

TESIS DEFENDIDA POR
Juan Jesús Sánchez Sánchez
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. David Salazar Miranda
Director del Comité

Dr. Heriberto Márquez Becerra
Miembro del Comité

Dr. Felipe Francisco Castellón Barraza
Miembro del Comité

Dra. María Del Carmen Maya Sánchez
Miembro del Comité

Dra. Diana Tentori Santacruz
Miembro del Comité

Dr. Serguei Stepanov
*Coordinador del programa de posgrado en
Óptica*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

09 de Enero de 2009

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ÓPTICA CON ORIENTACIÓN EN OPTOELECTRONICA**

Estudio de guías de onda de polímeros ópticos.

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Juan Jesús Sánchez Sánchez

Ensenada, Baja California, México, a Enero del 2009.

RESUMEN de la tesis de **Juan Jesús Sánchez Sánchez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ÓPTICA con orientación en OPTO-ELECTRONICA. Ensenada, Baja California. Agosto de 2008.

ESTUDIO DE GUÍAS DE ONDA DE POLÍMEROS ÓPTICOS.

Resumen aprobado por:

Dr. David Salazar Miranda
Director de Tesis

Se presenta un estudio sobre la fabricación de guías de onda con un polímero óptico, el SU-8. El trabajo parte desde la selección de sustratos y preparación de los mismos para lograr depósitos uniformes y con espesor controlado de los polímeros, requisito para la obtención de guías de onda ópticas. Para ello se hicieron pruebas de depósitos mediante la técnica de centrifugado, analizando el efecto de variar el número de revoluciones y tratamiento térmico de secado. Se caracterizó la dependencia del índice de refracción con los parámetros de depósito. Posteriormente, se procedió a realizar el diseño de guías de onda ópticas planas y de canal en función del espesor, índice de refracción, y llevar a la práctica los diseños propuestos usando la técnica de microlitografía. Se incluye un trabajo de caracterización de las propiedades ópticas de las guías, propagación de la luz, caracterización modal (en guías planas) y un estudio de microscopía electrónica para obtener imágenes de la geometría de las guías y la detección de posibles defectos en las mismas.

Palabras Clave: Guías de onda ópticas, polímeros ópticos, micro-litografía, óptica integrada.

ABSTRACT of the thesis presented by **Sánchez Sánchez Juan Jesús** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in OPTICS with guidance in OPTOELECTRONICS. Ensenada, Baja California, México agosto de 2008.

STUDY OF OPTICAL POLYMER WAVEGUIDES

We present a study on the manufacture of waveguides with a SU-8 polymer. The work starts from the selection of substrates and preparing them to achieve uniform and deposits with controlled thickness of the polymer, a requirement for obtaining optical waveguides. To do so is evidence of deposits made by the spin technique, analyzing the effect of varying the number of revolutions and heat treatment of drying. Saw the reliance of the refractive index with the parameters of the deposit. Subsequently, proceeded to carry out the design of planar optical waveguides and channel depending on the thickness, refractive index, and implement the proposed designs using the microlithography technique. It includes a characterization of the optical properties of the guides, propagation of light, characterization modal (in flat directories) and a study of electron microscopy to obtain images of the geometry of the guides and the detection of possible defects.

DEDICATORIA.

A mis padres, Antonio Sánchez y Mercedes Sánchez por todo su amor, apoyo incondicional y porque hoy en día he logrado todo esto gracias a sus consejos y educación.

A mi hermana, María de la Luz Sánchez, por su apoyo incondicional y por ser la medula espinal que siempre me ha sostenido en esos momentos de angustia y desesperanza.

A mis hermanos, Antonio Sánchez, Fidel Sánchez y Carlos Sánchez, por ser mis ejemplos a seguir y por todos los consejos que me regalaron a lo largo de esta vida.

AGRADECIMIENTOS.

A Dios por darme tantas bendiciones.

A mis padres, hermana y hermanos, por todo lo que me han brindado, ya que aunque lejos, siempre los llevo conmigo dentro de mi corazón.

A momita por todo el apoyo y por estar conmigo en los buenos y malos momentos durante este último año de tesis.

A mi tío Fernando Sánchez por el apoyo económico que se sirvió darme para emprender esta aventura.

Al Dr. David Salazar, porque aparte de ser mi director de tesis, también es mi amigo; por toda la paciencia, consejos y apoyo brindado para poder llegar hasta la meta final.

A mis sinodales:

Dra. Diana Tentori, gracias por la paciencia y consejos para la realización de mi escrito de tesis y por ser parte de mi formación académica a lo largo de estos dos fabulosos años.

Dra. María del Carmen, gracias por ser parte de mi comité de tesis y por prestarme parte de su tiempo para la revisión de mi trabajo, así como también sus valiosos consejos.

Dr. Felipe Castellón, gracias por todo el apoyo brindado para la utilización de los laboratorios del CNyN-UNAM, por compartir conmigo su conocimiento en temas relacionados a la química y por la paciencia para la realización de mi escrito.

Dr. Heriberto Márquez, gracias por darme la oportunidad de formar parte del grupo de óptica integrada y por brindarme todo el apoyo académico y moral a lo largo de este trabajo.

Al grupo de trabajo de óptica integrada, Dra. Georgina Navarrete, Dr. Eric Hernández, M.C. Jessica Ángel, gracias por todo el apoyo moral, técnico y por sus consejos y opiniones sobre este trabajo.

A Manuel Gómez García de la Universidad de Santiago de Compostela, gracias por todo tu apoyo moral, por toda esa “literatura gris” y sobre todo, por compartir tu experiencia de trabajo conmigo.

A Norma Barboza, gracias por haber sido la persona que me indujera y mostrara este camino lleno de satisfacciones y por ser una amiga incondicional quien siempre me brindo su apoyo.

A mis compañeros de generación: Alejandra, Jacob, Arnoldo, Alex, Ricardo y Daniel gracias por compartir estos dos años conmigo y por todos esos ratos tan divertidos que pasamos dentro y fuera del instituto.

A Javier Dávalos por su valiosa ayuda en el pulido de muestras y por sus comentarios que fueron de gran ayuda.

Al Ing. Israel Gradilla, gracias por haberme permitido analizar las muestras fabricadas y por la paciencia y consejos que me dio.

A Marcia Padilla por el uso de equipo de laboratorio que ayudaron a la realización de este trabajo.

Al equipo administrativo y de computo del departamento de óptica muchas gracias por toda la atención que me dieron a lo largo de estos dos años.

A todos mis amigos dentro del instituto tanto doctores como estudiantes, gracias por ser tan amables y por brindarme su alegría a lo largo de estos dos años.

Al CONACYT, por el apoyo económico brindado, # de becario 201223

Al CICESE, por la extensión en el apoyo económico.

Al proyecto de CONACYT # 7642.

CONTENIDO

Resumen español.....	i
Resumen inglés.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Contenido.....	vi
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	xii
Capítulo I Introducción.....	1
I.1 Objetivo general.....	2
I.1.1 Objetivos particulares.....	2
I.2 Organización de la tesis	2
Capítulo II Descripción de Polímeros	4
II.1 Aplicaciones: Polímeros Ópticos	6
II.2 Polímero SU-8	10
II.2.1 Características del SU-8	12
Capítulo III Teoría de Guías de onda óptica de polímeros.....	17
III.1 Guías de ondas ópticas	17
III.1.1 Descripción de una guía de onda óptica	18
III.2 Guías de onda de polímeros ópticos.....	20
III.2.1 Desempeño de los materiales poliméricos.....	20
III.2.2 Materiales poliméricos para óptica integrada	23
III.2.3 Efecto termo-óptico en polímeros.....	25
Capítulo IV Proceso de Fabricación y Caracterización.....	27
IV.1 Caracterización de los modos de propagación.....	28
IV.2 Microscopía electrónica de barrido MEB	30
IV.3 Selección y preparación de los sustratos.....	31
IV.3.1 Preparación y limpieza de los sustratos	32
IV.4 Selección del polímero óptico.....	33
IV.5 Técnica de microlitografía	37
IV.5.1 Depósito de la fotoresina	39
IV.5.2 Grabado y revelado de fotoresina	41
IV.6 Guías de onda Planas	42
IV.6.1 Control del espesor	44
IV.6.2 Tratamiento térmico	50
IV.6.3 Control de exposición.....	51
IV.7 Guías de onda de canal	52

IV.7.1	Rejilla patrón	55
IV.7.2	Control de exposición y revelado	57
Capítulo V	Análisis de Resultados	59
V.1	Guías de onda plana	59
V.1.1	Evaluación dimensional de la guía de onda plana	59
V.1.2	Modulación del índice de refracción.....	61
V.1.3	Transmitancia.....	64
V.1.4	Determinación experimental de los modos de propagación	66
V.2	Guías de onda de canal.....	70
V.2.1	Estructura de las guías ópticas de canal.....	70
V.2.2	Transmitancia.....	75
V.2.3	Determinación experimental de los modos de propagación	76
Capítulo VI	Conclusiones.....	79
Apéndice A		81
BIBLIOGRAFIA		83
ANEXO 1:		86

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Espectro de absorción de los polímeros ópticos Polimetilmetacrilato (PMMA) y Perfluorociclobutano (PFCB).	7
Figura 2. Variación de las propiedades ópticas de los polímeros con respecto a la longitud de onda: (a) variación del índice de refracción del polímero BP. (b) variación del índice de refracción del polímero 6F.....	8
Figura 3. Guía de onda plana, fabricada con tres tipos de polímeros ópticos.	8
Figura 4. Anillo 1,2-epoxi.....	10
Figura 5. (a) Foto generación de los ácidos de Lewis. (b) polimerización catiónica.	11
Figura 6. Micro agujas con alta relación de aspecto fabricados con el polímero SU-8 (Microchem).	12
Figura 7. Estructura molecular del polímero SU-8; (a). Molécula de SU-8 con varios grupos de epoxis, (b). SU-8 solvente, (c). Generador fotoácido del SU-8.	14
Figura 8. Mecanismo de foto-imagen durante la exposición U.V.	15
Figura 9. Reacción de entrecruzamiento durante la etapa de calentado después de la exposición.	16
Figura 10: Guía de onda en forma de escalón.	18
Figura 11: Pérdidas por propagación de una guía de onda de polímero óptico. Los puntos representan las pérdidas y la curva representa los datos adquiridos por el espectrofotómetro [Shacklette, 2003].	22
Figura 12. Reducción en las pérdidas por propagación a 1550 nm en guías monomodales a lo largo de 30 años. Los materiales son: 1) acrilatos, 2) policarbonatos fluorados, 3) Polimidos fluorados. 4) per-fluorociclobutano, 5) acrilatos fluorados, 6) polímeros pre-fluorados.	24
Figura 13. Mecanismo de acoplamiento por medio de un prisma de alto índice.	28
Figura 14. Ejemplo de un patrón de intensidad a la salida del prisma	29
Figura 15. Transmitancia medida de un portaobjeto sin recubrimiento.	32
Figura 16. Espectro de transmisión de una muestra de SU-8.	34

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura 17. Variación de las propiedades ópticas del SU-8. (a). Transmitancia óptica del polímero. (b) coeficientes de Cauchy.	37
Figura 18. Proceso de fabricación de guías de onda por micro litografía.	37
Figura 19. Materiales necesarios para el depósito de la foto-resina en sustratos de vidrio. (a) Centrifugadora. (b) Esquema de la deposición por gotero.	39
Figura 20. Velocidad de la centrifugadora respecto al espesor que se desea.	40
Figura 21. Anomalías que se presentan comúnmente cuando se deposita la fotoresina.	41
Figura 22. Estructura básica de una guía de onda plana	42
Figura 23. Proceso necesario para la realización de las guías de onda planas de polímeros ópticos.	44
Figura 24. Imagen de microscopio óptico que muestra los problemas típicos que se encontraron después de haber realizado el depósito de la fotoresina. En las micrografías (a) hasta (h) se muestran problemas de depósito en el sustrato. En las micrografías (i) hasta (l) se muestran depósitos con una excelente uniformidad.	45
Figura 25. Sustrato de vidrio de mala calidad, superficie porosa.	45
Figura 26. Material necesario para el pulido de los sustratos: disco de pelte y sustancia con macropartículas para el pulido.	46
Figura 27. Variaciones experimentales que se utilizaron para obtener el espesor cercano a 7 μm	47
Figura 28. Micrografías por medio de microscopia electrónica de barrido (MEB), de la guía de onda plana de polímero óptico.	48
Figura 29. Micrografía MEB de la superficie de la guía de onda plana	49
Figura 30. Arreglo experimental para la caracterización de la guía de onda plana.	50
Figura 31. Estructura básica de una guía de onda rectangular. Los valores de K_z y K_y para los modos de la guía de onda son mostrados como puntos negros en la figura.	53
Figura 32. Proceso típico a seguir para la fabricación de guías de onda rectangulares de polímero óptico.	54

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura 33. (a) proceso esquematizado del grabado de los canales de las guías de onda (b) imagen de como se deberá de observar el dispositivo final [Guerin, 1997].	55
Figura 34. Rejilla patrón necesaria para el grabado de los canales en la fotoresina.	56
Figura 35. Dimensiones de la rejilla patrón.	56
Figura 36. Micrografía MEB de la muestra. (a) sección transversal de la guía de onda plana. (b) superficie de la guía de onda plana con imperfecciones. (c) superficie de la guía de onda plana sin imperfecciones.	60
Figura 37. Variación del índice de refracción con diferentes tiempos de exposición y diferentes tiempos de pre-calentado a temperaturas de 95 °C.	62
Figura 38. Variaciones del índice de refracción en función de la temperatura [Tung, 2003].	64
Figura 39. Transmitancia óptica de la capa de fotoresina de SU-8 depositada sobre un sustrato de vidrio.	64
Figura 40. Intensidad a la salida de las guías de onda planas.	65
Figura 41. Modos propios de propagación en una guía de onda plana de polímero óptico (SU-8), obtenida mediante un sistema de detección automatizado (Metricon 2010), donde cada mínimo representa un modo acoplado a la guía.	68
Figura 42. Vista transversal de las guías de onda de polímero óptico, tomadas con un microscopio óptico.	70
Figura 43. Imágenes tomadas con un microscopio óptico, del patrón de guías de onda ya grabado en el SU-8.	71
Figura 44. Micrografías MEB de las guías de onda de rectangular. (a) y (b) vista transversal de las guías rectangulares. (c) Vista de la superficie de las guías rectangulares.	74
Figura 45. Micrografías MEB, (a) vista frontal de guías de onda de canal de SU-8 vista frontal de guías de onda de canal de SU-8 con recubrimiento de PMMA [Biow, 2006].	75
Figura 46. Intensidad de luz a la salida de las guías de onda de canal de polímero SU-8.	76
Figura 47. Distribución de intensidad de la luz a la salida de las guías de onda rectangulares.	77

Figura 48. Distribución de intensidad de la luz a la salida de las guías de onda rectangulares [Selviah, 2004].....78

Figura 49. (a) Sistema automatizado para la medición de los índices de refracción de las muestras (METRICON). (b) Vista esquemática de la guía de onda plana paralela al prisma de alto índice.....81

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Nombre y estructuras moleculares de algunos de los principales polímeros sintéticos utilizados en la industria	5
Tabla II. Propiedades ópticas de polímeros ópticos desarrollados globalmente.	6
Tabla III. Índices de refracción de algunos de los polímeros más utilizados.	9
Tabla IV. Evaluación de diferentes polímeros para la fabricación de guías de onda ópticas.	25
Tabla V: Composición química del vidrio 2947 Corning.....	31
Tabla VI. Propiedades físicas de la fotoresina SU-8.	35
Tabla VII. Propiedades ópticas de la fotoresina SU-8.....	36
Tabla VIII. Dosis de exposición recomendadas por el fabricante de la fotoresina.....	41
Tabla IX. Procedimiento de calentado de la muestra; temperatura en cada paso y tiempos a las que fueron sometidas las muestras.	51
Tabla X. Variación en el tiempo de exposición de las muestras, usada para obtener espesores cercanos a 7 μ m.	52
Tabla XI. Se muestra la variación de los índices de refracción debido al tiempo de exposición UV y el tiempo de pre-calentado.....	63
Tabla XII: Propiedades ópticas y físicas de las muestras fabricadas.....	67
Tabla XIII. Valores obtenidos experimentalmente de los índices de refracción efectivos y birrefringencia correspondientes a cuatro muestras.....	69
Tabla XIV. Variación entre los tamaños de las guías de la rejilla patrón vs tamaños de las guías fabricadas.....	72

Capítulo I

Introducción

El reciente surgimiento de la demanda de nuevos dispositivos en el área de la óptica integrada, que cumplan los criterios económicos y requisitos técnicos para ser usados en comunicaciones ópticas de corta y larga distancia (datacom/telecom), ha abierto las puertas para tecnologías nuevas que permitan funciones únicas y/o no convencionales sin sacrificar su funcionamiento. La introducción de tecnologías basadas en polímeros pueden cumplir los requisitos exigidos, y además, presentar algunas ventajas de su uso en este tipo de aplicaciones.

Los polímeros permiten la producción en masa, y a bajos costos, de circuitos de óptica integrada sobre sustratos planos, y con ello, proporcionan la posibilidad de lograr un mayor grado de robustez con un desempeño comparable con los obtenidos con otras tecnologías.

Aunque ya han pasado varios años desde que surgió la idea de usar polímeros ópticos para la fabricación de circuitos basados en guías de onda ópticas, son pocos los materiales desarrollados, siendo los más usados el polimetilmetacrilato (PMMA) y el perfluorociclobutano (PFCB). Antecedentes a este trabajo se tienen pocos, ya que el polímero óptico SU-8, que se utiliza en la fabricación de estas guías ópticas es relativamente nuevo, sin embargo en la poca literatura existente ya se han obtenido resultados satisfactorios en la fabricación de guías de onda (Nordtrom, Zauner, Boisen, Hubner 2007), lo cual incrementó en gran cantidad nuestro interés en la obtención de guías de onda planas y de canal de polímero óptico SU-8.

El grupo de óptica integrada de CICESE ha venido realizando investigaciones en dispositivos basados en guías de onda ópticas desde hace más de una década, iniciando con las guías de onda en forma de películas delgadas, después difusión de iones metálicos en

sustratos de vidrio e implantación de iones en el mismo tipo de sustratos. De igual manera, investigaciones sobre aspectos básicos de dispositivos de fibras ópticas similares a los antes mencionados, sirven de base, tanto teórica como experimental, para enfrentar un nuevo reto tecnológico: guías de onda con materiales poliméricos.

I.1 Objetivo general

Iniciar actividades de investigación de guías de onda planas y de canal, de polímeros ópticos; además de estudiar las propiedades físicas, químicas y ópticas de polímeros ópticos que puedan permitir su uso en aplicaciones potenciales de óptica integrada.

I.1.1 Objetivos particulares

- Realizar depósitos de SU-8 controlando su uniformidad, índice de refracción y espesor.
- Diseño y fabricación de guías de onda ópticas planas y de canal en función de: espesor, índice de refracción, modos de propagación (en función de los parámetros de fabricación).
- Caracterización de propiedades físicas de las guías de onda.
- Caracterización de las propiedades ópticas: modos de propagación, pérdidas de propagación, confinamiento modal, acoplamiento, etc.
- Caracterización de las superficies mediante microscopía electrónica.

I.2 Organización de la tesis

Este trabajo de tesis está compuesto por seis capítulos, los cuales se encuentran organizados de la siguiente manera:

Capítulo I. Se da una introducción, para que el lector tenga conocimiento sobre la rama de la ciencia a la cual esta investigación pertenece.

Capítulo II. Se realiza un estudio sobre el estado del arte en guías de polímeros; estudio sobre polímeros disponibles en el mercado y elección del polímero a usar en este trabajo.

Capítulo III. Se hace un estudio preliminar sobre los aspectos teóricos fundamentales para entender los fenómenos físicos que están involucrados en el funcionamiento de las guías de onda ópticas.

Capítulo IV. Se describe el proceso utilizado para la fabricación de guías de onda planas y de canal de polímero óptico en sustratos de vidrio, donde se explican la técnica de microlitografía y se da una descripción sobre los métodos de caracterización de los procesos necesarios para la fabricación de estas guías.

Capítulo V. En este capítulo se describe el análisis de las guías de onda por la técnica de MEB (microscopía electrónica de barrido), imágenes sobre la superficie y geometría de las guías. También se describe la caracterización modal (sistema de acoplamiento con prisma de alto índice Metricon) de las guías de onda planas, incluyendo mediciones de la birrefringencia. Se realiza el análisis de la propagación en las guías de onda en forma de canal (acoplamiento fibra-guía), observando la distribución de intensidad a la salida de las guías.

Capítulo VI. Se presentan las conclusiones a las que se llega en el estudio y posteriormente la bibliografía citada.

El documento incluye: un apéndice que describe el funcionamiento del sistema automatizado de detección de modos de propagación (Metricon 2010) en guías ópticas y un anexo que contiene el código realizado en MatLab, utilizado para obtener las dimensiones de las guías.

Capítulo II

Descripción de Polímeros

Gran parte de la historia de la humanidad se ha visto influenciada por la disponibilidad de materiales. De hecho, la historia se divide en épocas nombradas debido al material que se utiliza; la edad de piedra, la edad de bronce y la Edad de Hierro. Del mismo modo se podría afirmar que en el siglo XXI hemos entrado en la Edad de los Polímeros.

Un polímero (del griego *poli*, muchos; *meros*, parte, segmento) es una sustancia cuyas moléculas son, por lo menos aproximadamente, múltiplos de unidades de peso molecular bajo. La unidad de bajo peso molecular es el monómero. Si el polímero es rigurosamente uniforme en peso molecular y estructura molecular, su grado de polimerización se indica con un numeral griego, según el número de unidades de monómero que contiene; así, hablamos de dímeros, trímeros, tetrámeros, pentámeros y así sucesivamente. El término polímero designa una combinación de un número (grado de polimerización) no especificado de unidades. De este modo, el trióximetileno, es el trímero del formaldehído, por ejemplo.

Si el número de unidades es muy grande, se usa también la expresión macromolécula. Un polímero no tiene la necesidad de constar de moléculas individuales todas del mismo peso molecular, y no es necesario que tengan todas las mismas composiciones químicas y la misma estructura molecular. Hay polímeros naturales como ciertas proteínas globulares y polícarbohidratos, cuyas moléculas individuales tienen todos los mismos pesos moleculares y la misma estructura molecular; pero la gran mayoría de los polímeros sintéticos y naturales importantes son mezclas de componentes poliméricos homólogos. La pequeña variabilidad en la composición química y en la estructura molecular es el resultado de la presencia de grupos finales, ramificaciones ocasionales, variaciones en la orientación de unidades monoméricas y la irregularidad en el orden en el

que se suceden los diferentes tipos de esas unidades en los copolímeros. Estas variedades en general no suelen afectar a las propiedades del producto final, sin embargo, se ha descubierto que en ciertos casos hubo variaciones en copolímeros y ciertos polímeros cristalinos. En la Tabla I encontramos los nombres y las estructuras de las moléculas de algunos de los principales polímeros sintéticos. Los polímeros pueden ser de tres tipos:

- a) **Polímeros naturales:** provenientes directamente del reino vegetal o animal. Por ejemplo: celulosa, almidón, proteínas, caucho natural, ácidos nucleicos, etc.
- b) **Polímeros modificados:** son el resultado de modificaciones mediante procesos químicos, de ciertos polímeros naturales. Ejemplo: nitrocelulosa, estonita, etc.
- c) **Polímeros sintéticos:** son los que se obtienen por procesos de polimerización controlados por el hombre a partir de materias primas de bajo peso molecular. Ejemplo: nylon, polietileno, cloruro de polivinilo, poliuretano, etc.

Muchos elementos (el silicio, entre otros), forman también polímeros, llamados polímeros inorgánicos.

Tabla I. Nombre y estructuras moleculares de algunos de los principales polímeros sintéticos utilizados en la industria

Nombre	Fórmula
Polietileno	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \right]_n$
Polipropileno	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH} - \text{CH}_2 \end{array} - \right]_n$
Poliuretano	$\left[\left(\text{CH}_2 \right)_3 \text{HN} - \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} - \text{O} - \right]_n$
Cloruro de polivinilo (Poli(cloruro de vinilo) (PVC)	$\left[\text{CH}_2 - \overset{\text{Cl}}{\underset{ }{\text{CH}}} - \right]_n$
Poliestireno	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\underset{ }{\text{CH}}} - \right]_n$
Poli acrilato de metilo	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\begin{array}{c} \text{O} - \text{CH}_3 \\ \parallel \\ \text{C} = \text{O} \end{array}}{\underset{ }{\text{CH}}} - \right]_n$
Nylon	$\left[\text{HN} - \left(\text{CH}_2 \right)_6 \text{HN} - \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} - \left(\text{CH}_2 \right)_4 \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} - \right]_n$

II.1 Aplicaciones: Polímeros Ópticos

Los polímeros ópticos han sido diseñados y sintetizados en muchas compañías y algunos de ellos, mostrados en la Tabla II están disponibles comercialmente. Los diversos polímeros usados en óptica integrada incluyen acrilatos, polimidinos, policarbonatos y olefinicos. Algunos polímeros, tales como la mayoría de los polimidinos y policarbonatos, no son fotosensibles y son típicamente procesados usando ataque químico reactivo.

Tabla II. Propiedades ópticas de polímeros ópticos desarrollados globalmente.

Fabricante	Tipo de polímero [nombre comercial]	Técnicas de modelado	Pérdidas de propagación en guías de onda monomodal dB/cm [longitud de onda, nm]	Otras propiedades [longitud de onda, nm]
Corning	Acrilato	Fotoexposición/ataque químico, ataque iónico reactivo, ablación láser	0.02 [840] 0.3 [1300] 0.8 [1550]	Birrefringencia: 0.0002 [1550], entrecruzamiento , T _g : 25°C ambientalmente estable
	Acrilato halogenado	Fotoexposición/ataque químico, ataque iónico reactivo, ablación láser	<0.01 [840] 0.06 [1300] 0.2 [1550]	Birrefringencia: < 0.000001 [1550], entrecruzamiento , T _g : ~50°C ambientalmente estable
Dow chemical	Benzociclobutano [Cyclotene™]	Ataque iónico reactivo	0.8 [1300] 1.5 [1550]	T _g : >350°C
	Perfluorociclobutano [XU 35121]	Fotoexposición/ataque químico	0.25 [1300] 0.25 [1550]	T _g : 400°C
Gemfire	[Gemfire]	Fotoexposición/ataque químico	1.0 [1550]	Birrefringencia: 0.0002 [1550], entrecruzamiento
General Electric	Polieterimido [Ultem]	Ataque iónico reactivo, ablación láser	0.24 [830]	Térmicamente estable
Hitachi	Polimido fluorado	Fotoexposición/ataque químico	TE: 0.5, TM: 0.6 [1300]	Birrefringencia: 0.009 [1300], PDL 0.1dB/cm [1300] T _g : 310°C ambientalmente estable
Hoechst Celanese	Copolímero PMM [P2ANS]	Fotoblanqueamiento	1.0 [1300]	Polímero NLO
JDS Uniphase	Policarbonato [BeamBox™]	Ataque iónico reactivo	0.6 [1550]	Térmicamente estable
D-JIST	Fluorado de poli(amileno éter sulfurado) [FPAESI]	Ataque iónico reactivo	TE: 0.4, TM: 0.4 [1550]	PDL 0.02dB/cm [1550], birrefringencia: 0.0003 [1550] entrecruzamiento , térmicamente estable
Lumera	Poliuretano con chomoforescencia [PU-FTC]	Ataque iónico reactivo	2.0 [1300]	Polímero NLO r ₃₃ =25pm/V [1310] pérd. de acoplamiento=5dB/por cara

Esos polímeros tienen la mayoría de los problemas de la tecnología de los sustratos SiO₂/Si, en términos de pérdidas por esparcimiento, por rugosidad, esfuerzos inducidos y

dependencia de la polarización. Otros polímeros son fotosensibles y como tales son directamente fotoconformables; permitiendo alcanzar un ciclo completo de fabricación en un tiempo de aproximadamente 30 minutos por circuito óptico multicapa sobre una oblea. Estos materiales tienen una obvia ventaja en rendimiento, producción de obleas entre 10 y 1000 veces más rápido que otras tecnologías. Además, esta tecnología usa materiales y equipo de procesamiento de bajo costo (p.ej., centrifugado y microlitografía vs. equipo de crecimiento de depósito de vapor químico).

Los polímeros ópticos pueden ser altamente transparentes, con pérdidas de absorción abajo de 0.1 dB/cm a todas las longitudes de onda de comunicaciones claves (840 nm, 1310 nm y 1550 nm) un ejemplo de esto se muestra en la Fig. 1.

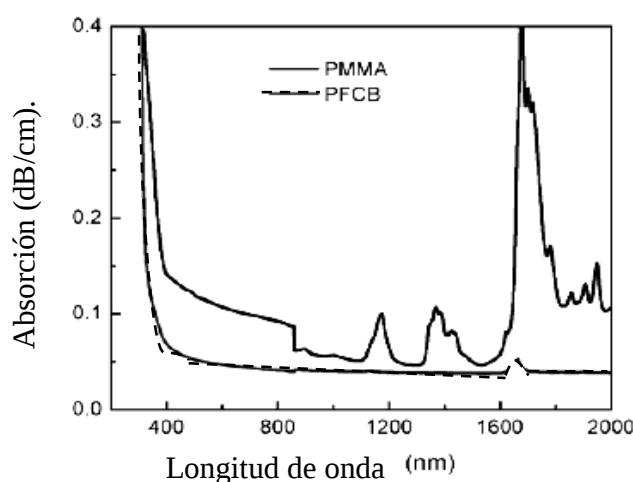


Figura 1. Espectro de absorción de los polímeros ópticos Polimetilmetacrilato (PMMA) y Perfluorociclobutano (PFCB).

Otra característica importante de los polímeros, es su capacidad de ajuste del contraste de índice de refracción; algunos ejemplos se muestran en la Fig. 2, los cuales pueden variar sus valores en un 35 %, permitiendo estructuras de guiado compactas de alta densidad, con radios de curvatura pequeños.

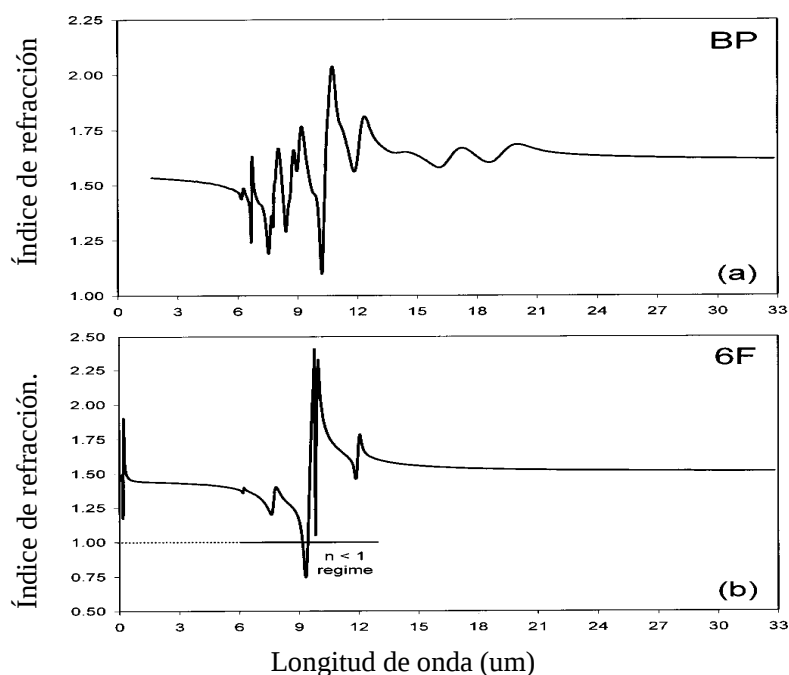


Figura 2. Variación de las propiedades ópticas de los polímeros con respecto a la longitud de onda: (a) variación del índice de refracción del polímero BP. (b) variación del índice de refracción del polímero 6F

Un ejemplo de una guía de onda de polímero óptico se muestra en la Fig. 3. desarrollada por Zen Photonics (Neyer, 2007). En la fotografía se distingue una estructura formada por tres polímeros y las dimensiones de las mismas

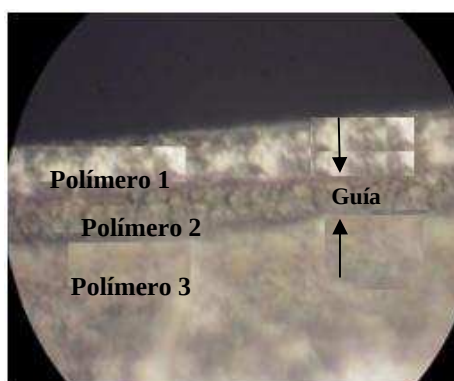


Figura 3. Guía de onda plana, fabricada con tres tipos de polímeros ópticos.

Además de esto, las propiedades mecánicas únicas de los polímeros permiten a éstos ser procesados por técnicas de fabricación no convencionales tales como moldeo, vertido, troquelado, grabado en relieve y microlitografía, permitiendo un rápido perfilado

para la formación de guías de onda y remoción del material para la posterior colocación de otros materiales tales como capas activas de películas delgadas, rotadores de Faraday o placas retardadoras de media onda. La producción de componentes de polímeros ópticos comercialmente viables es una tarea compleja porque los polímeros ópticos necesitan cumplir simultáneamente muchas propiedades.

Estos materiales, están revolucionando la óptica integrada por sus múltiples y diversas propiedades; además de su manejo de índice de refracción para diversos casos. En la tabla III se muestran algunos polímeros ópticos y sus índices de refracción.

Tabla III. Índices de refracción de algunos de los polímeros más utilizados.

Polímero	Índice de refracción (longitud de onda 632 nm)
Politetrafluoro-Etileno (PTFE)	1.35
Policlorotrifluoro-Etileno (PCTFE)	1.42
Acrílicos	1.49
Polipropileno	1.49
Polibutileno	1.5
Polietileno	1.51-1.54
Poliestireno	1.57-1.60

II.2 Polímero SU-8

Fotoresinas, tales como el SU-8, están basadas en epoxies. El término epoxi es un prefijo el cual se refiere a un enlace que consta de un átomo de oxígeno enlazado a otros dos átomos que se encuentran ya unidos y que frecuentemente son de carbono. Esta estructura es conocida como 1,2-epoxi. Una resina epoxi se define con una molécula que contiene uno o más grupos de 1,2-epoxi, este grupo se muestra en la Fig.4.

Dichas moléculas son capaces de convertirse a un polímero termofijo de estructuras de red tridimensional. Este proceso es llamado curado o entrecruzamiento.

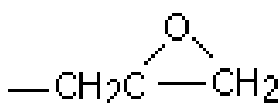


Figura 4. Anillo 1,2-epoxi

El término de curado o entrecruzamiento es utilizado para describir el proceso mediante el cual uno o más tipos de reactivos, por ejemplo, un epóxido y un agente de curado, se transforman de un material con bajo peso molecular a un compuesto epoxi. Los agentes para el curado de las resinas epoxi pueden ser divididos en tres categorías:

1. Compuestos activos de hidrógeno, los cuales son curados por reacciones de poli-adición.
2. Iniciadores iónicos, los cuales están divididos en aniónicos y catiónicos.
3. Entrecruzadores, los cuales forman parejas a través de la funcionalidad del hidroxilo (intercadenas) para formar resinas de mayor peso molecular.

Las fotoresinas, como el SU-8, normalmente son polimerizadas por foto polimerización catiónica. La polimerización catiónica es un proceso en donde el activo final de la molécula de polímero es un ion positivo. Este tipo de polimerización es inducida por ácidos de Lewis. El mecanismo general está representado en la Fig. 5, el ácido de Lewis se genera durante la iluminación por radiación UV. La polimerización se realiza por la apertura del anillo 1,2-epoxi.

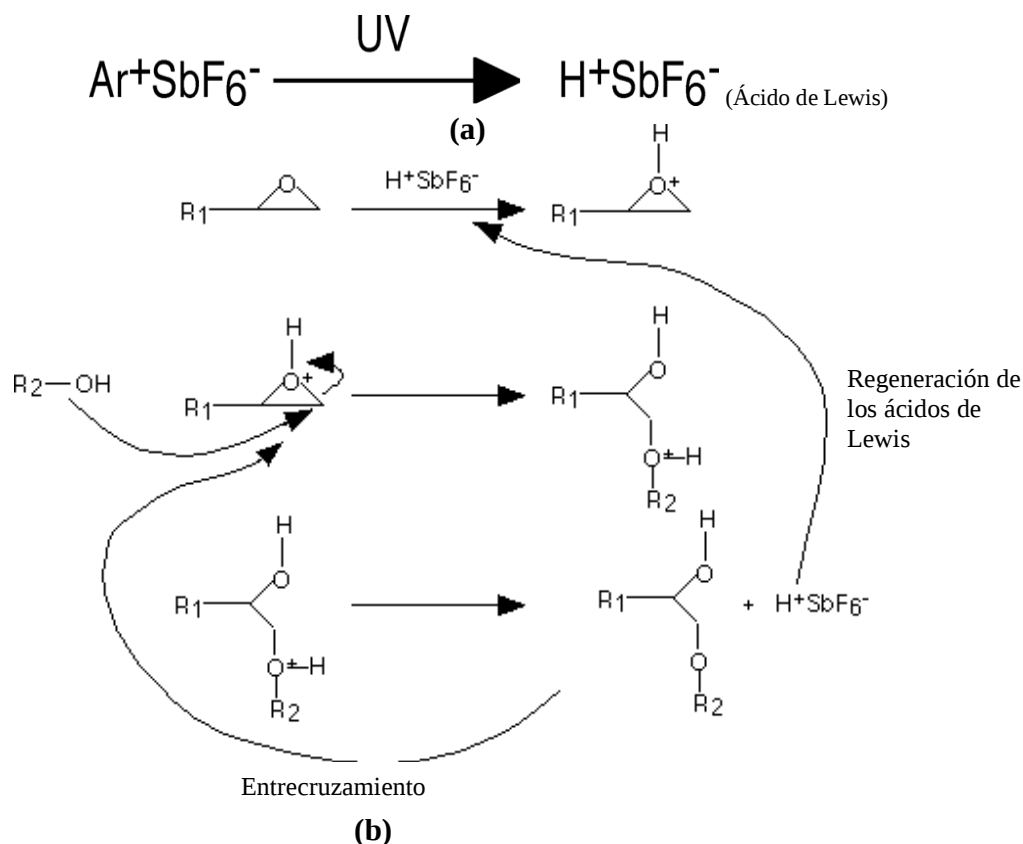


Figura 5. (a) Foto generación de los ácidos de Lewis. (b) polimerización catiónica.

Muchos de los micro-sistemas electrónicos y mecánicos (MEMS por sus siglas en inglés), requieren que sus microestructuras sean procesadas por medio de fotoresinas con las cuales se pueda obtener una alta relación de aspecto, esto es, que las microestructuras obtengan una alta definición en sus formas [Chang, 2000]. El SU-8 ha permitido el desarrollo de muchos de estos MEMS, gracias a su alta sensibilidad, resistencia química y su compatibilidad con la galvanoplastia (proceso basado en el traslado de iones metálicos desde un ánodo a un cátodo en un medio líquido) [Lorenz, 1998]. El SU-8 es una fotoresina lo suficientemente resistente para la fabricación de MEMS.

Existen ya muchos ejemplos de uso como material para micromoldes, embalaje y dispositivos [www.somisys.ch/microfluidics.htm], en la Fig. 6, se muestran algunos ejemplos de su utilización.

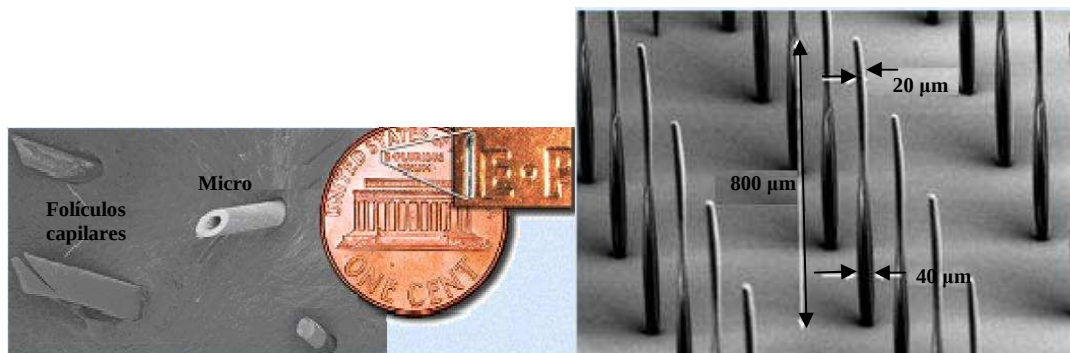


Figura 6. Micro agujas con alta relación de aspecto fabricados con el polímero SU-8 (Microchem).

El polímero SU-8 fue desarrollado y patentado originalmente por el Centro de Investigaciones Watson de la IBM (Yorktown Altura-EE.UU., EE.UU. No.4882245 de Patentes (1989) y otros). Posteriormente en 1996 este material fue adaptado para aplicaciones de MEMS por el Instituto EPFL de Microsistemas y la compañía IBM-Zúrich [LaBianca, 1995.].

II.2.1 Características del SU-8

El SU-8 es una fotoresina negativa. La zona expuesta a la luz se vuelve insoluble al revelador. La porción que no fue expuesta a la luz es disuelta por el revelador. Es un polímero con alta viscosidad que puede ser hilado en rangos tan angostos que van desde 1 μm hasta 2 mm y puede ser procesado por medio de mascarillas para alinear estándares. Puede ser usado para crear patrones de estructura de radio mayores a 20 μm . Su máxima absorción se da para la luz ultravioleta, centrada a una longitud de onda de 365 nm. Cuando el SU-8 es expuesto a la luz ultravioleta, sus cadenas moleculares se entrelazan para solidificar el material. El SU-8 se usa principalmente en la fabricación de microfluidos y partes para MEMS, además de ser uno de los materiales con mayor bio-compatibilidad. Las propiedades del SU-8 son las siguientes [Shaw, 1997]:

- Peso molecular bajo.
- Buena solubilidad.
- Alta transparencia.
- Formación de películas en vidrio.
- Baja temperatura de transición vítrea (T_g)

- Soluciones altamente viscosas
- Capas con un ancho de hasta 500 μm en un solo recubrimiento
- Alta uniformidad en el recubrimiento.
- Alta definición en estructuras suaves.
- Paredes definidas verticalmente.
- Alta relación de aspecto.
- Excelente resistencia química.
- Buena biocompatibilidad.

La resina consiste en un epoxi polimerizado disuelto en un solvente orgánico y con adición de un generador fotoácido. El SU-8 consta de 3 componentes básicos:

- a) Un epoxi, el cual se puede encontrar en Chemicals Shell, llamado Epon SU-8.
- b) Un solvente, llamado gama-butyrolactone (GBL), Fig. 7(b).
- c) Un generador fotoácido tomado de la familia de las sales de triarilico-sulfónico, Fig. 7(c).

La molécula en la Fig. 7(a) es una “imagen idealizada” porque en la realidad las moléculas existen en una gran variedad de tamaños y formas.

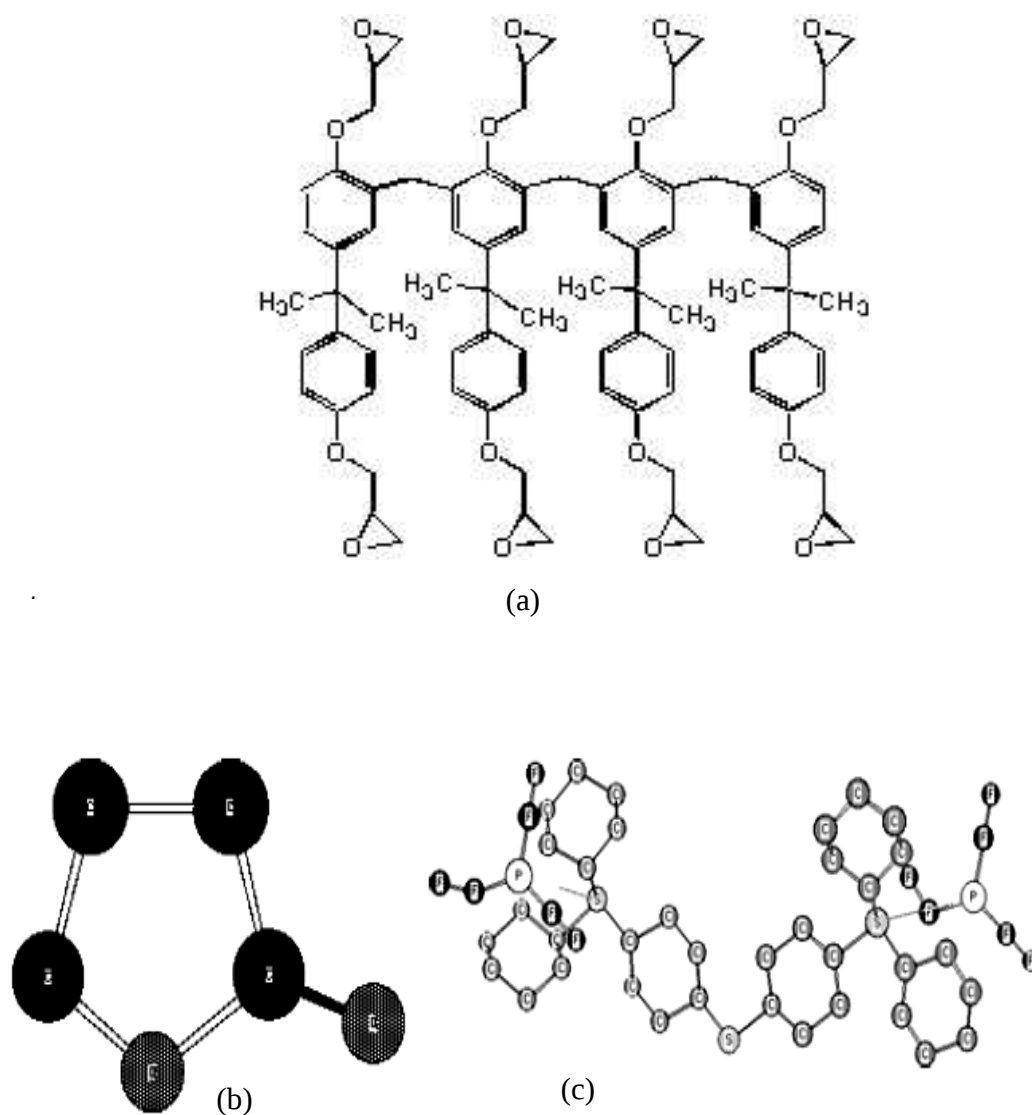


Figura 7. Estructura molecular del polímero SU-8; (a). Molécula de SU-8 con varios grupos de epoxis, (b). SU-8 solvente, (c). Generador fotoácido del SU-8.

Como se mencionó, el SU-8 es una resina fotosensible por lo cual la reacción química que tiene como consecuencia al ser expuesta a la luz UV se describe en la siguiente Fig. 8:

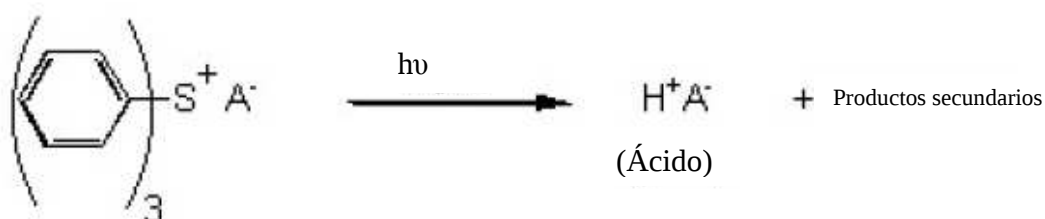


Figura 8. Mecanismo de foto-imagen durante la exposición U.V.

El fotoácido designado $\text{H}^+ \text{A}^-$, es producido fotoquímicamente en la fotoresina sólida por medio de la absorción de luz. El fotoácido actúa como un catalizador en la reacción de entrecruzamiento que tiene lugar durante el horneado después de la exposición (PEB post exposure bake por sus siglas en inglés). En otras palabras, la parte de la resina expuesta contiene el catalizador ácido, mientras la parte que no es expuesta no lo tiene (fotoresina negativa).

La etapa de precalentado es la responsable para que se dé el mecanismo de entrecruzamiento en la capa de SU-8. Este calentamiento es necesario porque la cinética del mecanismo de entrecruzamiento se da demasiado lento a temperatura ambiente.

Calentándolo por encima de su temperatura de transición vítrea ($T_g = 55^\circ\text{C}$), hace que el movimiento molecular se incremente, y por tanto ayuda a que el entrecruzamiento se obtenga. Para un polímero, T_g es la temperatura a la cual se da la transición de un estado sólido a un estado viscoso [Lorenz, 1996].

La reacción de entrecruzamiento, la cual es catalizada por ácidos, toma lugar en un tiempo muy corto (segundos), donde cada grupo epoxi puede reaccionar con otro grupo epoxi, ya sea o no en la misma molécula. El entrecruzamiento no ocurre en ausencia de ácidos. Un entrecruzamiento extenso nos llevará a una cadena densa, como se describe en la figura siguiente, donde cada grupo epoxi está “pre-conectado” a otros 7; esta cadena se vuelve insoluble al revelador. La reacción se ilustra en la Fig. 9

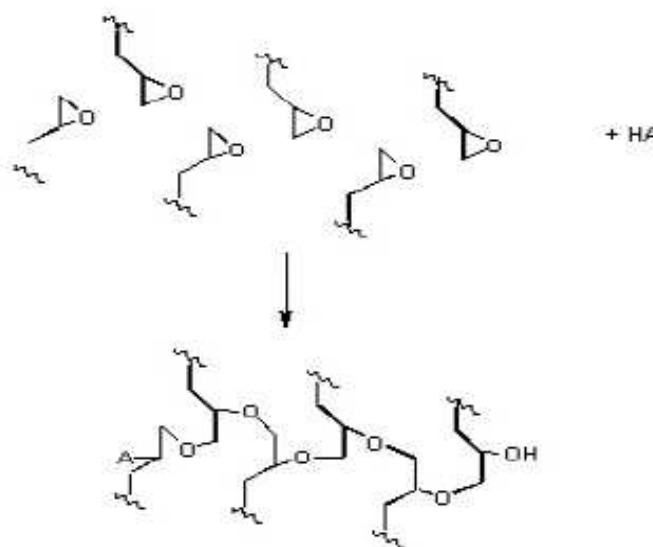


Figura 9. Reacción de entrecruzamiento durante la etapa de calentado después de la exposición.

La temperatura del precalentado deberá ser mayor que la temperatura de transición vítrea para que este tenga efecto. Debido a esto las capas de resina tendrán diversos cambios. [Shaw, 1997]:

- (1) Se podrán presentar algunas grietas debido a la reducción del volumen y al incremento de densidad.
- (2) La T_g aumentará conforme se dé el entrecruzamiento en la película.

El proceso de entrecruzamiento en la película tendrá lugar hasta que la película tome un estado sólido, con esto, el entrecruzamiento irá disminuyendo hasta que finalmente cese. De cualquier forma, la temperatura final de transición vítrea del material dependerá en mucho de la temperatura del precalentado.

Capítulo III

Teoría de Guías de onda óptica de polímeros

En este capítulo se realiza una revisión sobre los aspectos teóricos, que son fundamentales para poder entender los fenómenos físicos involucrados en el funcionamiento de las guías de onda ópticas de polímeros. Así como también, se tratan aspectos teóricos de las técnicas utilizadas para caracterizar estos materiales.

III.1 Guías de ondas ópticas

Una guía de onda óptica es un elemento que es capaz de atrapar la luz y guiarla en una dirección definida. El principio de funcionamiento es el siguiente: si tenemos un medio con un índice de refracción dado, inmerso en otro medio cuyo índice de refracción es menor, es posible que bajo ciertas condiciones, la luz quede atrapada en el primer medio al producirse repetidamente el fenómeno de reflexión interna total en las fronteras. Al darse estas reflexiones múltiples, la luz avanzará siguiendo una trayectoria en zig-zag a través de la dirección de propagación.

Para disminuir pérdidas, debidas a la componente compleja del índice de refracción de los materiales donde se producen las reflexiones, es necesario imponer la condición de usar materiales dieléctricos, cuyos índices de refracción son prácticamente cantidades reales; luego, para que el confinamiento sea óptimo, es necesario que la luz incida en las fronteras a un ángulo mayor que el ángulo crítico para evitar que la luz escape; es decir para provocar la reflexión interna total.

Las guías de onda pueden tener diversas geometrías: planas, rectangulares, cilíndricas, etcétera, igualmente pueden ser simétricas o asimétricas (Saleh, 1991). Las fibras ópticas son un ejemplo de las guías de onda ópticas, otros ejemplos de guías de onda ópticas son las películas delgadas, los apilamientos de películas delgadas y las guías en forma de canal inmersas en cristales o vidrios. Las guías pueden dividirse en dos tipos: las

de índice en forma de escalón y las de índice gradual o de gradiente. Pueden estar en forma de películas delgadas o inmersas en cristales o vidrios.

La propagación de la luz en las guías de onda se puede analizar desde varios enfoques: se pueden resolver las ecuaciones de Maxwell encontrando el conjunto de valores propios (eigenvalores) para encontrar la distribución de los campos asociados a los modos de propagación, o se puede usar el trazado de rayos y considerar un rayo de luz que se refleja siguiendo una trayectoria en zig-zag dentro de la guía (Koshiba, 1992).

En óptica integrada, es rara la ocasión que se realizan cálculos exactos que incluyan los efectos de difracción sobre propagación de los campos; esto se debe a la dificultad de identificar las diversas formas de la trayectoria del haz con los modos de la guía.

III.1.1 Descripción de una guía de onda óptica

La guía de onda más sencilla, es una película delgada dieléctrica depositada sobre un sustrato de vidrio. El sistema anterior consta de tres medios con diferentes índices de refracción: vidrio (sustrato), película delgada y aire (n_s , n_p y n_a son los índices de refracción, respectivamente), se supone que las interfaces entre estos medios son paralelas entre sí, como se muestra en la figura 10.

Lo importante en este sistema es que el índice de refracción de la película sea mayor que el del sustrato y del aire (se cumple que $n_a < n_s < n_p$), condición que permitirá se presente el fenómeno de reflexión interna total cuando la luz incida en las interfaces película-sustrato y película-aire.

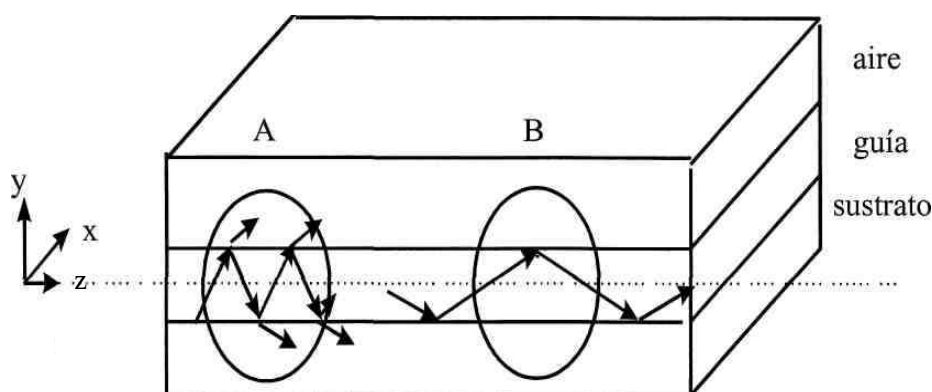


Figura 10: Guía de onda en forma de escalón.

Si la película es homogénea y la luz se propaga en la dirección z , y además se cumple que $n_a < n_s < n_p$ podemos diferenciar dos situaciones: cuando el ángulo de incidencia es menor que el ángulo crítico y cuando es mayor o igual al ángulo crítico. Los ángulos críticos para las interfaces superior e inferior tienen valores, $\sin^{-1}(n_a/n_p)$ y $\sin^{-1}(n_s/n_p)$, respectivamente. En el primer caso, no se presenta el fenómeno de reflexión interna total en las fronteras y parte de la luz es irradiada hacia el exterior de la guía. En la misma figura 10 se da esta situación en la región A. En el otro caso, la luz es atrapada completamente, como se muestra en la región B de la figura 10.

Sin embargo, no a todos los ángulos mayores que el ángulo crítico es posible que se tenga una propagación. Una guía solo puede soportar un número discreto de ángulos que aseguren la propagación, ya que se debe cumplir que estos ángulos satisfagan la condición de resonancia transversal, como se muestra en la ecuación 1 (Najafi, 1992):

$$2k_o n_p h \cos \theta_m - 2\phi_a - 2\phi_v = 2\pi m \quad (1)$$

donde $k_o = \omega/c$, h es el espesor de la guía, $2\phi_a$ y $2\phi_v$ son los corrimientos en fase que sufre el haz de luz en las fronteras con el aire y el vidrio, respectivamente, y $m = 0, 1, 2, \dots$ es el orden del modo de propagación.

El corrimiento en fase para una onda polarizada S que se refleja en una frontera está dado por

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{n_p^2 \sin^2 \theta_m - n_x^2}}{n_p \cos \theta_m} \right) \quad (2)$$

donde el subíndice n_x corresponde al índice del aire o el vidrio, según sea el caso.

Para una onda polarizada P, el corrimiento de fase es:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{n_p^2 \sqrt{n_p^2 \sin^2 \theta_m - n_x^2}}{n_x^2 \cos \theta_m} \right) \quad (3)$$

La condición de resonancia establece que el haz, en un ciclo completo, acumula un corrimiento de fase igual a un múltiplo entero de 2π .

El campo electromagnético total en un punto cualquiera de la guía de onda es la suma de todas las ondas que han sido reflejadas. Los campos que satisfacen la condición de resonancia se conocen como modos de la guía de onda. Se pueden definir los modos de propagación como campos que mantienen la misma distribución y polarización en cualquier punto a lo largo de la guía de onda.

La luz se propaga en la guía de onda en forma de modos normales. En nuestro ejemplo existen tres tipos de modos normales: los modos de la película, los modos del sustrato y los modos del aire. Los dos últimos son llamados modos de radiación. Los tres tipos de modos forman un conjunto completo de soluciones propias y todos ellos son ortogonales entre sí. Los eigenvalores de los modos de la guía son discretos.

III.2 Guías de onda de polímeros ópticos

III.2.1 Desempeño de los materiales poliméricos

En aplicaciones de comunicaciones ópticas, se puede notar que existen áreas con cierta preocupación en lo referente a la acumulación de los efectos de dispersión, la dependencia de la polarización, dependencia de la longitud de onda, por mencionar solo algunos. Dependiendo de la aplicación, hay diferentes tipos de pérdidas: pérdidas por dependencia a la polarización (PDL, polarization dependent loss por sus siglas en inglés), la dispersión de modo de polarización (PMD, polarization mode dispersion por sus siglas en inglés), esparcimiento, y así sucesivamente. Un aspecto que es especialmente importante en el caso de los polímeros, es el hecho de que hoy en día las redes de comunicaciones están conectadas por fibra de silicio y numerosos sistemas dependen del desempeño de ese material: los materiales recientes utilizados para la formación de estas redes, incluidos los componentes de polímeros, deben ser compatibles con los ya existentes.

Los polímeros, de hecho, no tienen una presencia significativa en las redes de comunicaciones modernas, excepto, por supuesto, por aquellos polímeros que se usan para interconectar componentes, dicho de otra forma, los polímeros tienen que abrirse paso en un mundo dominado por el silicio. En este contexto, uno de los problemas más importantes,

ha sido el de poder fabricar polímeros con características de pérdida por absorción comparables a los del silicio. En la práctica, la utilización de polímeros nos ofrece una alta transparencia en las bandas de comunicaciones ópticas, la banda O (1260-1360 nm), la banda C (1530-1565 nm), la banda L (1565-1625 nm) y posiblemente también la banda S (1480-1530 nm) como lo muestra la figura 11.

Tomando en consideración estas características, uno se podría preguntar: ¿qué caso tendría el usar polímeros en comunicaciones para componentes tales como los circuitos ópticos planos? (planar lightwave circuits PLC, por sus siglas en inglés). La tecnología líder, debido a sus bajas pérdidas y su estabilidad a altas temperaturas, es la de silicio-n-silicio. Estas ventajas, sin embargo, son acompañadas por algunos inconvenientes. Desde el depósito del silicio mediante un depósito por vapor químico de plasma (PECVD, plasma enhanced chemical vapor deposition por sus siglas en inglés) se produce un proceso de hidrólisis de alta temperatura, después que la oblea se ha enfriado, el esfuerzo puede acumularse dentro del silicio y surgir esfuerzos entre el silicio y el sustrato.

Los esfuerzos pueden surgir tanto de un desequilibrio en el coeficiente de expansión térmica (coefficient of thermal expansion CTE, por sus siglas en inglés) y/o de una contracción de la película de silicio al ser sinterizados. Sin intervención, el esfuerzo produce birrefringencia en la guía, lo cual conduce a una dependencia de la polarización, un efecto no deseado en ningún dispositivo. Aunque hay maneras de abordar el problema del esfuerzo en el proceso de fabricación, esto requiere de alargar el tiempo de procesamiento, y con esto, se da un aumento de los costos. El hecho de que el silicio tenga un coeficiente termo-óptico pequeño, le da una ventaja en la producción de dispositivos atérmicos, pero esta ventaja puede convertirse en una desventaja a la hora de querer obtener dispositivos sintonizables.

Algunos tipos de dispositivos, tales como los conmutadores ópticos digitales y las rejillas térmicamente sintonizables, que cubren una amplia gama de longitudes de onda, son esencialmente imposibles de lograr con silicio. Dado que los polímeros pueden ser procesados a bajas temperaturas, ofrecen la ventaja adicional de ser fácilmente combinables con otros dispositivos pasivos o activos (orgánicos y/o inorgánicos) para producir híbridos de circuitos ópticos integrados.

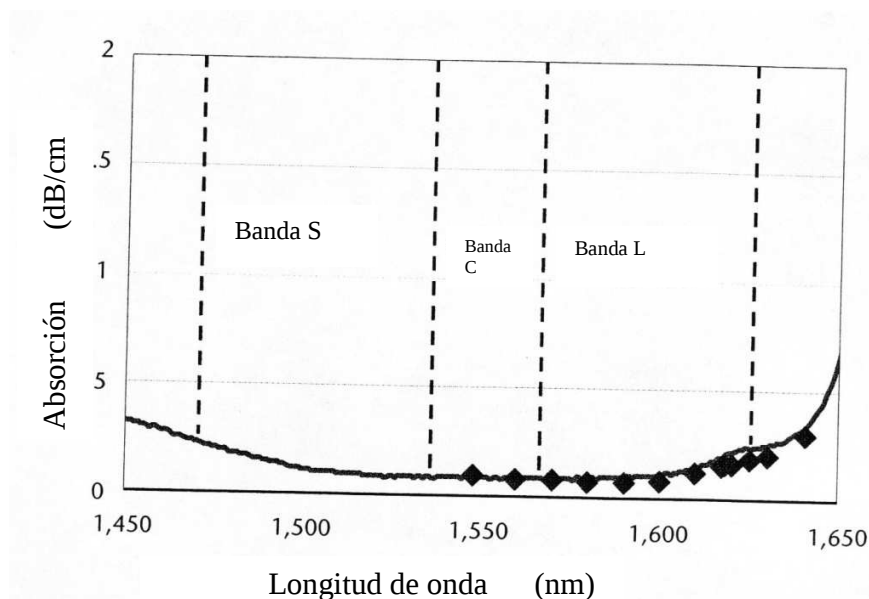


Figura 11: Pérdidas por propagación de una guía de onda de polímero óptico. Los puntos representan las pérdidas y la curva representa los datos adquiridos por el espectrofotómetro [Shacklette, 2003].

Las limitaciones del silicio han impulsado la investigación sobre los sistemas de polímeros, en la que determinados materiales poliméricos pueden proporcionar ventajas en los ámbitos de sintonización y una baja sensibilidad a la polarización. Los progresos recientes en este ámbito se pueden observar en varios artículos [Shacklette, 2003], los cuáles cubren el desarrollo de polímeros para las guías de onda planas. Las pérdidas por propagación y la confiabilidad han sido percibidas como las principales deficiencias de materiales poliméricos en el contexto de las comunicaciones. También se ha demostrado que un desafío es el obtener baja birrefringencia con polímeros que contienen un importante contenido de aromáticos y tienen una temperatura de transición vítrea relativamente alta [Smith, 2002]. Se ha demostrado en trabajos recientes que es posible eliminar el resto de los inconvenientes de los polímeros y lograr compararlos al silicio, manteniendo al mismo tiempo la alta ajustabilidad del índice de refracción, la cual es una gran ventaja de los polímeros. Las pérdidas ópticas en las guías de onda, en general, se dividen en dos categorías: las pérdidas inherentes a los propios materiales y las pérdidas causadas por defectos en las guías de onda. Las pérdidas debidas a los materiales están predominantemente relacionadas con la absorción causada por las vibraciones moleculares

que se producen en la región espectral infrarroja a longitudes de onda de $2.5\ \mu\text{m}$ en adelante. Matices de orden superior de estas vibraciones entran dentro de la región del infrarrojo cercano (NIR, near infrared region por sus siglas en inglés), que es importante para las comunicaciones ópticas [Eldada, 2000]. Las vibraciones que implican una masa reducida, tales como las características de los grupos químicos C-H, N-H u O-H tienen un mayor efecto negativo. Por esta razón, materiales ópticos, como el poliestireno, el policarbonato y el polimetacrilato de metilo no son útiles en las comunicaciones. Una de las formas más eficaces de disminuir sustancialmente la pérdida, es sustituir el hidrógeno con halógenos [Dreyer, 2002]. Debido al aumento de la masa reducida del oscilador. Esta tecnología reduce drásticamente la absorción de vibraciones causadas por longitudes de onda en el infrarrojo cercano. Sin embargo, la homogenización del polímero puede hacer el proceso mucho más difícil y darnos una reducción en su adherencia. En la compañía Corning I [Shacklette, 2003], se han encontrado resultados con polímeros que tienen muy poca absorción y distorsión muy baja debida a la dispersión (mediciones de pérdidas por absorción, en guías de onda de canal). En la Fig. 11 cada punto representa el promedio de ocho guías de onda. La curva representa datos tomados por medio de un espectrofotómetro sobre las guías de onda de polímeros.

La pérdida sigue siendo igual o inferior a $0.1\ \text{dB/cm}$ desde 1500 a $1600\ \text{nm}$, y por debajo de $0.23\ \text{dB/cm}$ a lo largo de las bandas S, C y L. Las pérdidas en este rango son comparables a las obtenidos con guías de onda de silicio (0.03 a $0.1\ \text{dB/cm}$). Para ambos materiales: polímeros y dispositivos de silicio, la pérdida dominante ocurre en el acoplamiento entre el circuito integrado y la fibra óptica.

III.2.2 Materiales poliméricos para óptica integrada

Como se mencionó anteriormente los materiales poliméricos son una tecnología prometedora para la fabricación de dispositivos ópticos integrados. El desarrollo de guías de ondas ópticas de materiales poliméricos se ha centrado en los últimos años en reducir la pérdida por absorción en la banda C (1525 - 1565nm) y la banda L (1565 - 1625nm). La Fig. 12, muestra la reducción de pérdidas por propagación en guías de onda monomodales que

se ha logrado con diferentes materiales. Además de las pérdidas por propagación, la estabilidad ambiental de los materiales poliméricos se ha mejorado en los últimos años.

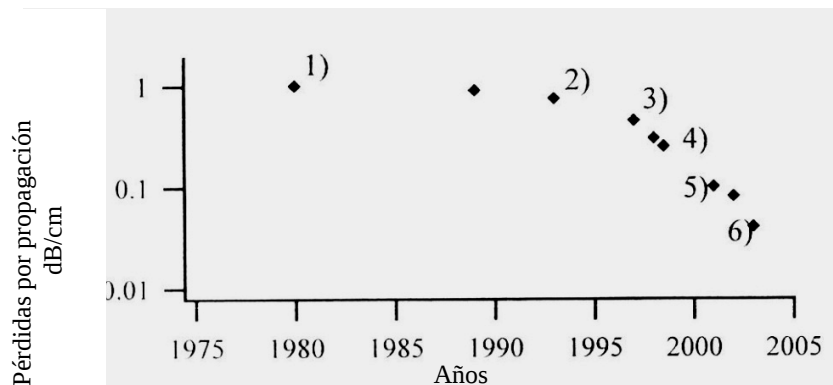


Figura 12. Reducción en las pérdidas por propagación a 1550 nm en guías monomodales a lo largo de 30 años. Los materiales son: 1) acrilatos, 2) policarbonatos fluorados, 3) Polímeros fluorados. 4) per-fluorociclobutano, 5) acrilatos fluorados, 6) polímeros pre-fluorados.

Para el éxito de la fabricación de guías de onda ópticas, la pérdida óptica debida al material no es el único parámetro importante. La estabilidad y el procesamiento del material son también características significativas. La Tabla IV muestra una visión general de los parámetros involucrados con las características de los materiales poliméricos.

Las primeras prácticas en materiales poliméricos por las compañías Tetramer y THz, pusieron de manifiesto que el esfuerzo para el desarrollo de un proceso de fabricación fiable sería grande. Hay un primer plano, un proceso específico de desarrollo [Zou, 2002] y una caracterización más detallada que se realiza sólo en algunos materiales poliméricos por las compañías RPO y Zenphotonics. Por último, debido a la menor pérdida y, en particular, la mejor estabilidad del medio ambiente. Los acrilatos fluorados utilizados en las pruebas de ZenPhotonics fueron elegidos para la fabricación de circuitos con guías de onda planas.

Tabla IV. Evaluación de diferentes polímeros para la fabricación de guías de onda ópticas.

	ZenPhoton	RPO	Tetrame	THz
Proceso de curado	UV	UV	termal	UV
Adhesión en polímero o silicio	+	+	+	-
Calidad de la película	+	+	-	+
Estrés en el material	poco	poco	mucho	mucho
Pérdidas ópticas	0.4 dB/cm	0.7 dB/cm	No medida	0.7 dB/cm
Estabilidad ambiental	+	~	No medida	No medida

III.2.3 Efecto termo-óptico en polímeros

El efecto termo-óptico describe el cambio en el índice de refracción debido a la temperatura. El coeficiente termo-óptico: dn/dt de los polímeros es muy grande. Es un orden de magnitud mayor que el de silicio. En los polímeros el índice de refracción cambia debido a un cambio de temperatura, el cual se debe principalmente a un cambio en la densidad ρ del material [Miya 2000]. Por lo tanto, el coeficiente termo-óptico dn/dt se puede escribir como:

$$\frac{dn}{dT} = \left(\frac{\delta n}{\delta \rho} \right)_T \left(\frac{\delta \rho}{\delta T} \right) + \left(\frac{\delta n}{\delta T} \right)_\rho = - \left(\frac{\rho \delta n}{\delta \rho} \right)_T \gamma + \left(\frac{\delta n}{\delta T} \right)_\rho \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\delta \rho}{\delta T} \right).$$

donde γ es el coeficiente de expansión de volumen. Para la mayoría de los polímeros las siguientes suposiciones nos dan una buena aproximación:

$$\gamma \approx -10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

$$\left(\frac{\rho \delta n}{\delta \rho} \right)_T \approx 0.5 \quad (5)$$

El cambio térmico del índice de refracción a densidades constantes es pequeño con valores típicos de 10^{-6} - 10^{-5} . Por lo tanto, el coeficiente termo-óptico se basa en el cambio de densidad, por lo que el valor es negativo:

$$\frac{dn}{dT} \approx - \left(\frac{\rho \delta n}{\delta \rho} \right)_T \gamma \approx -10^{-4} \text{ K}^{-1} \quad (6)$$

En el rango de temperaturas en el cual trabajan los dispositivos el coeficiente termo-óptico es constante. La estimación para el coeficiente termo-óptico en la ecuación (6) está cerca del valor medido para el polímero de prueba que utilizó la compañía ZenPhotonics y el cual obtuvo un valor de: $dn/dt = -2.5 \times 10^{-4}$ y es de aproximadamente un orden de magnitud más grande que el coeficiente termo-óptico del silicio ($dn/dt = -10^{-5}$).

Capítulo IV

Proceso de Fabricación y Caracterización

En este capítulo se describirán las actividades que se llevaron a cabo para la fabricación y caracterización de las guías de onda de polímero óptico. Para la fabricación se seleccionó un sustrato de vidrio sódico-cálcico debido a que presenta buena transmitancia en el rango espectral deseado (400-1600 nm), por lo que se ha venido utilizando por el grupo de óptica integrada de CICESE desde los primeros trabajos sobre guías de onda.

Como ya se dijo antes, para la fabricación de estas guías de onda se seleccionó el polímero SU-8 debido a sus características ópticas, físicas y mecánicas; además de ser un material con buena biocompatibilidad y de tener muy alta relación de aspecto, mayor a 15 μm . [Lorenz, 1997].

Existen diversas técnicas de fabricación de guías de onda de polímeros ópticos, pero en nuestro caso, ya que el polímero óptico a utilizar es fotosensible, utilizaremos la técnica de microlitografía.

El capítulo se encuentra dividido en 7 secciones:

- a) Descripción de la técnica utilizada para caracterizar los modos de propagación.
- b) Descripción de la técnica de microscopia electrónica de barrido.
- c) Selección y preparación de los sustratos.
- d) Polímero óptico SU-8.
- e) Técnica de microlitografía.
- f) Guías de onda planas.
- g) Guías de onda de canal.

Dichas secciones nos describen los procesos y técnicas necesarios para fabricar y caracterizar las guías de onda de polímeros ópticos.

IV.1 Caracterización de los modos de propagación

Utilizando la técnica de acoplamiento por prisma de alto índice de refracción (Najafi, 1992), se determinó el número de modos que podían soportar las guías de onda y sus índices efectivos asociados. Para la caracterización de los modos de propagación de las guías de onda. Se usó un sistema automatizado modelo Metricon 2010 Prism coupler. En la figura 13 se muestra un esquema del mecanismo que utiliza dicho sistema y el funcionamiento es el siguiente: un haz de luz láser llega a la base del prisma de alto índice y se refleja hacia el fotodetector. La guía que se va a medir se pone en contacto con la base del prisma. El ángulo de incidencia del haz láser varía girando la montura que soporta al prisma y a la guía.

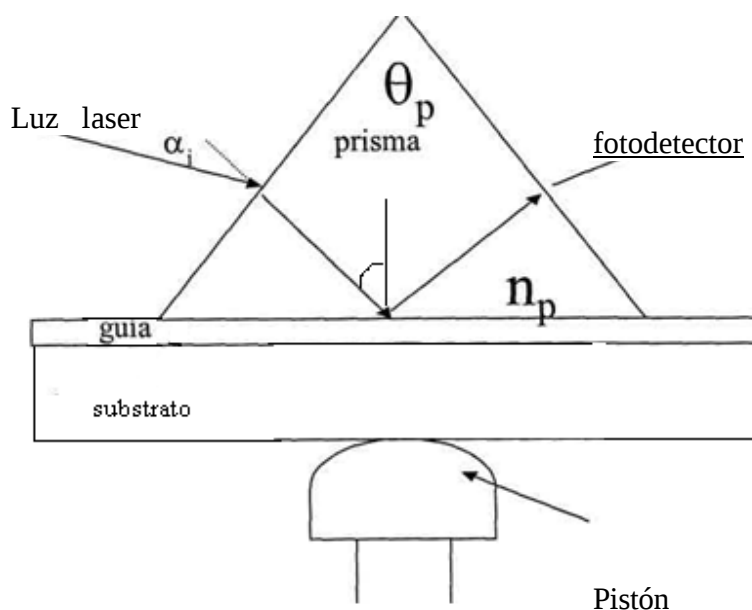


Figura 13. Mecanismo de acoplamiento por medio de un prisma de alto índice.

Para ciertos ángulos, los fotones no cumplen el criterio de la reflexión interna total, produciéndose un efecto de tunelaje óptico. El sistema cuenta con una placa de media onda que puede introducirse en el haz del láser, lo cual nos permite realizar mediciones tanto de modos TE como TM. En estas mediciones se usó un prisma de índice de refracción de

1.9650 que permite hacer mediciones de índices efectivos en el rango de 1.0000 a 1.8000 utilizando un láser que emite en 632.8 nanómetros. Para lograr un acoplamiento eficiente, la guía presiona contra el prisma por medio de un pistón neumático.

Como ejemplo, en la figura 14 se muestra la distribución de la intensidad (TE) en función de la posición angular del detector el cual está posicionado a la salida del prisma, el prisma se encuentra en contacto con una guía que presenta tres modos de propagación, proporcionada por el sistema Metricon. Cada mínimo en la gráfica de intensidad corresponde a un modo acoplado a la guía. En nuestro ejemplo se pueden observar claramente los 3 mínimos asociados al acoplamiento de tres modos de propagación.

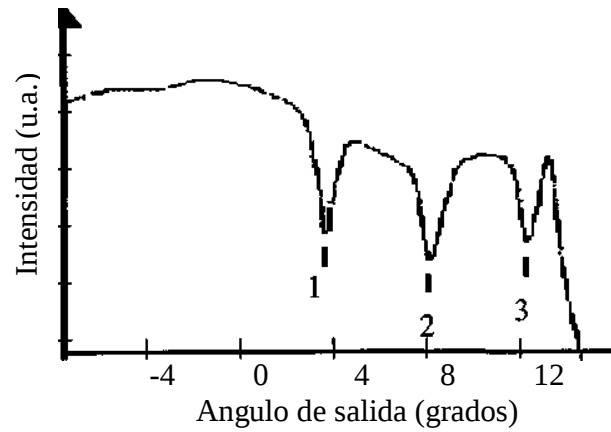


Figura 14. Ejemplo de un patrón de intensidad a la salida del prisma, donde cada mínimo representa un modo acoplado a la guía.

El índice de refracción efectivo del modo propagado por la guía, N_i , está relacionado con el ángulo de incidencia α_i sobre la cara de entrada del prisma por la relación (White, 1976).

$$N_i = \frac{\beta_i}{2\pi/\lambda} = n_p \sin \left(\theta_p + \frac{1}{n_p} \sin^{-1}(\sin(\alpha_i - \theta_p)) \right) \quad (8)$$

donde θ_p es el ángulo del prisma, α_i es el ángulo de incidencia de la luz con respecto a la normal de la cara de entrada del prisma, n_p es el índice de refracción del prisma y el

subíndice $i=0, 1, 2, \dots$ indica los órdenes de los modos. Este método se presenta con mayor detalle en el Apéndice A.

IV.2 Microscopía electrónica de barrido MEB

Una de las técnicas más usadas para analizar superficies a nivel microscópico es la de microscopía electrónica de barrido (MEB). A continuación se describen brevemente los principios del funcionamiento de dicha técnica.

Cuando un haz de electrones incide sobre la superficie de un sólido, tienen lugar varios fenómenos: re-emisión de una parte de la radiación incidente, emisión de luz, electrones secundarios, rayos X, etc. Todas estas señales se pueden emplear para obtener información sobre la naturaleza de la muestra que pueden ser: morfología, composición, estructura cristalina, estructura electrónica, etc. El microscopio electrónico de barrido con que cuenta el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM en Ensenada (CNyN-UNAM), JEOL 5300, dispone de detectores que permiten el análisis de electrones secundarios retro dispersados y rayos X característicos de los elementos que componen al material.

La técnica consiste, principalmente, en enviar un haz de electrones sobre la muestra y mediante un detector apropiado registrar el resultado de esta interacción. El haz se desplaza sobre la muestra realizando un barrido en las direcciones X e Y de tal modo que la posición en la que se encuentra el haz en cada momento coincide con la aparición de brillo, proporcionalmente a la señal emitida, en un determinado punto de una pantalla.

Las imágenes que se obtienen en el microscopio electrónico de barrido corresponden a electrones secundarios o electrones retrodispersados emitidos tras la interacción con la muestra de un haz incidente de entre 5 y 30 KeV.

La señal de electrones secundarios se forma en una capa superficial delgada, del orden de 50 a 100 Å. Al ser grande el número de electrones emitido se puede establecer un buen contraste. Por otra parte, al ser electrones de baja energía, menos de 50 eV, pueden ser desviados fácilmente de su trayectoria emergente inicial, y se puede obtener información de zonas que no están a la vista del detector. Esta particularidad es fundamental para otorgar a esta señal la posibilidad de aportar información “en relieve”. La apariencia de la imagen es

la que tendría una muestra que hubiese sido iluminada desde el detector y se estuviese observando desde el cañón de electrones.

En cuanto a la señal de electrones retrodispersados, su principal utilidad reside en que su emisión, que se debe a choques de tipo elástico y por tanto con energía del mismo orden que la de los electrones incidentes, depende fuertemente del número atómico de la muestra. Esto implica que dos partes de la muestra que tengan distinta composición se revelan con distinta intensidad aunque no exista ninguna diferencia de topografía entre ellas.

IV.3 Selección y preparación de los sustratos

Los sustratos que se emplean son vidrios porta-objetos previamente limpiados, del tipo Corning 2947 (vidrios de titanio-zinc), de dimensiones 2.5 x 7.5 x 0.1 cm con un índice de refracción de 1.5100 (a una longitud de onda de 632 nm). Las propiedades del vidrio común son una función tanto de la naturaleza de las materias primas como de la composición química del producto obtenido. Esta composición química se suele representar en forma de porcentajes en peso de los óxidos más estables a temperatura ambiente de cada uno de los elementos químicos que lo forman. Las composiciones de los vidrios utilizados como sustratos, fueron dados por el fabricante y se muestran en la tabla V.

Tabla V: Composición química del vidrio 2947 Corning.

Componente	%
SiO ₂	64,0
Al ₂ O ₃	3,0
Zno	7,0
TiO ₂	3,0
Na ₂ O	7,0
K ₂ O	7,0
B ₂ O ₃	9,0

La absorción (o transparencia) a la luz de los vidrios de titanio-zinc depende de su contenido en elementos de transición, en este caso, en la zona del espectro visible (400 nm

a 750 nm) el vidrio es casi totalmente transparente. La fig. 15, nos muestra la transmitancia medida para una muestra de portaobjeto sin recubrimiento.

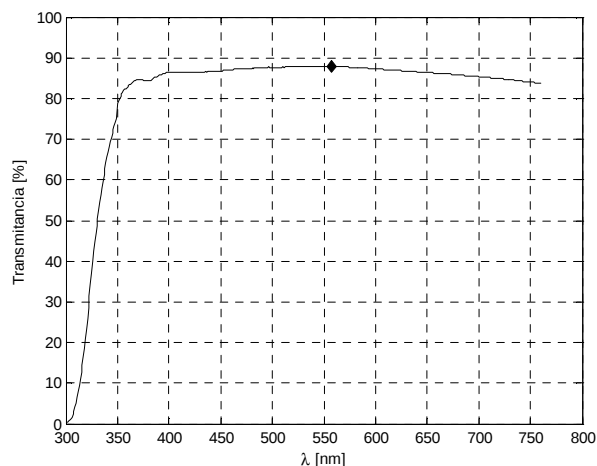


Figura 15. Transmitancia medida de un vidrio de portaobjeto sin recubrimiento.

IV.3.1 Preparación y limpieza de los substratos

Para que el substrato sea el adecuado para soportar en su superficie el depósito del polímero que actuará como una guía de onda óptica, éste deberá estar libre de impurezas y defectos en su superficie, condiciones necesarias para lograr una buena adherencia y librar de posibles defectos las guías de onda [Salazar Miranda, 1991]. Para ello, inicialmente se lleva al cabo una inspección visual haciendo incidir un haz de luz rasante mediante una lámpara de luz condensada. Mediante este procedimiento es posible detectar la presencia de partículas extrañas o de algún tipo de suciedad. Esta inspección se complementa con el uso de un microscopio óptico, con el cual es posible detectar defectos más pequeños o la porosidad microscópica de las superficies. Se requiere que el substrato no contenga impurezas ni defectos, éste no deberá de contener ralladuras o imperfecciones mayores a 1 μm . En caso de que la superficie de los substratos presente este tipo de anomalías, deberá verificarse que al ser retiradas no causen daño alguno. El sector de la superficie utilizable del substrato, en su zona central, debe ser de aproximadamente de 2 x 5 cm, debido a que ahí es la parte donde se depositará la fotoresina.

Para la limpieza de los sustratos existen diversos métodos, sin embargo, el método utilizado en este proyecto debido a su eficiencia y disponibilidad de materiales es el siguiente:

1. Lavar los sustratos con agua destilada y a una temperatura aproximada de 60 °C.
2. Secar con toallas de grado óptico.
3. Hacer un pulido de los sustratos en una pulidora y con un abrasivo apropiado.
4. Se repiten los paso 1 y 2.
5. Baño en cuba ultrasónica, sumergidos en agua destilada y jabón del tipo alconox (10:1) por un tiempo de 30 minutos.
6. Repetir paso 2.
7. Limpieza con hisopos, impregnados inicialmente con acetona grado técnico y después con alcohol isopropílico: en primera instancia se toma una cara del hisopo impregnada de acetona y limpiamos hasta que no queden rastros de impurezas, después tomamos la otra cara del hisopo y la impregnamos de alcohol isopropílico para quitar los restos de acetona que pudieran manchar el sustrato. Realizado este paso, se lleva al cabo una nueva inspección visual de nuestro sustrato con una lámpara de luz condensada.

Se recomienda la utilización de guantes en todo momento.

Una vez que se han seleccionado y limpiado los sustratos, éstos son horneados a temperaturas de 200 °C para deshidratarlos y quitar cualquier residuo de agua que pudieran llegar a tener debido al proceso de limpieza.

IV.4 Selección del polímero óptico

El rápido avance tecnológico en miniaturización de dispositivos está encabezando una creciente demanda de dispositivos ópticos integrados. Las guías de onda, ya sean planas o de canal, o circuitos más complejos, se emplean cada vez más. Dentro de este marco, aparece como una opción real el uso de polímeros. En el capítulo II se habló de las diferentes variedades de polímeros y el porqué del uso de SU-8. A continuación, se dan las características particulares de dicho material.

En la literatura existe una gran cantidad de métodos para la fabricación de guías de onda. Las guías de onda por intercambio iónico pueden ser fabricadas vía difusión en vidrios ópticos. Sin embargo, una limitación que tienen las guías de onda fabricadas por estos procesos, es que sus espesores no pueden tener una variación en un rango alto (típicamente $< 5 \mu\text{m}$). Por lo tanto, las pérdidas por inserción de luz en las guías de onda pueden llegar a ser significativas. La irradiación con luz UV es un método comúnmente empleado para obtener una modulación del índice de refracción en materiales tales como las obtenidas por sol-gel y polímeros.

El polímero SU-8 (MicroChem) ha sido utilizado por sus pérdidas de propagación bajas, a todas las longitudes de onda claves en comunicaciones (840 nm, 1310 nm y 1550 nm); un ejemplo de esto se muestra en la Fig. 16 [Shackette, 2004]. Además de ser química y mecánicamente estable, el SU-8 posee relaciones de aspecto altas y se encuentra disponible en diferentes viscosidades. De ahí que los dispositivos fabricados sean de grosores diferentes.

Por lo general se requiere un paso de revelado para remover las partes que no se encuentran entrecruzadas y así revelar las guías fabricadas en él. Ya que con este polímero

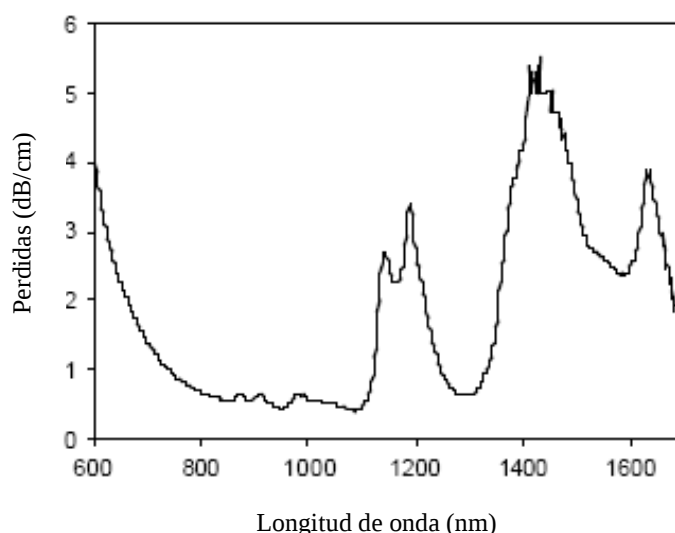


Figura 16. Espectro de transmisión de una muestra de SU-8.

las diferencias de los índices de refracción entre la cubierta y el sustrato que se obtienen son grandes. Esto nos permite que dichas guías de onda soporten varios modos de propagación (10 a 30 modos) aún para espesores de 5 μm .

En las tablas VI y VII se muestran las propiedades físicas y ópticas del SU-8 respectivamente.

Tabla VI. Propiedades físicas de la fotoresina SU-8.

características	Valor	Condiciones	Referencia
Densidad (kg/m^3)	1200	Densidad de la materia prima SU-8.	Resins.com
Viscosidad cinemática (m^2/s)	0.000045	SU-8 2	MCC
	0.000290	SU-8 5 (52% sólido + GBL), densidad 1.1641, 20C	
	0.001050	SU-8 10 (59% sólido + GBL), 20C	
	0.0025	SU-8 25 (63% sólido + GBL), 20C	
	0.01225	SU-8 50 (69% sólido), 20C	
	0.0515	SU-8 100 (73% sólido), 20C	
Viscosidad absoluta ó dinámica ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.06	SM1040 (40% sólido + GBL), DIN53019	Lorenz97 J-L Guerin.
	1.5	SM1060 (60% sólido + GBL), DIN53019	
	15	SM1070 (70% sólido + GBL), DIN53019	

Tabla VII. Propiedades ópticas de la fotoresina SU-8.

Características	Valor	Condiciones	Referencia
Índice de refracción	1.6700	A 365 nm, no entrecruzamientos (durante la exposición antes del PEB)	<u>MCC</u>
	1.6700	A 408 nm, igual que el anterior	
	1.5960	A 633 nm, entrecruzamiento después de someterse a la exposición U.V., técnica: prisma de alto índice	<u>Sum03</u>
	1.5750	A 1550 nm, idem	
	1.7000	A 1.6 THz, calentamiento después de la exposición a 100°C (+8 horas a 65°C en KOH), THz espectroscopia en el dominio del tiempo	<u>Arscott99</u>
	1.8000	A 100 GHz, igual a anterior	
Coeficiente de absorción: α (cm ⁻¹)	~2	A 100 GHz, calentamiento después de la exposición a 100°C (+8 horas a 65°C en KOH), THz espectroscopia en el dominio del tiempo	<u>Arscott99</u>
	~40	A 1.6 THz, igual a anterior	
Constante dieléctrica: ϵ_r	4	A 10 MHz, calentamiento después de la exposición a 100°C , válido para valores entre 20 GHz y 40 GHz	<u>Thorpe98</u>
	4.5	A 10 MHz	<u>James Thorpe</u>

En la Fig. 17, se ilustra la variación en las propiedades ópticas del SU-8. Para regiones del visible y del infrarrojo tiene un porcentaje alto de transparencia y un alto índice de refracción. Una característica importante de este polímero es, su capacidad de

ajuste del contraste de índice de refracción que permite estructuras de guiado compactas de alta densidad, con radios de curvatura pequeños.

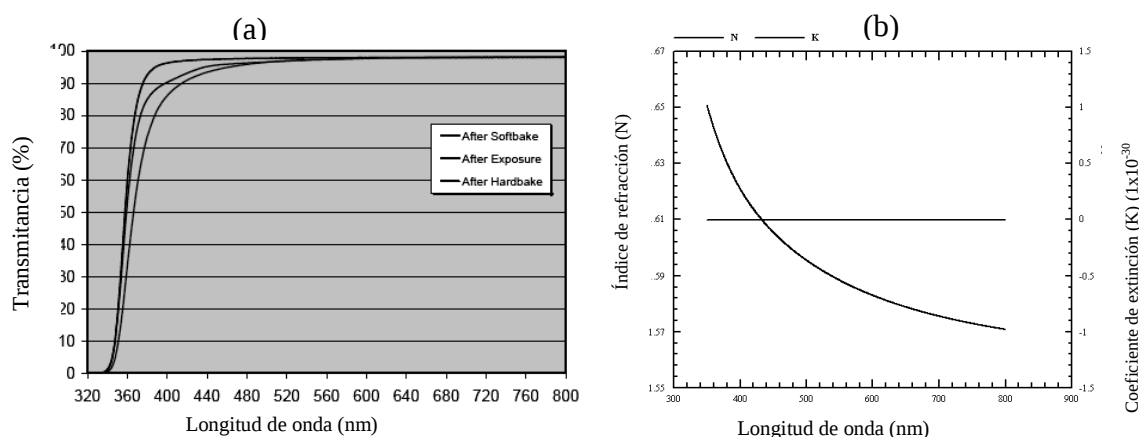


Figura 17. Variación de las propiedades ópticas del SU-8. (a). Transmitancia óptica del polímero. (b) coeficientes de Cauchy.

IV.5 Técnica de microlitografía

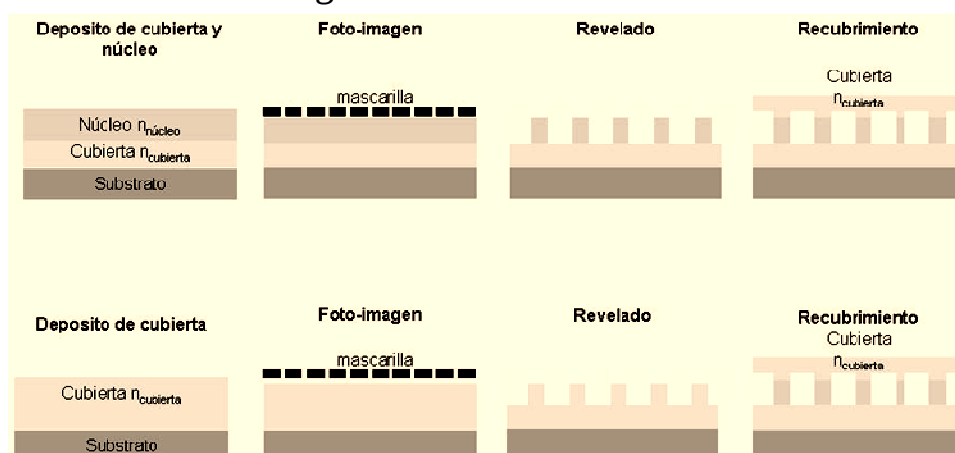


Figura 18. Proceso de fabricación de guías de onda por micro litografía.

La microlitografía es un proceso empleado en la fabricación de dispositivos semiconductores o circuitos integrados. El proceso consiste en transferir un patrón desde una fotomáscara (denominada rejilla en este trabajo) a la superficie de un sustrato. La microlitografía trabaja de manera análoga a la litografía empleada tradicionalmente en los trabajos de impresión y comparte algunos principios fundamentales con los procesos

fotográficos. La producción de las guías de onda de polímero óptico usando mascarillas patrón, es un proceso litográfico de pasos múltiples, que generalmente involucran el depósito, el grabado y el revelado, (ver Fig.18). El procesamiento de esos polímeros puede ser del tipo positivo o negativo, dependiendo si el material expuesto a la luz es el que se queda en el sustrato o es el que se desprende de él. En nuestro caso, la fotoresina SU-8 es un material negativo. Las películas de calidad óptica de uno a varios cientos de micrómetros pueden ser preparadas por las técnicas de centrifugado o inmersión, dependiendo la elección del tipo de uniformidad requerida. La fotoresina SU-8 sin procesar está en forma de monómero líquido y viene mezclada con un inhibidor de polimerización (gama-butirolacton).

Una serie típica de procedimientos en litografía de silicio podría constar de los siguientes procesos (figura 18):

- **Preparación del sustrato.** Se realiza una limpieza exhaustiva para dejar libre de impurezas al sustrato, además de realizar un paso de secado del mismo para eliminar restos de agua provenientes de su limpieza.
- **Aplicación de las fotoresinas.** Se aplica mediante la técnica de centrifugado una capa de fotoresina. Suele ser una sustancia que cambia sus características químicas con la exposición a la luz (generalmente radiación ultravioleta).
- **Introducción en el horno** (calentamiento ligero). En esta etapa se fijan las resinas sobre el sustrato.
- **Exposición.** Se usa una mascarilla patrón con áreas opacas y transparentes que delimitan el área a grabar. La mascarilla se coloca interponiéndose entre la placa preparada y la fuente luminosa, de este modo, se exponen a la luz sólo unas partes de la fotoresina, mientras que otras quedan ocultas ó protegidas.
- **Revelado.** En esta fase, se sumerge el sustrato en una sustancia reveladora previamente preparada (dicha sustancia depende de la fotoresina utilizada), y se agita levemente para así poder retirar la porción de fotoresina que no fue polimerizada.

- **Introducción en el horno** (calentamiento fuerte). Se fijan los cambios que la impresión ha realizado anteriormente.

Este proceso se lleva a cabo en los laboratorios llamados “cuartos limpios”, donde se trabaja en ambientes libres de partículas en suspensión y humedad, así como de la exposición a luces azules o ultravioletas externas, con el objeto de evitar, tanto la contaminación del proceso, como la exposición indeseada de las fotoresinas. El depósito en la centrifugadora se realiza de manera protegida, solo se permite iluminación centrada en el color amarillo, para evitar cualquier tipo de exposición no deseada. Este proceso litográfico ofrece una respuesta al contraste muy alta permitiendo la definición de características poliméricas con dimensiones en un rango de unos pocos micrómetros a unos cuantos milímetros con un alto grado de precisión del proceso.

IV.5.1 Depósito de la fotoresina

Se emplea la fotoresina SU-8 (MicroChem) para la fabricación de las guías de onda. Para el depósito de la fotoresina se lleva al cabo el siguiente procedimiento: Se coloca el sustrato en la montura del equipo de centrifugado para posteriormente depositar la fotoresina con ayuda de un gotero, como se ilustra en la Fig. 19.

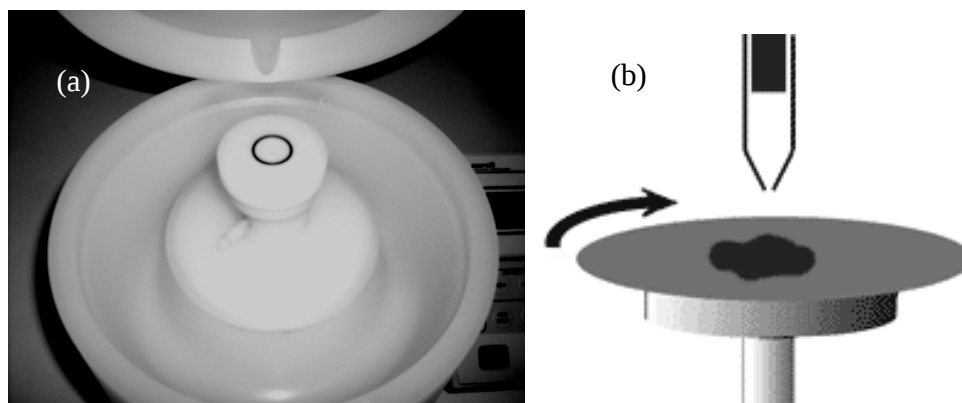


Figura 19. Materiales necesarios para el depósito de la foto-resina en sustratos de vidrio. (a) Centrifugadora. (b) Esquema de la deposición por gotero.

Posteriormente dependiendo del espesor deseado, se activa el centrifugado. En la Fig. 20, se ilustran los datos proporcionados por el fabricante para obtener un espesor definido con esta fotoresina, como se observa, dependiendo de la familia de SU-8 con que

se trabaje, dependerá el espesor que se quiera obtener. Para este trabajo se utilizó SU-8 2005, que como se observa en la Fig. 20, para poder obtener una capa de 7 μm se debe utilizar una velocidad de aproximadamente 1400 revoluciones por minuto (rpm).

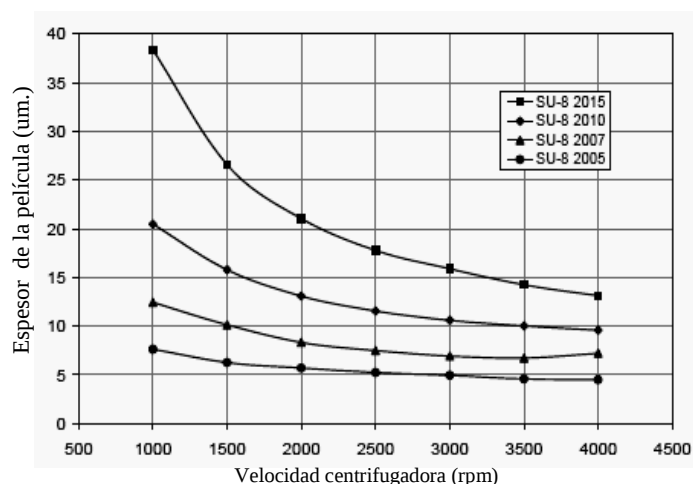


Figura 20. Velocidad de la centrifugadora respecto al espesor que se desea.

Una vez que se ha realizado este proceso, deberá observarse una película delgada de fotoresina de espesor muy uniforme; aunque cabe mencionar, que como se ilustra en la Fig.21, se pudieran llegar a presentar algunos tipos de anomalías. Las anomalías más comunes son:

- En forma de cometas: Gran parte de la resina ha sido rechazada por el sustrato.
- Forma de remolino: La resina queda “retorcida sobre el sustrato”.
- Forma de meteoro: La mayoría de la resina queda en el centro del sustrato
- Forma irregular: La resina no tiene una uniformidad constante a lo largo del sustrato

En caso de que esto llegara a suceder, se debe limpiar con ayuda de acetona y alcohol para volver a realizar un nuevo depósito. Una limpieza deficiente, mal manejo del centrifugado y presencia de humedad en el ambiente son las causas más comunes para que estas anomalías se presenten.

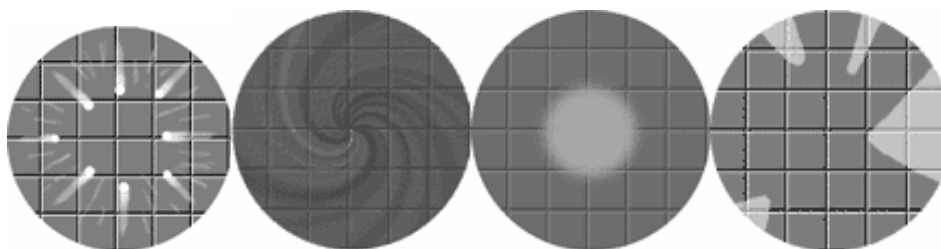


Figura 21. Anomalías que se presentan comúnmente cuando se deposita la fotoresina.

IV.5.2 Grabado y revelado de fotoresina

La muestra, el sustrato con el depósito de fotoresina, se coloca sobre un marco que la aprisiona, impidiéndole cualquier movimiento (se sujeta neumáticamente). A continuación se le coloca encima la rejilla de líneas patrón. Se debe tener el cuidado de que la cara de enfrente de la mascarilla haga contacto físico con la superficie de la muestra. El equipo utilizado para llevar cabo lo anterior es un equipo de microlitografía marca Oriel modelo 83210-V con un alineador de mascarillas, el cual opera en el modo de contacto por vacío.

Posteriormente la muestra es expuesta a luz UV. El tiempo de exposición al igual, que en el paso de centrifugado, varía dependiendo del espesor deseado, muestra de esto son los valores proporcionados por el fabricante del polímero y que se dan en la Tabla VIII.

Tabla VIII. Dosis de exposición recomendadas por el fabricante de la fotoresina.

Espesores micrómetros (μm).	Exposición mJ/cm^2
0.5-2	60-80
3-5	90-105
6-15	110-140
15-25	140-150
26-40	150-160

En la mayoría de los casos se tendrán que variar estos datos, ya que los parámetros de la lámpara de UV y el alineador con que se cuenta, no son los mismos, que se utilizaron para obtener los datos que nos proporciona el fabricante.

Una vez que se ha realizado el grabado se prepara una solución del revelador (en este caso y por tratarse de esta fotoresina, se utilizó el revelador PGMEA (Aldrich-Sigma),

se sumerge el substrato en el revelador y se agita levemente. En esta parte del proceso se puede ver una sustancia “lechosa”, la cual será la parte de SU-8 no polimerizado. En este lapso, la muestra se enjuaga varias veces para ayudar a la remoción de este material. Una vez que se encuentre removido de forma completa el material no revelado, la muestra es enjuagada en alcohol. El paso de secado es opcional y se puede hacer con el mismo centrifugado o bien con aire a presión, lo anterior se puede o no hacer debido a que se puede tener un efecto de “absorción” del revelador por parte del polímero, causando con esto un ensanchamiento en el producto final.

IV.6 Guías de onda Planas

La guía de onda plana es la forma más simple de guía de onda. Está formada por la combinación de tres medios dieléctricos con distinto índice de refracción (comúnmente aire n_c , guía n_f y substrato n_s) en una estructura tal y como se muestra en la Fig. 22. Para poder confinar ondas electromagnéticas es necesario que el medio del centro tenga un índice de refracción mayor que cualquiera de los dos que lo rodean ($n_f > n_c, n_s$). Dentro de la estructura de la guía de onda, debido a efectos de interferencia óptica, la luz ahí atrapada solo puede viajar a ciertos ángulos llamados ángulos de modo θ_m , donde los más bajos viajan casi paralelos al eje de propagación de la guía y los más altos viajan en zig-zag hasta que exceden la condición del ángulo crítico (de corte).

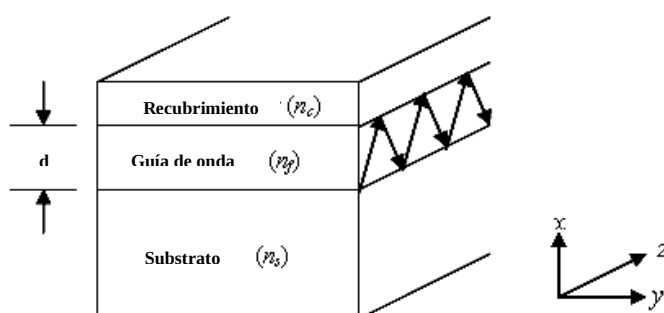


Figura 22. Estructura básica de una guía de onda plana

En nuestro caso, el rol del recubrimiento recae sobre el aire, cumpliéndose así la condición de tener en el centro del sistema un índice de refracción mayor. El proceso típico

que se desarrolló para este trabajo y el cual se siguió para la fabricación de guías de onda planas y de canal de polímeros ópticos, fue el siguiente:

1. Deshidratación de los sustratos. Colocar los sustratos en un horno a temperatura de 200°C por un tiempo de 30 minutos, con el fin de eliminar restos de agua que pudieran quedar al momento de limpiarlos.
2. Adhesión de la fotoresina. Centrar el sustrato dentro de la centrifugadora y verter la fotoresina por medio de una jeringa o pipeta
3. Centrifugado. Una vez que se realizó el vertido de la fotoresina en el sustrato, ésta se tiene que esparcir a lo largo del sustrato, por lo que en primera instancia el sustrato se somete a una velocidad de 200 rpm con una aceleración de 80 rpm durante 20 segundos seguido de una segunda velocidad a 400 rpm con una aceleración de 100 rpm durante 25 segundos, y por último una tercera velocidad de 1400 rpm con una aceleración de 100 rpm durante 40 segundos.
4. Precalentado. Introducir la muestra en el horno y realizar dos pasos de precalentado a temperatura de 60°C y 95°C , con el fin de eliminar restos de disolvente presentes en el SU-8.
5. Exposición a luz UV. Tomar en cuenta estos dos casos:
 - Guías de onda plana, para este caso no se requiere de obtener un patrón sobre la resina por lo que simplemente se coloca la muestra en la alineadora y se irradia con luz UV.
 - Guías de onda de canal: Colocar la rejilla patrón en el sujetador (cuidando que la parte cromada quede boca abajo), coloca la muestra en la alineadora y asegúrese que la muestra este en contacto con la rejilla patrón.
6. Después de la exposición se realiza un calentado, colocar la muestra en el horno y de igual manera que en el pre-calentado utilizar dos etapas de calentado, a 60°C y 95°C , con el fin de eliminar restos de disolvente presentes en el SU-8.
7. Se obtiene una película delgada de fotoresina sobre el sustrato. En este paso no es necesario el revelado ya que no se grabó ningún patrón.

8. Por último se realiza un último calentamiento de la muestra, el cual nos sirve para eliminar cualquier resto de disolvente y polímero suspendido obteniendo así la estructura final.

Este proceso se ilustra en la Fig. 23.



Figura 23. Proceso necesario para la realización de las guías de onda planas de polímeros ópticos.

IV.6.1 Control del espesor

El espesor propuesto para las guías de onda planas es de $7\ \mu\text{m}$, tamaño comparable con el de una fibra óptica monomodal, motivo por el cual se utilizó la fotoresina SU-8 2005. Se siguieron como referencia las especificaciones del fabricante ver Fig. 20, como se había comentado estas especificaciones no necesariamente son exactas, ya que los entornos de trabajo y materiales son diferentes, lo cual nos llevó a buscar experimentalmente las condiciones para el depósito.

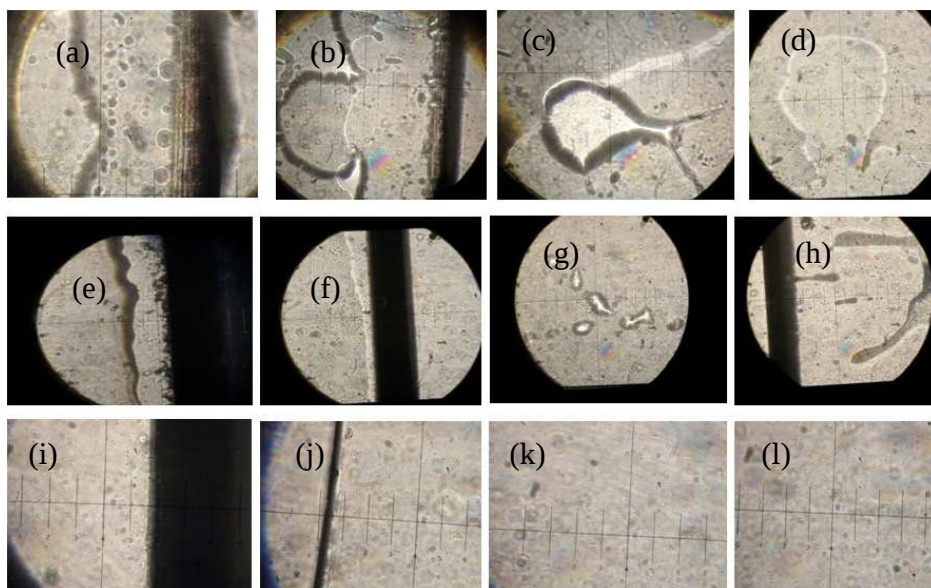


Figura 24. Imagen de microscopio óptico que muestra los problemas típicos que se encontraron después de haber realizado el depósito de la fotoresina. En las micrografías (a) hasta (h) se muestran problemas de depósito en el sustrato. En las micrografías (i) hasta (l) se muestran depósitos con una excelente uniformidad.

En la Fig. 24 se muestran imágenes de las muestras después de haber realizado el depósito de la fotoresina y de cómo el proceso se fue perfeccionando hasta obtener capas uniformes sobre el sustrato. En un principio se empezaron a tener problemas con la uniformidad de los depósitos, gran parte de esto, debido a imperfecciones en los sustratos, ya que la superficie se observaba porosa, como lo muestra la Fig. 25.

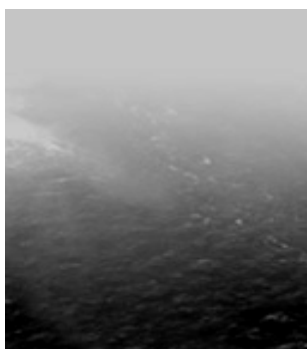


Figura 25. Sustrato de vidrio de mala calidad, superficie porosa.

La solución que se encontró para prevenir este tipo de anomalías fue la de pulir los substratos de vidrio antes de sumergirlos en la cuba sónica para su limpieza, en la Fig. 26 se muestra el material necesario para el pulido de los substratos; esto se realiza manualmente.



Figura 26. Material necesario para el pulido de los substratos: disco de pelte y sustancia con macropartículas para el pulido.

Aun cuando esto fue de gran ayuda, se siguieron teniendo algunos problemas con los depósitos, así que en lugar de utilizar la técnica ordinaria con gotero para el depósito de la fotoresina en el sustrato (ver Fig. 19 (b)), se utilizó un método dinámico de deposición de fotoresina, el cual consiste en tomar el sustrato con las manos y depositar una cantidad pequeña de la fotoresina, agitar el sustrato hasta que la fotoresina quede esparcida a lo largo y ancho del sustrato; una vez realizado esto, la muestra se coloca en la centrifugadora, y se le adiciona mas fotoresina. Los parámetros necesarios para activar el centrifugado son descritos a continuación.

La velocidad propuesta por el fabricante para obtener espesores de $7\text{ }\mu\text{m}$ es de 1400 rpm durante 45 seg. Si se siguen dichas propuestas, el material sale despedido en todas direcciones, para la propia adecuación a nuestras necesidades, el proceso de centrifugado se ajustó a una distribución de velocidades tipo rampa, de tal manera, que se realizó un proceso de aceleración a 200 rpm por 20 segundos, seguido de 400 rpm por otros 20 segundos hasta alcanzar una velocidad final de 1400 rpm por 40 segundos. Con ello fue posible obtener capas con un grosor cercano a $7\text{ }\mu\text{m}$ de espesor, la rampa de velocidades que se utilizó es mostrada en la Fig. 27.



Figura 27. Variaciones experimentales que se utilizaron para obtener el espesor cercano a 7 μm .

El espesor y uniformidad de los depósitos fueron analizados mediante microscopia electrónica de barrido (MEB). En la Fig. 28 se muestra el depósito final: una guía de onda plana de polímero óptico SU-8 con un espesor cercano a 7 μm .

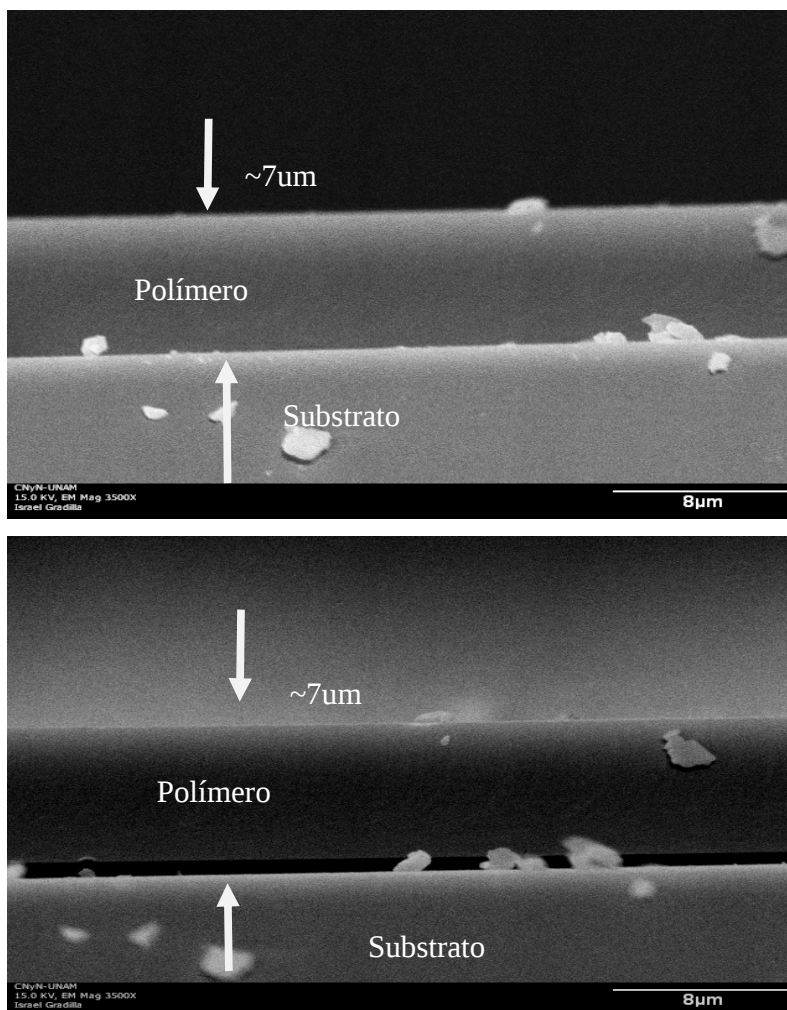


Figura 28. Micrografías por medio de microscopia electrónica de barrido (MEB), de la guía de onda plana de polímero óptico.

Las imperfecciones que se observan en la imagen anterior son debidas a que para realizar esta prueba, la muestra tuvo que ser “fracturada” ya que la muestra para ser observada se tenía que disponer de canto. Las partículas que se ven en la imagen corresponden a residuos de materiales del corte realizado.

La ilustración de la Fig. 29 es otra micrografía MEB de la misma muestra pero ahora de forma superficial, esto con el fin de detectar imperfecciones en la superficie tales como: burbujas, grietas, impurezas o no uniformidad de la fotoresina sobre el substrato. Se puede apreciar en la esquina superior derecha una impureza.

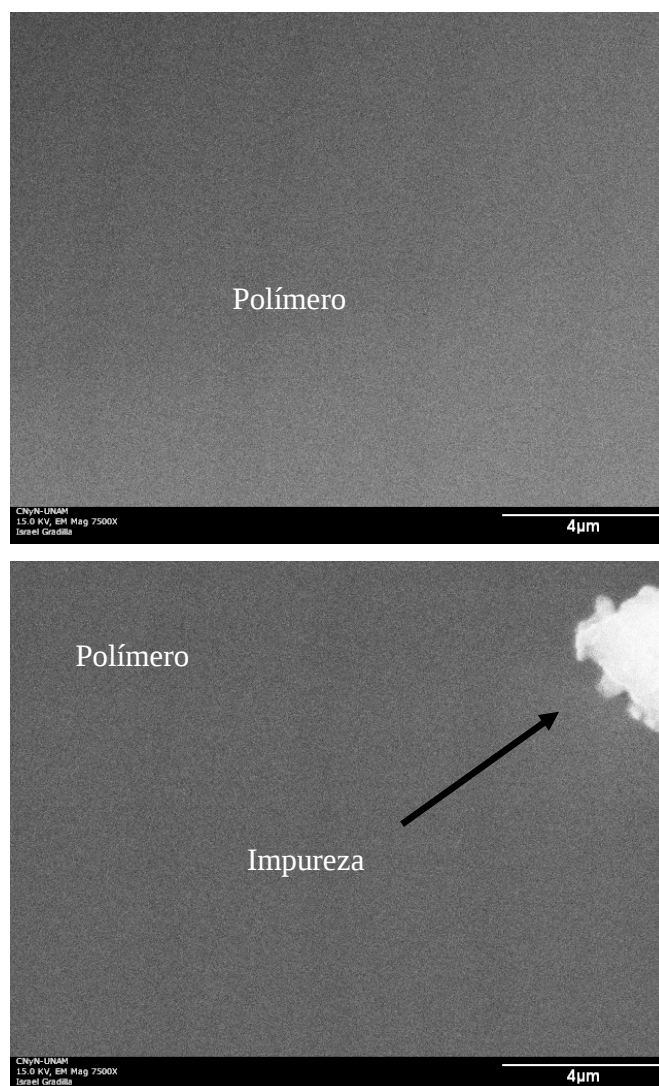


Figura 29. Micrografía MEB de la superficie de la guía de onda plana

Una vez verificado visualmente el estado físico de las guías, se pasó a acoplar luz que emergía de una fibra óptica a la guía de onda seleccionada, para esto se utilizó el arreglo experimental mostrado en la Fig. 30.

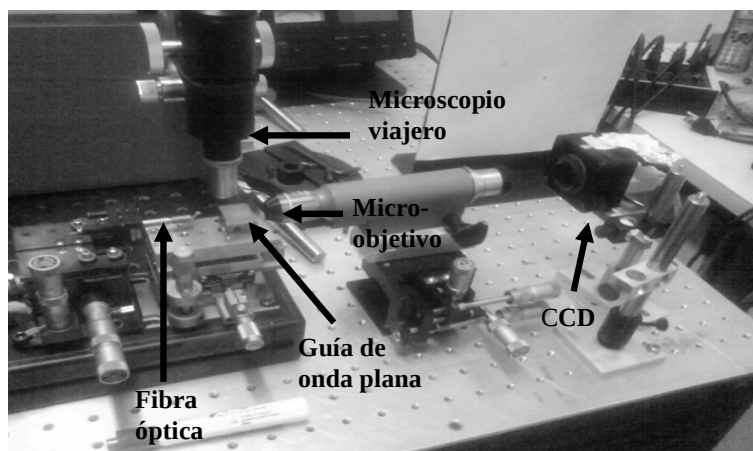


Figura 30. Arreglo experimental para la caracterización de la guía de onda plana.

Se utilizó un láser de He-Ne (Nec modelo GLG 5261), operando a una longitud de 632 nm, acoplado a una fibra óptica monomodal SMF 28, con diámetro de núcleo/recubrimiento igual a 8/124 μm . La alineación fibra-guía-microscopio fue mediante el uso de microposicionadores de alta resolución (NewPort), que permitían desplazamientos del orden de micras.

Para obtener las imágenes de la distribución de intensidad de la luz a la salida de la guía, se utilizó un objetivo de microscopio con amplificación de (16x), que proyectaba la imagen de la salida de la guía sobre una cámara CCD Electrim modelo EDC-1000HR, conectada a un ordenador personal.

IV.6.2 Tratamiento térmico

Como el SU-8 es una fotoresina epóxica, es posible alterar marginalmente su índice de refracción al variar parámetros durante el proceso térmico. Un paso antes de ser expuesta a la luz UV, consiste en realizar un precalentado de la resina, el cual nos servirá para evaporar el exceso de solvente y densificar la película. Sin embargo, como la temperatura en el precalentado es baja (típicamente 95 $^{\circ}\text{C}$), quedan restos de solvente en la película. La cantidad de solvente dentro del SU-8 restante antes de la exposición determinará las pérdidas y el peso final de la película.

Por tanto, creemos que el grado térmico de densificación previo a la exposición afectará tanto al índice de refracción como al espesor de la película fabricada [Xiaocong,

2006]. Para determinar la influencia que pudiera tener el pre-calentado sobre el índice de refracción, se prepararon 25 muestras (M1-M25), todas las muestras fueron primero pre-calentadas a 65 °C por 2 min, seguidas de 5 tiempos diferentes (5, 10, 15, 20 y 25 min), después se dejaron enfriar a temperatura ambiente durante 20 min, para posteriormente ser expuestas a la radiación UV. Siguiendo el proceso de fabricación estas fueron sujetas a un calentado después de la exposición que consistió en calentarlas a 65 °C por 5 min y a 95 °C por 15 min, para así iniciar el proceso de entrecruzamiento de la resina debido a los ácidos liberados en la exposición; un calentado adicional de 175 °C tiene lugar para terminar el entrecruzamiento de la resina, evaporar los restos de solvente y asegurar que el índice de refracción sea estable. La tabla IX muestra estos parámetros.

Tabla IX. Procedimiento de calentado de la muestra; temperatura en cada paso y tiempos a las que fueron sometidas las muestras.

	Pre-calentado		Calentado después de la exposición		Calentado final
	65 °C	95 °C	65 °C	95 °C	175 °C
M1-M5	2 min.	5 min	5 min	15 min	45 min
M6-M10	2 min.	10 min	5 min	15 min	45 min
M11-M15	2 min.	15 min	5 min	15 min	45 min
M16-M20	2 min.	20 min	5 min	15 min	45 min
M20-M25	2 min.	25 min	5 min	15 min	45 min

IV.6.3 Control de exposición

Como se había mencionado con anterioridad, variar el tiempo de precalentado influye en el índice de refracción y en el espesor del producto final. Otro parámetro que permite obtener cambios en el índice de refracción, es la variación en los tiempos de exposición de radiación UV a la que son sometidas las muestras. En la tabla IX se muestra la variación en el tiempo de exposición que se realizó para obtener guías de onda con un espesor cercano a 7 μm .

Como se mostró en la tabla VIII, se dan algunas recomendaciones por parte del fabricante dependiendo del espesor que se desee, para nuestro caso se requerían guías con un espesor de 7 μm . La lámpara con que se cuenta tiene una potencia fija de 500 W por lo

que se tuvieron que realizar pruebas a diferentes tiempos de exposición para poder obtener el espesor deseado en las guías de onda, ya que con este paso se dará inicio a la polimerización de la resina. Se produjeron 25 muestras, las cuales tuvieron un tratamiento térmico, dichos parámetros se mencionaron en la tabla IX. Las muestras fueron sometidas a diferentes tiempos de exposición, como lo muestra la tabla X, esto con el fin de lograr espesores promedio de 7 μm .

Tabla X. Variación en el tiempo de exposición de las muestras, usada para obtener espesores cercanos a 7 μm .

Tiempo de exposición UV (seg.)	Muestras				
2	M1	M6	M11	M16	M21
4	M2	M7	M12	M17	M22
8	M3	M8	M13	M18	M23
12	M4	M9	M14	M19	M24
16	M5	M10	M15	M20	M25

IV.7 Guías de onda de canal

Existen diferentes tipos de guías de onda ópticas; entre los principales se encuentran los de capa, canal, profunda y de tira. El interés de este trabajo de tesis es el desarrollo y estudio de guías de onda de canal.

Las guías de onda de canal se forman por una capa de alto índice de refracción que selectivamente se coloca en la superficie del sustrato. En la Fig. 31 se muestra la estructura básica de una guía de canal. Este tipo de guías, al igual que las guías planas, funcionan bajo el mismo principio de reflexión total interna. En el esquema se puede apreciar que existe un medio dieléctrico de índice n_1 que está sumergido en un medio con índice n_2 relativamente menor. La sección transversal de la guía es rectangular con dimensiones w y v para los ejes x e y respectivamente.

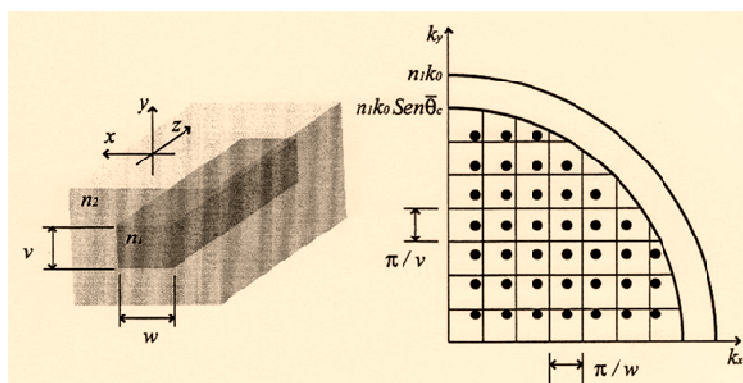


Figura 31. Estructura básica de una guía de onda rectangular. Los valores de K_x y K_y para los modos de la guía de onda son mostrados como puntos negros en la figura.

El proceso típico que se desarrolló para este trabajo y el cual se siguió para la fabricación de guías de onda planas y de canal de polímeros ópticos es el siguiente:

1. Deshidratación de los sustratos. Colocar los sustratos en un horno a temperatura de 200°C por un tiempo de 30 minutos, con el fin de eliminar restos de agua que pudieran quedar al momento de limpiarlos.
2. Adhesión de la fotoresina. Centrar el sustrato dentro de la centrifugadora y verter la fotoresina por medio de una jeringa o pipeta
3. Centrifugado. Una vez que se realizó el vertido de la fotoresina en el sustrato, ésta se tiene que esparcir a lo largo del sustrato, por lo que en primera instancia el sustrato se somete a una velocidad de 200 rpm con una aceleración de 80 rpm durante 20 segundos seguido de una segunda velocidad a 400 rpm con una aceleración de 100 rpm durante 25 segundos, y por último una tercera velocidad de 1400 rpm con una aceleración de 100 rpm durante 40 segundos.
4. Precalentado. Introducir la muestra en el horno y realizar dos pasos de precalentado a temperatura de 60°C y 95°C , con el fin de eliminar restos de disolvente presentes en el SU-8.
5. Exposición a luz UV. Tomar en cuenta estos dos casos:
 - Guías de onda plana, para este caso no se requiere de obtener un patrón sobre la resina por lo que simplemente se coloca la muestra en la alineadora y se irradia con luz UV.

- Guías de onda de canal: Colocar la rejilla patrón en el sujetador (cuidando que la parte cromada quede boca abajo), colocar la muestra en la alineadora y asegurar que la muestra esté en contacto con la rejilla patrón.
- Después de la exposición se realiza un calentado, colocar la muestra en el horno y de igual manera que en el pre-calentado utilizar dos etapas de calentado, a 60°C y 95°C , con el fin de eliminar restos de disolvente presentes en el SU-8.
 - Para el caso que se halla utilizado una rejilla patrón, debe sumergir la muestra en el revelador (PGMEA) y agitarla para remover el material no polimerizado.
 - Por último se termina el proceso realizando un último calentamiento de la muestra, el cual nos sirve para eliminar cualquier resto de disolvente y polímero suspendido obteniendo así la estructura final.

Este proceso es esquematizado en la Fig. 32, como se puede apreciar este involucra el paso de alineación con la mascarilla y revelado de la fotoresina.

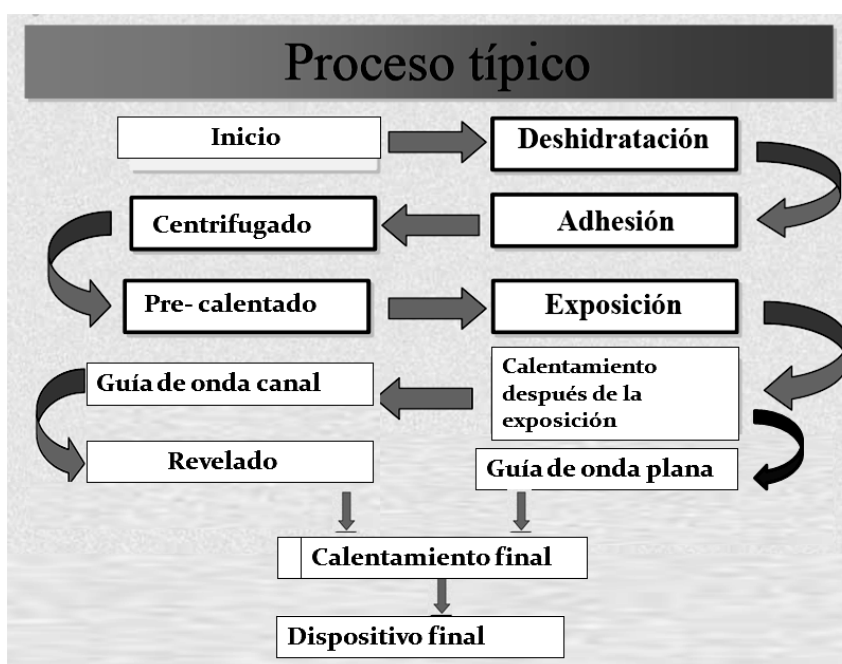


Figura 32. Proceso típico a seguir para la fabricación de guías de onda rectangulares de polímero óptico.

Este tipo de procesos de microlitografía permite:

- Generar directamente con la luz UV el patrón de guías de onda
- La colocación de dispositivos activos y pasivos de fibras y circuitos integrados en forma de estructuras alineadas
- Tiene como ventaja: bajo costo en lo referente a su estado del arte (menores pasos en su proceso, pero siguiendo los estándares planteados)

En la fig. 33 se esquematiza este proceso y se muestra una imagen de una guía de onda de canal obtenida mediante este proceso.

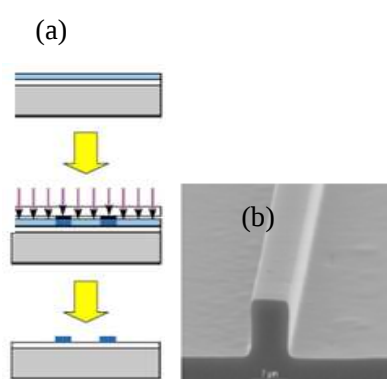


Figura 33. (a) proceso esquematizado del grabado de los canales de las guías de onda (b) imagen de como se deberá de observar el dispositivo final [Guerin, 1997].

IV.7.1 Rejilla patrón

La Fig. 34 nos muestra la rejilla patrón que contiene el esquema de la configuración deseada. Para este caso se utilizó una mascarilla con 10 grupos de 25 líneas cada uno, el ancho de las guías grabadas en la mascarilla son de: 21, 30, 32, 27, 17, 22, 25, 36, 41, 43 micrómetros.

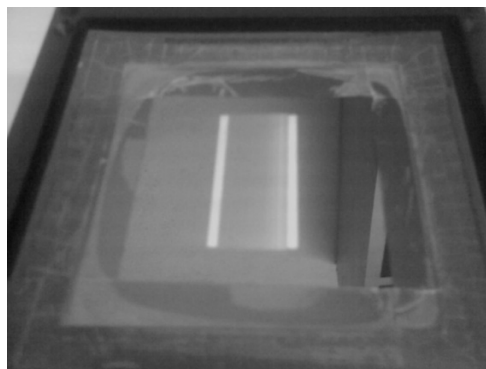


Figura 34. Rejilla patrón necesaria para el grabado de los canales en la fotoresina.

La separación entre las guías es de: 25 micrómetros, y la separación entre los paquetes de guías es de: 177, 162, 105, 85, 61, 41 y 25 micrómetros, tomando como primer grupo de guías las que se encuentran con mayor separación (177 μm) del siguiente grupo. Para poder medir los anchos correspondientes en la rejilla patrón se tomaron imágenes de microscopio con una retícula cuya separación de sus líneas es de 100 μm y con ayuda del programa computacional MatLab [ver anexo 1] se pudieron sacar estas mediciones, esto se puede observar a detalle en la ilustración de la Fig. 35.

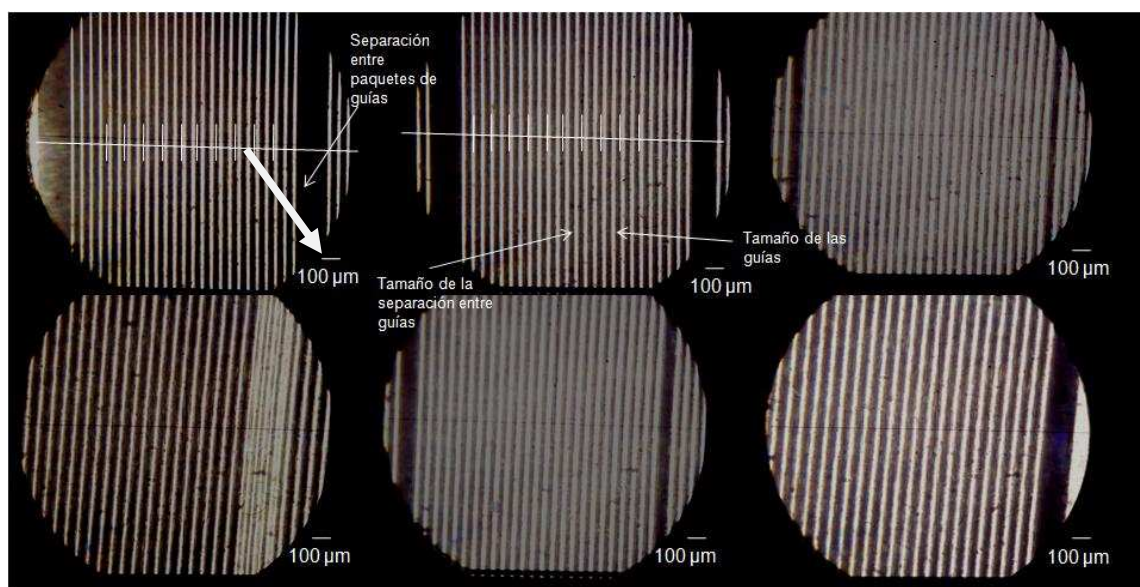


Figura 35. Dimensiones de la rejilla patrón.

IV.7.2 Control de exposición y revelado

El proceso de exposición y revelado es muy similar al realizado para la fabricación de guías de onda planas; sin embargo, ahora lo que se requiere es tener un patrón de canales, por lo que se utiliza un mascarilla, la cual se coloca encima del sustrato, cuidando de hacer contacto directo con la resina; para lograr esto, la muestra se coloca en el equipo de microlitografía, el cual opera en el modo de contacto por vacío, iluminándose con luz UV. Los tiempos de exposición fueron tomados de la misma manera que para las guías planas que se muestran en la tabla X. La cercanía de la máscara sobre el depósito de SU-8 debe ser la mejor posible, cuanto más próxima mejor, idealmente deben estar en contacto perfecto. De este modo, en una primera aproximación, se garantiza que salga una reproducción fiel del patrón. Pero eso, es sólo en primera aproximación, ya que hay que tener en cuenta otros factores, como la transparencia de la máscara (si la máscara es de cromo o de otro material), de modo que si la transparencia de las zonas "opacas" es elevada, y si la fuente de luz que se emplea es muy intensa, lo que va a suceder es que luz pasa a través de las zonas "opacas", y con ello, se puede tener polimerización en donde cabría esperar que no la hubiera. Así se tiene que en las zonas de surcos donde se esperarían ángulos de 90°, se tienen realmente surcos en forma de U, de aristas redondeadas.

Para este punto ya se tendrá el patrón grabado en la fotoresina, después de realizar el calentado posterior a la exposición, la muestra pasa a un proceso de revelado el cual consiste en tres pasos:

1. Se prepara una solución de PGMEA como revelador donde la muestra se sumerge y es agitada durante 16 segundos.
2. Se prepara una solución de PGMEA con alcohol isopropílico en proporciones 6:1; la muestra es nuevamente sumergida y agitada pero ahora por un tiempo de 30 seg.
3. Por último se prepara una solución con alcohol puro donde la muestra es sumergida y agitada por un tiempo de 20 seg.

Durante el primer paso se podrá ver una sustancia blanca lechosa la cual deberá ser removida durante los siguientes pasos. En caso de ser necesario, se deberán repetir los dos últimos pasos, esto con el fin de poder retirar toda la resina que no fue expuesta. El secado

se puede realizar como ya se había comentado, en el centrifugado o con aire a presión (este último tomando una distancia de por lo menos de 30 cm de la pistola de aire a la muestra).

Una vez que las guías de onda son obtenidas, son observables a simple vista en la muestra, pero con el fin de poder analizar a nivel microscópico los paquetes de guías grabados, se tomaron imágenes de la sección transversal de la guía por medio de un microscopio óptico a través de una cámara fotográfica digital adaptada al ocular del microscopio.

Teniendo como fuente de luz, un láser de He-Ne, se procedió a acoplar radiación láser a los canales. Se utilizó luz láser a una longitud de onda de 632 nm acoplada a una fibra óptica (sus características fueron mencionadas en la sección IV.6.1). La alineación fibra-guía-microscopio fue realizada mediante el uso de microposicionadores de alta resolución, que nos permite desplazamientos en el orden de micrómetros. Las imágenes a la salida de las guías angostas fueron obtenidas posicionando un micro-objetivo de microscopio a la salida de las guías, como se mostró en el arreglo experimental de la figura 30 y las imágenes a la salida del microscopio fueron capturadas con una cámara de CCD conectada a un ordenador personal.

Capítulo V

Análisis de Resultados.

Este capítulo está dividido en dos partes, lo correspondiente a las guías de onda planas y lo correspondiente a guías de canal. En la primera parte se describe la evaluación dimensional de las guías a partir de imágenes obtenidas por medio de la microscopía electrónica de barrido (MEB); a partir de estas imágenes es posible examinar la calidad de las superficies y las geometrías de las guías. Se presenta también un estudio sobre la dependencia del índice de refracción con un tratamiento térmico previo a la polimerización. Variaciones en el tiempo de precalentado, permitieron obtener variaciones del índice de refracción en un intervalo de 1.5700 a 1.5900. El estudio incluye la localización de modos de propagación (sistema de acoplamiento con prisma de alto índice Metricon) de las guías de ondas planas con ambos estados de polarización, el cual permite cuantificar la birrefringencia de las guías.

En lo que corresponde a las guías de onda de canal, se realizó una caracterización de las guías de onda por la técnica de MEB, para identificar las guías de onda de canal y poder evaluar su geometría y dimensiones. Se presentan imágenes sobre la distribución de intensidad de la luz que emerge de las guías de onda en forma de canal.

V.1 Guías de onda plana

Se fabricaron 25 muestras (M1-M25) de guías de onda planas. Se trabajó en un rango de 5 a 7 μm de espesor, con índices de refracción que son función del tratamiento térmico a que fueron sometidas. Un resumen de los principales parámetros de las guías fabricadas se muestra en las tablas IX y X. La caracterización de las muestras es expuesta a continuación.

V.1.1 Evaluación dimensional de la guía de onda plana

En esta sección se estiman las dimensiones de las secciones transversales de la guía de onda mediante MEB y se identifican imperfecciones en algunas zonas de su superficie.

El espesor promedio de las 25 muestras analizadas fue cercano a $7\text{ }\mu\text{m}$, espesor propuesto, ya que es comparable con las dimensiones de una fibra óptica monomodal (SMF 20), la cual es utilizada para acoplar radiación laser (632 nm) a las guías de onda. Además que las dimensiones son apropiadas para obtener guías de onda monomodo a longitudes de onda de comunicaciones claves (840 nm , 1310 nm y 1550 nm). Como se mencionó con anterioridad, los parámetros de centrifugado se fueron variando para lograr un control en el espesor de la película depositada. Para poder realizar la evaluación dimensional de las guías de onda planas, se tomaron micrografías de las muestras por medio de la técnica MEB. En la Fig. 36 se muestran imágenes de la superficie y de la sección transversal de la guía de onda plana. Cabe mencionar que para la obtención de las imágenes fue necesario depositar una película delgada de oro sobre el polímero de un espesor menor a $1\text{ }\mu\text{m}$ para lograr un buen contraste.

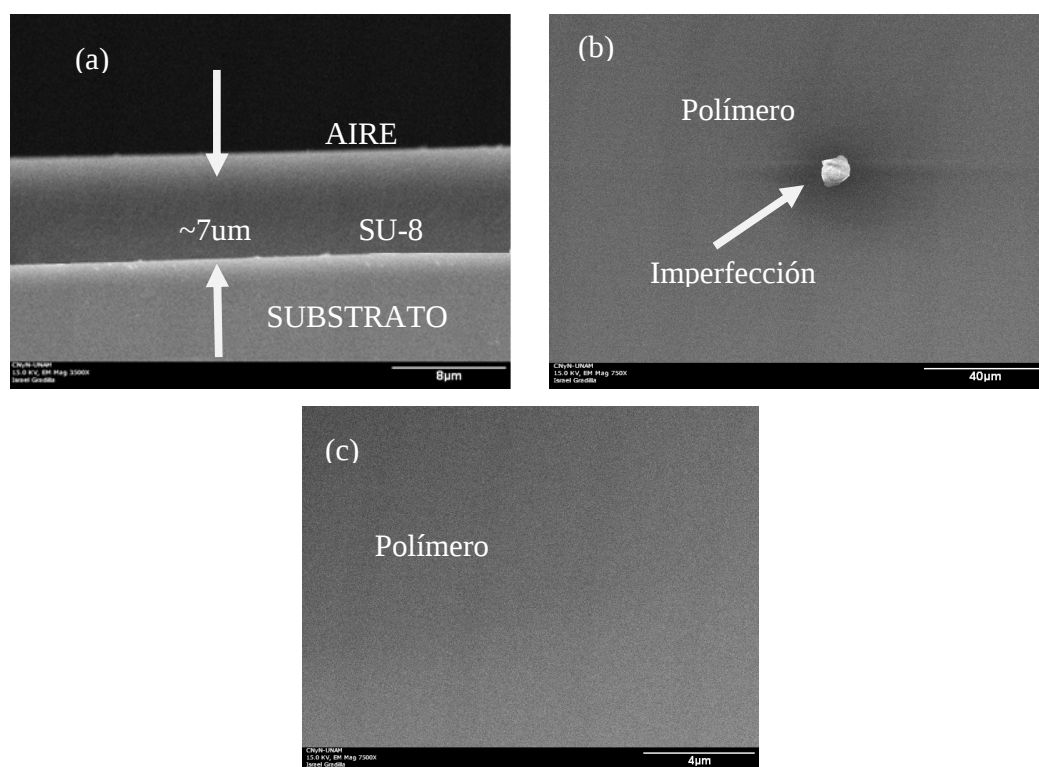


Figura 36. Micrografía MEB de la muestra. (a) sección transversal de la guía de onda plana. (b) superficie de la guía de onda plana con imperfecciones. (c) superficie de la guía de onda plana sin imperfecciones.

A partir de estas micrografías se realizaron medidas de las dimensiones de la guía de onda plana, pudiéndose observar en la figura 36 (a) que el espesor es cercano a 7 μm .

También podemos observar en la figura 36 (b) que en la superficie de la guía se encuentran algunas zonas que presentaban Imperfecciones en su superficie. Estas imperfecciones pueden ser debidas al material con que se cubrió la muestra o a la falta de limpieza de la muestra al momento que fue fracturada.

V.1.2 Modulación del índice de refracción

Como se mencionó en las secciones IV.6.2 y IV.6.3, las variaciones tanto en el tiempo de pre-calentado, como en el tiempo de exposición UV, permiten variar la modulación en el índice de refracción de la guías. En este proyecto se realizó un análisis de cómo afectan al índice de refracción y al espesor final de la película la variación en el tiempo de pre-calentado y la variación en el tiempo de exposición a la radiación UV. La Fig. 37 nos muestra los índices de refracción de las 25 muestras, medidos por el método de acoplamiento de prisma (Metricon, Modelo 2010) a diferentes tiempos de exposición y pre-calentado.

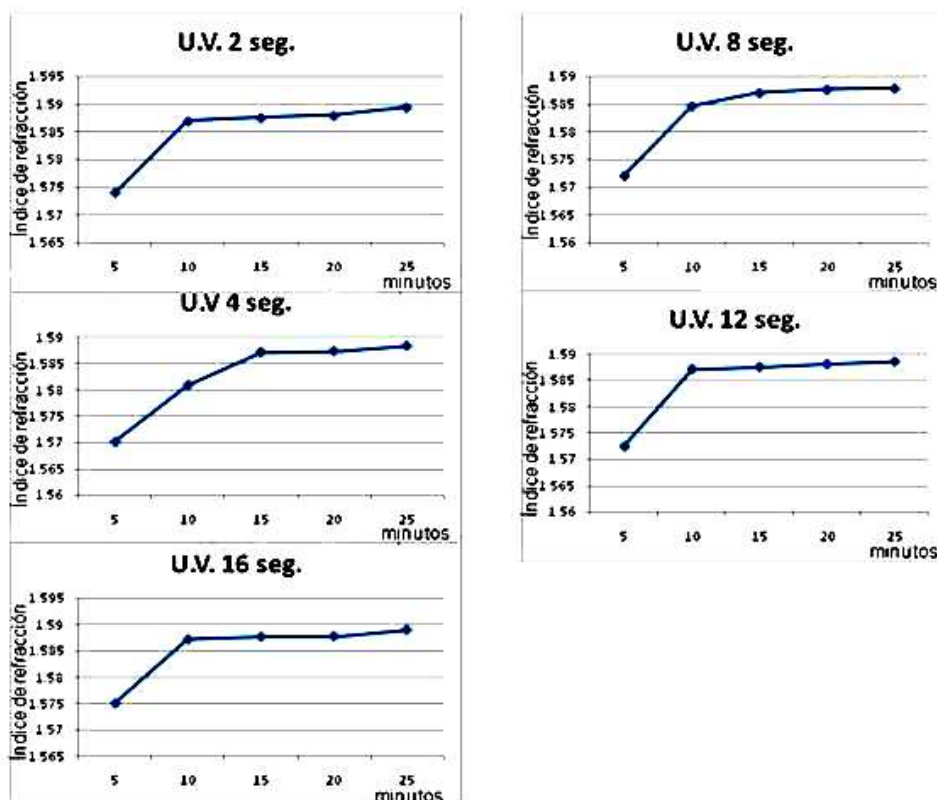


Figura 37. Variación del índice de refracción con diferentes tiempos de exposición y diferentes tiempos de pre-calentado a temperaturas de 95 °C.

Como se puede apreciar, el índice de refracción de la película final de SU-8, tiene un incremento significativo después de 5 minutos de precalentamiento y alcanza su saturación aproximadamente a los 20 min de precalentamiento. Esto nos indica que se evaporó una gran cantidad de solvente dentro de los primeros 5 minutos de pre-calentado a 95 °C y que casi todo el solvente se ha evaporado después de 20 minutos de precalentado. Para un mayor entendimiento de estas gráficas, en la tabla XI se presentan los mismos datos.

Tabla XI. Se muestra la variación de los índices de refracción debido al tiempo de exposición UV y el tiempo de pre-calentado.

	UV 2-seg.	UV 4-seg.	UV 8-seg.	UV 12-seg.	UV 16-seg.
Pre-calentado: 65°C 2-min-95°C 5-min.	n: 1.5739 M1	n: 1.5701 M2	n: 1.5720 M3	n: 1.5725 M4	n: 1.5750 M5
Pre-calentado: 65°C 2-min-95°C 10-min.	1.5869 M6	1.5803 M7	1.5842 M8	1.5871 M9	1.5809 M10
Pre-calentado: 65°C 2-min-95°C 15-min.	1.5875 M11	1.5846 M12	1.5870 M13	1.5874 M14	1.5867 M15
Pre-calentado: 65°C 2-min-95°C 20-min.	1.5879 M16	1.5873 M17	1.5877 M18	1.5880 M19	1.5878 M20
Pre-calentado: 65°C 2-min-95°C 25-min.	1.5893 M21	1.5883 M22	1.5878 M23	1.5882 M24	1.5887 M25

De la tabla XI, se puede observar que la diferencia entre índices de refracción es de aproximadamente 0.01, si la película se somete a tiempos de precalentado de 2 y 25 minutos. Como se esperaba el índice de refracción del polímero SU-8 varió en función del tiempo de precalentado. Esta propiedad puede ser utilizada para fabricar componentes termo-ópticos activos, por ejemplo: interruptores ópticos [Lee, 1997], filtros sintonizables [Wong, 2001] y atenuadores ópticos variables [Vroom, 2001].

Las variaciones obtenidas del índice de refracción al variar el tiempo de precalentado, son comparables con los resultados obtenidos en trabajos de otros autores [Tung, 2003]; en donde variando la temperatura del precalentado obtenían variaciones de 0.01 entre el índice de refracción mínimo y el índice de refracción máximo, esto es mostrado en la figura 38.

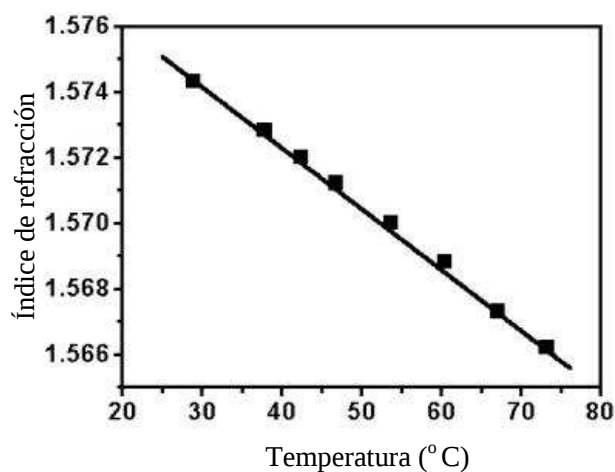


Figura 38. Variaciones del índice de refracción en función de la temperatura [Tung, 2003].

V.1.3 Transmitancia

Una vez que se consiguió obtener una guía de onda plana con espesor cercano a 7 μm , se realizaron medidas de transmitancia espectral para corroborar su transparencia. Se utilizó un espectrofotómetro con intervalo de trabajo de 300 a 1100 nm, obteniendo la gráfica de la Fig. 39, de la cual se observa una transmitancia de casi 100 % para longitudes de onda mayores a 360 nm, lo cual concuerda con lo proporcionado por el fabricante.

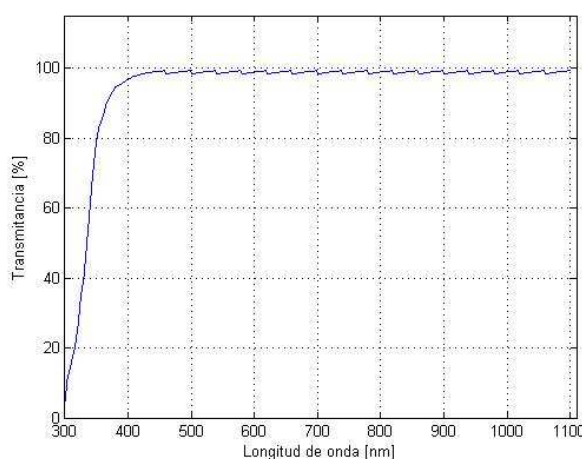


Figura 39. Transmitancia óptica de la capa de fotoresina de SU-8 depositada sobre un sustrato de vidrio.

Para poder evaluar la propagación de las guías de onda se procedió a analizar, por medio de un microscopio viajero la muestra completa. Para ello fue posicionado de manera perpendicular a la muestra y se desplazaba manualmente, a pequeños intervalos, tanto en la dirección x , como en la dirección y el arreglo experimental se describió en la sección IV.6.1.

Todas las guías presentaban las características físicas requeridas para tener un guiado adecuado de la luz, no se observaron fracturas en las terminales de entrada y de salida que pudieran impedir el acoplamiento de luz, existía continuidad a lo largo de la trayectoria de la guía.

En la Fig. 40 se ilustran cuatro imágenes características obtenidas de las guías de onda planas mediante el arreglo experimental de la figura 30. Aunque se analizaron la totalidad de las muestras, todas tienen un comportamiento similar y sus diferencias fueron mínimas.

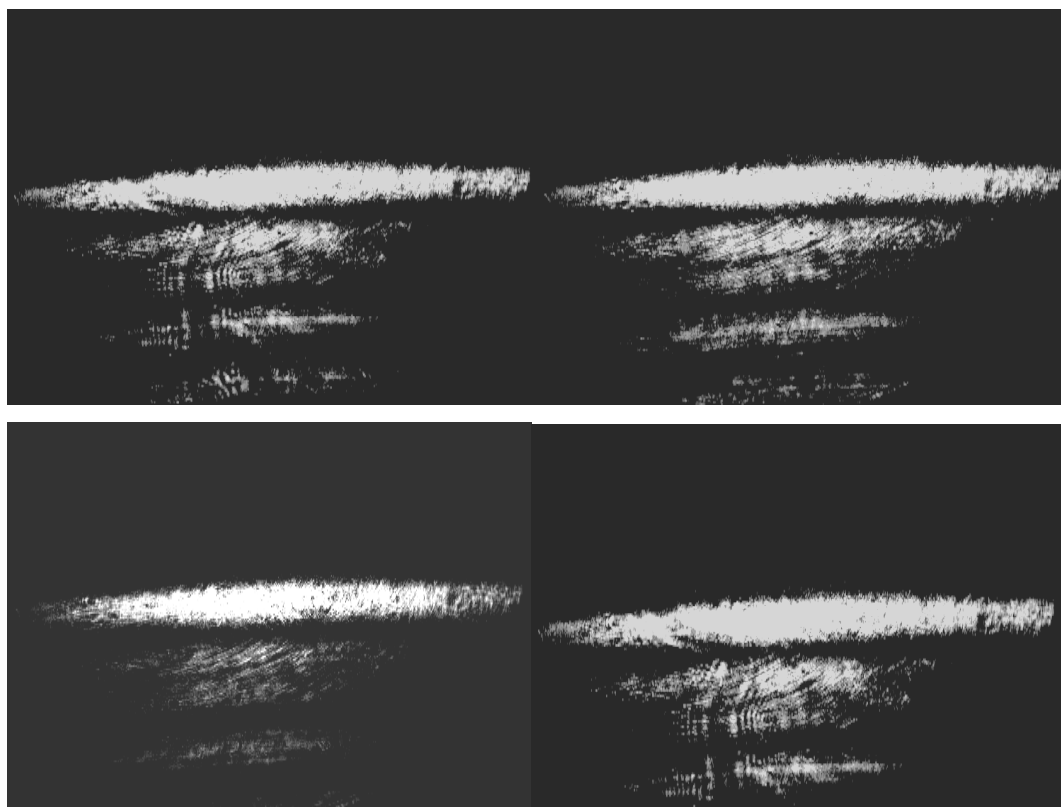


Figura 40. Intensidad a la salida de las guías de onda planas.

V.1.4 Determinación experimental de los modos de propagación

Las 25 muestras fueron sometidas a la técnica de acoplamiento de prisma con alto índice la cual es descrita en la sección IV.1, esto con el fin de determinar sus modos de propagación. En la tabla XII aparecen los valores experimentales de los índices de refracción de las 25 muestras, la cantidad de modos guiados y el espesor de las películas depositadas.

Tabla XII: Propiedades ópticas y físicas de las muestras fabricadas.

Muestra	Índice de refracción (Longitud de onda 632 nm).	Espesor (μm)	Número de modos
M1	1.5739	5.2879	9
M2	1.5701	5.1022	8
M3	1.5720	5.3619	9
M4	1.5725	5.1398	8
M5	1.5725	5.1022	10
M6	1.5869	6.5441	11
M7	1.5803	4.8942	8
M8	1.5842	5.4508	9
M9	1.5871	6.6356	11
M10	1.5809	4.8020	8
M11	1.5875	6.2371	10
M12	1.5846	5.5529	9
M13	1.5870	6.3285	10
M14	1.5874	6.5963	11
M15	1.5867	7.0266	12
M16	1.5879	7.3055	12
M17	1.5873	6.4414	11
M18	1.5877	6.2354	10
M19	1.5880	7.6601	12
M20	1.5878	7.3521	12
M21	1.5893	7.1094	11
M22	1.5883	6.9203	11
M23	1.5878	7.3055	12
M24	1.5882	7.8393	12
M25	1.5887	7.4847	10

Como ejemplo de los resultados obtenidos por la técnica de acoplamiento con prisma de alto índice tenemos en las gráficas de la figura 41 las muestras M11, M7, M9 y M14. Como se puede apreciar en las gráficas, las guías muestran un comportamiento multimodal, esto debido a su arquitectura y longitud onda utilizada.

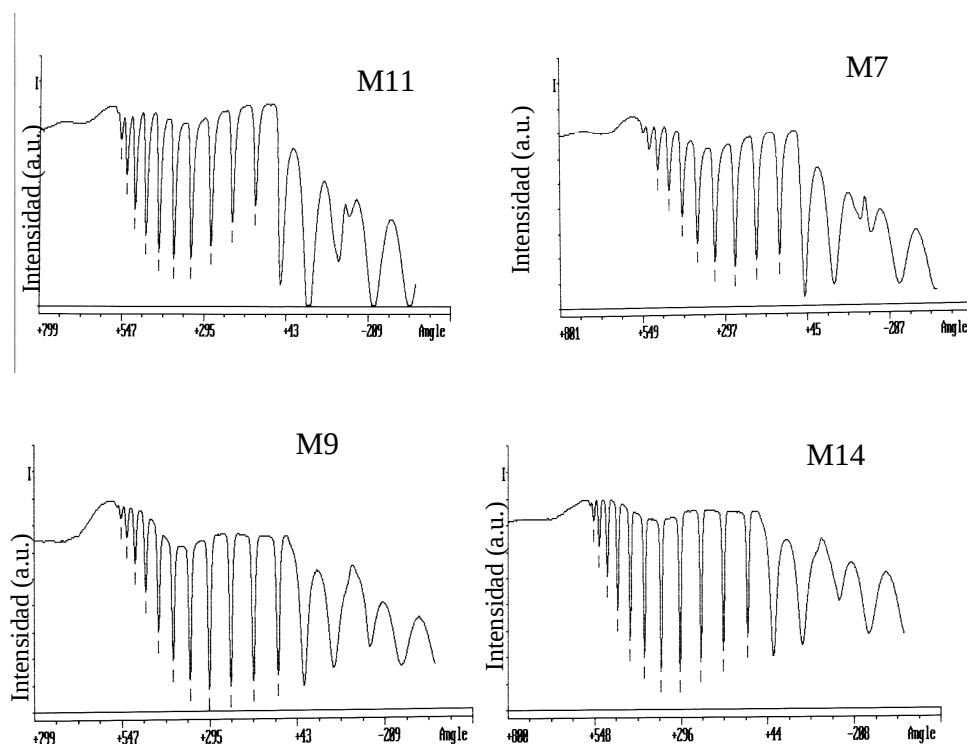


Figura 41. Modos propios de propagación en una guía de onda plana de polímero óptico (SU-8), obtenida mediante un sistema de detección automatizado (Metricon 2010), donde cada mínimo representa un modo acoplado a la guía.

Los datos obtenidos por medio del Metricon son: el índice de refracción efectivo que caracteriza a cada modo guiado, el índice de refracción de la película, espesor de la película depositada y la cantidad de modos guiados, (una de las cosas que debemos tomar en cuenta, aunque no es de suma importancia, es que, en las gráficas, lo que se muestra como ángulos son en realidad los pasos de motor). De los datos obtenidos por el Metricon y que son mostrados en la tabla XII, podemos notar cómo es que la cantidad de modos guiados depende directamente de la combinación que se haga entre espesor e índice de refracción. Por ejemplo, las muestras M9 y M14 presentan la misma cantidad de modos guiados, pero en el caso de la muestra M9 esta presenta un índice de refracción menor al de

la muestra M14, pero un espesor mayor. Los datos que se obtuvieron de las 4 muestras son listados en la tabla XIII.

Tabla XIII. Valores obtenidos experimentalmente de los índices de refracción efectivos y birrefringencia correspondientes a cuatro muestras.

Muestra	No. Modo	TE	TM	Birrefringencia
M11	0	1.5868	1.5781	0.0087
	1	1.5840	1.5733	0.0115
	2	1.5802	1.5670	0.0132
	3	1.5749	1.5606	0.0143
	4	1.5688	1.5520	0.0168
	5	1.5615	1.5516	0.0099
	6	1.5531	1.5402	0.0129
	7	1.5433	1.5211	0.0222
	8	1.5327	1.5293	0.0034
	9	1.5212	1.5195	0.0017
M7	0	1.5791	1.5702	0.0089
	1	1.5736	1.5634	0.0102
	2	1.5675	1.5555	0.0120
	3	1.5603	1.5465	0.0138
	4	1.5518	1.5365	0.0153
	5	1.5418	1.5262	0.0156
	6	1.5311	1.5200	0.0111
	7	1.5195	1.5120	0.0072
M9	0	1.5865	1.5862	0.0003
	1	1.5840	1.5837	0.0003
	2	1.5803	1.5800	0.0003
	3	1.5757	1.5754	0.0003
	4	1.5699	1.5690	0.0009
	5	1.5633	1.5629	0.0004
	6	1.5555	1.5545	0.0010
	7	1.5467	1.5460	0.0007
	8	1.5368	1.5340	0.0028
	9	1.5260	1.5200	0.0060
	10	1.5144	1.5240	0.0004
M14	0	1.5868	1.5865	0.0003
	1	1.5843	1.5840	0.0003
	2	1.5806	1.5803	0.0003
	3	1.5760	1.5757	0.0003
	4	1.5704	1.5699	0.0005
	5	1.5639	1.5633	0.0006
	6	1.5561	1.5557	0.0005
	7	1.5473	1.5470	0.0003
	8	1.5374	1.5365	0.0009
	9	1.5268	1.5264	0.0004
	10	1.5150	1.5146	0.0004

La birrefringencia en las guías de onda de polímero óptico se ve afectada por diversos factores [Boese, 1991]. Estos factores incluyen la flexibilidad y linealidad en las cadenas de moléculas que constituyen al polímero, la geometría en las unidades que se repiten dentro de las cadenas del polímero y la polarizabilidad y orientación de los enlaces de las moléculas del polímero. La birrefringencia obtenida (la cual es la diferencia entre n_{TE} - n_{TM}) en las muestras varió entre 222×10^{-4} y 3×10^{-4} (ver tabla XIII), resultando una birrefringencia más baja comparada con la obtenida para los polímeros fluorados donde la birrefringencia encontrada es cercana a 545×10^{-4} [Kang, 2001 y Jang, 1999].

V.2 Guías de onda de canal

En esta sección se incluyen de los resultados obtenidos durante la fabricación y caracterización de las guías de onda planas y un análisis de la propagación de las guías.

V.2.1 Estructura de las guías ópticas de canal

En la Fig. 42 se muestran las imágenes obtenidas de las guías de onda de canal. Los puntos brillantes corresponden a la salida de luz blanca por cada una de las guías.

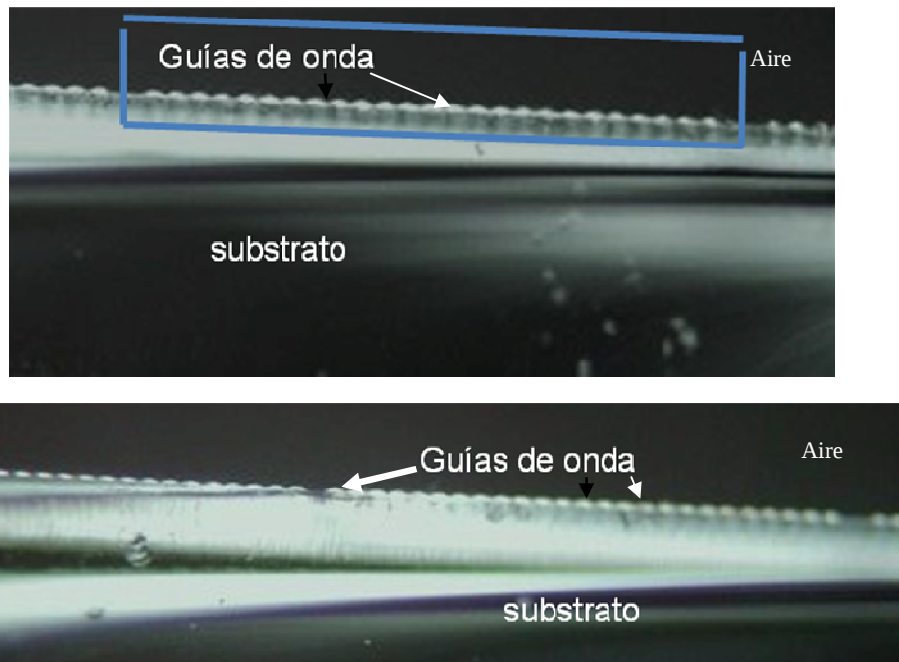


Figura 42. Vista transversal de las guías de onda de polímero óptico, tomadas con un microscopio óptico

Una vez identificadas las guías, se realizó otra toma de la superficie de la muestra para dimensionar el patrón de las guías de onda grabadas y ver que estos valores concuerden con los de la mascarilla utilizada. La Fig. 43 muestra estas imágenes. Para poder llevar al cabo esto, se usó como referencia una retícula con divisiones de aproximadamente 100 μm y la utilización de un programa en MatLab con un error menor del 3%.

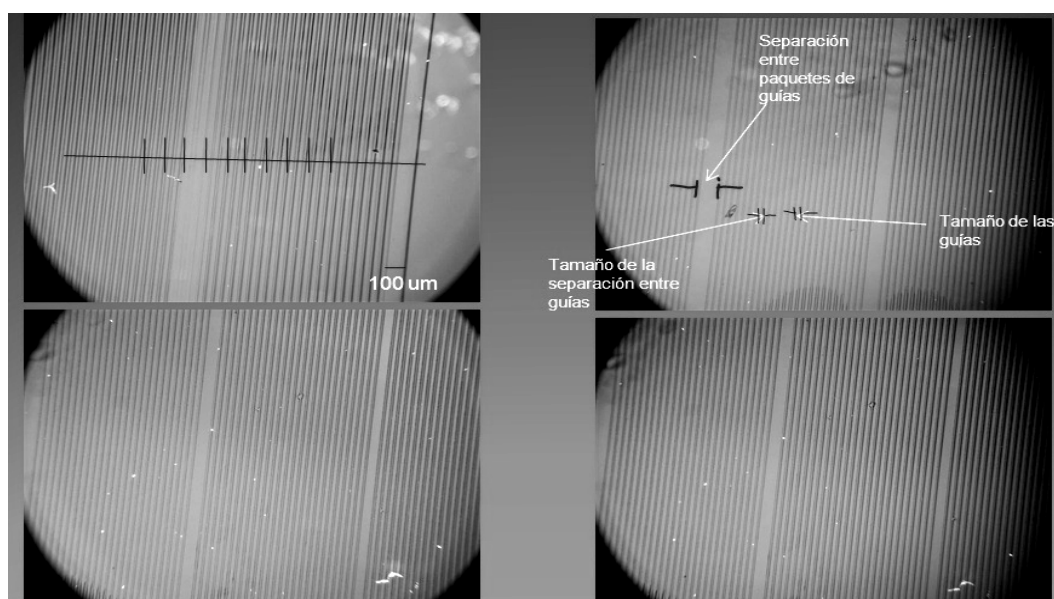


Figura 43. Imágenes tomadas con un microscopio óptico, del patrón de guías de onda ya grabado en el SU-8.

Las guías mostraron anchos (en μm) de: 18, 27, 33, 25, 15, 20, 23, 33, 44, 40. Las separaciones entre guías van de 22 a 20 μm y entre grupos de guías son de: 169, 158, 100, 80, 55, 39 y 23 μm . Al igual que en la rejilla patrón, se toma como primer grupo de 25 guías el que se encuentra a mayor distancia del siguiente grupo de 25 guías. En la tabla XIV se listan las medidas de las guías en la rejilla patrón (figura 35) y las medidas obtenidas de las guías fabricadas (figura 43), obteniéndose el error absoluto, el cual nos indica si medimos u obtuvimos más o menos que el valor experimental, y en qué cantidad excedimos del valor real o qué cantidad nos faltó; esto según el signo de la sustracción. Las variaciones en el tamaño final de las guías fabricadas con respecto al tamaño de las guías de la rejilla patrón pueden deberse a varios factores involucrados en el proceso de microlitografía [Taherabadi, 2004]. Estos factores incluyen la transparencia de la rejilla

patrón, de modo que si la transparencia en las zonas “opacas” es elevada se filtrara suficiente radiación UV y se tendrá polimerización en donde cabría esperar que no la hubiera, en las zonas transparentes por donde incide la radiación UV se puede producir dispersión, que hará que la radiación UV este fuera de los límites de la apertura de la rejilla patrón, además durante el proceso de revelado se pueden producir fenómenos que causen que las guías se ensanchen o se encojan. Como se ve en la tabla XIV las variaciones que presentaron las guías fabricadas respecto a las de la rejilla patrón estuvieron en un rango de $+1$ a -3 μm , esto es comparable con métodos más complejos, en donde se utiliza un escaneo de proyección con cambio continuo de enfoque para obtener rangos de $+0.7$ a -1.7 μm [Schaline 2007]. Aun con estas variaciones el producto final sigue teniendo un tamaño adecuado para obtener guías de canal monomodo a longitudes de onda de comunicaciones claves (840 nm, 1310 nm y 1550 nm).

Tabla XIV. Variación entre los tamaños de las guías de la rejilla patrón vs tamaños de las guías fabricadas.

	Ancho de las guías de la rejilla patrón (μm)	Ancho de las guías fabricadas (μm)	Diferencia de tamaños (guías fabricadas – guías de rejilla patrón) (μm)
Primer grupo	21	18	-3
Segundo grupo	30	27	-3
Tercer grupo	32	33	1
Cuarto grupo	27	25	-2
Quinto grupo	17	15	-2
Sexto grupo	22	20	-2
Séptimo grupo	25	23	-2
Octavo grupo	36	33	-3
Noveno grupo	41	40	-1
Decimo grupo	43	44	1

Tomando en cuenta los factores antes mencionados se proponen las siguientes acciones para minimizar estas variaciones:

- Colimar el haz de luz que sale de la lámpara UV, con el fin de iluminar exclusivamente el área de la rejilla patrón y con esto evitar que otras zonas de la muestra, puedan llegar a ser irradiadas provocando un ensanchamiento en las guías.
- No exceder los tiempos de revelado, ya que el SU-8 al impregnarse del revelador, sufre lo que se denomina “swelling” esto es un hinchamiento en el material. Este fenómeno se ve incrementado con el tiempo de inmersión. Por lo que se recomienda hacer lavados rápidos, permitiendo con esto que el revelador afecte sólo la parte no polimerizada y sólo de forma superficial evitando así que penetre más allá de unas pocas décimas de micras y evitando con esto el ensanchamiento de las guías.

La siguiente acción a tomar, fue la de, obtener micrografías por medio de MEB, esto con la finalidad de verificar que el espesor seguía siendo cercano a $7\text{ }\mu\text{m}$, y que la superficie del patrón de guías estuviera libre de burbujas, uniformidades, contaminantes etc. Las ilustraciones de la Fig. 44 nos dan una mejor idea de lo que se está hablando.

Para lograr el dimensionamiento transversal de las guías se utilizaron las escalas dadas por cada una de las micrografías MEB, y haciendo uso del programa realizado en MatLab verificamos que el espesor de las guías obtenidas era cercano a las $7\text{ }\mu\text{m}$. Como puede observarse en las micrografías 44 (c) y 44 (b) la superficie de las guías está libre de imperfecciones, por lo que se podrá tener un buen guiado de la luz acoplada. Si se observa con más detenimiento en las micrografías 44 (a) y 44 (b), en ellas se alcanza a ver un contraste entre las guías y el recubrimiento, siendo la parte cuadrada y oscura la guía de onda y la parte clara el recubrimiento, con esto podemos ver que las guías están fabricadas de manera adecuada.

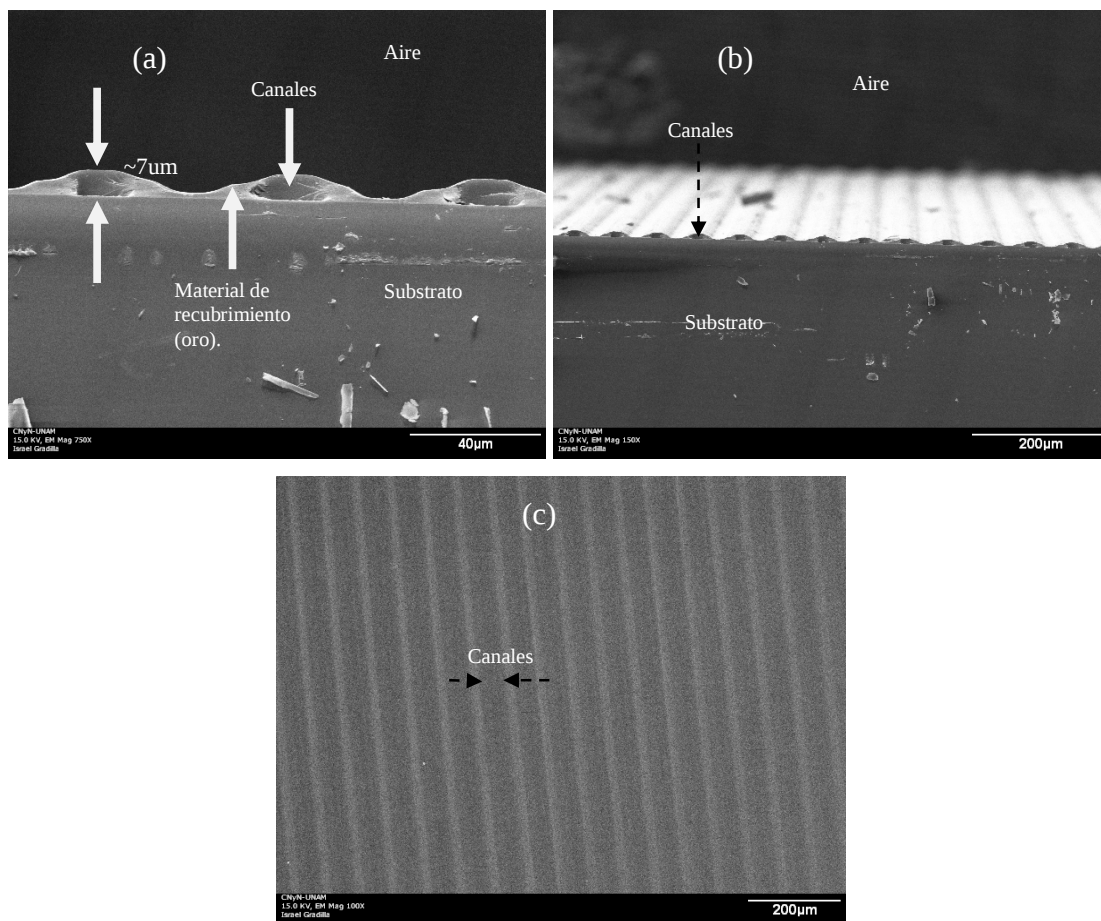


Figura 44. Micrografías MEB de las guías de onda de rectangular. (a) y (b) vista transversal de las guías rectangulares. (c) Vista de la superficie de las guías rectangulares.

Las muestras que no presentaron defectos, tanto en la superficie del patrón de canales, como en su parte transversal, se usaron para evaluar la propagación de las guías de onda. Esto se realizó utilizando el arreglo experimental de la Fig. 30.

La mayor parte de las guías de canal presentaron imperfecciones de forma sinusoidal en su cubierta. En la figura 44 (a) se muestra una micrografía obtenida de nuestras guías y en la figura 45 se muestra una micrografía de un trabajo similar [Borremán, 2002].

Después de un análisis de las micrografías tomadas por la técnica MEB y de hacer una comparación con investigaciones similares a la nuestra, se encontró que dichas imperfecciones se deben al recubrimiento que se utiliza en las muestras para poder ser utilizadas en la técnica MEB.

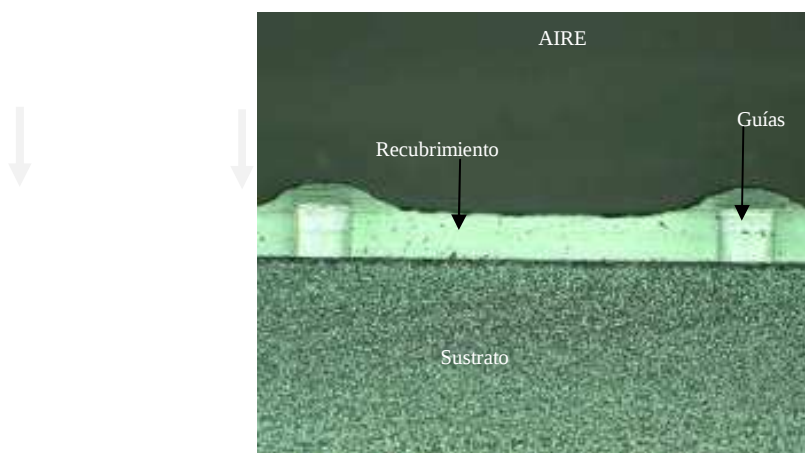


Figura 45. Micrografías MEB, (a) vista frontal de guías de onda de canal de SU-8 con recubrimiento de PMMA [Biow, 2006].

Debido a la naturaleza de la técnica MEB las muestras que se analizaron no pueden ser reutilizadas para su caracterización posterior, ya que el índice de refracción con que se recubren es mucho mayor que el de la película, por lo que, no se cumplirá la condición que da pie al fenómeno de reflexión interna total y por lo tanto no se tendrá un guiado a lo largo de la guía de onda rectangular.

V.2.2 Transmitancia

Se realizó el procedimiento descrito en la sección IV.7.3 para verificar el estado en que se encontraban las guías de canal. En la figura 46 se muestra la intensidad de la luz a la salida de las guías.

No se cuantificó la eficiencia de propagación de las guías. Ya que para poder tener una estimación acerca de la transmitancia y de las pérdidas por propagación, se necesitan tomar en cuenta diversos factores tales como:

- Eficiencia de acoplamiento fibra-guía: relación entre las aperturas numéricas de la guía y la fibra.
- Baja calidad óptica en las caras de entrada y salida de las guías [Zhang, 2003]. Los cortes realizados fueron hechos sin las herramientas adecuadas y las superficies requieren de un tratamiento de pulido que de calidad óptica a la superficie

- El acoplamiento guía objetivo, no es posible asegurar que toda la luz que emerge de la guía sea capturada por el microscopio.
- Pérdidas por reflectancia de las lentes del objetivo de microscopio.
- Acoplamiento del modo fundamental de la fibra a modos de orden superior de la guía de onda [Prasciolu, 2004].

Debido a lo anterior, no se realizó la medición de eficiencia de propagación de las guías, ya que no se cuenta con el equipo necesario. A pesar de no realizar dicha evaluación, resulta evidente que la señal de salida tiene la suficiente intensidad como para ser observada a simple vista, (figura 46).

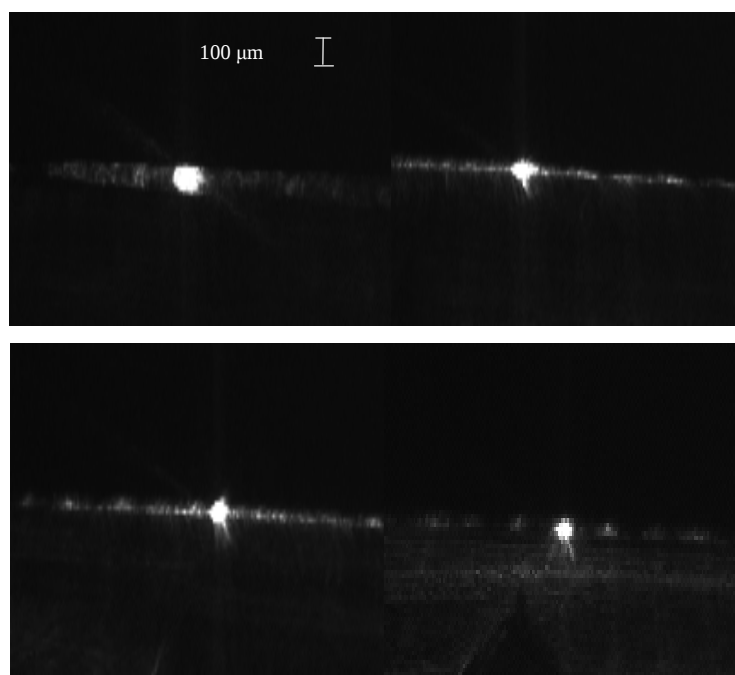


Figura 46. Intensidad de luz a la salida de las guías de onda de canal de polímero SU-8.

V.2.3 Determinación experimental de los modos de propagación

En las guías de canal existe un confinamiento de la luz tanto en la dirección x , como en la dirección y , por lo que, a diferencia con las guías de onda planas, aquí se observa una distribución de intensidades que además de tener mínimos en la dirección y , también presenta mínimos en la dirección x . En las imágenes de la figura 47 se muestra que las

guías presentan un confinamiento en 2 dimensiones, comportamiento comparable con resultados obtenidos por otros autores (ver figura 48) para guías de onda de canal de polímero óptico [Selviah, 2004]. En nuestro caso las guías de onda de canal presentaron un comportamiento multimodal a una longitud de onda de 632 nm, pero por el tamaño de las guías se espera que para longitudes de onda de comunicaciones claves (840 nm, 1310 nm y 1550 nm) presenten un comportamiento monomodo.

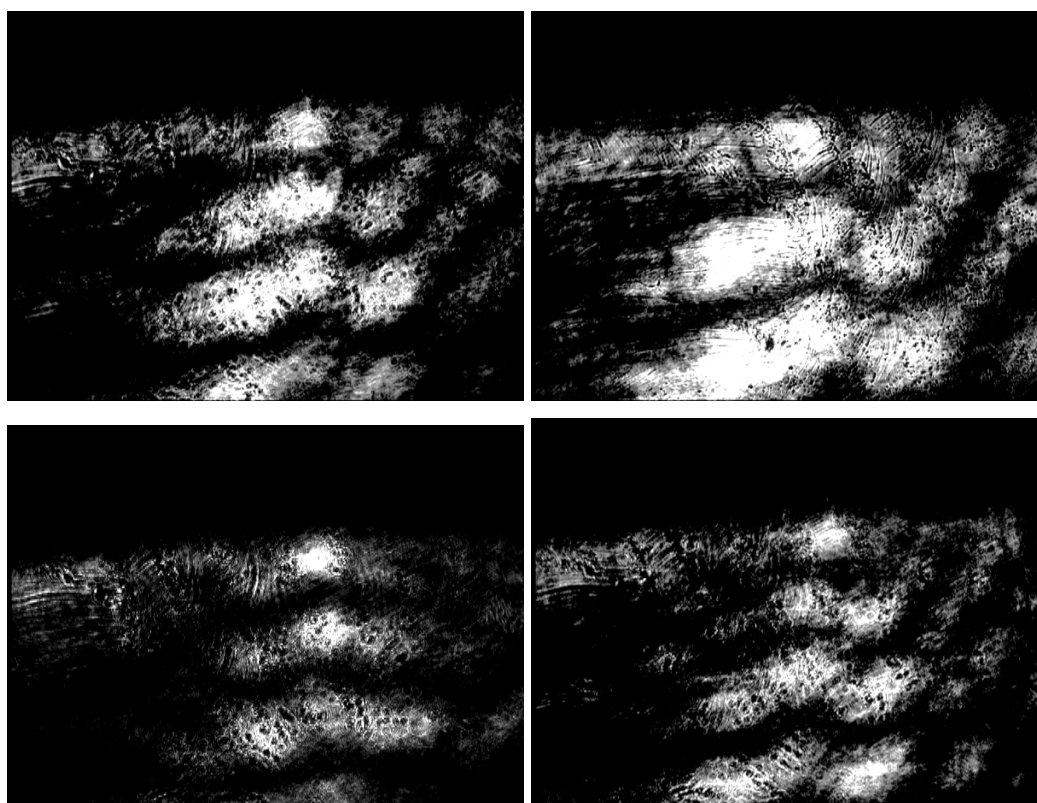


Figura 47. Distribución de intensidad de la luz a la salida de las guías de onda rectangulares.

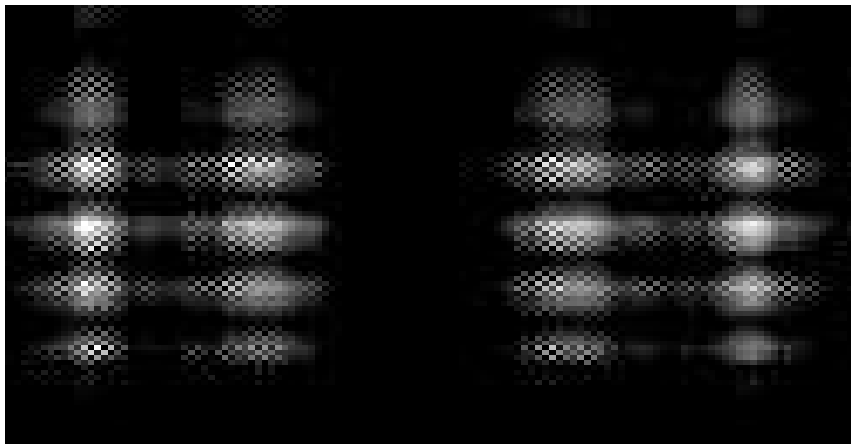


Figura 48. Distribución de intensidad de la luz a la salida de las guías de onda rectangulares [Selviah, 2004].

Capítulo VI

Conclusiones

En el presente trabajo de tesis se realizó el estudio de guías de onda planas y de canal de polímero óptico SU-8 obtenidas por el método de microlitografía, utilizando como sustratos vidrio de porta-objetos pre limpiados tipo Corning 2947 (vidrios de zinc-titanio), de dimensiones 2.5x7.5x0.1 cm con un índice de refracción de 1.51 (a longitudes de onda de: $\lambda = 632$ nm).

El objetivo de la tesis fue el de iniciar actividades de investigación de guías de onda planas y de canal, de polímeros ópticos, orientadas al desarrollo de circuitos de óptica integrada.

Se fabricaron guías de onda plana y de canal de polímero óptico SU-8 con espesores de entre 5 y 7 micrómetros; los perfiles de intensidad mostrados en las figuras 45 y 46, demuestran que la luz puede ser guiada a través de las guías de onda de SU-8. Debido a su arquitectura y a la longitud de onda utilizada (632 nm) las guías son multimodales, pero por el tamaño de las guías se espera que para longitudes de onda de comunicaciones claves (840 nm, 1310 nm y 1550 nm) presenten un comportamiento monomodo.

La estructura de las guías se inspeccionó por medio de un estudio de MEB. Se observó una geometría rectangular y uniforme de las guías de canal a lo largo del sustrato.

Los datos experimentales han revelado que el índice de refracción del SU-8 aumenta conforme se incrementa el tiempo de precalentado, logrando con esto una diferencia máxima entre índices de refracción de aproximadamente 0.01, sí, la película es sometida a tiempos de precalentado de 2 y 25 min y para tiempos más cortos, por ejemplo entre 2, 5 y 10 minutos se obtiene una diferencia entre índices de refracción de aproximadamente 0.0067.

Tomando en cuenta el proceso que se siguió para poder realizar la modulación en el índice de refracción de la muestra con SU-8, se puede proponer realizar guías con un

escalón aún más pequeño entre los índices de refracción, para lograr esto, la diferencia entre los tiempos de precalentado tiene que ser reducida.

Para aplicaciones ópticas, la técnica utilizada de microlitografía con exposición UV, nos reduce costos y nos da una gran fiabilidad en la fabricación de guías de onda plana y de canal con polímeros ópticos. Este tipo de proceso puede ser fácilmente aplicado, a la fabricación de otros elementos ópticos de mayor complejidad, tales como interconectores ópticos y sensores ópticos.

Apéndice A

Sistema automatizado de detección de modos de propagación en guías ópticas (acoplamiento con prisma de alto índice)

Para realizar el análisis de los modos de propagación de las guías de onda, se acopla luz láser a la guía de onda por medio de un prisma de alto índice de refracción. Para esto se utilizó el sistema automatizado Metricon 2010, en la Fig. 49 a) se muestra: el sistema automatizado y su diagrama esquemático, Fig. 49 b) se muestra: la vista esquemática de la guía de onda plana.

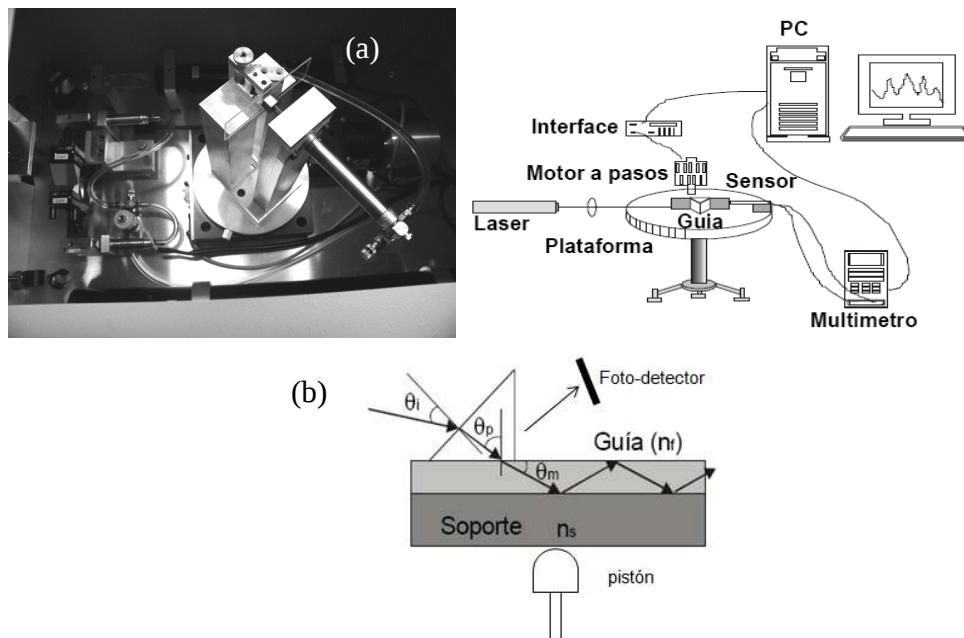


Figura 49. (a) Sistema automatizado para la medición de los índices de refracción de las muestras (METRICON). (b) Vista esquemática de la guía de onda plana paralela al prisma de alto índice.

El índice efectivo N_i es un parámetro básico que caracteriza a un modo guiado. Para un modo guiado de orden m , su índice de refracción efectivo está definido por la siguiente ecuación [Sánchez Barrales, 1999]:

$$N_i = \frac{\beta_i}{k} = n_p \sin \left(\theta_p + \frac{1}{n_p} \sin^{-1}(\sin(\theta_i - \theta_p)) \right) \quad (9)$$

$$\beta_i(\theta_p) = n_p \sin(\theta_p)$$

Donde β_i es la constante de propagación del modo. La guía de onda se coloca en contacto óptico con la base del prisma por medio de un pistón neumático a 40 psi de

presión. El ángulo de incidencia θ_i del láser se varía por medio de una montura rotatoria sobre la cual se encuentran montados, la guía de onda, la cabeza de acoplamiento y el detector a ciertos valores de θ_i , llamados ángulos modales. Los fotones no siguen el criterio de reflexión total interna y mediante el efecto óptico denominado como el efecto túnel [Najafi, 1992] se acoplan desde la base del prisma a la guía de onda como modos de propagación ópticos causando una caída abrupta de la intensidad de la luz que incide sobre el detector.

En el método de acoplamiento por prisma, que se mostró en la fig. 49, un haz de luz incide a un ángulo θ_i , respecto a la normal de la cara de entrada del prisma. En la base del prisma, el haz de luz incide a un ángulo θ_p , con la normal. Este ángulo θ_p , determina la velocidad de fase v_m en la dirección z del haz incidente, dada por

$$v_m = \frac{c}{n_{pr}} \text{sen} \theta_p \quad (10)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y n_{pr} es el índice de refracción del prisma. El acoplamiento de la luz a la guía de onda ocurre solamente cuando se selecciona un ángulo θ_p tal que $v_m = c/N_m$, donde v_m es la velocidad de fase para cada modo guiado $m = 0, 1, 2, \dots, m$; siendo m un valor entero y positivo, desde 0 hasta m . N_m es el índice de refracción efectivo del m -ésimo modo que está dado por

$$N_m = n_{pr} \text{sen} \theta_{pm} \rightarrow \theta_p > \theta_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{n}{n_{pr}} \right) \quad (11)$$

Con la ayuda de la ley de Snell se puede relacionar θ_{pm} con θ_m , de tal manera que los valores de N_m están dados por

$$N_m = n_{pr} \text{sen} \left(\text{sen}^{-1} \left(\frac{\theta_m}{n_{pr}} \right) \right) + A \quad (12)$$

donde n_{pr} es el índice de refracción y A es el ángulo de la base del prisma.

BIBLIOGRAFIA.

Agarwal V. 1998. "Improvements and recent advances in nanocomposite capacitors using a colloidal technique". Electronic Components and Technology Conference, Denver. Abril 15-17. pp. 165-170.

Ayliffe H. E. 1999. "Electric Impedance spectroscopy using microchannels with integrated metal electrodes", IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 8, No. 1. 5 de Marzo, pp. 50-57.

Biow H. O., Xiaocong Y. y Swee C. T. 2006. "Adjustable refractive index modulation for a waveguide with SU-8 photoresist by dual-UV exposure lithography". Optical Society of America, 29 de Junio, Vol. 45, No. 31. Pp 8036-8039.

Boer J., Visser R. J. y Melis G. P. 1992. "Time-resolved determination of volume shrinkage and refractive index change of thin polymer films during photopolymerization". Philips res. lab., 5600 JA Eindhoven, PAYS-BAS, vol. 33, n°6, pp. 1123-1126

Borreman A., Musa S., Kok A.A.M, Diemeer M. B. J. y Driessen A. 2002. "Fabrication of Polymeric Multimode Waveguides and Devices in SU-8 Photoresist Using Selective Polymerization". Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, Amsterdam. 10 de Noviembre . Pp. 83-86

Dutoit B.M., Besse P.A., Blanchard H., Guerin L., Popovic R.S. 1999. "High performance micromachined". Sm2Co17 bonded magnets, Sensors and Actuators. Physical, vol. 77, pp. 178-182.

Gerardino A., Cojoc D., Di Fabrizio E., Schiappelli F., Visimberga G., De Vittorio M., Prasciolu M., Kumar R., Cabrini S. y Degiorgio V. 2004 "Efficient fiber-to-waveguide coupling by a lens on the end of the optical fiber fabricated by focused ion beam milling" Microelectronic Engineering archive Vol. 73-74, pp 397-404.

Guerin L., M. Bossel, M. Demierre, S. Calmes, y Renaud P. 1997 "Simple and low cost fabrication of embedded microchannels by using a new thick-film photoplastic, Transducers". Chicago, 19 de junio. Vol.2 pp. 1419-1422

Han K.S., Kim D.B., Jang W.H., Rhee T.H.1999. "Chloro-fluorinated polyimides for low loss optical waveguides application". Jpn. J. Appl. Phys 9 de Agosto. Vol. 38, pp. L1249 - L1251.

Herminghaus S., Boese D., Yoon D. Y. y Smith B. A. 1993. "Out-of-plane thermal expansion coefficient of biphenyldianhydride-phenylenediamine polyimide film". *Journal of Electronic Materials*. 7 de noviembre, Vol. 22, pp. 797-799.

Kang J.W., Kim J.P., Lee W.Y., Kim J.S., Lee J.S., Kim J.J. 2001. "Lightwave Technol". *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 15 de diciembre. Vol. 11. Pp 1292-1298.

Kawabata T. 1998. "The micromachined accelerometer fabrication using thick resist", *Technical digest of the 16th Sensor Symposium, Japan*, 16 de septiembre. pp. 199-202

Koo J.S., Smith P. G. R., Williams R. B., Riziotis C. y Grossel M. C. 2003 "UV written waveguides using crosslinkable PMMA based copolymers". *Applied Optics*, 23 de junio. Vol. 45, Issue 31, pp. 8036-8039

Kowalczyk T.C., Finkelshtein I., Kouchnir M., Lee Y.C., Nguyen A.D., Vroom D., Bischel W.K. 2001. "Polymeric variable optical attenuator array", *Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO'01) Technical Digest, Baltimore, MD, USA*, 06 de mayo. pp. 17 - 18

LaBianca N., 1995. "High aspect ratio optical resist chemistry for MEMS applications". *4th Int. Symp. on Magnetic Materials, Processes, and Devices, The Electrochem* 13 de octubre. pp.386-396

Lee H.M., Hwang W.Y., Oh M.C., Park H., Zyung T. 1997. "Polymeric 2×2 electrooptic switch consisting of asymmetric Y junctions and Mach-Zehnder interferometer", *Appl. Phys. Lett* 10 de febrero. Vol. 80, pp. 621-626.

Lorenz H., 1996. "EPON SU-8 : A low-cost negative resist for MEMS", *MicroMechanics Europ MME 96, España* 21-22 de octubre. Pp.32 – 35.

Marquez H., Salazar D., Villalobos A., Paez G. y Rincon J. M. 1995. "Experimental study of Cu-Na Exchanged glass waveguides". *Appl. Opt.*, 1 de septiembre. Vol. 34, Issue 25, pp. 5817-5822

Najafi, S. Iraj, 1992. "Introduction to glass integrated optics," *Artech House Inc.* pp.150

Ong B. H., Yuan X.C., Tao S. H. y Tjin S. C. 2006. "Photothermally enabled lithography for refractive-index modulation in SU-8 photoresist," *Opt. Lett.* vol. 24, pp. 2940-2945.

Saleh, B.E.A. y M.C. Teich, "Fundamentals of Photonics", 1991, John Wiley and Sons, Inc. New York, pp.700.

Shacklette L.W, 2004 "Optical polymer technology", Optics&Photonics news.Vol. 10, Issue 10 pp. 1416-1418

Shaw J.M., 1997. "Negative photoresists for optical lithography", IBM Journal of Research and Development, 11 de septiembre. Vol. 41, pp.81-94

Tung K. K., Wong W. H. y Pun E. Y. B. 2003. "Polymeric optical waveguides using direct ultraviolet photolithography process", Applied Physics A: Materials Science & Processing, 3 de febrero. Vol. 80, No. 3, pp. 621-626.

Wang C., Taherabadi L., Jia G., Madou M., Yeh Y. y Dunn B. 2004."C-MEMS for the Manufacture of 3D Microbatteries", Electrochemical and Solid-State Letters, 16 de junio. Vol. 11, pp. A435-A438.

Wong W.H., Pun E. Y. B. 2001 "Polymeric waveguide wavelength filters using electron-beam direct writing". Appl. Phys. Lett., 20 de noviembre. Vol. 79, Issue 22. Pp 3576-3579.

Yang R., Mullen C., Schalline M., Reithmaier K. y Sheets R. 2007. "High throughput projection UV lithography of high-aspect-ratio thick SU-8 microstructures", journal Microsystem Technologies, 9 de enero. Vol. 14, No. 9-11, pp. 1233-1243

Yu G. y Selvia D. R. 2004"Modeling of optical coupling to multimode polymer waveguides". The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 13-16 de noviembre. pp.981 – 982.

Zhang C., Fetterman H. R., Seong K. K., Yuan W. y Steier W. H. 2003. "Fiber-Coupling Loss-Improved Electro-Optic Polymeric Modulators" Journal of the Korean Physical Society, vol. 43, nº5, pp. L645-L647.

ANEXO 1:

Código realizado en MatLab para medir los espesores de las guías de onda planas y de canal de polímeros ópticos.

```
clear all;
close all;
%f=imread('ancho.tiff');
f=imread('100_0764.JPG');    “leemos una imagen”
imshow(f)    “la imagen leída es mostrada en pantalla”
[x,y]=ginput(2);    “datos a obtener con el puntero”
num_pix_esc = ((abs(x(1)-x(2)))^2+(abs(y(1)-y(2)))^2)^(1/2);
[x,y]=ginput(2);    “datos a obtener con el puntero”
num_pix_dist = ((abs(x(1)-x(2)))^2+(abs(y(1)-y(2)))^2)^(1/2);
%dist=0.000008*num_pix_dist/num_pix_esc
dist=0.000100*num_pix_dist/num_pix_esc    “valor de la separación, ancho, espesor, etc..
de las guías”
```