscopía óptica de dos hileras de una matriz de pilares fabricados en SU-8 en vista superior, utilizando diferentes velocidades de escritura y estados de polarización del haz incidente. En esta imagen se pueden distinguir variaciones de forma y tamaño entre estructuras relacionadas con diferentes parámetros de fabricación, la variación de la forma se relaciona con la orientación del polarizador del sistema mientras las de tamaño se relacionan con la velocidad de exposición. El análisis de la forma dependiente de la polarización se realiza más adelante. Otra característica observada es que estas estructuras se pudieron fabricar con aspectos de altura grandes, tal como se ve en d) mostrando un pilar lateralmente con una altura aproximada de $60 \mu\text{m}$.

4.4 ENCAPSULAMIENTO CON SU-8

Para estructuras fotónicas basadas en guías de ondas, lo que se desea es tener dichas guías de onda rodeadas de un material con índice de refracción ligeramente menor al del núcleo. Al mismo tiempo, es deseable que las estructuras estén empaquetadas de manera que sean protegidas del medio ambiente. Debido a estos motivos y con el fin de evitar simultáneamente problemas de adhesión entre las estructuras fabricadas y el sustrato, evidentes al observar la Fig. 4.5 (d) en donde se observa un pilar derribado, se planteó dejar las estructuras fabricadas inmersas en SU-8. En primer lugar, se evaluó el dejar toda la estructura inmersa en el SU - 8 sin exponer, pero eventualmente el material tiende a fluir, afectando la película con deformaciones y rugosidad.

Como alternativa se decidió agregar una exposición extra a luz UV posterior a la de escritura directa láser. Este procedimiento añadido tiene dos funciones: sirve de anclaje entre estructuras y sustrato y funciona como revestimiento de las mismas estructuras. La Fig. 4.6 muestra los resultados de exponer una estructura de pilares generada por escritura láser a una segunda exposición total a luz UV. Primeramente, se observan los pilares claramente definidos al utilizar únicamente la escritura directa láser y un medio circundante sin exposición. Posteriormente se observan las mismas estructuras, al exponer el SU - 8 a la luz de una lámpara centrada en $\lambda = 365 \text{ nm}$ (Thorlabs CS2010).

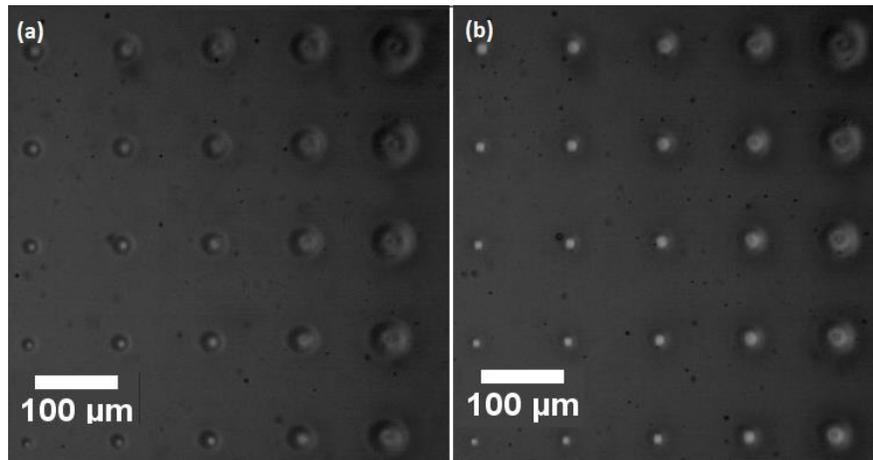


Fig. 4.6: Imagen adquirida con microscopio óptico de transmisión de pilares de SU-8 fabricados con doble exposición luminosa. (a) Exposición sólo con escritura directa láser en $\lambda = 532 \text{ nm}$, (b) exposición con escritura directa láser y luz ultravioleta ($\lambda = 365 \text{ nm}$).

Como resultado de la doble exposición a luz se observa un material bastante uniforme, pero con un ligero contraste en las zonas donde las estructuras fueron generadas con escritura directa láser. Esto representa una diferencia en el índice de refracción al polimerizar la resina por los dos métodos, dicha diferencia posee una magnitud poco significativa. Trabajos previos generando efectos similares han sido reportados midiendo cambios de índice de refracción del SU - 8 de $\Delta n = 0.0008$ [26]. Cabe mencionar que la segunda exposición puede realizarse usando o no una máscara para lograr una polimerización parcial o total de la resina depositada en el sustrato.

4.5 CARACTERIZACIÓN DE PATRONES GENERADOS POR ESCRITURA LÁSER

Para una caracterización de las dimensiones de las estructuras polimerizadas, se planeó la fabricación de una matriz en función de la potencia del haz y velocidad⁸ de exposición directa. Debido a que la polarización del haz de escritura es un parámetro fundamental del proceso, se realizaron dos matrices de caracterización: la primera considerando una polarización circular y la segunda con polarización lineal.

⁸ La velocidad de exposición se refiere al desplazamiento en $\mu\text{m/s}$ del haz de escritura láser sobre la muestra.

La Fig. 4.7 muestra la matriz de caracterización fabricada con polarización circular, mostrando el cambio en la estructura generada al variar los parámetros de fabricación: velocidad de exposición (eje horizontal) y potencia del haz incidente (eje vertical). De esta matriz se obtuvo la Tabla 4.4 con el registro de las dimensiones obtenidas con combinación de los parámetros de fabricación.

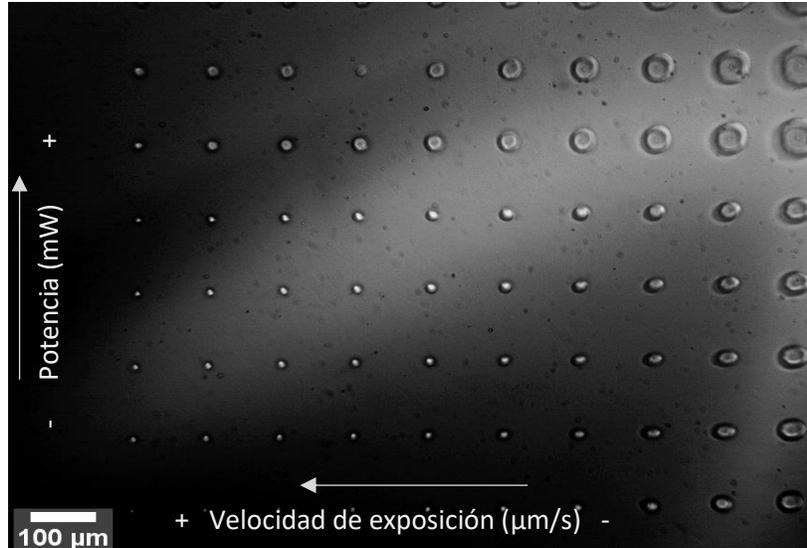


Fig. 4.7: Matriz de caracterización fabricada con polarización circular en el haz de escritura. (a) Matriz completa. (b) segmento de matriz con pilares de menor tamaño.

Posteriormente se agregó el polarizador lineal nuevamente al sistema de escritura y se repitió el proceso para obtener una matriz de caracterización de dimensiones con polarización lineal en el haz de escritura. La matriz se muestra en la Fig. 4.8 y los datos de la Tabla 4.5 muestran las dimensiones de las estructuras para cada pareja de parámetros velocidad de exposición, potencia.

De cada tabla se tomó una serie representativa en la potencia típica de emisión. La Fig. 4.9 muestra la serie de 40 mW para la matriz de polarización circular y la Fig. 4.10 la misma serie para matriz de polarización lineal. Estas series se emplearon posteriormente para realizar un análisis numérico.

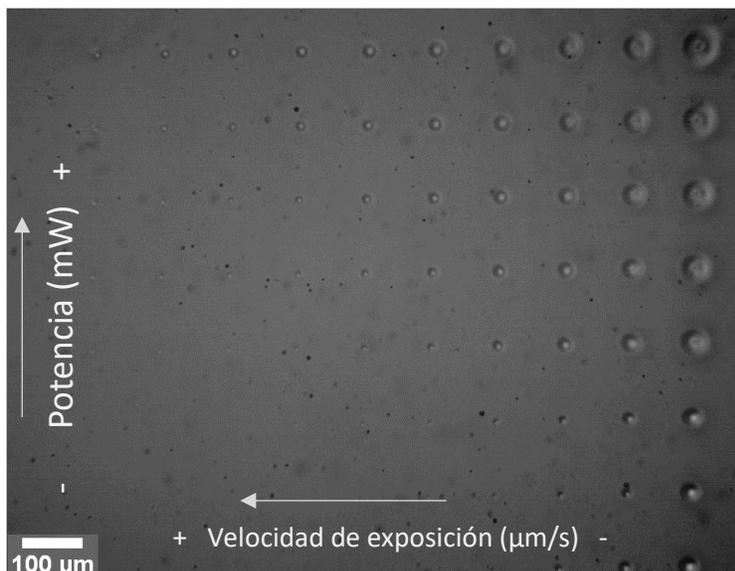


Fig. 4.8: Matriz de caracterización fabricada con polarización lineal en el haz de escritura.

Tabla 4.4 Dimensiones asociadas a la matriz de caracterización de polarización circular mostrada en la Fig. 4.7 Diámetro asociado en micrómetros (μm).

Caracterización con polarización circular											
Potencia (mW)	Velocidad $\mu\text{m/s}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
		1.52	44.832	40.847	37.609	36.862	32.13	26.152	22.665	18.929	14.446
1.59	47.447	37.36	36.613	28.394	25.031	20.548	12.329	10.959	9.215	10.71	
1.77	53.798	42.341	34.62	29.888	27.273	24.097	22.79	21.295	20.174	17.559	
1.97	56.787	41.843	36.613	29.639	26.899	24.159	20.423	20.672	17.559	15.318	
2.20	52.677	42.592	34.745	28.02	27.296	22.79	21.295	18.68	16.065	14.57	
2.43	49.315	32.13	29.888	29.888	27.397	23.91	23.91	21.669	18.182	14.446	
2.58	62.804	53.832	47.85	41.121	38.879	30.405	28.411	24.922	21.682	14.953	
2.66	62.804	57.321	49.844	46.854	41.869	34.393	23.925	27.165	27.913	24.174	
2.81	68.785	58.692	51.963	47.477	41.869	35.514	32.15	27.664	26.916	24.673	
3.04	96.449	61.682	56.075	51.215	44.486	42.617	38.505	36.636	29.533	30.654	

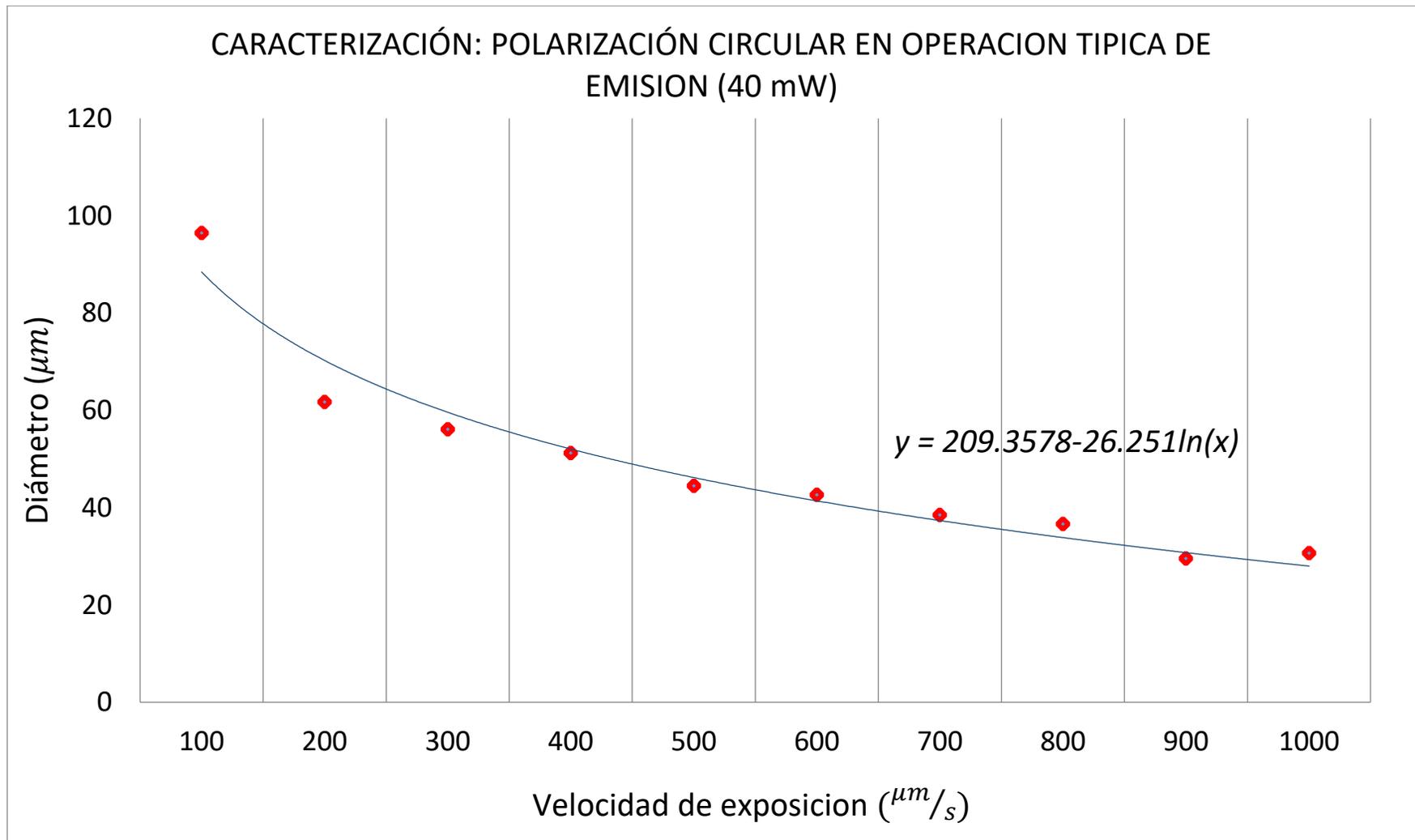


Fig. 4.9: Curva de caracterización asociadas a la matriz de polarización circular de la Fig. 4.7 con función logarítmica obtenida para la serie de 40 mW.

Tabla 4.5: : Dimensiones asociadas a la matriz de caracterización de polarización lineal mostrada en la Fig. 4.8 Diámetro asociado en micrómetros (μm).

Caracterización con polarización lineal											
Velocidad Potencia mW	$\mu\text{m/s}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1.52		35.17	20.399	11.02	7.503	7.737	6.682	-----	-----	-----	-----
1.59		26.729	18.288	14.42	8.792	6.565	5.51	5.275	-----	-----	-----
1.77		30.95	22.978	12.661	9.848	10.785	6.8	6.096	3.751	-----	-----
1.97		35.211	21.596	16.204	11.972	10.094	8.216	5.634	5.399	4.225	3.64
2.20		33.803	25.352	16.901	11.737	10.094	9.39	9.507	6.808	7.923	4.695
2.43		42.254	33.099	23.239	19.014	16.432	15.493	15.669	14.554	16.021	10.563
2.58		42.958	34.859	24.296	22.066	18.545	18.545	14.789	13.38	12.911	11.502
2.66		46.479	31.925	29.577	22.535	23.005	20.775	18.662	16.197	15.962	14.085
2.81		47.887	36.268	33.803	23.239	24.883	22.3	23.239	20.188	17.371	16.667
3.04		58.275	42.254	36.268	29.577	29.577	22.535	22.535	21.596	17.606	16.667

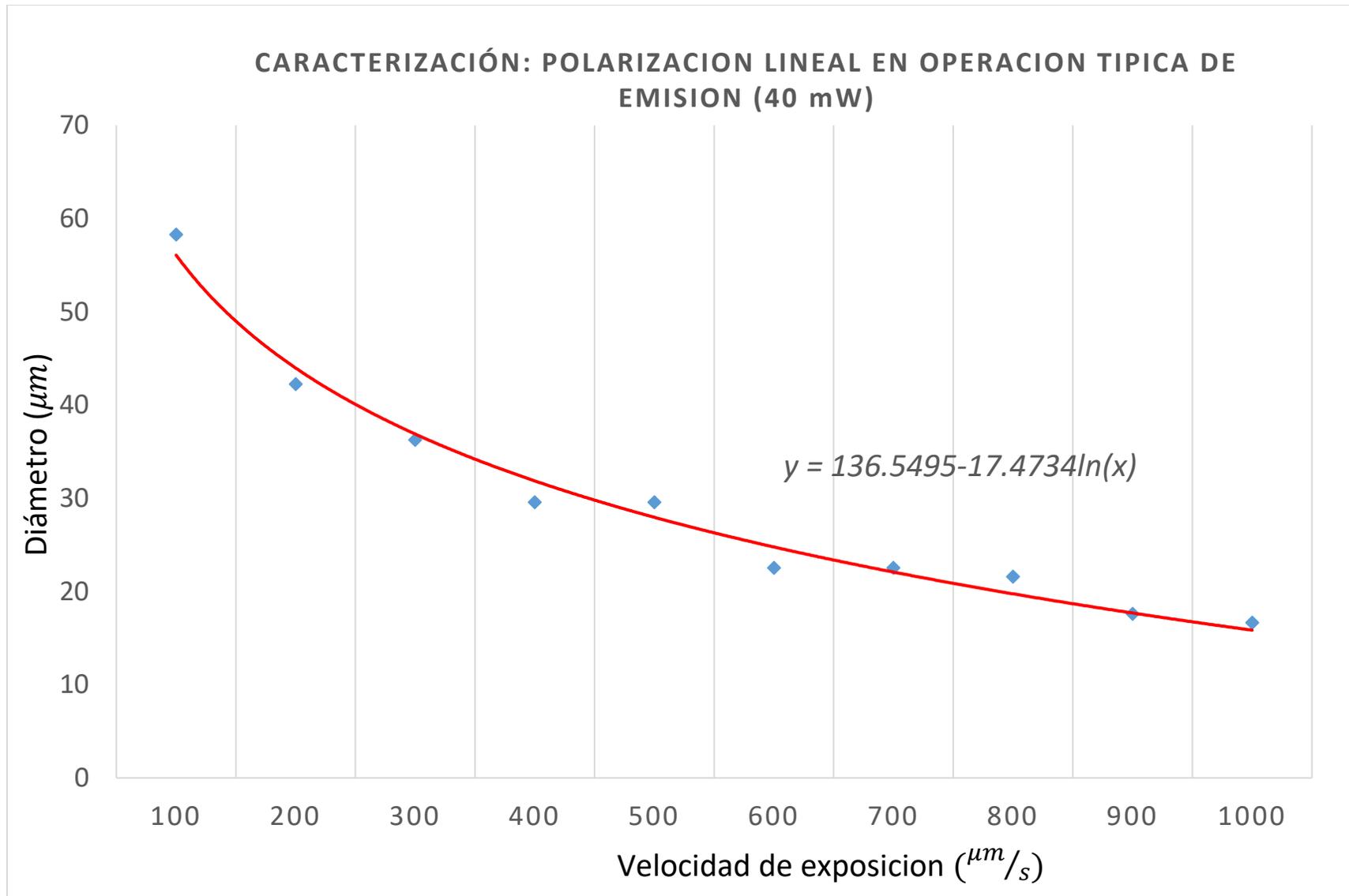


Fig. 4.10: Curva de caracterización asociadas a la matriz de polarización lineal de la Fig. 4.8 con función logarítmica obtenida para la corriente típica (40 mW).

Al analizar las tablas anteriores se observa dependencia de área polimerizada (diámetro de estructura) directamente proporcional según la corriente de alimentación del diodo láser e inversamente proporcional en velocidad de exposición. Este comportamiento indica dos posibles combinaciones para variar las dimensiones de la estructura a escribir: mantener fija corriente de alimentación y variar velocidad de exposición o variar corriente y variar velocidad de exposición.

En el primer caso mencionado existe mayor estabilidad en la tendencia de crecimiento mientras en el segundo caso la estabilidad disminuye, esto se debe al tiempo de estabilización de la potencia emitida por el diodo láser al variar la corriente de alimentación.

Con base en estas observaciones, obtuvo una función logarítmica que se acoplara al comportamiento las estructuras en una potencia típica de emisión del diodo láser (ver Fig. 4.9 y Fig. 4.10). Los modelos obtenidos se muestran a continuación. En ambos casos se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 > 0.95$ (mayor al que se obtuvo en otros ajustes lineales)

Polarización circular

$$Y[\mu m] = 209.3578[\mu m] - 26.2561[s] \ln(x) \left[\frac{\mu m}{s} \right] \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Polarización lineal

$$Y[\mu m] = 136.5495[\mu m] - 17.4734 \ln(x) \left[\frac{\mu m}{s} \right] \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Como se mencionó antes, la variable independiente en estas funciones (x) es la velocidad de exposición y la dependiente (Y) es el diámetro del área polimerizada. Para utilizar las Ecuación 4.1 4.1 y 4.2 es conveniente reescribirlas de forma que se defina un diámetro deseado y al resolver la ecuación se obtenga la velocidad de exposición.

Polarización circular

$$x \left[\frac{\mu m}{s} \right] = e^{\frac{Y[\mu m] - 209.3578[\mu m]}{26.2561[s]}} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Polarización lineal

$$x \left[\frac{\mu m}{s} \right] = e^{\frac{Y[\mu m] - 136.5495[\mu m]}{17.4734[s]}} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Las Ecuaciones 4.3 y 4.4 se utilizarán en las secciones siguientes para fabricar estructuras con dimensiones prediseñadas.

4.5.1 Uso de funciones de caracterización

Se requiere una estructura con líneas de diámetro alrededor de 10 μm y geometría circular.

1. Definir la polarización deseada del haz incidente.
 - a) Para una estructura circular, se retira el polarizador anterior en la trayectoria al objetivo de microscopio. Se utiliza Ecuación 4.3.
 - b) Para estructura ovalada (birrefringente), se coloca el polarizador lineal anterior al objetivo de microscopio. Se utiliza Ecuación 4.4.
2. Resolver la ecuación de la corriente seleccionada sustituyendo la variable Y con el diámetro deseado y resolviendo.

Diámetro deseado 10 μm en una estructura birrefringente.

Ecuación 4.4:

$$x\left[\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}\right] = e^{\frac{Y[\mu\text{m}]-136.5495[\mu\text{m}]}{17.4734[\text{s}]}}$$

$$\text{Sustitución de datos: } x\left[\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}\right] = e^{\frac{10[\mu\text{m}]-136.5495[\mu\text{m}]}{17.4734[\text{s}]}}$$

$$X = 1397.2255\left[\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}\right]$$

El valor de X obtenido es la velocidad en micrómetros por segundo $\left[\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}\right]$. Este valor se proporciona al software de control. El mismo software ajusta automáticamente la velocidad a la magnitud próxima permitida por el sistema (ajuste dependiente de la resolución del sistema).

En este capítulo se probó y desarrolló el método de fotolitografía de un fotón para acoplarlo a las características del prototipo del sistema de escritura directa láser ensamblado y descrito en el capítulo 3. El método establecido en combinación con las funciones obtenidas en la caracterización permite la fabricación repetible de estructuras. En los capítulos siguientes se aplicará este método para obtener guías de onda rectas y quirales, así como combinaciones de estas para fabricar acopladores por onda evanescente.

5 APLICACIÓN DEL MÉTODO EN FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS

Aplicando consideraciones y caracterizaciones que se han desarrollado a partir del método de fotolitografía de un fotón en baja absorción, se fabrican estructuras con distintas geometrías. Estas estructuras se someterán a pruebas cualitativas de confinamiento y acoplamiento para comprobar su funcionalidad como guías de onda y acopladores.

5.1 SISTEMA DE ACOPLAMIENTO DE LUZ

Previo a la fabricación de dispositivos se planteó un procedimiento para iluminar las posibles guías de onda y comprobar su capacidad de confinar luz. Para realizar estas pruebas se identificaron tres necesidades que se enlistan junto con su solución a continuación:

1. **Paredes rectas:** mejoran la aceptación de luz en la entrada del dispositivo.

Aprovechando las características de absorción de la resina SU-8 utilizada se planteó un procedimiento para obtener paredes verticales rectas en la entrada y salida del dispositivo. El procedimiento aprovecha la segunda exposición del proceso de fabricación utilizando máscaras de aluminio. La Fig. 5.1 muestra las partes significativas del proceso que aportan el atributo de paredes verticales. El procedimiento completo de exposición se detalla en la sección 4.2

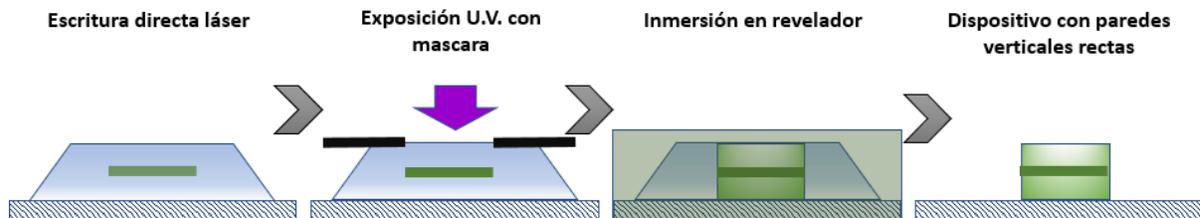


Fig. 5.1: Proceso para obtención de paredes verticales rectas mediante exposición a luz ultravioleta con máscara de aluminio.

Inicialmente se tiene una película de SU – 8 (azul) sobre un sustrato con una estructura con escritura directa láser (verde). Posteriormente se limita el área con una película de aluminio (negro), es importante cuidar que los bordes de la película correspondan con los de la estructura. Una vez colocada la película se expone la muestra con luz UV directamente sobre su normal, al terminar la exposición se pasa por revelador para eliminar la resina no solidificada. Finalmente se limpia y se obtiene una muestra con verticales rectas y estructuras con segmentos de entrada y salida expuestos.

2. **Control de posición de dispositivo:** permite acoplar con precisión un haz de luz en la entrada del dispositivo.

El control de posición del dispositivo para acoplar luz se diseñó con platinas de movimiento en tres ejes con resolución de $1\ \mu\text{m}$. En la Fig. 5.2 se muestra el sistema diseñado y ensamblado. El objetivo de microscopio utilizado tiene amplificación de 10X y $NA = 0.10$.

Para llevar la señal luminosa hasta la entrada del dispositivo se emplea una fibra óptica con núcleo de $6.4 \mu m$ de diámetro acoplada a un diodo láser de $\lambda = 635 \text{ nm}$.

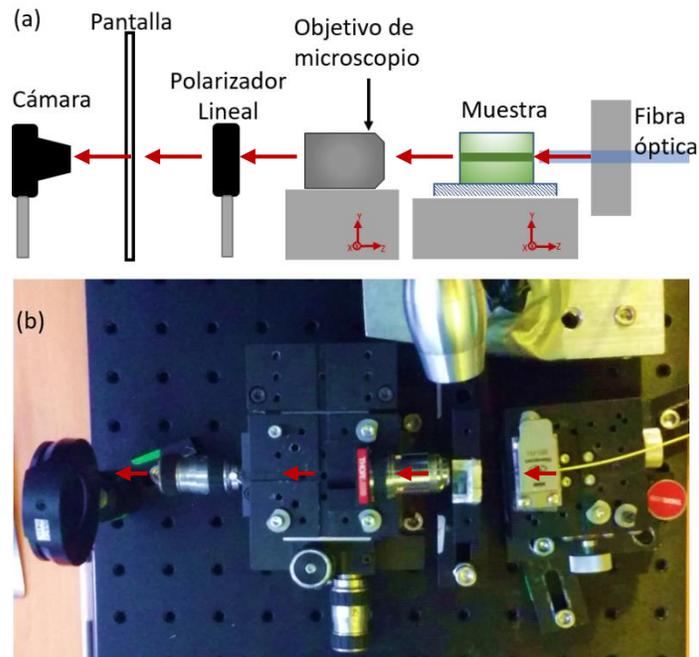


Fig. 5.2: Sistema de acoplamiento de luz. (a) Diagrama, (b) vista superior del sistema.

3. Rango de dimensiones: capacidad de confinar una señal de luz de $\lambda = 635 \text{ nm}$.

Una guía de onda siempre presenta limitaciones para captar y confinar luz con base en las características de los materiales y las dimensiones de la estructura que las forma.

En el Apéndice 1 se puede consultar la teoría en la que se basa el confinamiento y la propagación de luz en guías de onda. El siguiente análisis se realizó tomando en cuenta las consideraciones que ahí se tratan.

Suponiendo como base un índice de refracción del SU - 8 de 1.57 [27] y un $\Delta n = 0.0008$ [26], se tiene entonces que $n_{nucleo} = 1.57$ y $n_{recubrimiento} = 1.5692$. Utilizando estos datos para resolver la apertura numérica $NA = \sqrt{n_a^2 - n_b^2}$ en donde a es el núcleo y b el recubrimiento.

$$NA = 0.0501$$

A su vez , este resultado se utiliza para calcular el radio mínimo de una fibra óptica o estructura similar para que esta sea monomodal, utilizando el parámetro $a = \frac{V \lambda_0}{2\pi NA}$, en donde λ_0 es la longitud de onda y V es un parámetro que se obtiene de la función de Bessel. En el caso de una guía de onda monomodal $V = 2.405$.

$$a = \frac{(2.405)(635 \text{ [nm]})}{2\pi\sqrt{(1.57^2 - 1.5692^2)}} \approx 4850 \text{ nm}$$

Dado que el estudio de la propagación en una de onda monomodal es significativamente más sencillo, lo deseado es la fabricación de un dispositivo monomodal. Sin embargo, se definió un rango de radios de fabricación $5 \mu\text{m} \leq a \leq 50 \mu\text{m}$. Nótese que el límite inferior fijado está apenas por encima de la dimensión en donde podría existir una propagación monomodal según la consideración anterior. La razón del rango seleccionado es debido a que en estas dimensiones el sistema se comporta de forma estable según lo observado durante la caracterización.

Cabe aclarar que el valor de a calculado para la propagación de un solo modo es un estimado basado en diferentes consideraciones teóricas y valores reportados en la bibliografía que no son exactamente los mismos a los de los dispositivos fabricados. Para un correcto cálculo de los modos a propagar, se requiere medir bien el contraste entre índices de refracción del SU-8 curado por escritura directa láser y con UV. Sin embargo, estos valores se utilizan como referencia.

Los resultados del sistema de acoplamiento se muestran más adelante en las pruebas de confinamiento de cada uno de los dispositivos fabricados.

5.2 ESTRUCTURAS RECTAS

Las estructuras rectas son segmentos de resina polimerizada en una sola dirección, ajustando los parámetros de fabricación según las Ecuaciones 4.3 y 4.4 se varía el diámetro de cada estructura.

5.2.1 Guías de onda rectas

La Tabla 5.1 muestra algunos de los parámetros que se utilizaron durante las pruebas de fabricación.

Tabla 5.1: Determinación de parámetros de fabricación para guías de onda con diferentes radios de núcleo.

POLARIZACIÓN DEL HAZ	CORRIENTE (mA)	RADIO DE GUÍA (μm)	VELOCIDAD DE EXPOSICIÓN ($\mu\text{m/s}$)
CIRCULAR	330	5	1787.0753
		15	980.5993
	320	20	832.4214
LINEAL	325	5	778.9445
		20	252.4179
		30	119.0865

Las estructuras se fabricaron en sustrato de vidrio y totalmente inmersas en resina con doble exposición; en la Fig. 5.4 se observa su disposición geométrica desde una perspectiva superior. Se fabricaron utilizando un haz de escritura con polarización lineal que genera estructuras ligeramente ovaladas. Por lo tanto, al no ser completamente circular se genera una guía de onda birrefringente y esta propiedad se mantiene constante a lo largo de toda su extensión, desde el punto donde se acopla luz hasta la salida. También tienen una variación de profundidad en la resina, siendo la de menor diámetro (extrema izquierda) la que se encuentra a mayor profundidad en la resina y la más grande (extrema derecha) la más superficial.

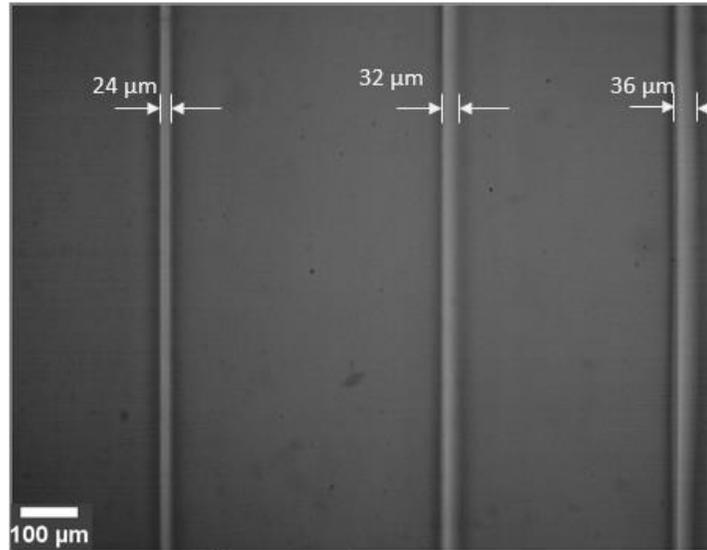


Fig. 5.4: Guías de onda rectas de diferentes dimensiones inmersas en SU-8. De izquierda a derecha 26, 32 y 36 μm.

Al observar el núcleo de las guías de onda fabricadas (ver Fig. 5.3), es evidente que poseen una sección transversal ovalada en la dirección de la profundidad del haz de escritura. Esta geometría se atribuye a aberraciones generadas por el objetivo de microscopio, resultando en un enfoque y absorción no tan puntual en el material [28]. Aunado a este efecto, se debe considerar la elipticidad perpendicular generada por la polarización lineal del haz de escritura láser.

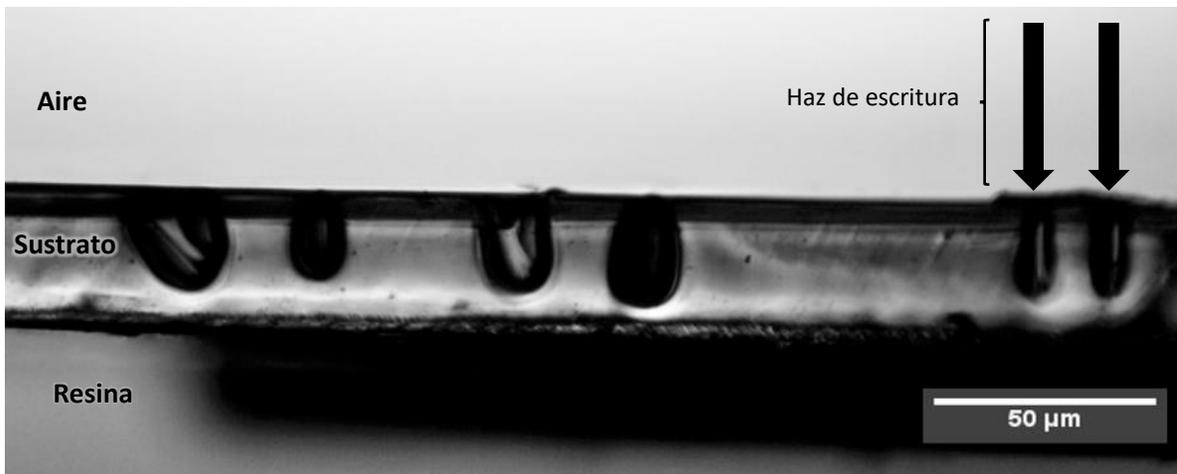


Fig. 5.3: Vista frontal de salida de guías de onda con estructura oval inmersas en SU-8. La muestra tiene 3 pares de guías, solo un par se señaló para ejemplificar la forma ovalada que provoca el láser enfocado en la resina.

Para evaluar las estructuras rectas fabricadas de la Fig. 5.4 se sometieron a pruebas de confinamiento utilizando el sistema descrito en la sección 5.1.

La Fig. 5.5 muestra los resultados del acoplamiento de luz en la guía: la fibra óptica proveniente de la fuente de luz se acopla directamente a la estructura fabricada esta ultima confina y transmite la luz hasta su extremo de salida y la proyecta por un objetivo de microscopio hasta una pantalla. En la

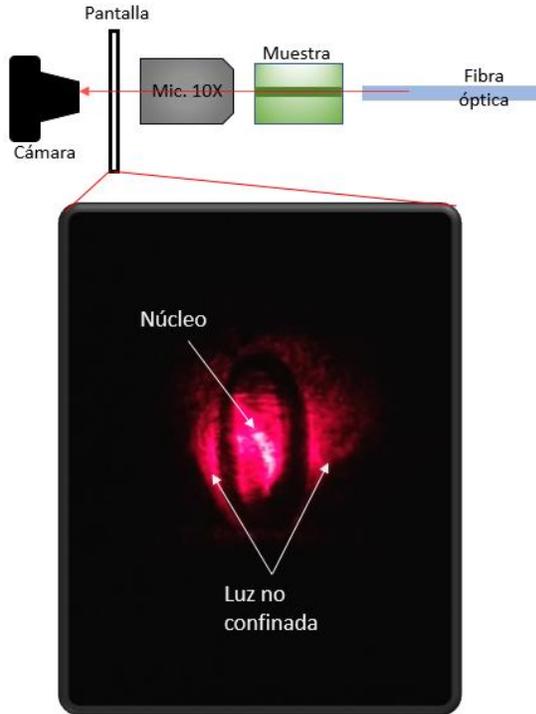


Fig. 5.5: Confinamiento en guía de onda recta. Patrón de luz en la faceta de salida proyectado en pantalla.

imagen adquirida por la cámara se distingue un patrón de esparsimiento de luz en torno a una sección central iluminada. La sección central se señala como núcleo y es la salida de la guía. Con esta prueba se demuestra el confinamiento y guiado de la luz en toda su extensión (2 mm) hasta el extremo de salida.

El esparsimiento observado (señalado como luz no confinada) se atribuye al acoplamiento imperfecto entre la fibra óptica y la guía de onda, que a su vez es consecuencia del bajo contraste de índice de refracción en la guía de onda y la posible rugosidad en la pared de entrada de la misma.

5.2.2 Acopladores rectos

Una vez definida la capacidad de las guías de onda de confinar luz, se planteó probar su aplicación en la construcción de acopladores direccionales. Este tipo de dispositivo aprovecharía la luz expuesta fuera del núcleo u onda evanescente descrita previamente para constituir un sistema de una entrada y dos salidas, o viceversa. Un diagrama de este tipo de dispositivos se

muestra en la Fig. 5.6.

La guía principal o primaria es aquella de mayor longitud y a la cual siempre se le acopla la luz proveniente de la fibra óptica, sus dos extremos (entrada y salida) están, cada uno, en una pared vertical de la resina. La guía secundaria es la de menor longitud y es la que captará y confinará la onda evanescente proveniente de la guía principal. Ambas guías tienen un diámetro aproximado de $22 \mu\text{m}$ y se encuentran totalmente inmersas en SU-8 curado con luz UV separadas una longitud $L = 25 \mu\text{m}$. las flechas en la Fig. 5.7 indican la dirección de propagación que sigue la luz en el dispositivo descrito.

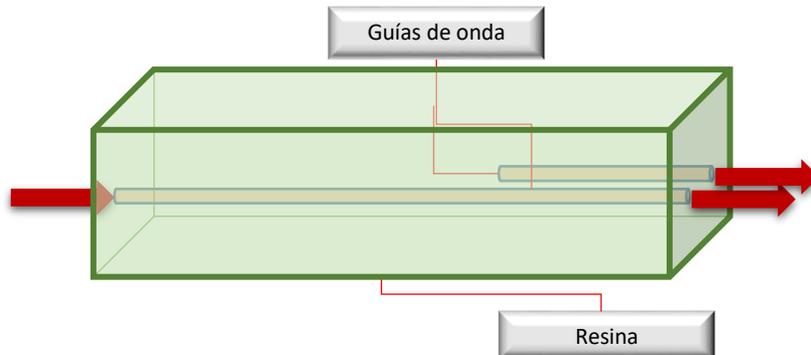


Fig. 5.6: Diagrama de acoplador fabricado mediante escritura directa láser en resina fotosensible SU-8.

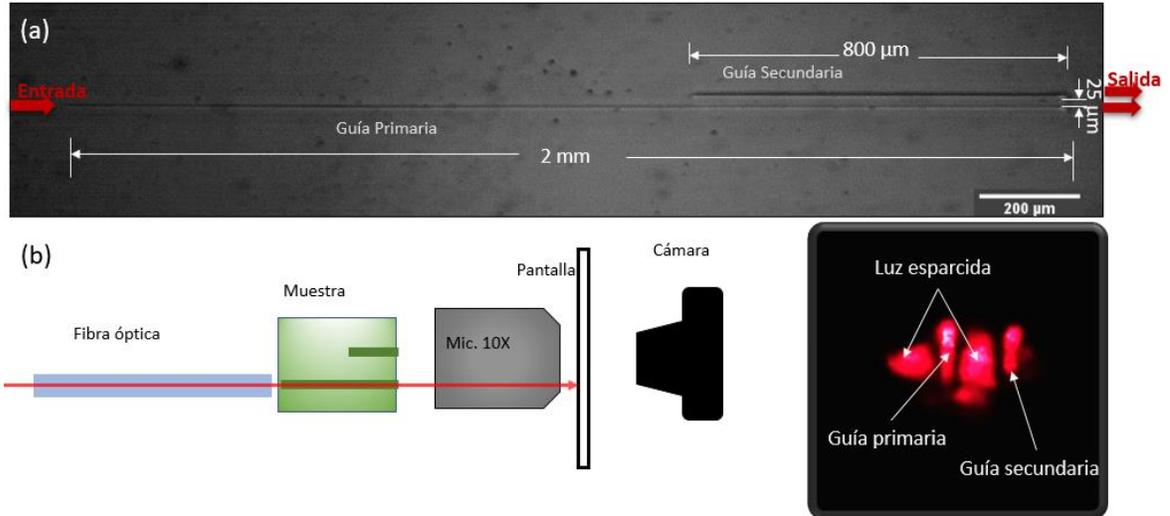


Fig. 5.7: Acoplador fabricado con escritura directa láser en SU-8. (a) vista superior con microscopía óptica, (b) patrón de salida de luz con diagrama de sistema de acoplamiento.

Los dispositivos se sometieron a pruebas de confinamiento utilizando el sistema de la sección 5.1. Para revisar el comportamiento en polarización de un acoplador recto se utilizó un polarizador lineal colocado en el sistema de acoplamiento a la salida de la guía (ver Fig. 5.2). Este polarizador montado en una platina giratoria permite identificar o diferenciar las propiedades de la polarización de la luz a la salida de cada guía de onda. En otras palabras, esto funciona como un filtro en polarización que discrimina si se propaga un estado de polarización lineal en cierta orientación o no.

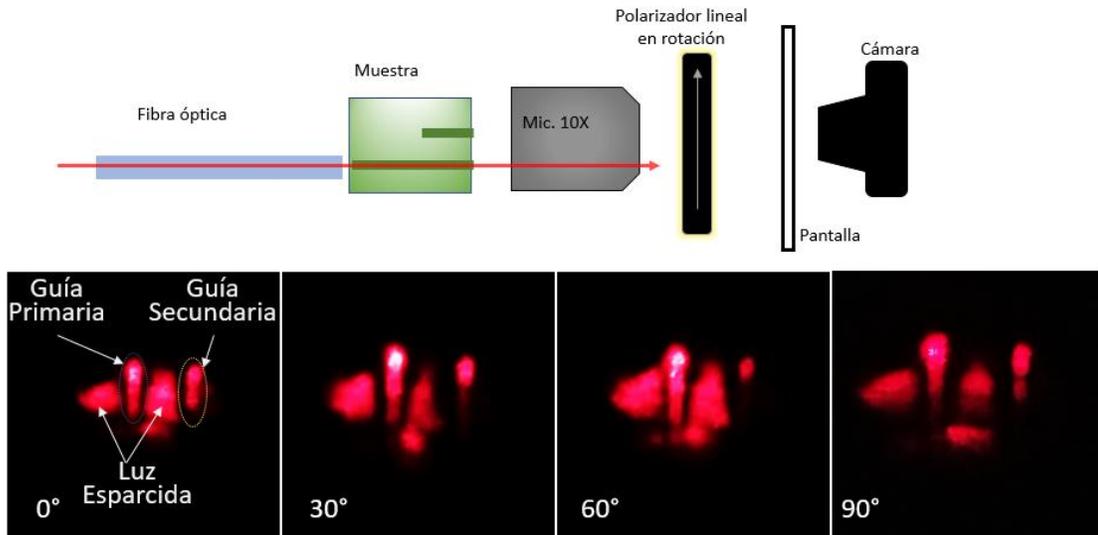


Fig. 5.8: Evolución del patrón de salida de acoplador recto dependiente de la orientación del polarizador lineal a la salida del dispositivo.

En la Fig. 5.8 se añadió un polarizador lineal al sistema de acoplamiento en una platina rotatoria, se capturaron los patrones de luz de la salida del acoplador en incrementos de orientación del polarizador de 30°. Siguiendo la imagen de izquierda a derecha, tomadas secuencialmente, se observa que la guía de onda principal (izquierda) varía muy poco su intensidad. En contraste, la guía secundaria (derecha) se atenúa y posteriormente vuelve a iluminarse. El efecto presentado puede atribuirse a:

- i. Ambas guías son capaces de confinar luz con polarización elíptica, siendo posible la transmisión de luz en ejes ortogonales. Por esta razón se atenúan sin desaparecer al rotar el polarizador.
- ii. La birrefringencia en guías de onda ópticas favorece la propagación de la polarización lineal, lo cual no es comprobable en este caso. En su lugar se tiene una polarización elíptica indicando que, de ser estructuras más delgadas, aumentaría la magnitud de la birrefringencia y la componente horizontal se discriminaría.
- iii. La birrefringencia de las guías favorece el acoplamiento y, en el caso de la guía secundaria, una polarización casi lineal. Esto último es comprobable por la mayor atenuación que presenta al rotar el polarizador, sin desaparecer por completo.

5.2.3 Simulaciones

Con los parámetros definidos teórica y experimentalmente se realizaron diferentes pruebas en el software *OptiFDTD* desarrollado por *Optiwave*. Este software se especializa en diseño, análisis y pruebas de componentes fotónicos en materia de propagación de onda. Las pruebas que se realizaron consisten en la simulación de los dispositivos fabricados con el fin de comprobar la propagación de luz a través de ellos.

Tabla 5.2: Parámetros de simulación de acoplador de guías de onda.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Radio guía primaria</i>	22 μm
<i>Radio guía secundaria</i>	22 μm
<i>Distancia entre guías</i>	25 μm
n_{core}	1.58
$n_{cladding}$	1.5792
Δn	0.0008
λ	635 nm

Los dispositivos simulados se realizaron con base en los parámetros mostrados en la Tabla 5.2 La variación en birrefringencia se muestra específicamente en el análisis de cada dispositivo. Cabe mencionar que bajo estos parámetros que se adecuan a los dispositivos fabricados, las guías de onda son multimodales.

5.2.4 Acoplador circular cilíndrico

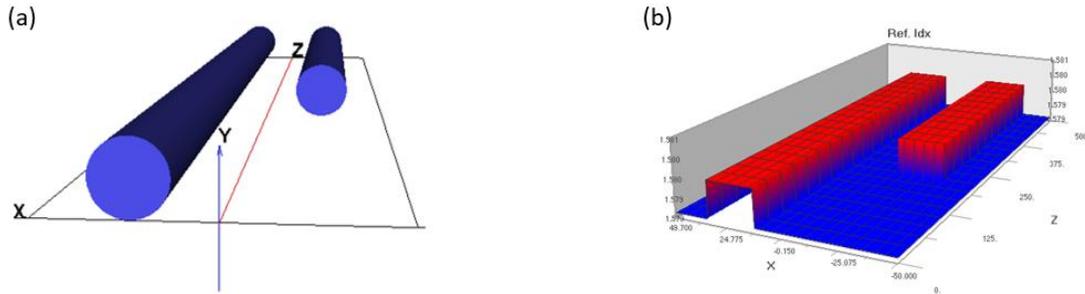


Fig. 5.9: Acoplador cilindrico recto. (a) Modelo 3D (b) perfil de contraste de índice de refracción.

El acoplador circular cilíndrico corresponde al producto esperado usando una fabricación sin polarizador lineal o control de polarización en el sistema de escritura directa láser y sin efectos de aberraciones ópticas. La estructura es un cilindro perfectamente circular, similar a una fibra óptica. El propósito de esta simulación es analizar la propagación en una estructura de este tipo con los índices de refracción teóricos en un proceso de fotolitografía híbrida con SU-8 (bajo contraste de índice de refracción) y diferenciar las características principales respecto a una estructura birrefringente.

A la estructura mostrada en la Fig. 5.9 se le acopló una fuente de luz de 635 nm con dirección de propagación Z. Se plantearon dos tipos de señales diferentes, Transversal Eléctrica (TE) y Transversal Magnética (TM) con el fin de evidenciar las diferencias en propagación que la estructura pudiera ocasionar.

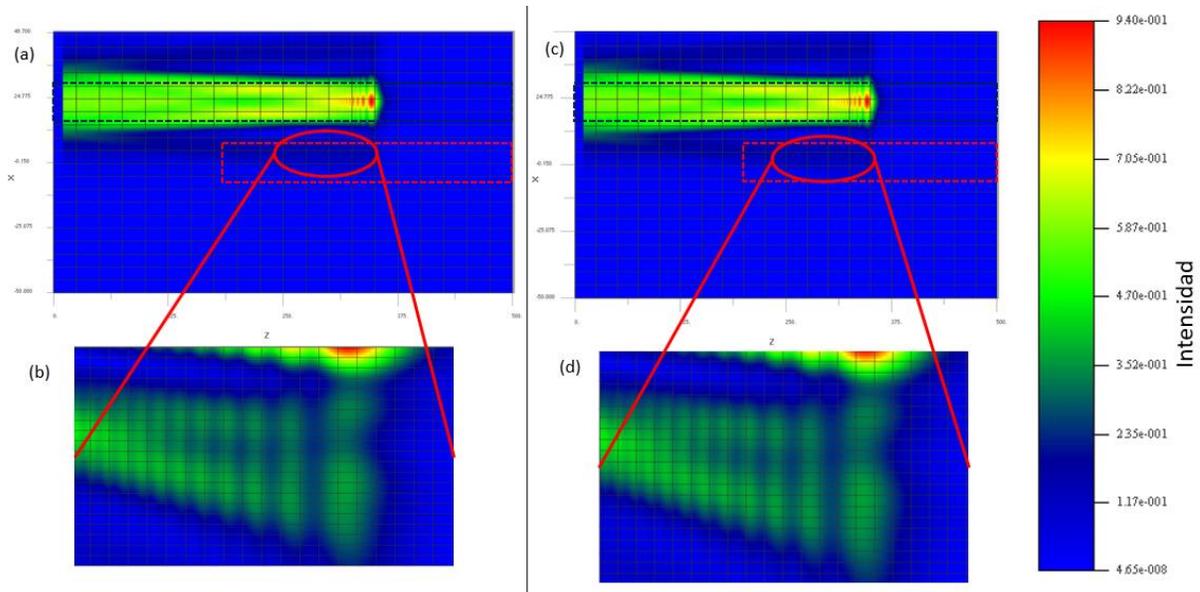


Fig. 5.10: Distribución de campo en acoplador recto cilíndrico. (a-b) onda TE y (c-d) onda TM.

La Fig. 5.10 muestra la propagación a través del acoplador, en (a), (b) para onda TE y (c), (d) para onda TM. De los resultados de esta simulación no se observa diferencia significativa de la distribución de campo y para ambas ondas la intensidad de la luz acoplada a la guía secundaria es muy baja. Esto se

debe a la simetría perfecta de las guías de onda, con lo cual no hay preferencia en términos de polarización.

Estos resultados se comparan más adelante con un acoplador birrefringente.

5.2.5 Acoplador birrefringente

Con el propósito de diferenciar la propagación de onda por una estructura birrefringente respecto a una estructura circular cilíndrica se realizó esta simulación de un dispositivo birrefringente, la silueta de este dispositivo se asemeja con mayor precisión al fabricado.

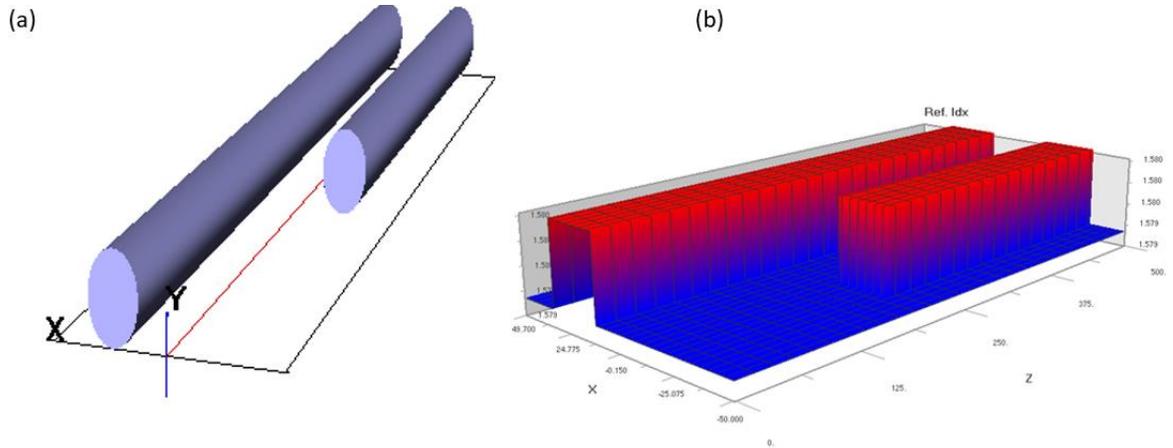


Fig. 5.11: Simulación acoplador birrefringente recto. (a) Modelo 3D, (b) Perfil de contraste de índice de refracción.

La relación de excentricidad es de 0.86, la guía principal tiene una longitud de 500 μm y la secundaria de 300 μm con final en el mismo plano. La separación entre guías es de 25 μm , este dispositivo puede verse en la Fig. 5.11

Para simular la propagación de una señal de luz se utilizó una fuente de luz de 635 nm igual a la utilizada en los experimentos. La distribución de campo y los resultados de propagación se observan en la Fig. 5.12 para una onda TE en (a, b) y (c, d) para una TM. En ambos casos se observa alta concentración de campo en la estructura primaria y niveles hasta 3 dB más bajos de energía en la estructura secundaria según la escala adimensional del software.

Analizando estas imágenes resulta evidente que fuga una gran cantidad de luz de las guías de onda primarias, en contraste con la simulación de un acoplador recto cilíndrico. En este caso se nota mayor intensidad de la señal en la guía secundaria para ambas ondas. Para la onda TE se observa la aparición de modos de propagación de alto orden con mayor prontitud respecto a la onda TM.

Es importante mencionar que, debido las condiciones de fabricación, esta geometría es más cercana a las estructuras obtenidas experimentalmente. Por lo tanto, se puede decir que tienen cierta birrefringencia y el acoplamiento hacia la guía de onda secundaria es preferente en un estado de polarización. Dichos resultados concuerdan con lo observado experimentalmente en la sección anterior.

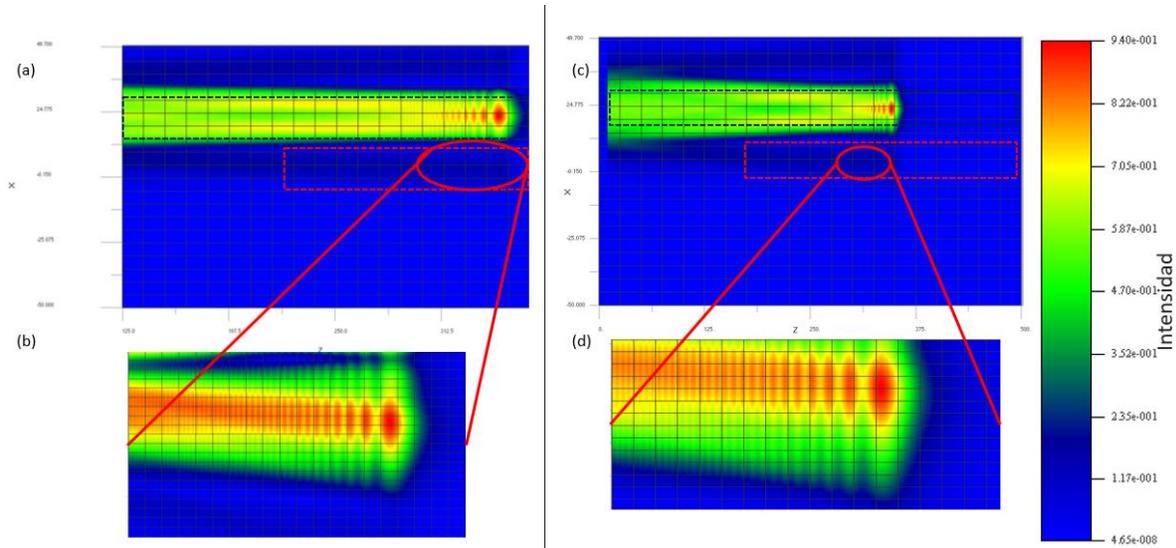


Fig. 5.12: Distribución de campo en acoplador birrefringente. (a - b) onda TE, (c - d) onda TM.

5.2.5.1 Análisis de simulaciones

Haciendo un análisis de las simulaciones se pueden rescatar tres puntos:

- A. La propagación por una estructura cilíndrica circular es igual para una onda TE y una TM.
- B. La propagación por una estructura birrefringente es diferente para una onda TE y una TM, la excentricidad podría ocasionar diferentes modos de propagación y alteraciones en intensidad en zonas transversales tanto de la guía primaria como de la guía secundaria.
- C. El acoplamiento puede ser favorecida en estructuras birrefringentes por la onda evanescente con mayor magnitud (dependiente de la orientación de la birrefringencia y el modo de propagación TE o TM).

5.3 ESTRUCTURAS QUIRALES

Las guías de onda quirales se diferencian de las guías de onda rectas por la estructura birrefringente que presenta una evolución a lo largo del eje de propagación, asemejándose de esta manera una espiral [29]. La evolución en birrefringencia puede realizarse durante la fabricación del dispositivo rotando el polarizador lineal previo al objetivo de microscopio (ver Fig. 3.6). El movimiento de este polarizador es simultáneo al desplazamiento del haz de escritura sobre la muestra y se realiza con un motor a pasos. Cada revolución del polarizador indica dos revoluciones en la orientación de la polarización del haz sobre la muestra. El software controla el número de revoluciones de la polarización sobre la muestra, es decir, las espiras que se formaran en la resina expuesta.

La Fig. 5.13 muestra una comparación de los efectos en estructuras en forma de pilar creadas al cambiar la dirección de la polarización entre estructuras. En (a) se mantuvo la dirección del polarizador lineal del haz de escritura estática durante toda la matriz, como resultado se obtuvieron pilares rectos birrefringentes. En (b) se roto el polarizador lineal 20° para cada renglón de pilares, como resultado, la orientación de la birrefringencia cambia en cada renglón. Esto confirma los efectos que causa la geometría de la silueta del haz de escritura descritos en la sección 3.2.

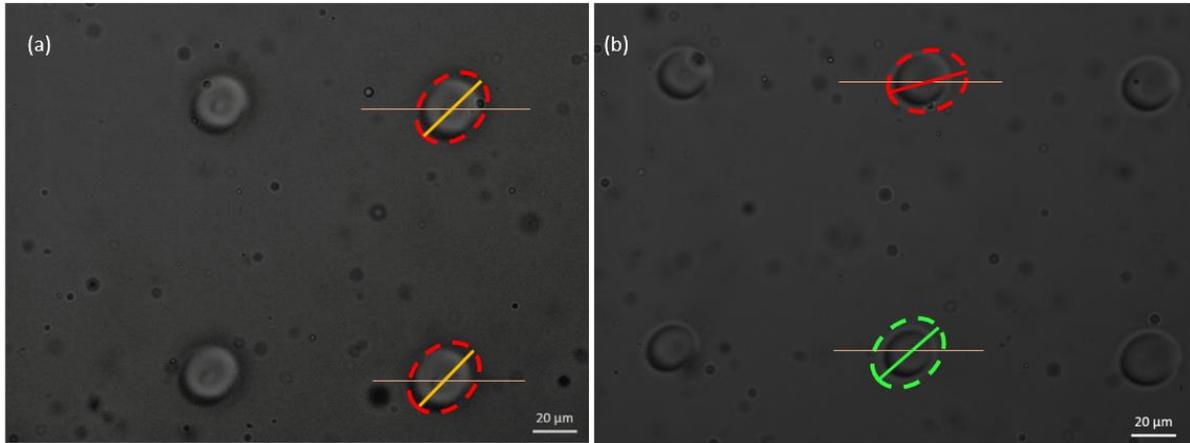


Fig. 5.13: Pilares rectos fabricados con polarización lineal en el haz de escritura. (a) Dirección de polarización del haz invariable, (b) dirección de polarización del haz variable.

El procedimiento de fabricación de guías de onda con birrefringencia evolutiva a lo largo del eje de propagación es el mismo utilizado en la sección anterior, pero en este caso se añade rotación de polarización durante la escritura. Como consecuencia, esto modificará de manera dinámica el cómo interactúa el haz de escritura con el material. Al tener una polarización lineal paralela a la dirección de escritura, se tiene un tiempo de exposición más prolongado en el material. Esto dará como resultado una estructura más angosta, pero con mayor profundidad. En contraste, al ser perpendicular la polarización a la dirección de escritura se tendrá una estructura más ancha, pero de menor profundidad. Por lo tanto, al generar una estructura donde se alterne gradualmente entre estos estados de polarización resultará en estructuras quirales. Estos dispositivos se pueden fabricar según el número de espiras que se desee a lo largo de la estructura. Mediante este efecto se logra generar *guías de onda quirales*.

Para la fabricación de este tipo de estructuras un factor importante es la posible vibración que sufre el polarizador lineal al rotar sobre su eje. Esta vibración se origina por el motor y el sistema de engranes que rotan el polarizador para controlar su orientación. Se observó que entre mayor sea la velocidad angular, mayor será la vibración inducida al haz de escritura. En la Fig. 5.14 (a) se presenta la afectación que sufren las estructuras fabricadas a causa de la vibración del polarizador.

Para evitar esta afectación se estableció una relación de no más de 6 espiras por milímetro en un grabado con velocidad de desplazamiento de 300 $\mu\text{m/s}$. Siguiendo esta regla se observó que dichas vibraciones ya no eran visibles al inspeccionar las muestras (ver Fig. 5.15). La diferencia de número de espiras no es visualmente comprobable en (b) dado que los cambios en dimensiones se esperan sean muy bajos y además requeriría un sistema para medir las variaciones en el índice de refracción.

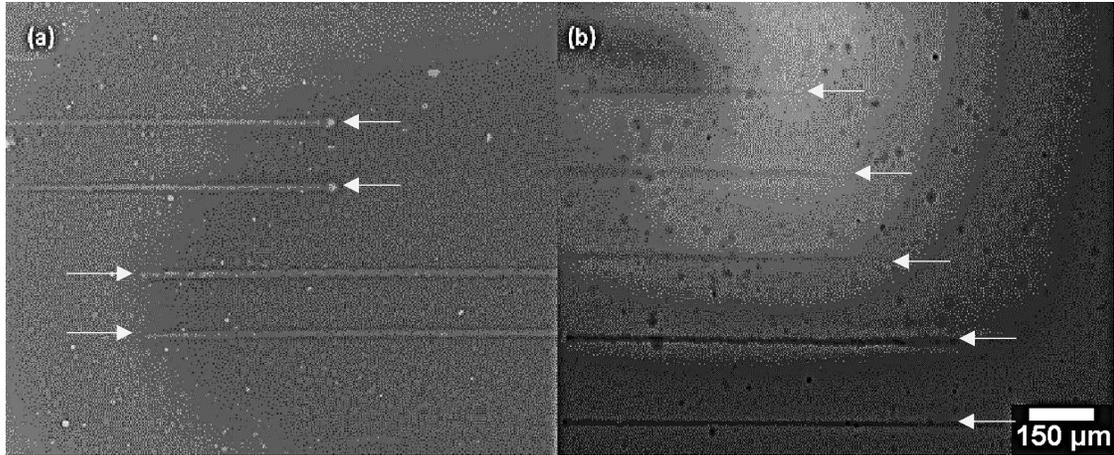


Fig. 5.14: Guías de onda quirales. (a) Pareja superior guía recta y guía quiral, pareja inferior de guías quirales con velocidad de rotación de polarizador elevada. (b) Estructuras quirales con número de espiras en aumento; potencia y velocidad estáticas.

5.3.1 Guías de onda quirales

Una vez demostrada la posibilidad de generar estructuras quirales, se evaluó el uso de estas como potenciales guías de onda. Las características de estas estructuras consistían en líneas con amplias longitudes y embebidas dentro de un volumen de material con índice de refracción ligeramente diferente. El diámetro con el cual fue posible fabricar estas estructuras de manera experimental es definido en la sección 5.1 ($5 \mu\text{m} \leq a \leq 35 \mu\text{m}$).

La Fig. 5.15 muestra una guía de onda quiral con 10 espiras, se encuentra totalmente inmersa en SU-8 expuesto a luz UV y los extremos de entrada y salida expuestos para acoplar luz. Como se comprobó más atrás no es evidente la quiralidad y no presenta diferencia significativa respecto a una guía de onda recta.

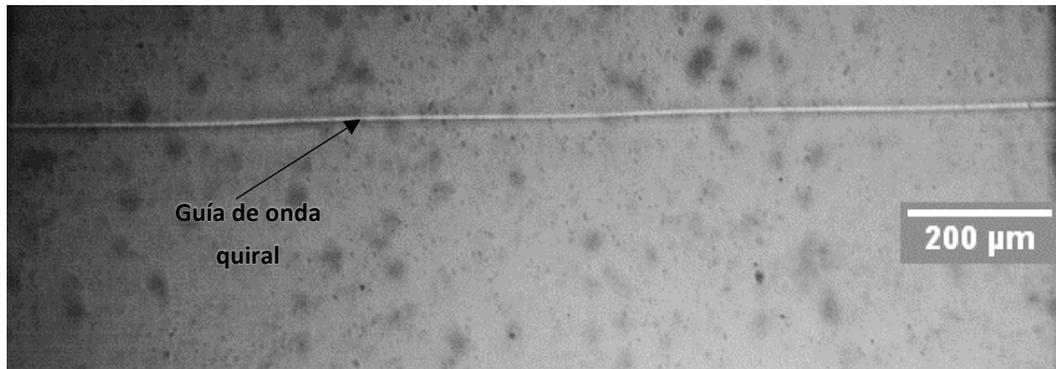


Fig. 5.15: Guía de onda quiral 1.5 mm de longitud y 13 μm de diámetro.

Se procedió a comprobar su funcionamiento como guías de onda al acoplar luz con $\lambda = 635 \text{ nm}$. La Fig. 5.16 muestra el patrón de salida de una guía quiral de referencia similar a la mostrada en la Fig. 5.15, en este caso tiene seis espiras y longitud de 2 mm con un diámetro aproximado de 20 μm. Comparando el patrón con el de la guía de onda recta se notan dos diferencias significativas:

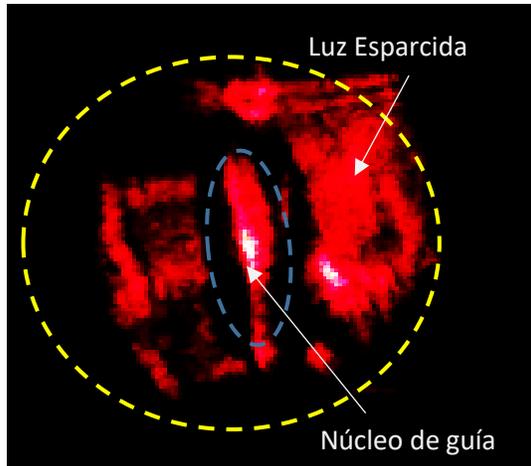


Fig. 5.16: Patrón de salida en guía de onda quiral proyectado en pantalla.

1. Existe mayor presencia de luz fuera de la sección del núcleo de la guía, esta luz puede estar en la periferia de la guía por acoplamiento imperfecto y fugas ocasionadas por la variación en la geometría a lo largo del eje de propagación.
2. La forma central de la guía, correspondiente al núcleo, es considerablemente menos uniforme respecto a una guía recta.

Adicionalmente se puede comentar que las paredes de la guía (alrededor de la sección marcada en azul) también se iluminan, dificultando la diferenciación entre núcleo y revestimiento.

Con estas pruebas se corroboró que el esparcimiento en una guía quiral es mayor que en una recta. Este fenómeno puede explicarse por la evolución de birrefringencia o quiralidad a lo largo del eje de propagación. Al final de la guía (2 mm) la mayoría de la luz se ha fugado. Dadas las características geométricas se consideró interesante analizar el efecto al acoplarla a una guía de onda recta. Además, debido a las pérdidas de propagación presentes se descartó la guía quiral como principal para acopladores. En su lugar la configuración que se consideró para la fabricación de acopladores fue guía recta para la principal y quiral para la secundaria.

5.3.2 Acoplador quiral

Similar a los acopladores rectos, el acoplador quiral se basa en la transferencia de luz de una guía de onda principal y que se acople a una guía de onda secundaria para tener un dispositivo de una entrada y dos salidas. En esta versión el acoplador se fabrica con quiralidad en alguna o a ambas guías para modificar la forma en que la luz se acopla entre ellas debido a la selectividad en la polarización propagada.

La Fig. 5.17 muestra algunos dispositivos fabricados aplicando rotación del polarizador de escritura para formar estructuras quirales. Tanto la guía primaria como secundaria tienen un diámetro aproximado de $18 \mu\text{m}$ y se separan por $25 \mu\text{m}$; la longitud de la guía de onda principal es de 2 mm y de la secundaria de 1 mm, ambas completamente inmersas en SU-8. La guía principal atraviesa todo el sustrato mientras la secundaria solo tiene la sección de salida expuesta.

Para acoplar luz a estas guías y acopladores se utilizó el mismo sistema y procedimiento de los dispositivos antes mencionados. La Fig. 5.18 demuestra el acoplamiento de luz entre una guía de onda recta (principal) y una guía quiral (secundaria). Se observa la luz proveniente de la fibra óptica (izquierda) llegando hasta la pared de entrada en la región de la guía, siguiendo el desplazamiento a de izquierda a derecha en la imagen, finalmente se observan dos secciones iluminadas correspondientes a la salida. El punto inferior corresponde a la guía principal y el superior a la guía de onda secundaria quiral.

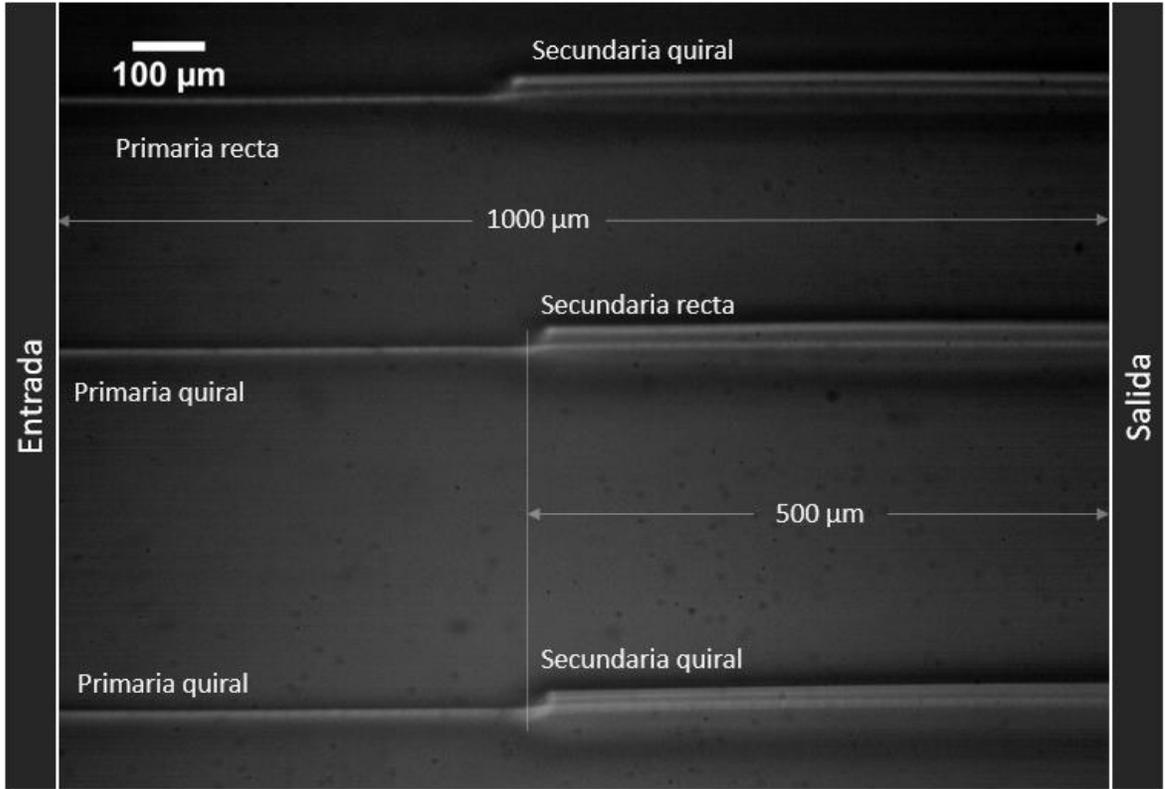


Fig. 5.18: Acoplador Plano – Quiral en sistema de acoplamiento de luz.

Como se mencionó, se definió una configuración estándar de acopladores de la siguiente manera: guía principal recta y guía secundaria quiral. Esto a razón de las observaciones realizadas al acoplar luz directamente de la fibra óptica a una guía con quiralidad. En la página 53 se detallan estas observaciones. Adicionalmente se probó sin éxito el acoplamiento en el resto de los dispositivos de la Fig. 5.17.



Fig. 5.17: Imagen con microscopía óptica de sección central de acopladores quirales, vista superior. Los tres dispositivos completan las configuraciones posibles con al menos una de las guías con quiralidad.

Para evidenciar la afectación en polarización que sufre el haz de luz a través de la guía y después del acoplamiento entre guías, se realizó la misma prueba en polarización que en los acopladores rectos.

A la salida de la guía se colocó un polarizador y se rotó gradualmente mientras se capturaba la evolución del patrón de salida en la pantalla de proyección.

La Fig. 5.19 muestra los resultados del experimento descrito en donde se ve la evolución de los dos haces de salida; el spot del lado izquierdo de cada imagen corresponde a la salida de la guía primaria recta y el spot derecho a la guía secundaria quiral.

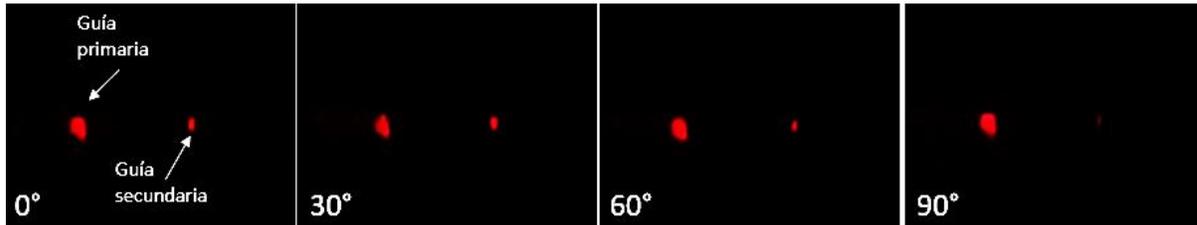


Fig. 5.19: Evolución del patrón de salida de acoplador Recto - Quiral al variar la orientación del polarizador lineal a la salida en escalones de 30°.

Después de girar el polarizador lineal un total de 90° se observó el siguiente comportamiento:

- i. La luz proveniente de la guía de onda secundaria (quiral) se atenúa por completo al rotar el polarizador lineal 90° con respecto a la posición inicial. La geometría del spot se mantiene hasta que éste desaparece.
- ii. La luz correspondiente a la salida de la guía de onda primaria (recta) prácticamente no se atenúa. Similar a lo que pasa en la guía de onda primaria del acoplador recto.
- iii. La geometría del patrón de luz proveniente de la guía de onda secundaria es más angosta respecto a la de la guía de onda primaria.

El análisis anterior indica que existe un estado de polarización lineal viajando en la guía de onda quiral a diferencia del caso de un acoplador con guías de onda recta (la atenuación al rotar el polarizador en la salida es más significativa en una guía de onda quiral). Cabe mencionar que éste fenómeno no coincide con el reportado anteriormente en fibras ópticas, en donde se logran tener polarizadores circulares al provocar quiralidad en las mismas fibras [29].

El comportamiento de los dispositivos quirales fabricados puede relacionarse con el reportado en [17, 19, 18] en donde se modifica la orientación del estado de polarización, se cambian las fases de las componentes de polarización o se modifican las propiedades cuánticas de la onda. Sin embargo, esto no se puede demostrar por completo con las herramientas y pruebas de este trabajo.

En este capítulo se detallaron los resultados en fabricación de estructuras rectas y quirales, donde mediante pruebas cualitativas de confinamiento de luz se comprobó su funcionalidad como guías de onda y acopladores. Se demostró que estructuras birrefringentes rectas y estructuras con evolución de birrefringencia acoplan luz entre sí. Adicionalmente se demostró que puede tenerse cierto control de polarización mediante la evolución de birrefringencia.

En las mismas pruebas se demuestra la diferencia en selectividad de polarización de una señal al transmitirse por una guía quiral respecto una recta. Las imágenes presentadas demuestran la aportación de la quiralidad alterando la polarización de la luz confinada en estas estructuras. Al aplicar esto en acopladores se logró diferenciar la polarización en las dos salidas cuando se tiene una única señal de entrada.

6 CONCLUSIONES

En el desarrollo de este trabajo se obtuvieron diferentes logros enfocados en la fotolitografía y tecnologías de micro fabricación de dispositivos integrados. Al término del trabajo experimental se lograron dos resultados principales:

- I. Obtención de un sistema de escritura directa láser con luz visible con posibilidad de fabricar dispositivos en dos y tres dimensiones, de bajo costo, alta versatilidad para diferentes aplicaciones, resoluciones nanométricas y posibilidad de actualización y expansión.
- II. Demostración de confinamiento de luz en estructuras tipo guía de onda con bajo contraste de índice de refracción.

De estos dos resultados principales se desglosan algunos resultados no menos importantes:

- i. Desarrollo de un método de fotolitografía híbrida con poca a nula bibliografía, basado en la doble exposición de resina SU-8 a longitudes de onda en diferente absorción.
- ii. Aplicación del método de fotolitografía híbrida para fabricación de si positivos embebidos.
- iii. Diversificación de geometría de estructuras fabricadas tipo guía de onda dependiente de la polarización del haz de incidencia 0, con control de orientación.
- iv. Confinamiento de luz en estructuras birrefringentes de bajo contraste de índice de refracción.
- v. Modificación y cuasi control de la polarización de onda propagada por dispositivos mediante birrefringencia y evolución de birrefringencia.

Como conclusión general de este trabajo se destaca la posibilidad de implementar un método de fabricación de dispositivos fotónicos de bajo costo, con materiales y equipo básicos. El proceso de fotolitografía innovador establecido es sin duda funcional y práctico, siendo fácil de desarrollar dentro de un laboratorio. Permite fabricar dispositivos con repetitividad y con resolución de 2 μm y alcance mayor a 50 μm .

Tabla 6.1: Capacidades de escritura del sistema para aplicación como guías de onda.

	ESTRUCTURA CILÍNDRICA	ESTRUCTURA BIRREFRINGENTE	GUÍA QUIRAL
DIÁMETRO MÍNIMO (μm)	8	3.5	<3.5
DIÁMETRO MÁXIMO (μm)	100	58	<58

A modo de resumen de resultados se obtuvo un método híbrido de fotolitografía por doble exposición en luz visible y ultravioleta se optimizó y adaptó a la fabricación de guías de onda ópticas. Las dimensiones alcanzadas son adecuadas para lograr la propagación de luz visible o infrarroja, en régimen multimodal o monomodal. Posteriormente se extendió para realizar estructuras similares

a quirales, mismas que pueden emplearse como guías de onda aún con el bajo contraste de índice de refracción ocasionado por la doble exposición.

Comparando el sistema con otros métodos de escritura directa láser [5, 6, 7, 9, 30, 31], este resulta más eficiente dado que la potencia de emisión láser total se encuentra por debajo de los 40 mW, y la potencia incidente se midió entre 2 y 4 mW antes del objetivo de microscopio.

Conforme a los resultados mencionados arriba se puede concluir que:

Es posible y factible la implementación del método de fotolitografía híbrido con versatilidad para generar estructuras fotónicas. Sus capacidades son similares a sistemas reportados con láseres pulsados pero con un láser continuo común y por una fracción del costo de un elaborado sistema de láser pulsado.

Se demostró que es posible generar estructuras con bajo contraste de índice de refracción y posteriormente acoplar y guiar luz en ellas. Esto indica que las estructuras fabricadas son efectivamente guías de onda, y por lo tanto implica que el proceso y el sistema junto con las caracterizaciones pueden emplearse para fabricación de dispositivos variados. Haciendo uso de este tipo de estructuras se posibilita el desarrollo de dispositivos de fotónica integrada u ópticamente activos.

Con los resultados obtenidos en las pruebas con los acopladores quirales, no es posible asegurar que en realidad se fabriquen estructuras quirales como las que actualmente se encuentran reportadas en otros textos [17, 18, 19, 29]. Sin embargo, se tiene un comportamiento notorio que muestra cambios en la polarización de una guía de onda recta respecto a una con evolución en la birrefringencia. Para clasificar correctamente el tipo de estructura se requiere mucho más análisis con métodos más elaborados (comparación de fases, medición de dispersión, análisis selectivo de polarización de relación entrada-salida) que midan con precisión los cambios en orientación y fase. Esto puede ayudar a determinar el momento orbital y momento de spin de la onda en las estructuras. Estas pruebas quedan fuera del alcance de este trabajo de investigación por su complejidad teórica y experimental.

Finalmente, con la sumatoria de resultados, se establecieron los parámetros para la fabricación de elementos con comportamiento especial en polarización. El control de polarización del haz de escritura posibilita fabricar estructuras birrefringentes y quirales. La birrefringencia en una guía de onda dota de características de propagación selectivas en polarización. La quiralidad de una guía de onda permite modificar la orientación de polarización y características de propagación dentro de ella. En conjunto esto implica que se tiene la capacidad de modificar y controlar tanto el estado de la polarización (guía birrefringente recta) como la orientación de esta (guía quiral).

6.1 TRABAJO A FUTURO

Una parte fundamental que quedó fuera del alcance de este trabajo de investigación consiste en la caracterización óptica detallada de los dispositivos fabricados. Las pruebas principales que podrían implementarse serían:

Conclusiones

- 1) Caracterización espectral y análisis de pérdidas del dispositivo.
- 2) Caracterización extensiva de propagación con diferente estado de polarización de la luz acoplada a la entrada para diferentes quiralidades.
- 3) Comprobar los efectos espectrales de propagación en las estructuras quirales.
- 4) Descripción matemática de la propagación.

Posterior a la caracterización de los efectos de transmisión ocasionados, se consideraría evaluar la continuidad del proyecto en dos vertientes diferentes:

- a. Continuar con el método para fabricar dispositivos integrados en dos y tres dimensiones en resinas fotosensibles.
- b. Extender el sistema y el método para fotolitografía en cristales fotónicos y vidrios.

Para ambos casos la idea es fabricar dispositivos integrados como acopladores, resonadores, discriminadores, etc., que posteriormente puedan emplearse en sensores, multiplexores, o cualquier dispositivo integrado posible en la tendencia de *circuitos fotónicos*. Entre las posibles aplicaciones hay posibilidades amplias y variadas, abarcando desde biomedicina hasta sistemas de comunicaciones y tratamiento de señales.

Mejorar el sistema de fabricación utilizando un sistema más robusto, insensible a vibraciones propias del sistema y provenientes del entorno, software de control de forma que la fabricación se realice con base en un CAD y en un ambiente más controlado.

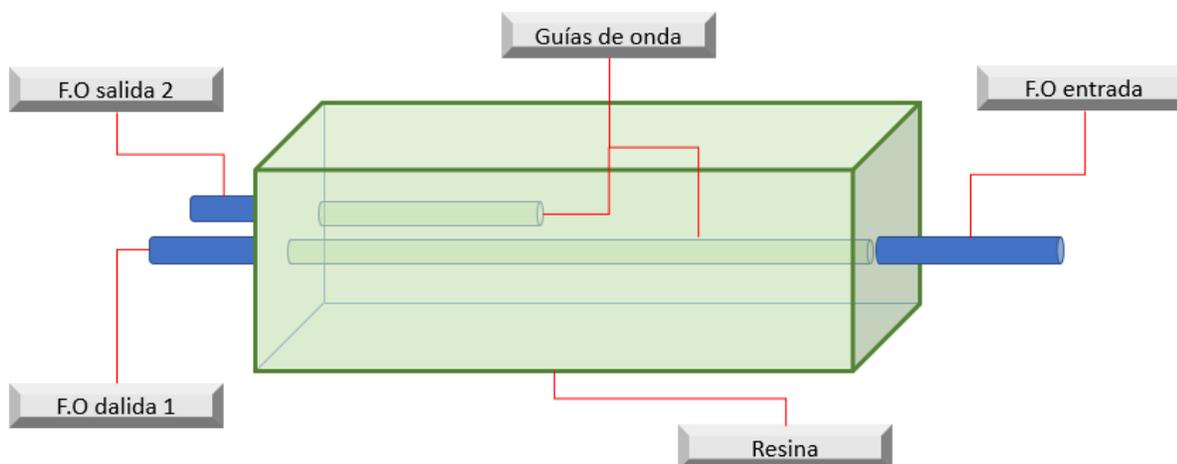


Fig. 6.1: Acoplador de guías de onda acoplado a fibras ópticas de entrada y salida.

Un aspecto que no se probó y definiría una nueva forma de fabricación consiste en la integración de fibras ópticas a la muestra (ver Fig. 6.1). De esta forma se sustituye el procedimiento de acoplamiento de luz por uno más sencillo y posiblemente, con mejores resultados. Además, se mejoraría la portabilidad y compatibilidad de los dispositivos fabricados.

APÉNDICES

APÉNDICE 1: CONCEPTOS FUNDAMENTALES

CONFINAMIENTO DE LUZ

Para estudiar el fenómeno de reflexión y refracción de señales luminosas se puede utilizar un método simplificado mediante el modelo de la luz bajo la suposición de trayectorias de rayos y fundamentos geométricos. En este modelo se considera a la señal luminosa como un conjunto de rayos que forman haces de luz viajando en trayectorias rectas y con dirección definida; generalmente las señales ópticas se representan con una flecha en la dirección de propagación. Mediante este modelo se pueden representar las ondas incidentes, reflejadas y refractadas. A estas representaciones se les conoce como *óptica geométrica*.

La luz es una onda electromagnética (EM) que generalmente se propaga por un medio con propiedades determinadas y posee un frente de onda plano y con frecuencia, amplitud y longitud de onda definidas. Al incidir en otro material con propiedades distintas, existe la posibilidad de que la onda se descomponga en dos partes: una onda reflejada y una transmitida. La onda transmitida tendrá un cambio de dirección en su propagación debido al cambio de las propiedades del nuevo material, siendo llamado este fenómeno refracción. En cuanto a la onda reflejada, esa se reflejará con el mismo ángulo de incidencia con respecto a la normal de la interfaz de los materiales, pero dirección opuesta. El comportamiento de la luz debido a estos efectos se puede observar en la Fig. A

La propiedad de los materiales que causa el cambio de velocidad a la que viaja la luz dentro de ellos, y a su vez causa la refracción, se llama índice de refracción (n). Este se define matemáticamente como la razón entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío (c_0) y la velocidad de la luz en el material (c), tal cual se muestra en la Ecuación I recuperada de [13].

$$n = \frac{c_0}{c}$$

Ecuación I

El conocimiento del índice de refracción dentro de la óptica geométrica es muy útil para definir la propagación de ondas de luz. Una vez definida esta propiedad, se puede proceder a definir las leyes

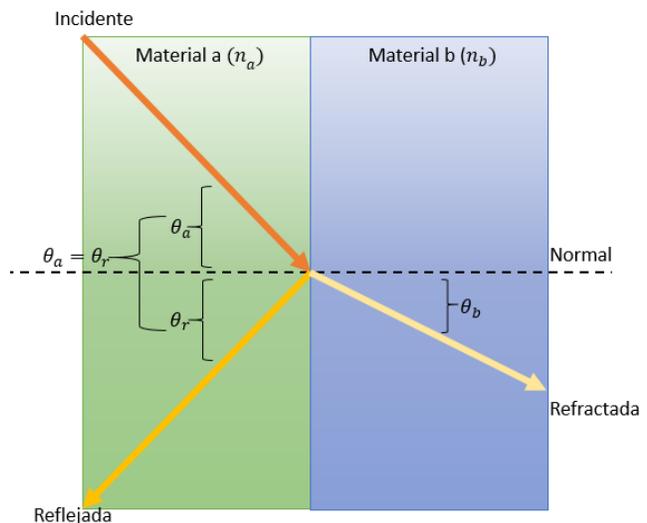


Fig. A: Reflexión y refracción utilizando el modelo de óptica geométrica.

de reflexión y refracción al analizar la interacción de un haz de luz monocromático [13]. Estas leyes se definen a continuación y se apoyan en la Fig. A

Ley de reflexión: Los ángulos que forman la onda incidente (θ_a) y la onda reflejada (θ_r) con la normal de la interfaz de dos materiales son iguales para cualquier longitud de onda y para cualquier par de materiales.

$$\theta_a = \theta_r \quad \text{Ecuación II}$$

Ley de refracción o ley de Snell: En una interfaz de dos materiales, a y b , la razón del seno de los ángulos de incidencia y transmitido (θ_b) que se forma entre cada haz y la normal de la interfaz, es igual al inverso del cociente de los coeficientes de refracción n_a y n_b . [13, 11]. Esto se describe a continuación:

$$\frac{\text{sen } \theta_a}{\text{sen } \theta_b} = \frac{n_b}{n_a} \quad \text{Ecuación III}$$

De la ley de Snell puede obtenerse un caso en el que la totalidad de la onda incidente sobre una interfaz de los dos materiales se refleje sin generar una onda refractada. Para que suceda esto primeramente se debe cumplir la condición $n_a > n_b$.

Por lo tanto, el cociente n_a/n_b al ser mayor a uno, obliga a la existencia de un ángulo crítico formado entre el rayo incidente y la normal de la interfaz a, b . Aplicando este caso particular de la ley de Snell en donde no existe una onda refractada en la Ecuación III, se tiene que el ángulo $\theta_b = 90$ y resolviendo $\text{sen } \theta_b = 1$ se simplifica la ecuación para obtener el ángulo crítico:

$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_b}{n_a} \quad \text{Ecuación IV}$$

Entonces, para ángulos mayores al crítico la totalidad de la luz incidente se reflejará hacia el primer material. A este fenómeno se le conoce como “reflexión total interna” [11, 13]. Para un análisis más detallado de la reflexión total interna y la propagación de luz entre dos interfaces, es conveniente utilizar las ecuaciones de Fresnel, que permiten, además de relacionar los ángulos de cada onda, conocer su magnitud considerando la polarización de la onda. Este análisis se hace mediante los coeficientes de transmisión \mathcal{T} y reflexión \mathcal{R} [12].

Comprender el principio de confinamiento de luz y las leyes de la reflexión y refracción es fundamental para realizar el estudio de la propagación de luz en medios guiados como guías de onda.

Guía de onda

Una guía de onda es un cuerpo tubular con corte transversal geométrico usualmente circular o cuadrangular que confina y permite la propagación de una onda electromagnética (EM). La guía de onda generalmente se compone de dos materiales, un dieléctrico como medio de transmisión y un conductor o incluso otro dieléctrico que envuelve al primero y confina la onda EM [1]. El comportamiento de la onda EM dentro de la guía de onda se puede describir con las ecuaciones de Maxwell y representar conceptualmente utilizando el modelo de rayos. Por ejemplo, las ondas se reflejan totalmente en las paredes de la guía en una trayectoria de zigzag como se muestra en la Fig. B.

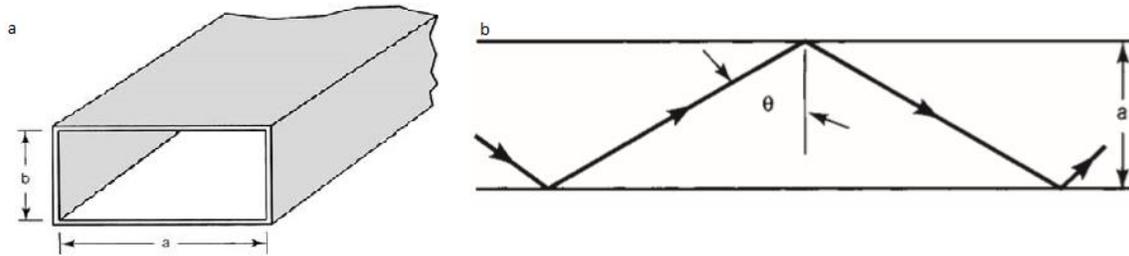


Fig. B: Guía de onda rectangular: (a) corte transversal y (b) propagación de onda EM dentro de la guía de onda por reflexión total interna [1].

Las dimensiones de una guía de onda se definen en función de la frecuencia que transmiten y por lo tanto existe tecnología para variedad de dimensiones como acopladores, detectores y discriminadores para ondas de entre 1 y 220 GHz [2]. Para la propagación de frecuencias más elevadas como el infrarrojo cercano (30 - 300 THz) o la de la luz visible (0.3 - 3 PHz) [1] se aplican consideraciones especiales y se utilizan guías de onda ópticas fabricadas en materiales dieléctricos como medios de propagación.

Guías de onda ópticas

Para señales ópticas se utilizan las fibras ópticas y guías de onda planas que consisten de dos materiales: un **núcleo** (en inglés *core*) con índice de refracción n_a que sirve como medio de transmisión, y un **revestimiento** que lo rodea (en inglés *cladding*) con índice de refracción n_b que sirve de frontera para el confinamiento de la luz. Estos dos materiales deben cumplir con la condición fundamental $n_a > n_b$, enunciada en el principio de reflexión total interna tratado anteriormente.

El esquema básico de una guía de onda óptica se muestra en la Fig. C, donde en el extremo izquierdo de la guía se forma un ángulo entre la trayectoria del haz de luz incidente y la normal del corte transversal de la guía. El ángulo máximo posible en este punto denota la aceptación de luz por la guía y se denomina **apertura numérica (NA)**, por sus siglas en inglés), cuyo valor puede ser calculado por la Ecuación V.

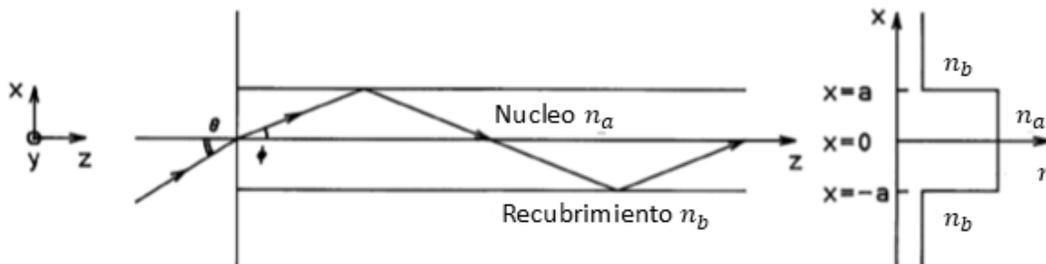


Fig. C: Estructura básica de un haz de luz propagado dentro de una guía de onda plana (izquierda) y perfil de índice de refracción (derecha) [11].

$$NA = \sqrt{n_a^2 - n_b^2}$$

Ecuación V

Es evidente que la luz no siempre va a incidir en la cara de la guía con el ángulo crítico y aun así será aceptada. Si en la Fig. C se suponen más rayos de entrada con ángulo menor al mostrado, también se pueden suponer más rayos propagándose por la guía y reflejándose en sus paredes con diferentes ángulos y por lo tanto con diferentes trayectorias, la afectación que sufre la onda propagada debido a esa diferencia de trayectorias se estudia en los modos de propagación.

Modos de propagación en guías de onda

En la reflexión total interna es matemáticamente imposible que se exceda el ángulo crítico. Sin embargo, si pueden existir ángulos inferiores que resulten como soluciones para propagar la luz, aunque estos no pueden tener valores arbitrarios. Partiendo de ángulos de incidencia discretos dentro de las fronteras de la guía y haciendo un análisis sencillo con óptica de rayos, resulta evidente que para cada ángulo el camino total recorrido por un haz de luz de un extremo a otro de la guía será diferente. Las reflexiones que sufre la onda dentro de la guía determinan el cambio de fase que sufre la onda debido a la diferencia de distancias recorridas, pudiendo ocurrir interferencia constructiva y destructiva entre fases encontradas por cada ángulo de reflexión. Dentro de las posibles trayectorias, es de particular interés aquellas en las cuales la fase de la onda es la misma después dos reflexiones, consecuentemente siendo el mismo frente de onda después de este recorrido. Esta condición es conocida como *auto consistencia*⁹, tal como se ejemplifica en la Fig. D

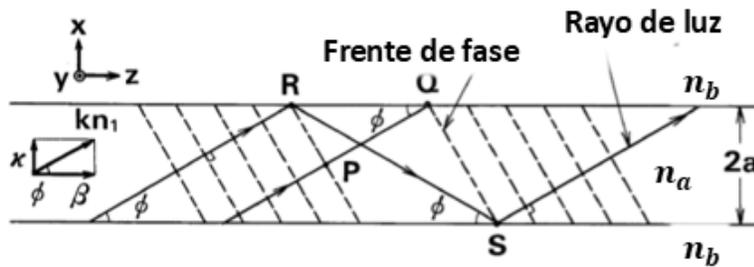


Fig. D: Trayectorias de haces por diferentes reflexiones dentro de una guía de onda y representación del frente de onda [11].

Los caminos que cumplen con la condición de auto consistencia representan las soluciones a la propagación de la luz dentro de la guía de onda. Estas soluciones también son llamadas “*modos de propagación*”.

Asociados a los modos de propagación se encuentran ciertas distribuciones de campo eléctrico. La primera solución o trayectoria más corta es el modo con la distribución de campo más simple y que consiste en una distribución gaussiana, correspondiendo al modo fundamental. Las siguientes soluciones o modos de alto orden poseen una distribución de campo más compleja [11]. En la Fig. E ilustran el modo fundamental y el siguiente modo de alto orden de una guía de onda. Las líneas

⁹ Una onda reflejada dos veces y que se acopla a la onda original se dice que es auto consistente [20]

solidas representan una fase negativa y las punteadas una positiva, a la salida el patrón de interferencia entre las fases genera diferentes distribuciones de campo.

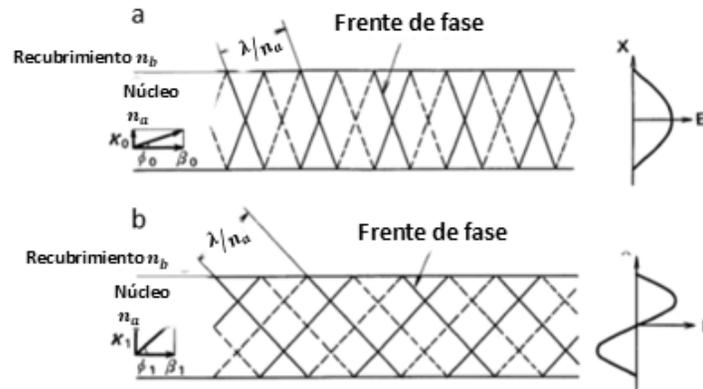


Fig. E: Modos de propagación en una guía de onda. a) Modo fundamental: a la salida de la guía de onda hay un solo máximo de intensidad en el centro. b) Modo de alto orden: a la salida de la guía hay dos máximos de intensidad y la fase entre ellos es opuesta [11].

El número de modos que puede transmitir una guía de onda depende de la longitud de onda de la señal transmitida, el contraste de índice de refracción de la guía y las dimensiones de esta. El número M en la Ecuación VI es equivalente a la cantidad de modos posibles en una guía de onda plana formada por dos superficies paralelas e infinitas y es aplicable, entre otras, para guías de luz [20].

$$M \cong \frac{2d}{\lambda_0} NA \quad \text{Ecuación VI}$$

donde d es el diámetro de la guía de onda y λ_0 es la longitud de onda de transmisión.

El símbolo \cong indica que se toma el entero inmediato superior, por lo tanto, no puede ser menor que uno. De darse el caso en que $(2d/\lambda_0)NA < 1$, esto indica que se rompe la condición de auto consistencia, por lo tanto, esta longitud de onda no puede ser transmitida por la guía. Para determinar este caso especial se tiene que la frecuencia mínima que puede transmitirse por la guía se expresa como $\nu = \frac{c_0}{2dNA}$ y está definida como frecuencia de corte [11, 13]

Para todo tipo de guías de onda, se utiliza la frecuencia normalizada o parámetro V para analizar la propagación de la señal que confinan. Este parámetro considera aspectos indispensables de propagación del medio, como características de la onda transmitida (longitud de onda), propiedades físicas de la guía (cambios de índice de refracción y dimensiones) [11]. La ecuación que describe este parámetro es la siguiente:

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda_0} NA \quad \text{Ecuación VII}$$

donde a es el radio de la estructura, λ_0 la longitud de onda de propagación y NA es la apertura numérica. Para asegurar propagación monomodal o del modo fundamental, en fibras ópticas y estructuras cilíndricas similares, el parámetro V siempre debe tener valores iguales o menores a 2.405 [20]. Para modos de alto orden cuando $V \gg 1$ se aplica la Ecuación VIII para conocer el número aproximado de modos totales existentes en la estructura [11].

$$M \approx \frac{4}{\pi^2} V^2$$

Ecuación VIII

EFFECTO FOTOELÉCTRICO

El efecto fotoeléctrico es la excitación de electrones de un nivel energético a otro cuando una onda luminosa incide sobre un material, para que el electrón escape de su nivel de energía, primero debe de ganar cierta energía, esta proviene del fotón y depende de la longitud de onda asociada al mismo fotón. Albert Einstein basándose en la hipótesis de Max Planck postuló la existencia de *cuantos* de energía junto con la ecuación que permite conocer la energía asociada a cada *cuanto* o fotón (Ecuación IX):

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Ecuación IX

en donde h es la constante de Planck con valor determinado ($h = 6.626093 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) [13] y f la frecuencia asociada al fotón.

Cuando el fotón con energía E llega hasta la superficie la totalidad de su energía se transfiere al electrón o no transfiere nada, es un proceso binario. Este proceso depende de la energía del fotón y la diferencia entre los niveles de energía del material (bandgap). Si la energía del fotón coincide con la energía entre niveles electrónicos, este será absorbido y por consiguiente el electrón cambiará de estado. De la ecuación, cuanto mayor es la frecuencia del fotón, mayor será la energía que podrá ser transferida al electrón y, por lo tanto, el salto de nivel de energía podrá ser mayor.

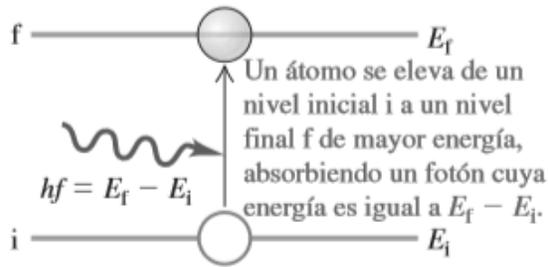


Fig. F: Un electrón absorbe la energía de un fotón [13]

La Fig. F es un esquema del fenómeno de absorción de energía: un electrón es impactado por un fotón y aumenta su nivel de energía, E_i y E_f son los niveles de energía *inicial* y *final* que tiene el electrón.

El concepto de niveles de energía discretos lo introdujo Bohr en su hipótesis en la que plantea que cada átomo puede existir solamente con niveles específicos de energía interna. Un átomo puede tener una energía interna igual a cualquiera de esos niveles, pero nunca una intermedia [32, 13].

APÉNDICE 2: DESCRIPTION OF SU-8

Description of SU-8

D. M. Altpeter

1 Description of SU-8

Many MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) devices require processing of thick photoresist for new microstructures with high aspect ratios [2]. SU-8 has enabled the development of many new MEMS devices. Thanks to its high sensitivity, chemical resistance and compatibility with electroplating SU-8 appears to be an ideal photoresist for MEMS fabrication. There are already many examples of its use as material for micromolds, packaging and devices. [3]

It has been originally developed, and patented by IBM-Watson Research Center (Yorktown Height-USA, US Patent No.4882245 (1989) and others). In 1996 the material has been adapted for MEMS applications by EPFL-Institute of Microsystems and IBM-Zurich (CH). [4]

The properties of epoxy-novolack Epon SU-8 are as follows:

- Low molecular weight
- Good solubility
- High transparency
- Glass and film formation
- Low glass transition temperature (T_g)
- Highly viscous solutions
- Ultra thick layers up to 500 μm by single coating
- Highly uniform coating
- Low edge bead
- Vertical sidewalls
- Aspect ratio > 15
- A excellent chemical resistance
- Good biocompatibility [5, 6]

In appendix B the mechanical, physical and electromagnetic properties are given an indication of their values.

The resist consists of a polymeric epoxy resin by dissolving in an organic solvent and adding a photoacid generator.

The SU-8 consists of 3 basic components:

- a) An epoxy, which is available at Shell Chemicals, called Epon SU-8.
- b) A solvent, called gamma-Butyrolactone (GBL), see Fig. 1-2.
- c) A photoacid generator taken from the family of the triarylium-sulfonium salts (Fig. 1-2).

The molecule in Fig. 1-1 is “idealized” because in reality the molecules exist in a wide variety of sizes and shapes.

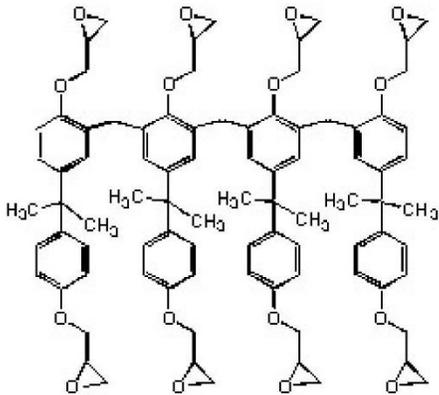


Fig. 1-1 SU-8 molecule with epoxy groups. Also, that on average a single molecule contains 8 epoxy groups, hence the “8” in SU-8. [4]

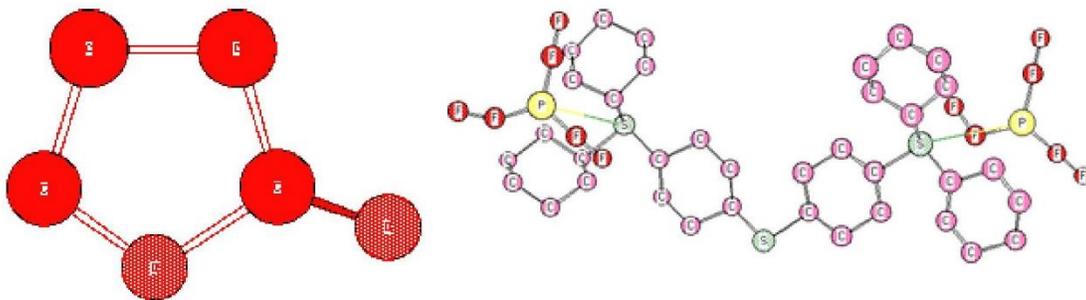


Fig. 1-2 Components of the resist SU-8.

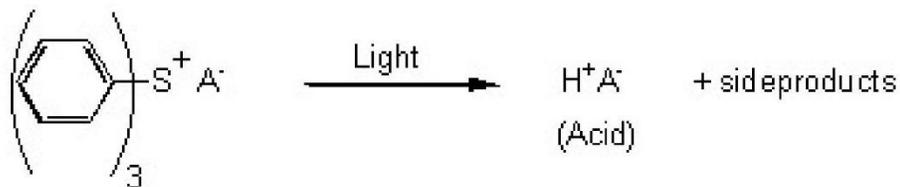
a) The solvent of SU-8. [4]

b) The photoacid generator of SU-8. [4]

Because of the good mechanical/chemical stability the SU-8 can be used as building material for devices.

1.1 Chemical reaction

On the basis of the exposure runs the followed reaction, the photoimaging mechanism can be described by the equation below:



Eq. 1.1-1 Photoimaging mechanism during the exposure. [1]

Photoacid, designated H^+A^- in the above, is photochemically produced in the solid photoresist film upon absorption of light. The photoacid acts as a catalyst in the subsequent cross-linking reaction that takes place during Post-Exposure-Bake (PEB). In other words, the exposed resist contains acid catalyst, while the unexposed resist doesn't (negative photoresist).

The following PEB is responsible for the cross-linking mechanism in the SU-8 layer. The bake is necessary because the reaction kinetic of the cross-linking mechanism is very slow at ambient temperature. Heating the solid above its glass transition temperature ($T_g=55^\circ C$) the molecular motion is increased, and therefore assist the cross-linking process. (For a polymer, T_g is the temperature at which the transition between solid glass and viscous fluid occurs). [1]

The cross-linking reaction which is catalyzed by acid takes place in a "zipping up" fashion, where each epoxy group can react with another epoxy group, either in the same or different molecule. Cross-linking does not occur in the absence of acid, at the temperature of the PEB. Extensive cross-linking will yield a dense network since as described above each epoxy is "pre-connected" to 7 others on the average. This dense network is insoluble in the developer. The reaction is illustrated in Fig. 1-3:

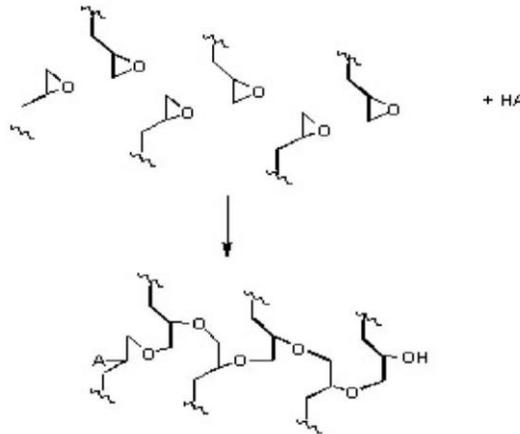


Fig. 1-3 The cross link reaction during the post exposure bake. [1]

The PEB must be carried out at temperatures greater than T_g in order to be effective. Due to this the resist film properties will change in several ways [1]:

- (1) Some shrinking will inevitably occur due to reduction in free volume and increase in density.
- (2) The T_g will also rise as the film becomes increasingly cross linked.

Cross-linking proceeds the film gradually until the film is solid and the cross link reaction will slow down and eventually stop. Therefore, the final T_g of the material is dependent on the PEB temperature.

1.2 SU-8 100 process scheme

A complete SU-8 process consists of: spin coat, soft bake, exposure, post expose bake and development. A controlled hard bake is recommended to further cross-link the imaged SU-8 structures if they are supposed to remain part of the device. The variables of the process should be optimized for the specific application, which will be treated in the next sections. [1]

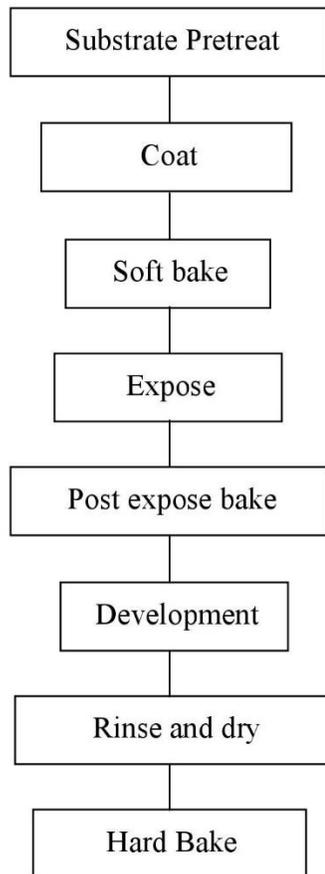


Fig. 1-4 Process SU-8 100 scheme.

2 References

- [1] www.microchem.com
- [2] Chang H., Kim Y.: UV-LIGA for high aspect ratio structure using stress barrier and C-shaped etch hole. *Sensors and Actuators*, 2000, 84, pp. 342-350.
- [3] Lorenz H. et al: mechanical characterization of a new high-aspect-ratio neat UV-photoresist. *Microelectronic Engineering*, 1998, 41/42, pp. 371-374.
- [4] www.somisys.ch/microfluidics.htm
- [5] marc.heuschkel@epfl.ch
- [6] <http://aveclafaux.freeservers.com/SU-8.html>

APÉNDICE 3: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DIODO LÁSER THORLABS DJ532-40

THORLABS

DPSS Laser Diode

DJ532-40



Description

Thorlabs' DJ532-40 is a compact diode-pumped solid state (DPSS) green laser diode module comprised of a combination of Nd:YVO4 and KTP crystals, pumped by a 808 nm laser diode. The front window is made from wedged filter glass, which blocks the IR source light and hermetically seals the module. This laser diode is compatible with both the AD9.5F collimator adapter and M9 thread adapters, such as the S1TM09.

A DPSS laser diode can be used as a typical semiconductor laser diode, and all precautions when handling a semiconductor laser diode apply to a DPSS laser diode as well. The properties of a DPSS laser diode differ from those of a typical laser diode in two ways:

- 1) A DPSS has a narrow operation temperature range. The efficiency of the nonlinear effect of the laser crystals is sensitive to the operation temperature.
- 2) A DPSS outputs a single mode laser beam, which has a much smaller divergence angle than a typical semiconductor laser diode.

Specifications

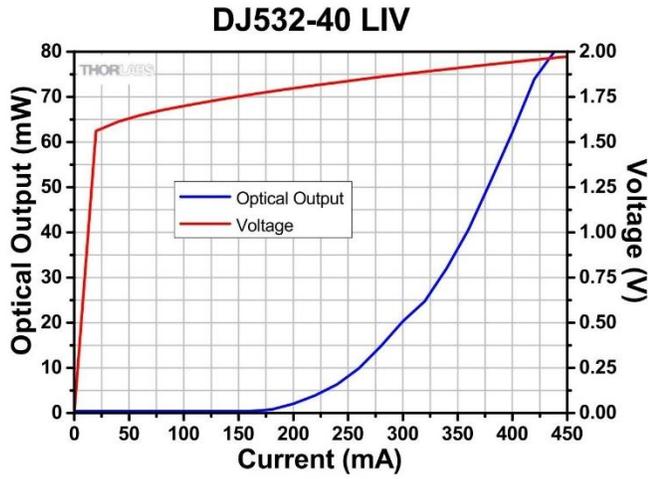
DJ532-40 Specifications ^a				
	Symbol	Min	Typical	Max
Center Wavelength	λ_o	531 nm	532 nm	533 nm
Optical Output Power	P_o	-	40 mW	50 mW
Beam Divergence, Full Angle	θ	-	12 mrad	15 mrad
Slope Efficiency	η	0.1 W/A	0.2 W/A	-
Operating Current @ P_o	I_{op}	-	330 mA	400 mA
Operating Voltage @ P_o	V_{op}	-	1.9 V	2.2 V



a. Unless otherwise noted, all measurements are performed at 25 °C ambient temperature.

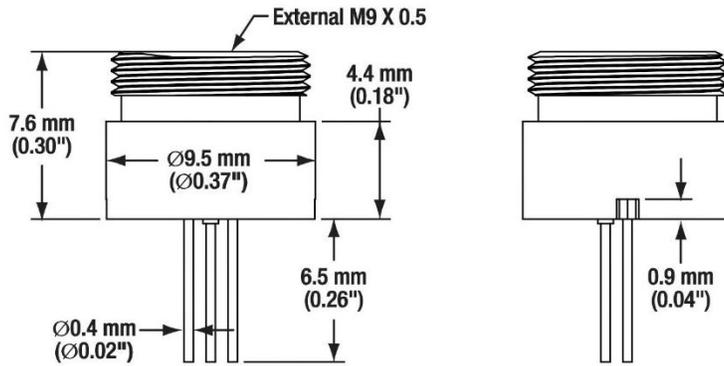
Absolute Maximum Ratings	
LD Reverse Voltage	2 V
Operating Temperature	20 to 25 °C
Storage Temperature	-30 to 70 °C
Pin Code	5E

Performance Plot

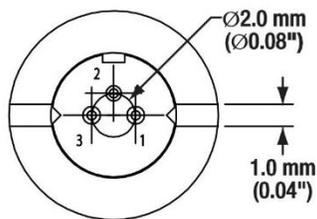


Drawings

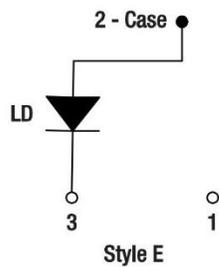
Side View



Bottom View

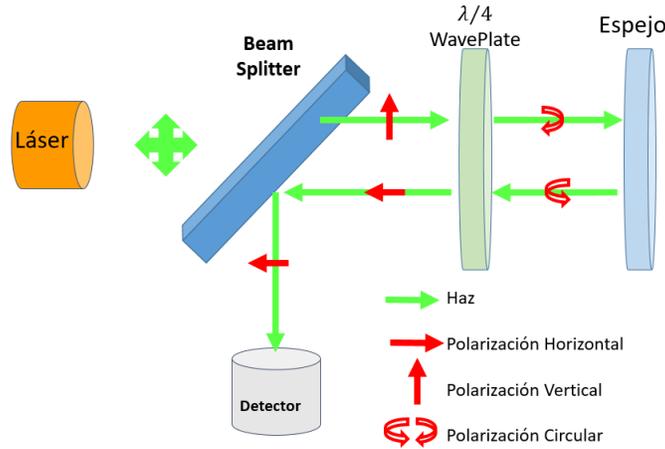


Pin Diagram



APÉNDICE 4: LOGRANDO UNA POLARIZACIÓN CIRCULAR

Asegurar una polarización circular y controlar el perfil del haz de escritura con el fin de lograr las estructuras deseadas es indispensable para el sistema. Para esto se montó una configuración especial con los elementos ópticos con los que se contaba y garantizara resultados confiables. Este arreglo tenía como fin el discriminar la onda según su estado de polarización, tal como se muestra en el siguiente diagrama:



Procedimiento

1. Hacer pasar la luz láser a través del divisor de haz polarizado.
2. Situar un espejo en la trayectoria horizontal después del divisor de haz y, colocar el fotodetector de silicio en la trayectoria vertical después del divisor de haz.
3. Colocar el polarizador lineal entre el divisor de haz polarizado y el espejo y orientarlo radialmente para obtener una lectura máxima en el fotodetector del camino vertical; esto indica una polarización lineal que denominaremos **A** y que llega al divisor de haz proveniente del espejo.
4. Colocar el retardador de $\lambda/4$ entre el polarizador lineal y el espejo, orientarlo radialmente en una lectura mínima; esto indica una polarización lineal **B** perpendicular a que llega al divisor de haz proveniente del espejo. El cambio de máximo a mínimo en la lectura implica un cambio de sentido de polarización inducido por el espejo. Dadas las consideraciones que se mencionan posteriormente, esto solo ocurre cuando el espejo recibe una polarización circular y refleja otra circular con sentido inverso.

Consideraciones

- * El espejo no cambia el estado de polarización, pero sí modifica el sentido.
- * El retardador de $\lambda/4$ solo entrega una polarización circular si se orienta a 45° respecto a una polarización lineal de entrada.
- * El retardador de $\lambda/4$ transforma una polarización circular en lineal a 45° de su eje.

APÉNDICE 5: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SU-8



NANO™ SU-8

Negative Tone Photoresist Formulations 50-100

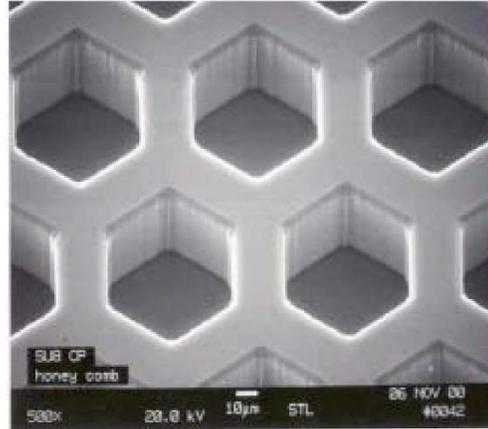
- **High aspect ratio imaging with near vertical side walls**
- **Near UV (350-400nm) processing**
- **Film thicknesses from 1 to >200µm with single spin coat processes**
- **Superb chemical and temperature resistance**

SU-8 is a high contrast, epoxy based photoresist designed for micromachining and other microelectronic applications, where a thick chemically and thermally stable image is desired. The exposed and subsequently cross-linked portions of the film are rendered insoluble to liquid developers. SU-8 has very high optical transparency above 360nm, which makes it ideally suited for imaging near vertical sidewalls in very thick films. SU-8 is best suited for permanent applications where it is imaged, cured and left in place.

Process Guidelines

SU-8 is most commonly processed with conventional near UV (350-400nm) radiation, although it may be imaged with e-beam or x-ray. i-line (365nm) is recommended. Upon exposure, cross-linking proceeds in-two-steps (1) formation of a strong acid during the exposure process, followed by (2) acid-initiated, thermally driven epoxy cross-linking during the post exposure bake (PEB) step.

A normal process is: spin coat, soft bake, expose, post expose bake (PEB) and develop. A controlled hard bake is recommended to further cross-link the imaged SU-8 structures when they it will remain as part of the device. The entire process should be optimized for the specific application. A baseline process is given here to be used as a starting point.



Honeycomb structure in thick SU-8 resist



Substrate Pretreatment

To obtain maximum process reliability, substrates should be clean and dry prior to applying the SU-8 resist. Start with a solvent cleaning, or a rinse with dilute acid, followed by a DI water rinse. Where applicable, substrates should be subjected to a piranha etch / clean (H₂SO₄ & H₂O₂). To dehydrate the surface, bake at 200°C for 5 minutes on a hotplate. For applications that require electroplating and subsequent removal of SU-8 apply MicroChem’s OmniCoat prior to processing SU-8.

Coat

SU-8 resists are designed to produce low defect coatings over a very broad range of film thickness. The film thickness versus spin speed data displayed in Table 1, and Figure 1, provide the information required to select the appropriate SU-8 resist and spin conditions, to achieve the desired film thickness.

The recommended coating conditions are:

- (1) STATIC Dispense: Approximately 1ml of SU-8 per inch of substrate diameter.
- (2) Spread Cycle: Ramp to 500 rpm at 100 rpm/second acceleration. Hold at this speed for 5-10 seconds to allow the resist to cover the entire surface.
- (3) Spin Cycle: Ramp to final spin speed at an acceleration of 300 rpm/second and hold for a total of 30 seconds.

Product Name	Viscosity (cSt)	Thickness (µms)	Spin Speed (rpm)
		40	3000
SU-8 50	12250	50	2000
		100	1000
		100	3000
SU-8 100	51500	150	2000
		250	1000

Table 1. Thickness vs. spin speed data for selected SU-8 resists.

** Approximate

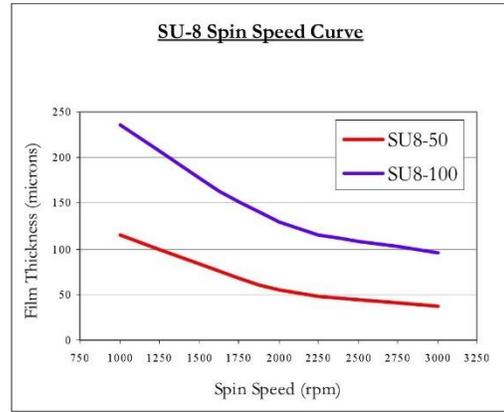


Figure 1. Spin speed vs. thickness curves for selected SU-8 resists.

Soft Bake

After the resist has been applied to the substrate, it must be soft baked to evaporate the solvent and densify the film. SU-8 is normally baked on a level hot plate, although convection ovens may be used. The following bake times are based on contact hot plate processes. Bake times should be optimized for proximity and convection oven bake processes since solvent evaporation rate is influenced by the rate of heat transfer and ventilation.

For best results, ramping or stepping the soft bake temperature is recommended. Lower initial bake temperatures allow the solvent to evaporate out of the film at a more controlled rate, which results in better coating fidelity, reduced edge bead and better resist -to-substrate adhesion. Refer to Table 2, for TWO STEP contact hot plate process recommendations.

Product Name	Thickness (µms)	Pre-bake (@ 65° C)	Softbake (@ 95° C)
	40	5	15
SU-8 50	50	6	20
	100	10	30
	100	10	30
SU-8 100	150	20	50
	250	30	90

Table 2. Recommended soft bake parameters

Expose

SU-8 is optimized for near UV (350-400nm) exposure. i-line exposure tools are recommended. SU-8 is virtually transparent and insensitive above 400nm but has high actinic absorption below 350nm. This can be seen in Figure 2. Excessive dose below 350nm may, therefore, result in over exposure of the top portion of the resist film, resulting in exaggerated negative sidewall profiles or T-topping. The optimal exposure dose will depend on film thickness (thicker films require higher dosage) and process parameters. The exposure dose recommendations in Table 3. are based on source intensity measurements taken with an i-line (365nm) radiometer and probe.

Expose tip: When using a broad spectral output source, for best imaging results, i.e. straightest sidewalls, filter out excessive energy below 350nm.

Catastrophic adhesion failure, severely negative sidewalls and excessive cracking often indicate an under cross-linking condition. To correct the problem, increase the exposure dose and/or increase the post exposure bake (PEB) time.

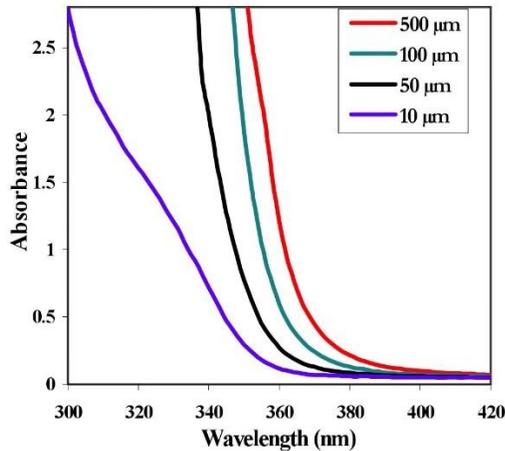


Figure 2. SU-8 absorbance vs. film thickness

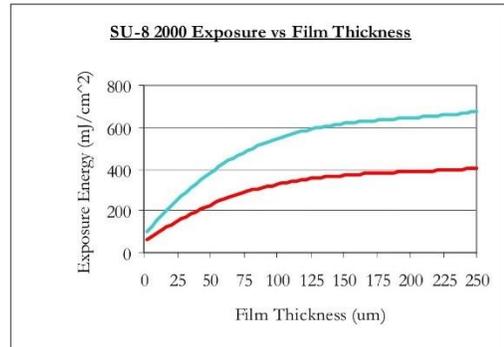


Table 3. Recommended exposure dose processes

Post Exposure Bake

Following exposure, a post expose bake (PEB) must be performed to selectively cross-link the exposed portions of the film. This bake can be performed either on a hot plate or in a convection oven. Optimum cross-link density is obtained through careful adjustments of the exposure and PEB process conditions. The bake recommendations below are based on results obtained with a contact hot plate.

PEB tip: SU-8 is readily cross-linked and can result in a highly stressed film. To minimize stress, wafer bowing and resist cracking, a slow ramp or TWO STEP contact hot plate process, as shown in Table 4., is recommended. Rapid cooling after PEB should be avoided.

Product Name	Thickness (μms)	PEB 1 @65°C	PEB 2 @95°C
SU-8 50	40	1	4
	50	1	5
	100	1	10
SU-8 100	100	1	10
	150	1	12
	250	1	20

Table 4. Recommended post exposure bake parameters

Develop

SU-8 resists have been optimized for use with MicroChem's SU-8 Developer. Immersion, spray or spray- puddle processes can be used. Other solvent based developers such as ethyl lactate and diacetone alcohol may also be used. Strong agitation is recommended for high aspect ratio and/or thick film structures. Recommended develop times are given in Table 5. for immersion processes. These proposed develop times are approximate, since actual dissolution rates can vary widely as a function of agitation rate, temperature and resist processing parameters.

Product Name	Thickness (µms)	Development (minutes)
	40	6
SU-8 50	50	6
	100	10
	100	10
SU-8 100	150	15
	250	20

Table 5. Recommended develop processes

Rinse and Dry

Following development, the substrate should be rinsed briefly with isopropyl alcohol (IPA), then dried with a gentle stream of air or nitrogen.

Rinse tip: If a white film is produced during rinse, this is an indication that the substrate has been under developed. Simply immerse or spray the substrate with SU-8 developer to remove the film and complete the development process. Repeat the rinse step

Hard Bake (cure)

SU-8 has good mechanical properties, therefore hard bakes are normally not required. For applications where the imaged resist is to be left as part of the final device, the resist may be ramp/step hard baked between 150-200°C on a hot plate or in a convection oven to further cross link the material. Bake times vary based on type of bake process and film thickness.

Remove

SU-8, after expose and PEB, is a highly cross-linked epoxy, which makes it extremely difficult to remove with conventional solvent based resist strippers. MicroChem's Remover PG will swell and lift off minimally cross-linked SU-8 2000.

However, if OmniCoat has been applied immersion in Remover PG should effect a clean and thorough Lift-Off of the SU-8 2000 Material. It will not remove fully cured or hard baked SU-8 2000 without the use of OmniCoat. Alternate removal processes include immersion in oxidizing acid solutions such as piranha etch / clean, plasma ash, RIE, laser ablation and pyrolysis.

To remove minimally cross-linked SU-8 2000, or if using Omnicoat, with Remover PG, heat the bath to 50-80°C and immerse the substrates for 30-90 minutes. Actual strip time will depend on resist thickness and cross-link density. For more information on MicroChem Omnicoat and Remover PG please see the relevant product data sheets.

Storage

Store SU-8 resists upright in tightly closed containers in a cool, dry environment away from direct sunlight at a temperature of 40-70°F(4-21°C). Store away from light, acids, heat and sources of ignition. Shelf life is thirteen months from date of manufacture.

Disposal

SU-8 resists may be included with other waste containing similar organic solvents to be discarded for destruction or reclaim in accordance with local state and federal regulations. It is the responsibility of the customer to ensure the disposal of SU-8 resists and residues made in observance all federal, state, and local environmental regulations.

Environmental, Health and Safety

Consult product Material Safety Data Sheet before working with SU-8 resists. Handle with care. Wear chemical goggles, chemical gloves and suitable protective clothing when handling SU-8 resists. Do not get into eyes, or onto skin or clothing. Use with adequate ventilation to avoid breathing vapors or mist. In case of contact with skin, wash affected area with soap and water. In case of contact with eyes, rinse immediately with water and flush for 15 minutes lifting eyelids frequently. Get emergency medical assistance.

The information is based on our experience and is, we believe to be reliable, but may not be complete. We make no guarantee or warranty, expressed or implied, regarding the information, use, handling, storage, or possession of these products, or the application of any process described herein or the results desired, since the conditions of use and handling of these products are beyond our control.



1254 Chestnut Street
 Newton, MA 02464
 tel: (617)965-5511 fax: (617)965-5818
 email: mcc@microchem.com www.microchem.com

Rev. 2/02



www.microchem.com

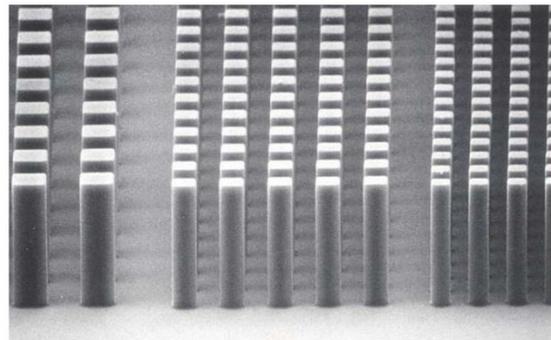
SU-8 2000

Permanent Epoxy Negative Photoresist

PROCESSING GUIDELINES FOR:

SU-8 2000.5, SU-8 2002, SU-8 2005, SU-8 2007, SU-8 2010 and SU-8 2015

SU-8 2000 is a high contrast, epoxy based photoresist designed for micromachining and other microelectronic applications, where a thick, chemically and thermally stable image is desired. SU-8 2000 is an improved formulation of SU-8, which has been widely used by MEMS producers for many years. The use of a faster drying, more polar solvent system results in improved coating quality and increases process throughput. SU-8 2000 is available in twelve standard viscosities. Film thicknesses of 0.5 to >200 microns can be achieved with a single coat process. The exposed and subsequently thermally cross-linked portions of the film are rendered insoluble to liquid developers. SU-8 2000 has excellent imaging characteristics and is capable of producing very high aspect ratio structures. SU-8 2000 has very high optical transmission above 360 nm, which makes it ideally suited for imaging near vertical sidewalls in very thick films. SU-8 2000 is best suited for permanent applications where it is imaged, cured and left on the device.



10 um features, 50 um SU-8 2000 coating

SU-8 2000 Features

- High aspect ratio imaging
- 0.5 to > 200 μm film thickness in a single coat
- Improved coating properties
- Faster drying for increased throughput
- Near UV (350-400 nm) processing
- Vertical sidewalls

Processing Guidelines

SU-8 2000 photoresist is most commonly exposed with conventional UV (350-400 nm) radiation, although i-line (365 nm) is the recommended wavelength. SU-8 2000 may also be exposed with e-beam or x-ray radiation. Upon exposure, cross-linking proceeds in two steps (1) formation of a strong acid during the exposure step, followed by (2) acid-catalyzed, thermally driven epoxy cross-linking during the post exposure bake (PEB) step. A normal process is: spin coat, soft bake, expose, PEB, followed by develop. A controlled hard bake is recommended to further cross-link the imaged SU-8 2000 structures when they will remain as part of the device. The entire process should be optimized for the specific application. The baseline information presented here is meant to be used as a starting point for determining a process.

Process Flow





www.microchem.com

Substrate Preparation

To obtain maximum process reliability, substrates should be clean and dry prior to applying SU-8 2000 resist. For best results, substrates should be cleaned with a piranha wet etch (using H₂SO₄ & H₂O₂) followed by a de-ionized water rinse. Substrates may also be cleaned using reactive ion etching (RIE) or any barrel asher supplied with oxygen. Adhesion promoters are typically not required. For applications that include electroplating, a pre-treatment of the substrate with MCC Primer 80/20 (HMDS) is recommended.

Coat

SU-8 2000 resists are available in twelve standard viscosities. This processing guideline document addresses six products: SU-8 2000.5, SU-8 2002, SU-8 2005, SU-8 2007, SU-8 2010 and SU-8 2015. Figures 1.a. and 1.b. provide the information required to select the appropriate SU-8 2000 resist and spin conditions to achieve the desired film thickness.

Recommended Program

- 1.) Dispense 1 ml of resist for each inch (25mm) of substrate diameter.
- 2.) Spin at 500 rpm for 5-10 seconds with acceleration of 100 rpm/second.
- 3.) Spin at 2000 rpm for 30 seconds with acceleration of 300 rpm/second.

Figure 1.a. SU-8 2000 Spin Speed vs. Thickness

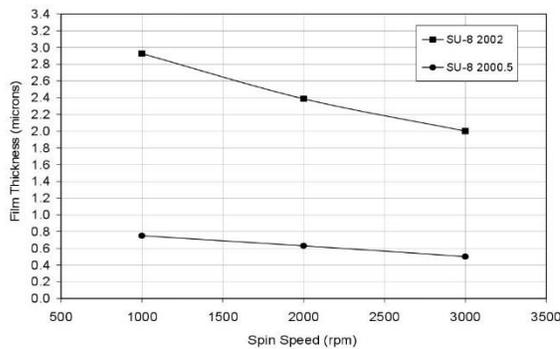


Figure 1.b. SU-8 2000 Spin Speed vs. Thickness

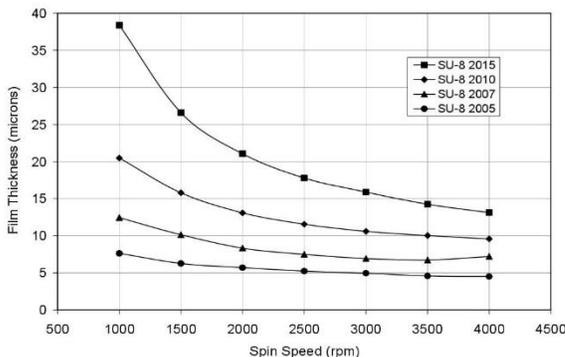


Table 1. SU-8 2000 Viscosity

SU-8 2000	% Solids	Viscosity (cSt)	Density (g/ml)
2000.5	14.3	2.49	1.070
2002	29.00	7.5	1.123
2005	45.00	45	1.164
2007	52.50	140	1.175
2010	58.00	380	1.187
2015	63.45	1250	1.200

Edge Bead Removal (EBR)

During the spin coat process step, a build up of photoresist may occur on the edge of the substrate. In order to minimize contamination of the hotplate, this thick bead should be removed. This can be accomplished by using a small stream of solvent (MicroChem's EBR PG) at the edge of the wafer either at the top or from the bottom. Most automated spin coaters now have this feature and can be programmed to do this automatically.

By removing any edge bead, the photomask can be placed into close contact with the wafer, resulting in improved resolution and aspect ratio.

Soft Bake

A level hotplate with good thermal control and uniformity is recommended for use during the Soft Bake step of the process. Convection ovens are not recommended. During convection oven baking, a skin may form on the resist. This skin can inhibit the evolution of solvent, resulting in incomplete drying of the film and/or extended bake times. Table 2. shows the recommended Soft Bake temperatures and times for the various SU-8 2000 products at selected film thicknesses.

Note: To optimize the baking times/conditions, remove the wafer from the hotplate after the prescribed time and allow it to cool to room temperature. Then, return the wafer to the hotplate. If the film 'wrinkles', leave the wafer on the hotplate for a few more minutes. Repeat the cool-down and heat-up cycle until 'wrinkles' are no longer seen in the film.

THICKNESS	SOFT BAKE TIME
microns	minutes @ 95°C
0.5 - 2	1
3 - 5	2
6 - 15	2 - 3
16 - 25	3 - 4
26 - 40	4 - 5

Table 2. Soft Bake Times



Optical Parameters

The dispersion curve and Cauchy coefficients are shown in Figure 3. This information is useful for film thickness measurements based on ellipsometry and other optical measurements.

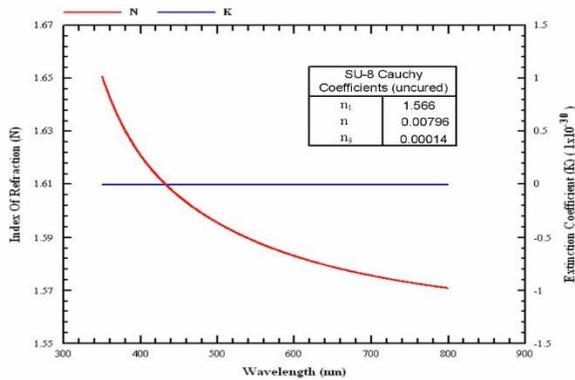


Figure 3. Cauchy Coefficients

Exposure

To obtain vertical sidewalls in the SU-8 2000 resist, we recommend the use of a long pass filter to eliminate UV radiation below 350 nm. With the recommended filter (PL-360-LP) from Omega Optical (www.omegafilters.com) or Asahi Technoglass filters V-42 plus UV-D35 (www.atgc.co.jp), an increase in exposure time of approximately 40% is required to reach the optimum exposure dose.

Note: With optimal exposure, a visible latent image will be seen in the film within 5-15 seconds after being placed on the PEB hotplate and not before. An exposure matrix experiment should be performed to determine the optimum dosage.

THICKNESS microns	EXPOSURE ENERGY mJ/cm ²
0.5 - 2	60 - 80
3 - 5	90 - 105
6 - 15	110 - 140
16 - 25	140 - 150
26 - 40	150 - 160

Table 3. Exposure Dose

	RELATIVE DOSE
Silicon	1X
Glass	1.5X
Pyrex	1.5X
Indium Tin Oxide	1.5X
Silicon Nitride	1.5 - 2X
Gold	1.5 - 2X
Aluminum	1.5 - 2X
Nickel Iron	1.5 - 2X
Copper	1.5 - 2X
Nickel	1.5 - 2X
Titanium	1.5 - 2X

Table 4. Exposure Doses for Various Substrates

Post Exposure Bake (PEB)

PEB should take place directly after exposure. Table 5. shows the recommended times and temperatures

Note: After 1 minute of PEB at 95°C, an image of the mask should be visible in the SU-8 2000 photoresist coating. If no visible latent image is seen during or after PEB this means that there was insufficient exposure, heating or both.

THICKNESS microns	POST EXPOSURE BAKE TIME minutes @ 95°C
0.5 - 2	1 - 2
3 - 5	2 - 3
6 - 15	3 - 4
16 - 25	4 - 5
26 - 40	5 - 6

Table 5. Post Exposure Bake Times

Development

SU-8 2000 photoresist has been designed for use in immersion, spray or spray-puddle processes with MicroChem's SU-8 developer. Other solvent based developers such as ethyl lactate and diacetone alcohol may also be used. Strong agitation is recommended when developing high aspect ratio and/or thick film structures. The recommended development times for immersion processes are given in Table 6. These development times are approximate, since actual dissolution rates can vary widely as a function of agitation

Note: The use of an ultrasonic or megasonic bath may be helpful when developing out via or hole patterns or structures with tight pitch.

THICKNESS	DEVELOPMENT TIME
microns	minutes
0.5 - 2	1
3 - 5	1
6 - 15	2 - 3
16 - 25	3 - 4
26 - 40	4 - 5

Table 6. Development Times for SU-8 Developer

Rinse and Dry

When using SU-8 developer, spray and wash the developed image with fresh solution for approximately 10 seconds, followed by a second spray/wash with Isopropyl Alcohol (IPA) for another 10 seconds. Air dry with filtered, pressurized air or nitrogen.

Note: A white film produced during IPA rinse is an indication of underdevelopment of the unexposed photoresist. Simply immerse or spray the substrate with additional SU-8 developer to remove the white film and complete the development process. Repeat the rinse step.

The use of an ultrasonic or megasonic bath will energize the solvent and allow for more effective development of the unexposed resist.

Physical Properties

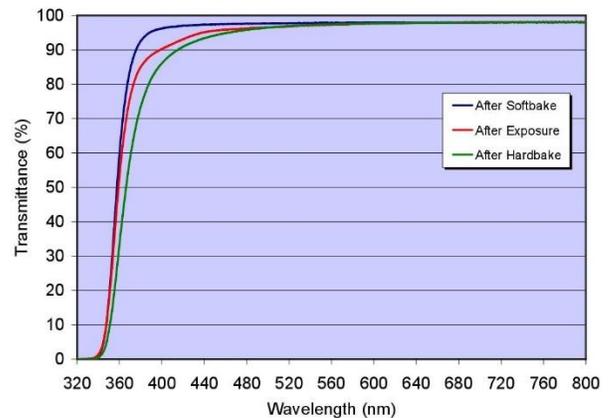
(Approximate values)

Adhesion Strength (mPa) Silicon/Glass/Glass & HMDS	38/35/35
Glass Transition Temperature (Tg °C), tan δ peak	210
Thermal Stability (°C @ 5% wt. loss)	315
Thermal Conductivity (W/mK)	0.3
Coeff. of Thermal Expansion (CTE ppm)	52
Tensile Strength (Mpa)	60
Elongation at break (εb %)	6.5
Young's Modulus (Gpa)	2.0
Dielectric Constant @ 10MHz	3.2
Water Absorption (% 85°C/85 RH)	0.65

Table 7. Physical Properties

Optical Properties

Figure 4. Optical Transmittance



Process conditions for Figure 4.

Softbake: 5 minutes at 95°C
 Exposure: 180 mJ/cm²
 Hardbake: 30 minutes at 300°C

Hard Bake (cure)

SU-8 2000 has good mechanical properties. However, for applications where the imaged resist is to be left as part of the final device, a hard bake can be incorporated into the process. This is generally only required if the final device or part is to be subject to thermal processing during regular operation. A hard bake or final cure step is added to ensure that SU-8 2000 properties do not change in actual use. SU-8 2000 is a thermal resin and as such its properties can continue to change when exposed to a higher temperature than previously encountered. We recommend using a final bake temperature 10°C higher than the maximum expected device operating temperature. Depending on the degree of cure required, a bake temperature in the range of 150°C to 250°C and for a time between 5 and 30 minutes is typically used.

Note: The hard bake step is also useful for annealing any surface cracks that may be evident after development. The recommended step is to bake at 150°C for a couple of minutes. This applies to all film thicknesses.



www.microchem.com

Removal

SU-8 2000 has been designed as a permanent, highly cross-linked epoxy material and it is extremely difficult to remove it with conventional solvent based resist strippers. MicroChem's Remover PG will swell and lift off minimally cross-linked SU-8 2000. However, if OmniCoat (30-100 nm) has been applied, immersion in Remover PG can effect a clean and thorough Lift-Off of the SU-8 2000 material. Fully cured or hard baked SU-8 2000 cannot be removed without the use of OmniCoat.

To remove minimally cross-linked SU-8 2000, or when using OmniCoat: Heat the Remover PG bath to 50-80°C and immerse the substrates for 30-90 minutes. Actual strip time will depend on resist thickness and cross-link density. For more information on MicroChem OmniCoat and Remover PG please see the relevant product data sheets.

To re-work fully cross-linked SU-8 2000: Wafers can be stripped using oxidizing acid solutions such as piranha etch, plasma ash, RIE, laser ablation and pyrolysis.

Plasma Removal

RIE 200W, 80 sccm O₂, 8 sccm CF₄, 100mTorr, 10°C

Storage

Store SU-8 2000 resists upright and in tightly closed containers in a cool, dry environment away from direct sunlight at a temperature of 40-70°F (4-21°C). Store away from light, acids, heat and sources of ignition. Shelf life is thirteen months from date of manufacture.

Disposal

SU-8 2000 resists may be included with other waste containing similar organic solvents to be discarded for destruction or reclaim in accordance with local state and federal regulations. It is the responsibility of the customer to ensure the disposal of SU-8 2000 resists and residues made in observance all federal, state, and local environmental regulations.

Environmental, Health and Safety

Consult the product Material Safety Data Sheet before working with SU-8 2000 resists. Handle with care. Wear chemical goggles, chemical gloves and suitable protective clothing when handling SU-8 2000 resists. Do not get into eyes, or onto skin or clothing. Use with adequate ventilation to avoid breathing vapors or mist. In case of contact with skin, wash affected area with soap and water. In case of contact with eyes, rinse immediately with water and flush for 15 minutes lifting eyelids frequently. Get emergency medical assistance.

The information is based on our experience and is, we believe to be reliable, but may not be complete. We make no guarantee or warranty, expressed or implied, regarding the information, use, handling, storage, or possession of these products, or the application of any process described herein or the results desired, since the conditions of use and handling of these products are beyond our control.

Disclaimer

Notwithstanding anything to the contrary contained in any sales documentation, e.g., purchase order forms, all sales are made on the following conditions:

All information contained in any MicroChem product literature reflects MicroChem's current knowledge on the subject and is, we believe, reliable. It is offered solely to provide possible suggestions for customer's own experiments and is not a substitute for any testing by customer to determine the suitability of any of MicroChem products for any particular purpose. This information may be subject to revision as new knowledge and experience becomes available, but MicroChem assumes no obligation to update or revise any data previously furnished to a customer; and if currency of data becomes an issue, customer should contact MicroChem requesting updates. Since MicroChem cannot anticipate all variations in actual end uses or in actual end-use conditions, it makes no claims, representations or warranties, express or implied including, without limitation any warranty of merchantability or fitness for a particular purpose; and customer waives all of the same. MicroChem expressly disclaims any responsibility or liability and assumes no responsibility or liability in connection with any use of this information including, without limitation, any use, handling, storage or possession of any MicroChem products, or the application of any process described herein or the results desired or anything relating to the design of the customer's products. Nothing in this publication is to be considered as a license to operate under or a recommendation to infringe any patent right.

Caution

This product is not designed or manufactured for, nor is it intended for use in any medical device or for any other medical application. Do not use this product in any medical applications [including, without limitation, any permanent implantation in the human body or any animals (other than laboratory animals used for experimental purposes), or contact with internal body fluids or tissues] unless otherwise expressly and specifically provided for in a written contract between MCC and the customer. The complete MicroChem Medical Disclaimer Statement is available upon request or on the MicroChem website at www.microchem.com.



1254 Chestnut St.
Newton, MA 02464
PHONE: 617.965.5511
FAX: 617.965.5818
EMAIL: sales@microchem.com
www.microchem.com

REFERENCIAS

- [1] W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electronicas*, Pearson Education, 2003.
- [2] D. Pozar, *Microwave Engineering*, New York: Jhon wiley & sons, inc, 1998.
- [3] N. R. Vela, *Líneas de transmisión*, Ciudad de México: McGraw-Hill, 1999.
- [4] K. K. Lee, D. R. Lim, L. C. Kimerling, J. Shin y F. Cerrina, «Fabrication of ultralow-loss Si/SiO₂ waveguides by roughness reduction,» *OSA*, nº 2001, pp. 1888-1890.
- [5] D. T. T. N. M. T. D. M. H. L. B. J. I. L.-R. a. N. D. L. Quang Cong Tong, «Direct laser writing of polymeric nanostructures via optically induced local thermal effect,» *Applied Physics Letters*, vol. 183104, nº 108, 2016.
- [6] P. K. D. & P. Ganguly, «A technical report on fabrication of SU-8 optical waveguides,» *Journal of Optics*, pp. 79-83, Enero - Marzo 2014.
- [7] M. Trang Do, L. Qinggele, T. Thi , N. Ngan , H. Benisty, I. Ledoux-Rak y N. Diep Lai, «High aspect ratio submicrometer two-dimensional structures,» *Microsyst Technol*, nº 20, pp. 2097-2102, 2014.
- [8] G. M. Clifton, *Hybrid Lithography in SU-8: A Masked-Based*, New York, 2017.
- [9] M. Shumann, T. Bückmann, N. Grunhler, M. Wegner y W. Pernice, «Hybrid 2D–3D optical devices for integrated optics by,» *Light: Science & Applications*, 2014.
- [10] M. Y. S. I. V. K. A. A. K. S. S. S. A. S. P. K. I. V. DYAKONOV, «Laser-written polarizing directional coupler,» *Optics Letters*, 13 October 2017.
- [11] K. Okamoto, *Fundamentals of optical waveguides*, London, UK: Elsevier, 2006.
- [12] E. Wolf y M. Farley-Born, *Principles of optics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [13] Y. Hugh D., R. A. Freedman y A. A. Ford, *Física universitaria con física moderna*, México: Pearson Education, 2009.
- [14] F. Träger, *Handbook of Lasers and Optics*, Springer, 2002.
- [15] S. W. Thomson y L. Kelvin, *The molecular tactics of crystal*, Glasgow: Claredon Press, 1894.
- [16] J. Winters, «Looking for the Right Hand,» *Discover*, 1995.

- [17] M. L. N. Chen, L. J. Jiang, W. E. I. Sha, W. C. H. Choy y T. Itoh, «Polarization Control by Using Anisotropic 3-D Chiral Structures,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, pp. 4687 - 4694, 2016.
- [18] *. D. M. B. C. D. Alessandro Zannotti, «Chiral Light in Helically Twisted Photonic Lattices,» *Advanced Optical Materials*, vol. 5, nº 1600629, 2017.
- [19] Department of Physics, The University of Texas at Austin, «Optical polarizer/isolator based on a rectangular waveguide with helical grooves,» *Applied Physics Letters*, vol. 89, nº 141127, 2006.
- [20] M. C. T. Bahaa E. A. Saleh, *Fundamentals of Photonics*, Wiley, 2007.
- [21] IBM, «IBM Research,» IBM, [En línea]. Available: https://researcher.watson.ibm.com/researcher/view_group_subpage.php?id=3662. [Último acceso: 2018 Diciembre 10].
- [22] MicroChem, «MicroChem Products,» [En línea]. Available: http://microchem.com/Prod-SU8_KMPR.htm. [Último acceso: 2018 Diciembre 10].
- [23] Thorlabs, «Thorlabs,» 30 Marzo 2017. [En línea]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5597&pn=DJ532-40. [Último acceso: 17 Noviembre 2017].
- [24] MicroChem, *SU-8 2000 Data Sheet*, Newton, Massachusetts, 2017.
- [25] MicroChem, *SU-8 50-100 Data Sheet*, Newton, Massachusetts, 2017.
- [26] X. Y. a. S. C. T. Biow Hiem Ong, «Adjustable refractive index modulation for a waveguide,» *Applied Optics*, vol. 45, nº 31, 2006.
- [27] K. K. N. M. M. S. Susan Kavita Martham, «Refractive Index Modification of SU-8 Polymer,» *IEEE*, vol. 978, nº 14, 2014.
- [28] J. Nemanja, G. Simon y M. Christopher, «Direct laser written multimode waveguides,» *Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation*, vol. 7739, nº 773923-1, 2010.
- [29] V. I. Kopp, M. W. Jongchul Park y J. Singer., «Chiral Fibers: Microformed Optical Waveguides,» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, pp. 605-613, 04 Febrero 2014.
- [30] M. T. Do, « Fabrication of submicrometer 3D structures by one-photon absorption direct laser writing and applications,» Cachan, 2015.
- [31] D. T. Trang Mnguyen, Q. Cong Tong , I. Ledoux-rak y N. Diep Lai , «One-step fabrication of submicrostructures by low one-photon absorption direct laser,» *Journal of Applied Physics*, vol. 119, 2016.

Referencias

- [32] P. J. Nolan, *Fundamentals of Modern Physics*, New York, 2014.
- [33] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication systems*, New York: Jhon Wiley & Sons, 2002.
- [34] Tele Geography , «Submarine Cable Map,» PriMetrica, Inc., 16 Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.submarinecablemap.com/>. [Último acceso: 19 Mayo 2018].
- [35] M. Milosevic, «On the nature of the evanescent wave,» *Applied Spectroscopy* , vol. 67, nº 2, pp. 126-131, 2013.
- [36] Ocean Optics, «Products Ocean Optics,» [En línea]. Available: <https://oceanoptics.com/product/hr4000-custom/>. [Último acceso: 20 Abril 2018].
- [37] F. D. R. M. P. F. Y. K. I. E. P. d. S. M. N. Y. A. Y. S. T. M. Y. M. L. O. E. S. P. G. D. Z. M. G. K. Hao Hu, «Single-source chip-based frequency comb enabling extreme parallel data transmission,» *Nature Photonics*, p. 469–473, 2018.

