



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE CIENCIAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN COMUNICACIÓN ÓPTICA

**IMPLEMENTACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE TÉCNICAS
PARA LA FABRICACIÓN DE GUÍAS DE ONDA CANAL**

**TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL GRADO
DE MAestrÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

PRESENTA:

L.F. CLAUDIA VERÓNICA SILVA JUÁREZ

ASESOR:

DRA. AMPARO RODRIGUEZ COBOS

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. 14 de febrero de 2018

DEDICATORIA

“Has vivido, has sentido, has llorado,
has reído, te has caído, y te has
vuelto a levantar.

Así es la vida, se trata de no
quedarse abajo sino tomar nuevas
fuerzas y levantarse, de intentar
nuevas cosas, de no darse por
vencido”.

Anónimo

Este trabajo de tesis se la dedico a mi a mis papás Claudia y Ricardo, mis hermanos Vanne y Ricky, y a mi hijo Derek quien fue la principal razón por la que decidí emprender este reto, con mucho cariño para ustedes que siempre me apoyaron en todo este trayecto para que pudiera culminar con éxito, muchas gracias por todo, los amo.

Claudia Verónica Silva Juárez

AGRADECIMIENTOS

Mucha gente me apoyó para poder alcanzar ésta meta, si no hubiera sido por ustedes no lo habría logrado por ello voy a estar eternamente agradecida.

A Dios por ponerme en mi camino a personas bondadosas que me ayudan a llevar a cabo mis metas, por darme una familia que me apoya en todo lo que me propongo, por la salud y por guiarme en mi vida abriéndome las puertas hacia cosas buenas.

A ti mi querido hijo que a pesar de todos los momentos difíciles que se nos presentaron, tu siempre estabas con esa sonrisa haciéndome saber que todo iba a estar bien, siempre que llegaba a casa me recibías con un fuerte abrazo dándome la fuerza necesaria para poder seguir salir adelante y poderte dar una vida de calidad, cada cosa nueva que me enseñabas, cada pequeño logro me hacía sentir que no estaba haciendo las cosas mal, por todo eso y por estar en mi vida te doy las gracias, te amo mi pequeño Derek.

A mi papá Ricardo que a pesar de que ya no soy una niña él todavía me cuida y ve por mí, por sus consejos, por ser el magnífico abuelo que es para mi niño, por nunca soltar mi mano y apoyarme en todas las decisiones que tomo, simplemente te agradezco por estar con nosotros.

A mi mamá Claudia, mi mejor amiga, mi consejera, que tampoco me ha dejado sola, por ser mí ejemplo a seguir y saber que siempre puedo contar con ella, por compartir mis tristezas y alegrías, por todos los sacrificios que hiciste para que yo logre concluir mis metas, gracias por todo el apoyo que me has brindado.

A mis hermanos Ricardo y Vanne por alegrarme mis días, que a pesar de todas las peleas que tenemos siempre están conmigo en las buenas y en las malas, por ser esos tíos magníficos que son, por hacerme sentir que a pesar de todo siempre voy a poder contar con ustedes, los quiero mucho.

A mi asesora por darme la oportunidad de trabajar con ella, por creer en mí y apoyarme en todo momento, por ser esa maestra de vida la que impulsa a sus alumnos a salir adelante a pesar de todas las circunstancias, por la confianza que me brindó durante mi estancia como estudiante de maestría.

Agradezco a los Doctores: Gilberto Alvarado Leyva, Francisco De Anda Salazar y Victor Hugo Compeán Jasso por aceptar formar parte de mi jurado y por los pertinentes comentarios, sugerencias y correcciones a este trabajo de tesis.

En particular, agradezco al Dr. Gilberto Alvarado Leyva por el apoyo y los consejos que me brindó durante mi paso por la Facultad de Ciencias de la UASLP.

Al Dr. Francisco De Anda Salazar y al Dr. Victor Hugo Compeán Jasso les agradezco por facilitarme el kit de la fotoresina negativa para poder llevar a cabo algunos de los experimentos necesarios para este trabajo de tesis.

Al Dr. Compeán por el apoyo y las asesorías brindadas cuando fue necesario.

A mis amigos del IICO por apoyarme y asesorarme en mi estancia en el instituto, por alegrarme cuando había problemas, por acompañarme en todo mi proceso, gracias por no dejarme sola cuando más los necesitaba.

A CONACYT por el apoyo económico durante mi estancia como estudiante de maestría.

RESUMEN

En este trabajo se reporta la fabricación de guías de onda canal vítreas con un ancho de $17\mu m$ fabricadas mediante el intercambio iónico de potasio (K^+) en substratos de vidrio soda lime. La fabricación de estos dispositivos se llevó a cabo en un cuarto limpio en la que se hace uso del equipo necesario para aplicar la técnica de fotolitografía utilizando, por primera vez, una fotoresina negativa.

Se implementaron algunas de las técnicas utilizadas en la fabricación de dispositivos de óptica guiada con el fin de incursionar en la fabricación de guías de onda orgánicas (poliméricas).

La caracterización de ambos tipos de guías implicó la implementación de un banco óptico de caracterización de campo cercano. Esta técnica consiste en acoplar luz a la entrada del dispositivo y recolectarla a la salida con el fin de observar la distribución de los patrones de intensidades.

Visualizamos en superficie las guías canal vítreas que de acuerdo con la literatura revisada esto no se había hecho anteriormente.

Reportamos la optimización de todos los parámetros involucrados en las diferentes etapas de fabricación.

ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Aspecto teórico	6
2.1 Guías de onda ópticas	6
2.2 Guías de onda plana	7
2.3 Modos en las guías de onda	9
2.4 Teoría electromagnética de las guías de onda	10
2.4.1 Ecuaciones de Maxwell	10
2.4.2 Ecuaciones de Maxwell en un medio	11
2.4.3 Modos TE y TM en guías de onda planas	15
2.5 Método del índice efectivo	16
2.6 Intercambio iónico	19
2.6.1 Guías de onda fabricadas por intercambio iónico	22
3. Aspecto Experimental	24
3.1 Introducción	24
3.2 Fabricación de guías de onda por intercambio iónico	25
3.2.1 Clivado y limpieza del sustrato	25
3.2.2 Depósito del material de barrera	28
3.2.3 Elección y depósito de la resina fotosensible	30
3.2.4 Insolación y revelado de la resina fotosensible	33
3.2.5 Ataque del material de barrera	35
3.2.6 Intercambio iónico	35
3.2.7 Pulido de las guías de onda	37
3.3 Caracterización de las guías de onda	39
3.3.1 Montaje del banco óptico de campo cercano en el visible	39
3.4 Fabricación de guías de onda canal orgánicas	41
3.4.1 Aplicación de la técnica de lift – off	41
3.4.2 Guías de onda canal poliméricas (resina fotosensible)	43
4. Resultados y análisis	44
4.1 Fabricación de las guías de onda vítreas	44

4.1.1	Deposición del material de barrera	44
4.1.2	Depósito, exposición y revelado de las resinas fotosensibles	46
4.1.3	Abertura de los canales en el material de barrera	48
4.2	Caracterización de las guías de onda fabricadas	49
4.2.1	Visualización de las guías en superficie	49
4.2.2	Caracterización de campo cercano	50
4.3	Cálculo del índice efectivo	52
4.3.1	Simulación de la guía de onda canal fabricada	55
4.3.2	Simulación de guías de onda con diferente ancho canal	58
4.4	Fabricación de las guías de onda canal orgánicas	60
4.4.1	Guías de onda de fotoresina positiva	61
4.4.2	Guías de onda orgánicas con una estructura base de Al	63
4.4.3	Guías de onda orgánicas con una estructura base de spin on glass	65
4.4.4	Guías de onda orgánicas con una estructura base de fotoresina negativa	66
5.	Conclusiones y perspectivas	67
6.	Referencias	69

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En 1969 S.E. Miller propuso el concepto de “óptica integrada” el cual consiste en la integración de dispositivos ópticos y electrónicos en un mismo sustrato. Una guía de onda forma la base para los dispositivos de óptica integrada, se han empleado diferentes técnicas para conseguir guías de ondas en diversos materiales. Los dispositivos desarrollados pueden ser divididos en cuatro grupos: pasivos, electro-ópticos, opto-electrónicos y ópticos no lineales ^[1].

Los dispositivos de óptica integrada pasivos principalmente dividen señales en dos o más partes para guiarlas en la dirección deseada. Los dispositivos electro-ópticos son fabricados en materiales dieléctricos con grandes coeficientes electro-ópticos. Para modificar el índice de refracción de una guía de onda se usa un campo eléctrico. Los dispositivos ópticos integrados opto-electrónicos son fabricados de materiales semiconductores y ofrecen la mayor versatilidad de cualquier componente óptico integrado. Son muy utilizados debido a la poca pérdida que generan, también se realizan distintos dispositivos en guías de onda, tales como acopladores direccionales, filtros, circuladores, entre otros (figura 1.1).

Hoy en día son demasiado vistas las guías de onda dieléctricas trabajando a frecuencias de la luz visible e infrarrojas, debido a que son útiles para transportar información de banda ancha, sustituyendo a los cables coaxiales y enlaces de microondas en las redes telefónicas y, en general, las redes de datos.



a)



b)

Figura 1.1 Ejemplos de algunas de las aplicaciones con guías de onda a) acopladores de guías^[2] y b) Filtro de guía de onda^[3].

Diversos estudios de óptica integrada ^[4, 5, 6] se centran en el desarrollo de nuevos dispositivos basados en guías ópticas capaces de sustituir a los actuales elementos activos de los circuitos eléctricos semiconductores (transistores, capacitores, etc.), en la mejora de los elementos pasivos (divisores, multiplexores, filtros, etc.)

La óptica integrada está basada en el hecho de que es posible producir por diferentes métodos, regiones de mayor índice de refracción en la superficie de un sustrato plano, y que estas regiones de índice ligeramente mayor al sustrato plano actúan como guías de onda para la luz ^[7].

El vidrio ha sido el material más popular para la fabricación de componentes pasivos, es un buen sustrato por su costo relativamente bajo, por su excelente transparencia, por su alto umbral de daño óptico y por la disponibilidad en tamaños sustancialmente grandes. Además, los sustratos de vidrios son amorfos y es más fácil producir polarización insensible en componentes de vidrio. El índice de refracción de los vidrios usados en la óptica integrada es cercano a la fibra óptica por lo que las pérdidas de acoplamiento entre las guías de onda fabricadas en vidrio y las fibras ópticas son más pequeñas ^[8].

Se han empleado diferentes métodos para la fabricación de guías de onda, los cuales se pueden dividir como sigue:

1. Pulverización catódica.
2. Deposición de vapor químico.
3. Capa de solución de gel.
4. Implantación de iones.
5. Intercambio iónico^[7].
6. Deposición por spin-coating

El proceso por intercambio iónico ha sido el método más popular para la fabricación de componentes en la óptica integrada en vidrio debido a que es una técnica simple y de bajo costo, la cual consiste en reemplazar un ion de vidrio por otro de mayor tamaño o polarizabilidad electrónica más importante como Ag^+ , K^+ , Cs^+ o Tl^+ . Consecuentemente el índice de refracción incrementa localmente, dando origen a la guía de onda^[8].

Las guías de onda fabricadas por intercambios iónicos poseen dos características que las vuelven apropiadas para su aplicación en tecnologías híbridas. Primero, las guías de onda fabricadas se encuentran sobre la superficie del substrato, permitiendo que los modos guiados puedan interactuar fácilmente con una sobre capa. Segundo, los substratos de vidrio no son atacados químicamente durante la fabricación de la guía, estos permanecen planos, lo cual beneficia a la mayoría de los tipos de hibridación^[8].

Anteriormente, en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica se han fabricado guías de onda canal mediante diferentes técnicas logrando anchos de canal de aproximadamente de $30\mu m$ ^[9].

El trabajo de esta tesis consistió en la fabricación y caracterización de guías de onda canal vítreas mediante la técnica del intercambio iónico. Teniendo como objetivos principales: optimizar cada uno de los procesos y parámetros

involucrados y buscar lograr la fabricación de una guía de ancho de canal menor al de las guías de onda ya fabricadas anteriormente. Esto, con el fin de que las guías trabajen en su régimen monomodo para longitudes de onda del visible (rojo) o del cercano infrarrojo (longitudes de onda de las telecomunicaciones).

También, se trabajó en la implementación de algunas de las técnicas utilizadas en la fabricación de dispositivos de óptica guiada con el fin de incursionar en la fabricación de guías de onda orgánicas (poliméricas) y su caracterización.

La caracterización de ambos tipos de guías implicó la implementación de un banco óptico de caracterización de campo cercano.

Este trabajo de tesis se divide en cinco capítulos que están distribuidos de la siguiente manera:

1. **Introducción:** se plantea el contexto del desarrollo de este trabajo.
2. **Fundamentos teóricos:** se expone la teoría electromagnética de las guías de onda. Explicamos el método del índice efectivo que nos permite estimar los índices efectivos de los modos guiados y se revisan los fundamentos del proceso del intercambio iónico entre los iones del vidrio y los de una sal fundida.
3. **Aspecto experimental:** en este capítulo se explican los diferentes procedimientos involucrados en la fabricación de guías de onda canal por intercambio iónico. Se exponen a detalle las diferentes técnicas implementadas para la fabricación y caracterización tanto para las guías de onda vítreas como para las guías orgánicas.
4. **Resultados experimentales y análisis:** Exponemos los resultados obtenidos en cuanto a las guías de onda fabricadas: características, su caracterización óptica y cálculo de los índices efectivos. Revisamos los

resultados de la optimización de los diferentes procesos y parámetros involucrados y se analiza la pertinencia de las técnicas de fabricación utilizadas.

5. **Conclusiones y perspectivas:** Se enlistan nuestras conclusiones respecto a los métodos de fabricación utilizados y a las características de las guías de onda fabricadas. En cada uno de los puntos mencionamos, de acuerdo a nuestra experiencia, una recomendación a manera de perspectiva para la continuación de este trabajo.

6. Referencias Bibliográficas

CAPITULO 2

ASPECTO TEÓRICO

2.1 GUÍAS DE ONDA ÓPTICAS

Una nueva tecnología que ha surgido es la transmisión de la luz en diversos materiales, que es la base del mejor sistema óptico la cual se realiza mediante conductos dieléctricos llamados guías de onda ópticas; esta guías consisten en una luz conducida por un medio dieléctrico que está rodeado por otro material dieléctrico que posee un índice de refracción diferente ^[10], algunos tipos de guía son: de bloque o plana, canal y cilíndrica como se muestran en la figura 2.1.

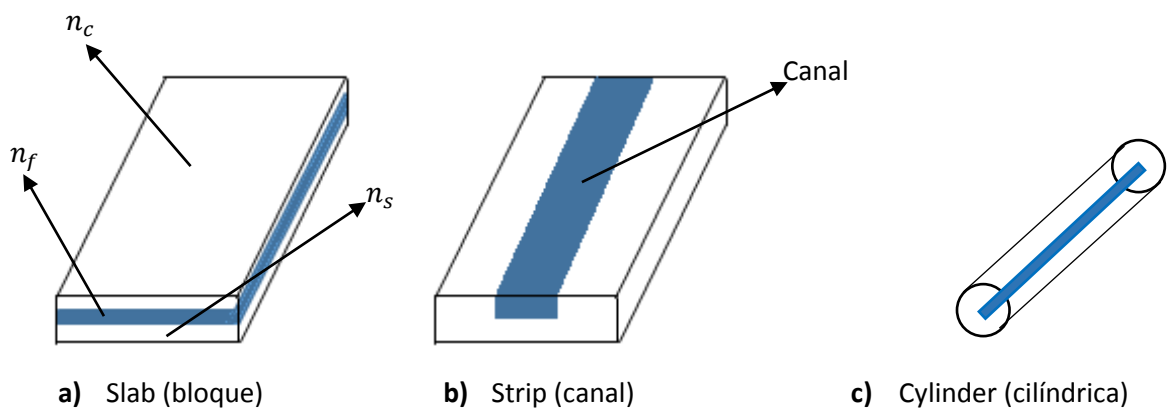


Figura 2.1 Tipos de guías de onda ^[10].

La óptica integrada es la tecnología que se encarga de combinar un substrato simple con varios dispositivos ópticos y componentes para la generación de enfoque, insolación combinatoria, polarización, acoplamiento, traspuesta, modulación y detección de la luz. Tiene como objetivo la miniaturización de la óptica de la misma manera que los circuitos integrados han servido para miniaturizar la electrónica.

2.2 GUÍAS DE ONDA PLANA

Un adecuado tratamiento matemático para comprender la propagación de la luz en las guías de onda planas es la creación de un problema de valores propios de las ecuaciones de Maxwell y resolverlos en orden de obtener los modos normales (estados propios) que corresponden a la dirección de la propagación de la luz en la guía, así como sus distribuciones de campo (funciones propias). Sin embargo, es posible analizar la propagación de la luz en la guía de onda desde otros puntos de vista, uno de ellos es el uso de óptica geométrica, que considera un rayo de luz que se refleja hacia atrás y hacia adelante entre dos interfaces siguiendo un camino en zig-zag en la guía de onda y utilizando la ley de Snell y de Fresnel para la reflexión y la transmisión del mismo en una interfaz entre dos medios con índice de refracción diferente ^[12]. Aunque en la mayoría de las aplicaciones de las guías de onda es necesario utilizar canales, las guías de onda planas son útiles porque con ellas es posible obtener información acerca del comportamiento general de la guía y del proceso de fabricación, esto se logra debido a que la luz se acopla relativamente fácil a la guía.

La guía de onda plana es la forma más simple y consiste en la combinación de tres elementos (núcleo, substrato y cubierta) con diferentes índices de refracción (usualmente guía de onda n_0 , substrato n_1 y aire n_2) como se representa en la figura 2.2; para que la luz pueda ser guiada en el núcleo, el índice de refracción debe ser ligeramente mayor que los índices del substrato y la cubierta. Como consecuencia de la diferencia de índices de refracción, la luz es confinada en la dirección X y se propaga libremente en las direcciones Y y Z [7].

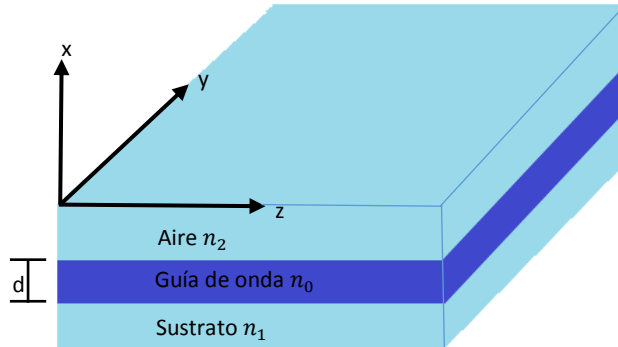


Figura 2.2 Guías de onda plana de tres capas paralelas con distinto índice de refracción [12].

El espesor del núcleo depende de la longitud de onda que queremos guiar, de las diferencias de índice de refracción de las capas que forman la guía de onda y del número de modos en que se desea propagar la luz. Se puede considerar que la guía tendrá un buen confinamiento de la luz cuando su espesor es aproximadamente el doble de la longitud de onda con la que se trabaje. Cuando el índice de refracción del sustrato (n_1) es igual al índice de refracción de la cubierta o el aire (n_2) como se observa en la figura 2.3 se dice que es una guía de onda simétrica ($n_1 = n_2$), si por el contrario los índices de refracción varían entre sí se dice que es una guía de onda asimétrica ($n_0 > n_1 > n_2$). Las guías de onda planas se pueden clasificar según la variación del índice de refracción como función de la profundidad con respecto a la superficie para obtener guías de onda con perfil de índice en forma de escalón, donde el cambio en el índice de refracción es bastante considerable, de índice gradiente en donde el cambio de índice de refracción es gradual, y de barrera óptica en donde el cambio de índice de refracción puede ser considerable o gradual.

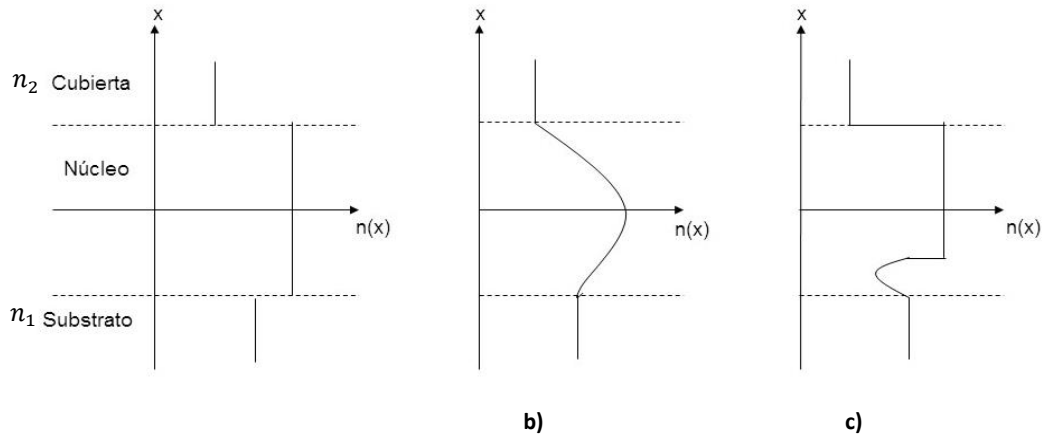


Figura 2.3 Perfil de índice de refracción para guías de onda planas a) guía de índice escalón, b) guía de índice gradiente y c) guía de barrera óptica [7].

2.3 MODOS EN LAS GUÍAS DE ONDA

En las ondas electromagnéticas transversales (TEM) las variaciones de amplitud y fase son muy lentas en la dirección transversal; sin embargo, en aplicaciones que implican fibras y guías ópticas monomodo, la suposición de una variación lenta en esta dirección ya no es válida. Por lo tanto, para el análisis electromagnético de tales estructuras, se deben utilizar las ecuaciones de Maxwell.

En las guías de ondas dieléctricas, los modos ópticos discretos tienen un campo evanescente fuera de la región del núcleo (el núcleo es a veces llamado la guía de ondas ópticas). Puede existir una cantidad significativa de energía transportada en la cola evanescente. El campo evanescente puede usarse para lograr una interacción mutua con otras guías o estructuras de ondas adyacentes. La interacción del campo evanescente es muy importante en aplicaciones de dispositivos, tales como el filtro de rejilla dieléctrica, el láser de realimentación distribuida y el acoplador direccional. El análisis matemático debe ser numérico o por aproximaciones para encontrar la distribución de campo de los modos de guía de ondas de canal.

Además del conjunto de modos guiados que tienen valores propios discretos, hay un conjunto infinito de modos continuos. Sólo la suma de éstos existe un conjunto completo de funciones ortogonales. Los modos continuos se llaman modos de radiación porque están propagando ondas fuera de la guía de ondas.

En cualquier discontinuidad dieléctrica, las condiciones de contorno de los campos eléctrico y magnético se satisfacen por la suma tanto de los modos de onda guiados como de los modos continuos en ambos lados del límite. Los modos continuos se excitan en cualquier discontinuidad, su energía irradia lejos de la discontinuidad ^[13].

2.4 TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA DE LAS GUÍAS DE ONDA

2.4.1 Ecuaciones de Maxwell

B. E. A. Saleh (2007) menciona que el campo magnético y eléctrico en el espacio libre satisfacen las ecuaciones de Maxwell, estas toman la siguiente forma:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.4.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.4.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (2.4.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (2.4.4)$$

donde:

\mathbf{E} es el campo eléctrico,

\mathbf{H} el campo magnético,

$\varepsilon_0 \approx \left(\frac{1}{36\pi}\right) \times 10^{-9} \text{ F/m}$ es la permitividad eléctrica y

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ la permeabilidad magnética.

Los componentes de \mathbf{E} y \mathbf{H} satisfacen la ecuación de onda en el espacio libre, dada por:

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (2.4.5)$$

Donde c representa la velocidad de la luz en el vacío y equivale a:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.4.6)$$

La función escalar de $u(r, t)$ se aplica a cualquiera de las componentes de \mathbf{E} (E_x, E_y, E_z) y de \mathbf{H} (H_x, H_y, H_z).

La ecuación de onda se puede derivar de las ecuaciones de Maxwell aplicando el operador rotacional ($\nabla \times$) a la ecuación (2.4.2), haciendo uso de la identidad $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$, y por medio de las ecuaciones (2.4.1) y (2.4.3) se observa que las componentes satisfacen la ecuación de onda que es la base para la óptica y de la teoría electromagnética, la velocidad de la luz está relacionada a las constantes electromagnéticas ϵ_0 y μ_0 .

2.4.2 Ecuaciones de Maxwell en un medio

En un medio donde las cargas no son libres dos o más vectores de campo son definidos como son la densidad de flujo eléctrico $\mathbf{D}(r, t)$ y la densidad de flujo magnético $\mathbf{B}(r, t)$, por lo que las ecuaciones de Maxwell se relacionan de la siguiente manera:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.4.7)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.4.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2.4.9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4.10)$$

La relación que existe entre la densidad de flujo eléctrico \mathbf{D} y el campo eléctrico \mathbf{E} depende de las propiedades del medio que se caracterizan por la densidad de polarización \mathbf{P} . En un medio dieléctrico, la densidad de polarización es la suma de los dipolos eléctricos inducidos por el campo eléctrico, así mismo la relación entre la densidad de flujo magnético \mathbf{B} y el campo magnético \mathbf{H} depende de las propiedades del medio, incorporado en la densidad de magnetización \mathbf{M} , Que se define de forma análoga a la densidad de polarización. Las ecuaciones que relacionan las densidades de flujo y los campos son:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.4.11)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \quad (2.4.12)$$

En un medio homogéneo, todas las componentes de los campos \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{D} y \mathbf{B} son funciones continuas de la posición. En un medio dieléctrico, la tangencial de las componentes del campo eléctrico y magnético, y la normal de las componentes de las densidades de flujo eléctrico y magnético deben ser continuas.

Si se considera una onda electromagnética monocromática propagándose en un medio óptico, todas las componentes del campo eléctrico y magnético son funciones armónicas del tiempo con frecuencia ν y frecuencia angular $\omega = 2\pi\nu$. Se puede expresar el campo eléctrico y magnético en su forma compleja.

$$\mathbf{E}(r, t) = \text{Re}[\mathbf{E}(r)e^{j\omega t}] \quad (2.4.13)$$

$$\mathbf{H}(r, t) = \text{Re}[\mathbf{H}(r)e^{j\omega t}] \quad (2.4.14)$$

Sustituyendo (2.4.13) y (2.4.14) en las ecuaciones de Maxwell (2.4.7) – (2.4.10) y usando la relación $(\partial/\partial t)e^{j\omega t} = j\omega e^{j\omega t}$ para ondas monocromáticas con frecuencia angular ω , se produce un conjunto de ecuaciones con la amplitud de su vector complejo de campo las cuales son:

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\mathbf{D} \quad (2.4.15)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mathbf{B} \quad (2.4.16)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2.4.17)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4.18)$$

En una onda monocromática la amplitud de su vector complejo de campo eléctrico y magnético son ondas planas con el vector de onda \mathbf{k} de modo que:

$$\mathbf{H}(r) = \mathbf{H}_0 e^{-jk \cdot r} \quad (2.4.19)$$

$$\mathbf{E}(r) = \mathbf{E}_0 e^{-jk \cdot r} \quad (2.4.20)$$

donde \mathbf{H}_0 y \mathbf{E}_0 son vectores constantes, la magnitud de \mathbf{k} es $k = nk_0$ (n es el índice de refracción). Por lo que se pueden reescribir las ecuaciones de Maxwell:

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H}_0 = -\omega\epsilon\mathbf{E}_0 \quad (2.4.21)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 = \omega\mu\mathbf{H}_0 \quad (2.4.22)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (2.4.23)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (2.4.24)$$

De la ecuación (2.4.21) se deduce que \mathbf{E} debe ser perpendicular a \mathbf{k} y a \mathbf{H} , de manera similar, de la ecuación (2.4.24) se tiene que \mathbf{H} debe ser perpendicular a \mathbf{k} y a \mathbf{E} . Entonces \mathbf{E} , \mathbf{H} y \mathbf{k} son mutuamente ortogonales como se muestra en la figura 2.4. Ya que \mathbf{E} y \mathbf{H} se encuentran en un plano normal a la dirección de propagación \mathbf{k} , la onda es llamada onda transversal electromagnética (TEM).

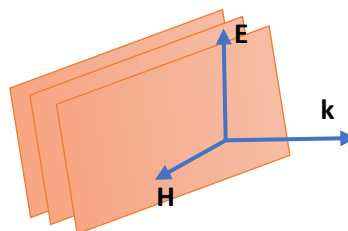


Figura 2.4 Onda transversal electromagnética en un plano ^[10].

De acuerdo con la ecuación (2.4.21), las magnitudes H_0 y E_0 están relacionadas por:

$$H_0 = \left(\frac{\omega\varepsilon}{k}\right) E_0 \quad (2.4.25)$$

Similarmente la ecuación (2.4.22) por:

$$H_0 = \left(\frac{k}{\omega\mu}\right) E_0 \quad (2.4.26)$$

La razón entre las amplitudes del campo eléctrico y magnético es $E_0/H_0 = \omega\mu/k = c\mu = \sqrt{\mu/\varepsilon}$. Esta cantidad es conocida como impedancia del medio representada por:

$$\eta = \frac{E_0}{H_0} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (2.4.27)$$

Después de haber definido que $\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}$. Para un medio no magnético $\mu = \mu_0$, se puede definir en términos de la impedancia del espacio libre η_0 como:

$$\eta = \frac{\eta_0}{n} \quad (2.4.28)$$

donde

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 120\pi \approx 377\Omega \quad (2.4.29)$$

2.4.3 Modos TE y TM en guías de onda planas

La sección transversal en la dirección de la propagación puede ser dividido en TE (transversal eléctrico) y TM (transversal magnético). TE representa el caso donde no hay componentes del campo eléctrico en la dirección de la propagación (es decir que sale del campo de propagación) y para TM no hay componentes del campo magnético en la dirección de la propagación.

En el caso de una onda plana se asume que $\partial/\partial y = 0$ a lo que es similar a una onda plana en un medio, si se sustituye en las ecuaciones de Maxwell se obtienen dos grupos de ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_y}{\partial z} &= \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} &= -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \\ \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} &= \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (2.4.30a)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_y}{\partial z} &= -\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} &= \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} &= \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (2.4.30b)$$

La solución del conjunto de ecuaciones (2.4.30a) pertenecen a los modos TE, las soluciones del segundo grupo de ecuaciones (2.4.30b) son los modos TM. Ya que ε solo es una función de x , la variación de z debe de ser la misma en todas las capas, para la propagación de las ondas en la dirección $+z$ la variación es $e^{-j\beta z}$, así como para $-z$ la variación es $e^{j\beta z}$. Por lo que las

ecuaciones para las ondas TE se pueden escribir de la siguiente manera para E_y , $E_y(x, z) = E_y(x)E_z(z)$:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + (\omega^2 \mu \varepsilon(x) - \beta^2) \right] E_y(x) E_y(z) = 0 \quad (2.4.31)$$

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta^2 \right] E_y(z) = 0 \quad (2.4.32)$$

y

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + (\omega^2 \mu \varepsilon(x) - \beta^2) \right] E_y(x) = 0 \quad (2.4.33)$$

De manera similar el procedimiento anteriormente mencionado puede ser usado para la obtención de los modos TM.

Las soluciones a los modos ópticos de una guía de onda canal no tienen soluciones exactas, por lo cual se han utilizado diferentes aproximaciones como el método del índice efectivo. Aunque los modos puros TE y TM no existen, se pueden encontrar modos parecidos, para los cuales tanto E_z , o H_z son despreciables comparados con otras componentes de campo.

2.5 EL MÉTODO DEL ÍNDICE EFECTIVO

El método del índice efectivo ha sido utilizado desde inicios de la óptica integrada para tener una rápida aproximación de la constante de propagación de los modos guiados ^[15], facilitando el análisis de numerosas estructuras ópticas. El método se basa en hacer una aproximación rápida de una guía canal en una guía plana, este método se puede aplicar cuando la diferencia entre los índices del núcleo y del substrato es muy pequeña. El método, como se esquematiza en la figura 2.5, consiste en dividir verticalmente en tres zonas la sección transversal de una guía canal: la zona central y dos laterales. Supóngase que la composición de la zona de los laterales es idéntica. En la figura 2.5 se muestra la sección transversal de una guía en el plano (x,y) así como la proyección del perfil de índice de refracción sobre el eje y . El índice de

refracción proyectado en $y = y_0$, es el índice efectivo de la guía de onda cuyo perfil de índice de refracción es (x, y_0) . La proyección consiste en una zona central de ancho ω , con un índice efectivo N_f , y dos zonas laterales con índices N_l . El espesor h de la guía del bloque central es mayor que el ancho l de las guías laterales. Por lo tanto $N_f > N_l$ produciendo un confinamiento lateral de la luz en la zona central.

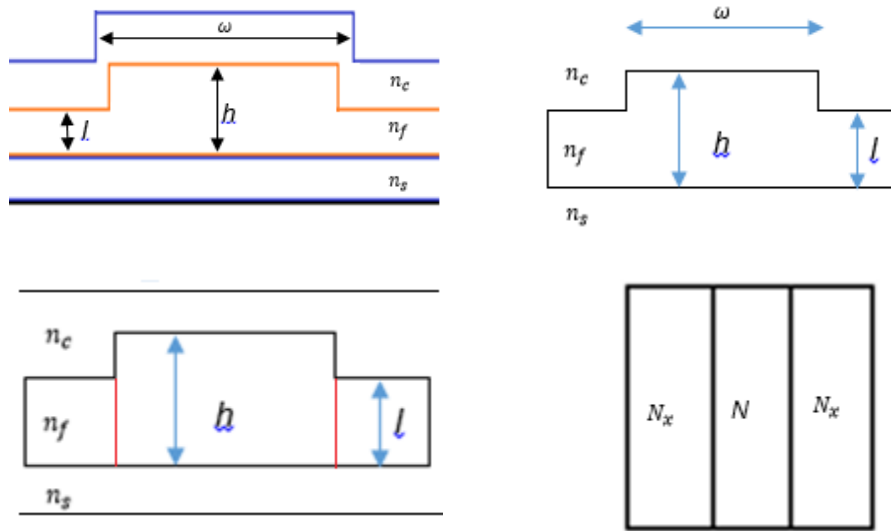


Figura 2.5 Ilustración del método del índice efectivo

El método del índice efectivo procede de la siguiente manera:

- 1 Calcular la asimetría de la guía para ondas TE con la siguiente expresión:

$$a = \frac{(n_s^2 - n_c^2)}{(n_f^2 - n_s^2)} \quad (2.5.1)$$

- 2 Calcular las frecuencias normalizadas V de la guía central.

$$V = kh \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (2.5.2)$$

donde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

3 Determinar los índices normalizados b_f de la guía con ayuda de la gráfica de la figura 2.6 acorde a su asimetría dada.

4 Obtener el índice efectivo de la primera estructura

$$N_x \approx n_s + b(n_f - n_s) \quad (2.5.3)$$

5 Trabajando ahora con el espesor ω y el nuevo índice calculado N_x , se calcula una frecuencia V' con la expresión (2.5.4), la luz se propaga como si fuese confinada por el índice N_x la asimetría ahora es $a = 0$.

$$V' = k\omega\sqrt{N_x^2 - n_s^2} \quad (2.5.4)$$

6 Nuevamente haciendo uso de la figura 2.6 se determina el índice normalizado.

7 Por último se calcula su índice efectivo

$$N \approx n_s + b(n_x - n_s) \quad (2.5.5)$$

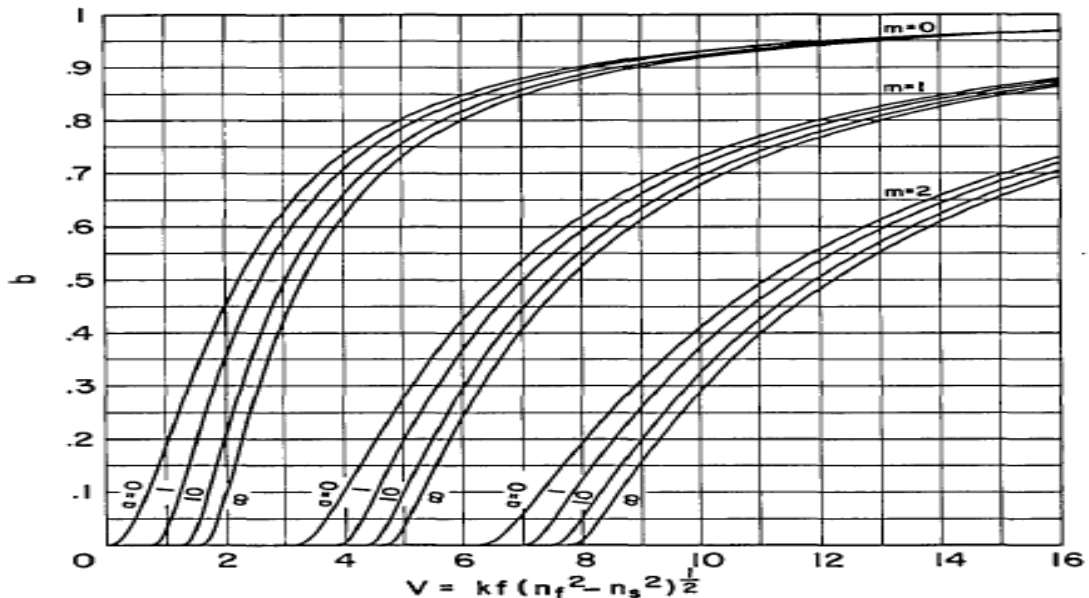


Figura 2.6 Diagrama del índice de la guía b como función de la frecuencia normalizada V para los tres primeros modos con diferentes asimetrías [16].

2.6 INTERCAMBIO IÓNICO

Para la óptica integrada el vidrio es un buen sustrato para la fabricación de dispositivos gracias a las propiedades que presenta como son: su bajo costo, resistencia, rigidez mecánica y su transparencia para las longitudes de onda en telecomunicaciones. Una de las características más relevantes, es que, debido a que su índice de refracción es similar al de las fibras ópticas, permite disminuir las pérdidas por acoplamiento entre ambas.

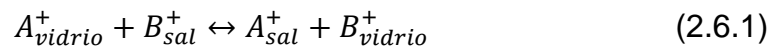
En un proceso de intercambio iónico, un ion del vidrio (usualmente sodio Na^+) es reemplazado por un ion de mayor tamaño o mayor polarizabilidad como plata Ag^+ , potasio K^+ , cesio Cs^+ , rubidio Rb^+ o talio Tl^+ . Consecuentemente, el índice de refracción se aumentará localmente dando origen así a la guía de onda. El proceso de fabricación de guías de onda en vidrio por el método de intercambio iónico es conveniente por varias razones, algunas de estas se mencionan a continuación:

- El proceso ofrece una considerable flexibilidad en los parámetros de fabricación y pueden ser optimizados para una amplia gama de aplicaciones.
- El proceso es simple y conveniente debido a la cantidad de muestras que se pueden intercambiar en cada lote, las guías de onda fabricadas tienen pocas pérdidas.
- Este tipo de guías no presentan problemas en el acoplamiento con guías de onda monomodo y multimodo.
- Las guías de onda de intercambios iónicos tienen una configuración plana. Esto facilita considerablemente el uso de otros materiales (por ejemplo) polímeros no lineales) para la fabricación de dispositivos híbridos de óptica integrada de muy alta calidad.

Las sales más comunes en el proceso de intercambio iónico son las sales de potasio (tabla 1) como por ejemplo en nuestro caso el nitrato de potasio (KNO_3) produce más esfuerzo de compresión en la superficie del vidrio cuando el ion de potasio substituye el ion de sodio de la matriz del vidrio.

El ion de potasio produce un cambio de índice de refracción de alrededor de 0.01. Un substrato de vidrio contiene iones A^+ que son sumergidos en un baño de sales fundidas que contiene iones B^+ , la interface vidrio-sales no está en equilibrio termodinámico en la distribución de iones A^+ y B^+ . Así la agitación térmica de la interface produce colisiones aleatorias en las cuales el ion B^+ reemplaza un ion A^+ de la matriz del vidrio, un gradiente de concentraciones establece la difusión generada de los iones B^+ hacia los iones A^+ en el vidrio.

En la figura 2.7 se muestra el esquema del proceso del intercambio iónico de sales [8]. Por ejemplo, el ion de Na^+ contenido en el vidrio es cedido por las sales y el ion de potasio dado por la sal derretida de KNO_3 es llevado dentro del vidrio, esto es:



Las temperaturas varían entre los 200°C y 500°C, procurando estar por debajo del punto de reblandecimiento del substrato de vidrio ya que se puede dañar la superficie a causa de la descomposición del nitrato. La naturaleza isotrópica del intercambio refleja que los perfiles de concentración de iones B^+ en los substratos tienen dimensiones laterales que exceden el ancho de los motivos grabados por dos veces la profundidad del intercambio.

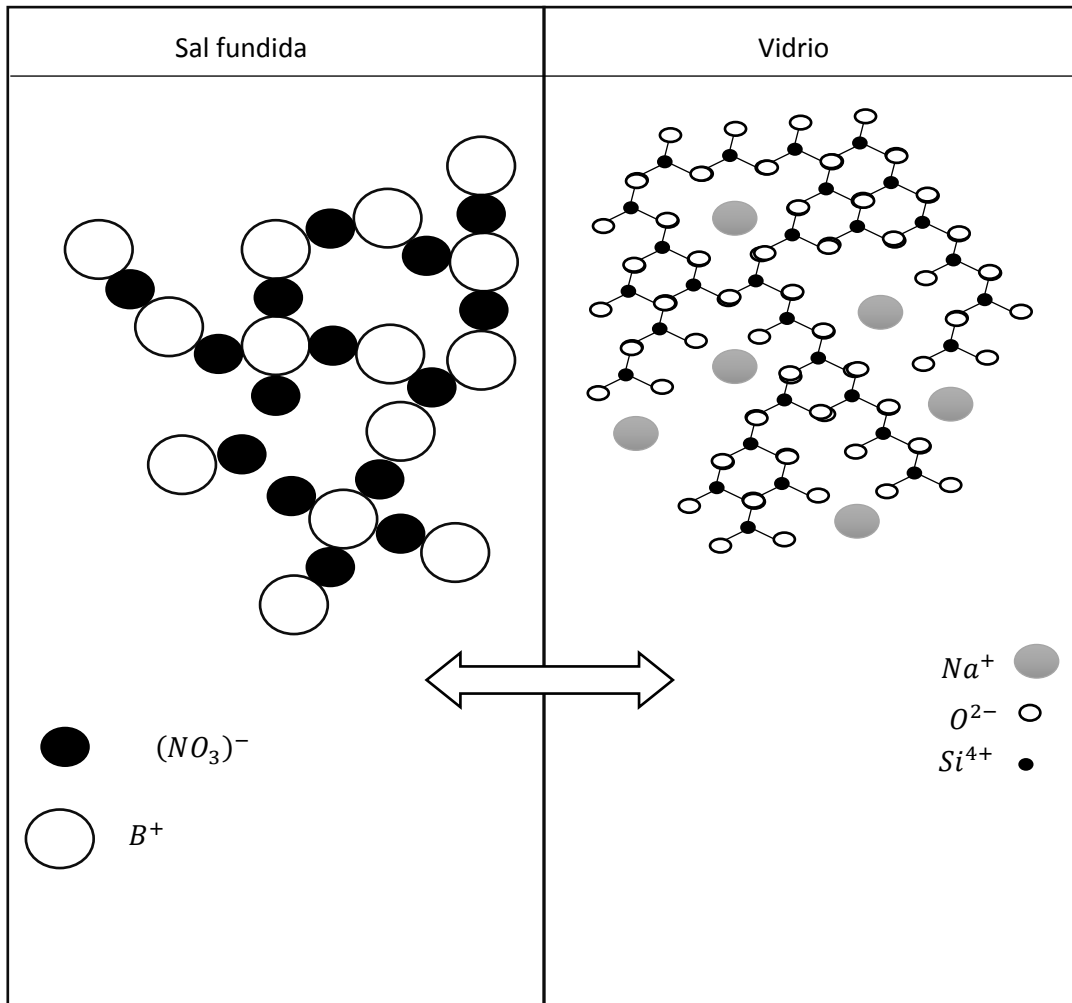


Figura 2.7 Diagrama del intercambio iónico entre sales fundidas y vidrio ($A^+ = Na^+$) [8].

ION	POLARIZABILIDAD ELECTRONICA \AA^3	RADIO IONICO \AA	SAL	PUNTO DE FUSION $^{\circ}\text{C}$	PUNTO DE DECOMPOSICION $^{\circ}\text{C}$	DOSIS LETAL LD50 mg/Kg -sal
Na^+	0.41	0.95	NaNO_3	307	380	1955 NaNO_3
Li^+	0.03	0.65	LiNO_3	264	600	710 LiCO_3
Ag^+	2.4	1.26	AgNO_3	212	444	2820 Ag_2O
K^+	1.33	1.33	KNO_3	334	400	1894 KNO_3
Rb^+	1.98	1.49	RbNO_3	310	-	1200 RbCl
Tl^+	5.2	1.49	TlNO_3	206	430	25 Tl_2SO_4
Cs^+	3.34	1.65	CsNO_3	414	-	1200 CsNO_3

Tabla 1 Parámetros relevantes de iones monovalentes para intercambio iónico en vidrio [8].

2.6.1 Guías de onda fabricadas por intercambio iónico

Las guías canal son delimitadas por un material de barrera que se deposita en el substrato previo a la inmersión en las sales fundidas. El material de barrera no debe ser susceptible al ataque por las sales usualmente empleadas en el intercambio iónico y debe ser impermeable al movimiento iónico. Varios materiales han sido usados, pero uno de los más convenientes es el aluminio evaporado, con al menos 100nm de espesor.

Algunas de las características que presenta el vidrio intercambiado con potasio son:

- El máximo índice de refracción de las capas intercambiadas es de entre 0.001 y 0.16 sobre el índice que tiene el substrato. Esto permite la fabricación de guías multimodo con apertura numérica grande y también guías monomodo con buena reproducibilidad y control.
- Los mejores resultados en cuanto a las pérdidas de propagación son obtenidas con guías de onda monomodo enterradas y sus pérdidas son menores a 0.1 dB/cm .
- El tamaño usualmente no está limitado. Milímetros en la profundidad de los intercambios han sido logrados (para propósitos diferentes al guiado de ondas). Sin embargo, para ciertas combinaciones de iones de vidrio es difícil o imposible intercambiar profundidades mayores a $10 \mu\text{m}$.

El intercambio de Na^+/K^+ es realizado en un baño de sales de nitrato de potasio KNO_3 utilizando un substrato de vidrio Menzel soda-lime con un índice de refracción de 1.5098, presentando un incremento de índice de refracción de $\Delta n \approx 0.01$ en la superficie. Este tipo de guías presentan un confinamiento débil y una birrefringencia del orden de 10^{-3} debido a la tensión producida por la diferencia del tamaño atómico de los iones ^[17].

CAPITULO 3

ASPECTO EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓN

En el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica se fabrican dispositivos de óptica integrada mediante la técnica de intercambio iónico de sales. Estos dispositivos basan su estructura en guías de onda canal fabricadas mediante el intercambio iónico de potasio (K^+) en sustratos de vidrio soda lime. El Instituto cuenta con un laboratorio para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos (cuarto limpio) en la que se hace uso del equipo necesario en la fabricación de las guías de onda: una alineadora de rayos Ultra Violeta (UV) donde se lleva a cabo el proceso de fotolitografía, una evaporadora, un perfilómetro, un horno y dos campanas de extracción.

Cabe mencionar que el trabajo en el cuarto limpio se hace en una campana de extracción utilizando guantes, bata y lentes de protección para evitar tanto la contaminación del dispositivo a fabricar como la inhalación y el contacto directo de la piel con los diferentes químicos utilizados. A los dispositivos de óptica integrada fabricados se les caracteriza ópticamente con una técnica conocida como caracterización de campo cercano. Esta técnica consiste en acoplar luz a la entrada del dispositivo y recolectarla a la salida con el fin de observar la distribución de los patrones de intensidades. Gracias a esta caracterización es posible localizar en el sustrato las guías de onda que se fabricaron correctamente, determinar si son monomodo o multimodo y en base a las dimensiones del patrón de irradiancia, es posible estimar las pérdidas de acoplamiento entre dos guías similares, con patrón de irradiancia elíptico, o entre una guía de este tipo y una fibra óptica [8]. En el caso de ciertos

dispositivos como interferómetros o conmutadores esta caracterización nos permite tratar la señal de salida a fin de determinar parámetros involucrados en su operación.

Para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto nos fijamos los objetivos siguientes:

1. Fabricar y caracterizar guías de onda canal vítreas de un ancho menor hasta el que ahora se han fabricado en el IICO, para ello será necesario optimizar cada uno de los procesos y parámetros involucrados.
2. Investigar e implementar algunas de las técnicas utilizadas en la fabricación de dispositivos de óptica guiada con el fin de incursionar en la fabricación de guías de onda orgánicas (poliméricas).
3. Caracterizar las guías de onda fabricadas y estimar algunos valores característicos.

3.2 FABRICACIÓN DE GUÍAS DE ONDA POR INTERCAMBIO IÓNICO

En el esquema de la figura 3.1 se detalla el proceso general de fabricación de guías de onda canal utilizando la técnica de fotolitografía y de intercambio iónico. Posteriormente, se describen cada una de las etapas involucradas.

3.2.1 Clivado y limpieza del sustrato

La limpieza del sustrato es un proceso constituido de varias etapas, en cada una de ellas se asegura la eliminación de cualquier impureza que pueda intervenir en la fabricación de la guía de onda.

- Clivado del sustrato: Un porta objetos (soda – lime) se cliva en tres partes iguales con un rayador para vidrio punta diamante, como se muestra en la figura 3.2, quedando la dimensión de cada uno de los sustratos de 2X2 cm. Durante el proceso de fotolitografía es muy importante identificar la parte frontal y la trasera del sustrato. Para ello, es necesario poner una marca en una esquina de cada uno de los sustratos con el mismo rayador con el que se clivaron. La superficie que tiene la marca pasa a ser la parte trasera de nuestro sustrato (parte que estará en contacto con las diferentes superficies involucradas durante todo el proceso de fabricación) y la parte frontal (no hay marca) es en donde se fabrican las guías de onda.

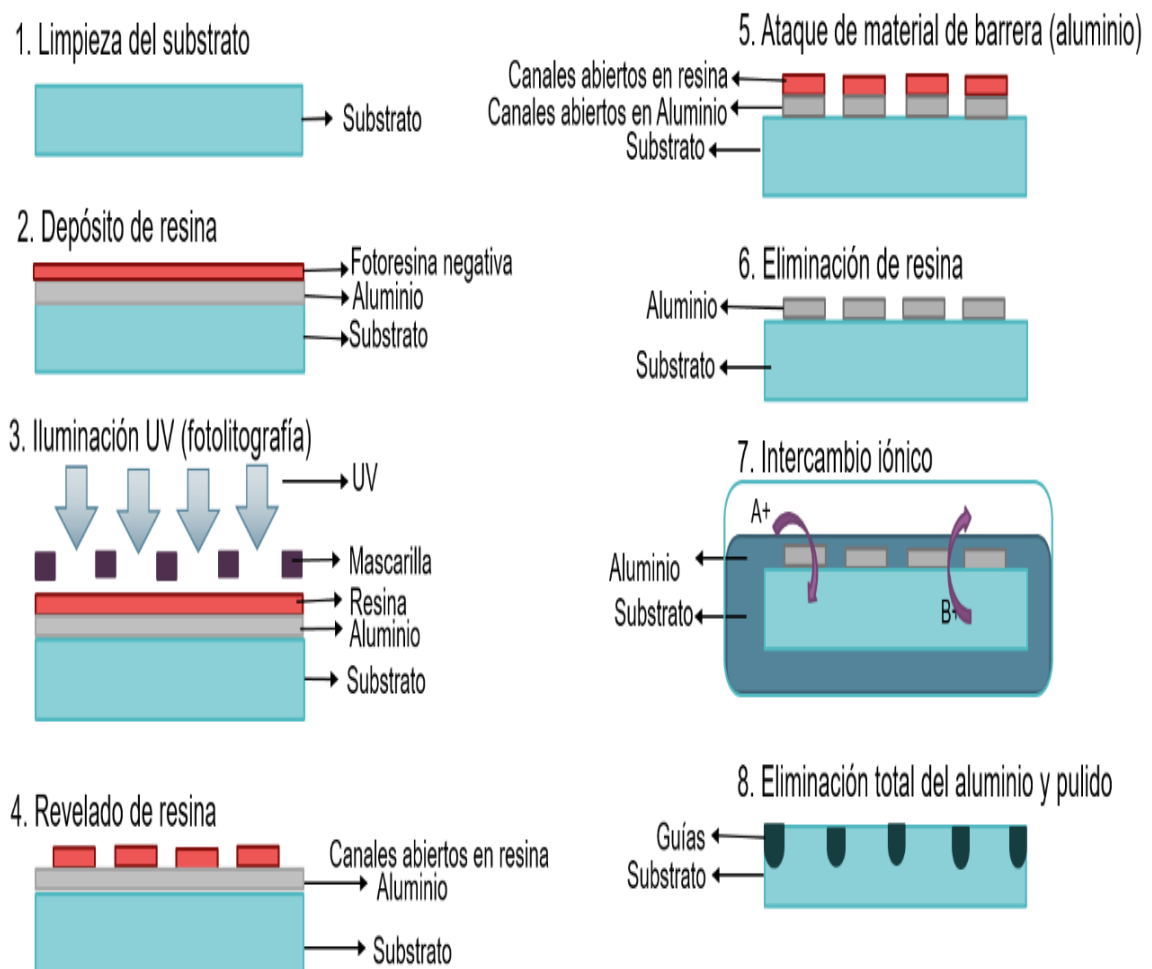


Figura 3.1 Esquema del proceso de fotolitografía e intercambio iónico.

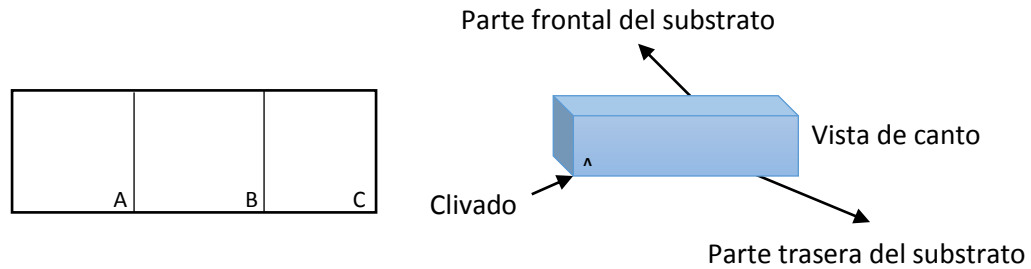


Figura 3.2 Clivado y marcado del sustrato

- Lavado, enjuagado y secado de los sustratos: Una vez cortados y marcados los sustratos; se colocan en un porta-sustratos para posteriormente sumergirlos en un vaso de precipitado con una solución de 100 ml de agua y 5 ml de jabón líquido. El vaso es colocado en una parrilla eléctrica (figura 3.3 (a)) hasta llevar al inicio de la ebullición. Cuando se alcanza el estado de ebullición de la solución se retira el vaso de la parrilla con las pinzas, se sustituye el agua jabonosa por agua limpia, se enjuagan los sustratos de manera individual con suficiente agua hasta eliminar totalmente cualquier residuo de jabón. Después, se secan con nitrógeno comprimido (figura 3.3 (b)) en dirección hacia la pinza con la que se sostienen y por último se guarda cada uno de los sustratos en sobres hechos con papel óptico para evitar que se contaminen.

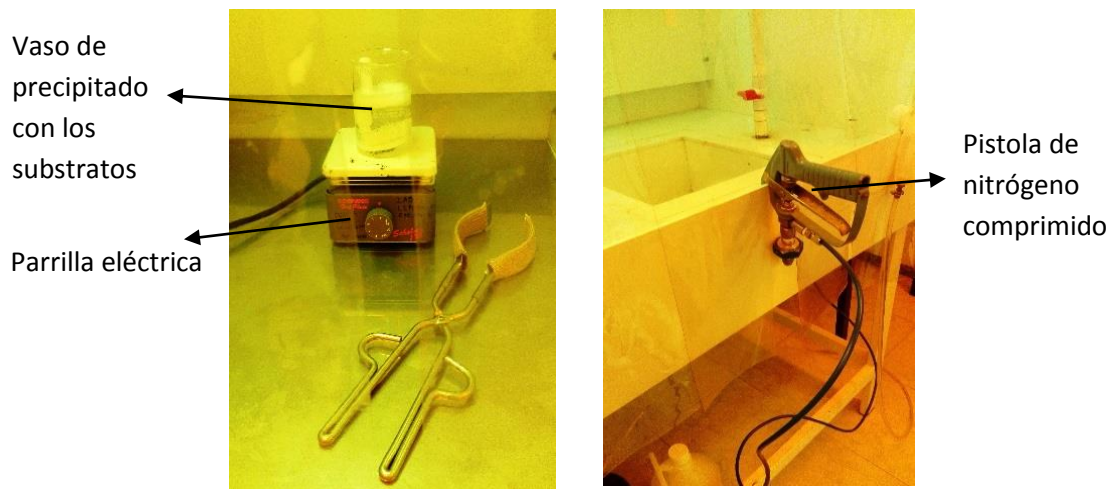


Figura 3.3 (a) Limpieza del sustrato, (b) Secado de los Substratos con nitrógeno comprimido.

3.2.2 Depósito del material de barrera

El aluminio ha sido el material de barrera más utilizado en la fabricación de guías de onda por intercambio iónico, debido a que es inerte al sustrato y no altera el proceso de ionización en el baño de sales. También posee buena adherencia al sustrato y se ataca químicamente con relativa facilidad sin que se vea afectado el sustrato [21]. Para el desarrollo de este trabajo, el depósito del aluminio se llevó a cabo en la evaporadora de metales VEECO V-300 (figura 3.4) que logra un vacío de 10^{-6} torr [22]



Figura 3.4 Evaporadora de metales VEECO V-300.

Con el fin de determinar la cantidad de aluminio que se necesita para obtener un espesor determinado depositado sobre el sustrato, en términos de la distancia H de una fuente puntual (figura 3.5), se hace uso de la siguiente expresión [23]:

$$l = \frac{mH}{4\pi\rho(H^2+L^2)^{3/2}} = \frac{m}{4\pi\rho H} \left\{ \frac{1}{\left[1+\left(\frac{L}{H}\right)^2\right]^{3/2}} \right\} \quad (3.1.1)$$

En donde

$$m = 4\pi\rho lH^2 \text{ para calcular la masa del aluminio a evaporar} \quad (3.1.2)$$

l es el espesor deseado

ρ la densidad del material de barrera, en este caso es el aluminio que es $\rho = 2.6989 \text{ g/cm}^3$

L es el radio de las muestras a evaporar y

H es la altura del alambre de tungsteno al centro de los substratos (en este caso a 4cm).

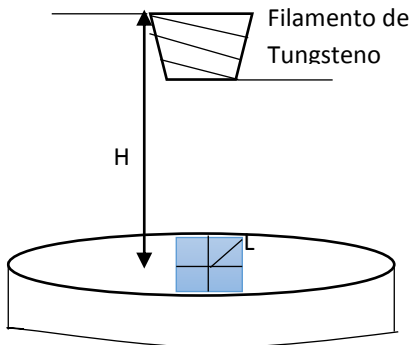


Figura 3.5 Módulo de evaporación [23]

Después de haber depositado el aluminio, se verifica el espesor depositado mediante el uso de un perfilómetro. En base a la experiencia, es recomendable depositar un espesor mayor a 300 nanómetros de aluminio para asegurar su resistencia al baño de sales del intercambio iónico.

3.2.3. Elección y depósito de la resina fotosensible

Se mencionó anteriormente que uno de los objetivos de este trabajo era el de fabricar guías de onda canal con el menor ancho posible considerando que en el IICO contamos con una mascarilla compuesta por 6 series de canales en las que el ancho de los canales impresos en cromo varían desde $200\mu m$ hasta $10\mu m$ con una separación entre ellos que va desde 100 hasta alrededor de $300\mu m$ [21].

Es por ello que en esta etapa del proceso contemplamos dos opciones: utilizar una resina positiva o una resina negativa tal y como se resume en el esquema de la figura 3.6. La resina positiva es aquella que se elimina después de ser insolada con luz UV y revelada. En cambio, la resina negativa se elimina después del revelado siempre y cuando no haya estado expuesta a los rayos UV. De esta forma, y de acuerdo con la figura 3.6, utilizando la misma mascarilla tenemos la posibilidad de abrir canales de diferente ancho en el material de barrera según la resina utilizada.

En el paso (1) del esquema de la figura 3.6 se muestra la mascarilla con la que cuenta el Instituto, cuando se utiliza fotoresina positiva (figura 3.6 (a)) la parte insolada con la luz ultravioleta (separación entre canales) se elimina al ser revelada (paso 3) quedando solo la resina no insolada (canales oscuros), lo que genera canales con un ancho muy grande grabados (abiertos) en el aluminio quedando expuesto el vidrio que al intercambiarse con los iones de potasio nos da como resultado guías de onda canal muy anchas tal y como se observa en el paso 4.

Por el contrario, en la figura 3.6 (b) se muestra lo que ocurre al emplear fotoresina negativa, la parte insolada con la luz UV (separación entre canales) es la que permanece sobre el sustrato desprendiéndose la parte que no fue expuesta a los rayos UV (canales oscuros), lo que al final genera canales más

angostos grabados en el aluminio que al llevar a cabo el intercambio iónico nos producen guías de onda canal más estrechas.

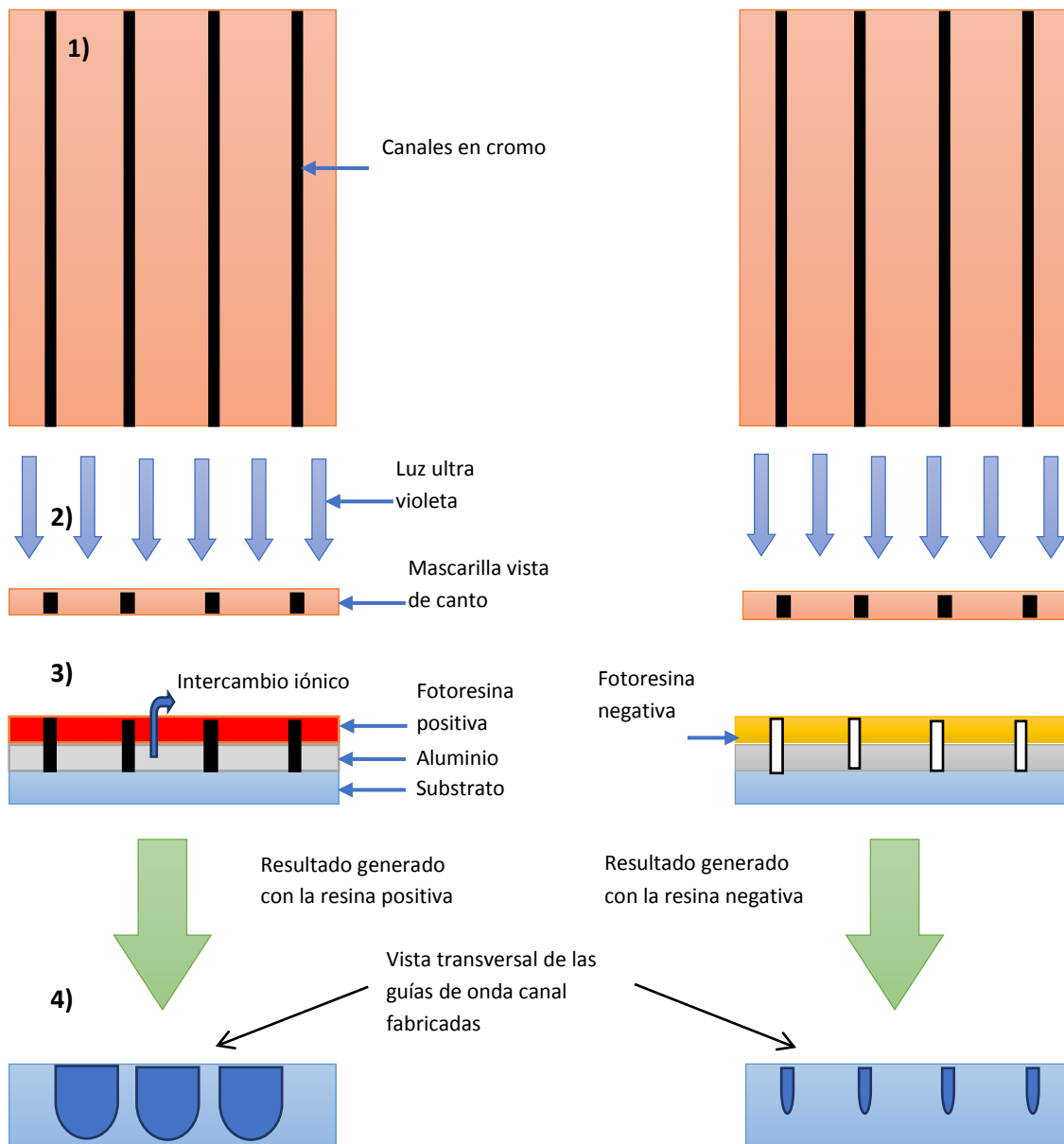


Figura 3.6 Esquema del proceso de fabricación de guías de onda canal empleando (a) fotoresina positiva y (b) fotoresina negativa.

- **Depósito de la resina negativa**

Posterior al depósito del material de barrera, se lleva a cabo el depósito de la fotoresina que forma parte de un Kit (Sigma-Aldrich Kit I) [24], que contiene además de la fotoresina un revelador y un disolvente. Esto nos permite disolver la resina dependiendo de los espesores depositados que estemos buscando. Este depósito se realiza en una sala blanca “clean room” con extractor de aire y las ventanas forradas de una mica amarilla para evitar que la luz UV ambiental afecte nuestros resultados, los pasos a seguir son los siguientes:

El depósito de la fotoresina sobre el sustrato se lleva a cabo mediante la técnica de spin-coating, la cual consiste en un centrifugado con el spin-coater Chemat Technology. En la platina del spinner se coloca el sustrato en el centro de la base para poder succionarlo con vacío para que no se mueva al hacer girar la base. En la figura 3.7 (a) se muestra una imagen del Spin-Coater con el que se depositan entre tres y cuatro gotas de fotoresina negativa en el centro del sustrato para tener una película uniforme. El “spinner” se programa a las rpm y tiempo de rotación deseados. Antes de posicionar la muestra en la platina es necesario cerciorarse de que se está colocando el sustrato con el aluminio hacia arriba que es donde se va a hacer el depósito. Inmediatamente después del depósito se hace un pre-horneado a 82°C por 20 minutos, este intervalo de tiempo no debe ser excedido para que la fotoresina no se endurezca (figura 3.7 (b)).



Figura 3.7 (a) Spin-Coater para el depósito de la fotoresina (b) horno eléctrico Jouan.

- **Depósito de la resina positiva**

La fotoresina positiva utilizada es la Shipley 1818 [25], es menos viscosa en comparación con la negativa por lo cual no es necesario diluirla y el tiempo y temperatura de horneado son diferentes. Al igual que con la resina negativa, en el spin-coater se depositan aproximadamente 3 gotas para que se cubra toda la superficie del substrato, se hornea por 30 minutos a una temperatura de 90°C y en este caso no es necesario realizar un segundo horneado después del revelado.

3.2.4 Insolación y revelado de la resina fotosensible

- **Resina negativa**

Una vez que las muestras se han enfriado, después del pre-horneado, se procede a la insolación de la fotoresina durante el tiempo suficiente para que la luz penetre todo el espesor depositado. Este proceso se lleva a cabo en la alineadora UV OAI serie 200 (figura 3.8), la cual emite en un rango de longitud de onda (λ) de 260 nm a 325 nm [26]. Dado que la

fotoresina es negativa quedarán grabados los motivos oscuros como se muestra en la figura 3.6 (b).



Figura 3.8 Alineadora UV OAI serie 200.

Al término de la insolación se hace el revelado de la resina por los segundos necesarios con el revelador que incluye el kit. Después, se enjuaga con alcohol isopropílico para eliminar el químico y se seca la muestra con nitrógeno comprimido. Posteriormente, se hace un recocido por 10 minutos a 120°C para adherir la resina después del revelado (es importante hacer éste nuevo horneado ya que la resina queda blanda después del revelado y se desprende fácilmente) este horneado no debe de exceder los 148°C.

- **Resina positiva**

En el caso de la resina positiva solamente es necesario determinar el tiempo de insolación suficiente para asegurar la total penetración de la luz UV en el espesor de resina depositado. El tiempo de revelado es de 5 a 10 segundos dependiendo de la inspección al microscopio de la muestra para finalmente enjuagar con agua.

3.2.5. Ataque del material de barrera

Para grabar los canales en el aluminio la muestra se ataca químicamente sumergiéndola en ácido ortofosfórico (H_3PO_4) a 40°C, calentado a baño maría tal y como se muestra en la figura 3.9. Después de aproximadamente medio minuto el aluminio comienza a desprenderse en las zonas donde no hay fotoresina. El tiempo que tarde el ataque depende del espesor depositado. Se recomienda que después de un minuto de ataque, se enjuague la muestra y se inspeccione al microscopio, en caso de ser necesario repetir esto una y otra vez hasta que se observen los canales abiertos en el aluminio y de esta forma quede expuesto el substrato y poder realizar el intercambio iónico.

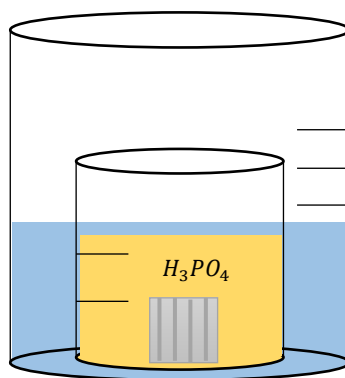


Figura 3.9 Ataque químico con ácido ortofosfórico.

Al terminar de abrir los canales en aluminio se elimina por completo la resina negativa restante con el remover incluido en el kit para después proceder con el intercambio iónico. En el caso de la resina positiva la resina restante se elimina con un baño de acetona.

3.2.6 Intercambio iónico

Después de los procedimientos mencionados anteriormente, las muestras se encuentran listas para el proceso del intercambio iónico, para ello se emplea el horno que se muestra en la figura 3.10.



Figura 3.10 Horno para intercambio iónico.

El horno consta de un control de programable para que se mantenga a la temperatura deseada. En nuestro caso, se fija a una temperatura de 380°C que es el valor ideal para los intercambios entre vidrios con alto contenido en sodio y las sales de nitrato de potasio (KNO_3) las cuales comienzan a fundirse a los 110°C, pero se debe esperar a que el sistema alcance la temperatura de 380°C que es la temperatura a la que los iones de sodio tienen mayor movilidad y se desprenden de la matriz vítrea.

El horno consta de un sistema de extracción y un motor que nos permite bajar y subir el porta muestras para introducirlas lentamente en el vaso con la sal fundida y comenzar así el intercambio iónico. El tiempo de intercambio varía dependiendo del tipo de sal y de substrato pero en nuestro caso es suficiente con siete horas y media para completar el proceso ^[27].

Una vez terminado el intercambio, se apaga el horno y se comienza a subir lentamente el porta-muestras, cuando se saca completamente del vaso que contiene la sal fundida se dejan ahí hasta que los substratos alcancen la

temperatura ambiente para poder sacarlas del horno y así prevenir cualquier choque térmico que les pudiera romper o provocar fisuras.

3.2.7 Pulido de las guías de onda

Después del intercambio iónico las muestras se enjuagan para eliminar el remanente de sal solidificada y dar paso al pulido de los dos extremos de las guías. El tener ambos extremos pulidos nos permitirá acoplar luz a las guías y caracterizarlas. Es recomendable llevar a cabo el proceso de pulido cuando todavía se tiene el material de barrera sobre el substrato, esto con el fin de visualizar las guías ya que el vidrio intercambiado, a simple vista, no presenta color alguno y si se elimina el aluminio antes de pulir no tendremos ninguna referencia que nos indique los extremos de las guías.

En esta etapa se utilizan abrasivos de diferente tamaño de grano y una pulidora de plato en húmedo. Sobre el revés del substrato y a lo largo de los dos extremos de las guías (ver esquema de la figura 3.11) se hace una cuña con una hoja abrasiva de número 240 cuidando de no tocar la superficie en donde se encuentran las guías. El objetivo de esta cuña es que al pulir la muestra en vertical, la superficie a pulir sea menor tomando así menos tiempo y evitando que los discos abrasivos se desgasten rápidamente. Para pulir los extremos se utilizan abrasivos de hoja diamantada Newport de diferente tamaño de grano comenzando por la hoja con un tamaño de grano de $63\mu m$ (color gris), continuando con la de $9\mu m$ (color azul), después con la de $1\mu m$ (color violeta) y por último la de $0.3\mu m$ (color blanco).

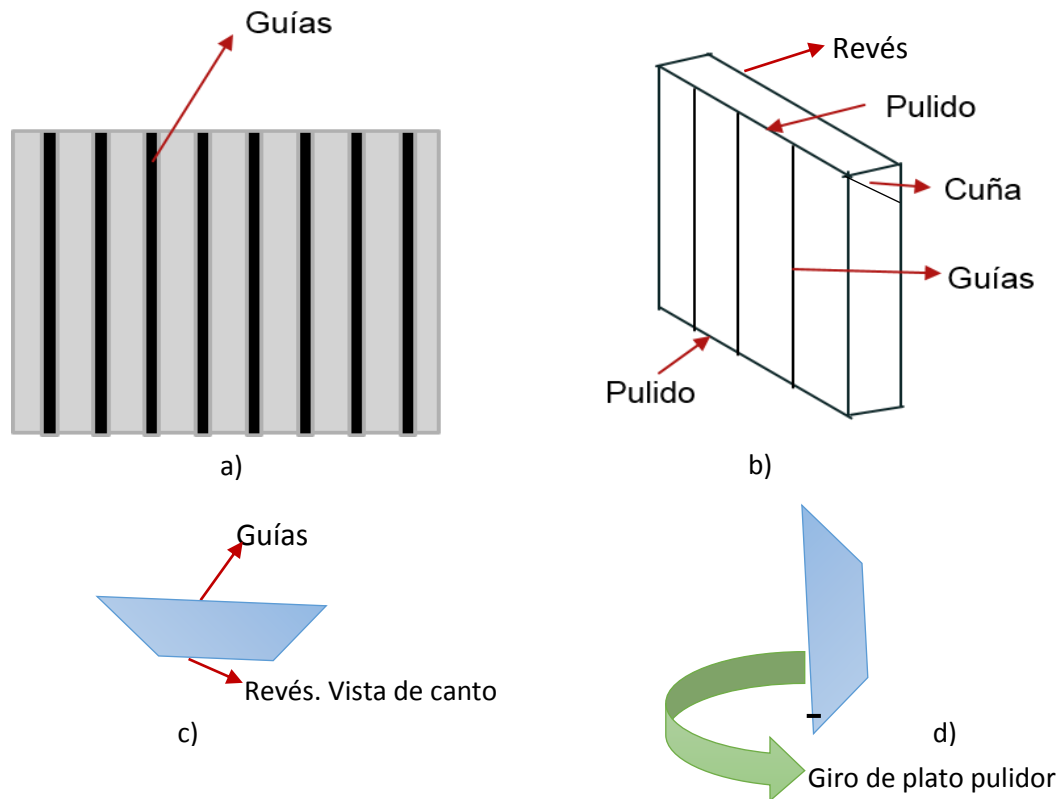


Figura 3.11 Esquema para el pulido de las muestras. a) Vista vertical de la muestra, b) se muestra la cuña, c) vista de canto de la muestra con las cuñas y d) vista de canto vertical de la muestra sobre el giro de plato

La duración del pulido con cada uno de los abrasivos dependerá de la inspección al microscopio. Esta inspección se hace con la ayuda de una retícula y se busca que las fracturas o defectos del extremo que se esté puliendo no sobrepasen el tamaño del grano a utilizar. Cada vez que se termine de usar una hoja abrasiva es necesario enjuagar la muestra para evitar que los residuos dañen el pulido obtenido. Al terminar el pulido, se elimina por completo el material de barrera. Como anteriormente se mencionó, esto se hace atacando el aluminio con el ácido ortofosfórico a 40°C en baño maría, dando el tiempo suficiente para remover por completo el aluminio.

Finalmente, se enjuaga la muestra con abundante agua y a partir de este momento es necesario tener sumo cuidado al manipular las guías para evitar dañar los extremos. En la imagen de la figura 3.12 se puede observar una de

las muestras una vez concluido el pulido de los extremos. Las guías se encuentran en la superficie inferior y podemos apreciar la cuña del sustrato.

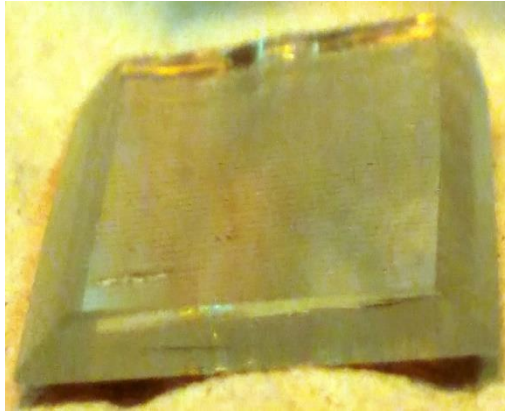


Figura 3.12 Muestra después del pulido de los extremos.

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS GUÍAS DE ONDA

3.3.1 Montaje del banco óptico de campo cercano en el visible (VIS).

Para la caracterización de campo cercano de los dispositivos fabricados se implementó el banco óptico que se muestra en el esquema de la figura 3.13. Este montaje está constituido de un láser de Helio-Neón con una longitud de onda de $\lambda = 633nm$, un objetivo microscópico de 20X que se utiliza para focalizar la luz del láser a la entrada de uno de los extremos de las guías. A la salida de las mismas la luz se recolecta con otro objetivo de microscopio idéntico al de acoplamiento y que nos permite focalizar el patrón de intensidad a la salida de la guía sobre una cámara CCD Sony XC-75 que va conectada a un monitor. En la figura 3.14 podemos observar una imagen del banco óptico implementado. Cabe mencionar que tanto los objetivos de microscopio como el portamuestras tienen libertad de movimiento micrométrica en X, Y, Z. Gracias al porta-muestras que tiene movimiento en la dirección transversal al haz de luz (X) podemos acoplar la señal a todas las guías que se encuentran en el sustrato conforme lo desplazamos.

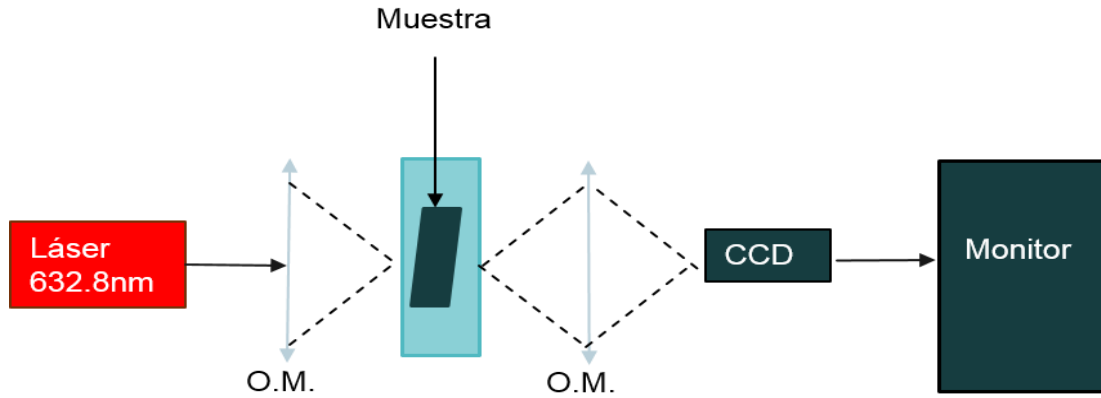


Figura 3.13 Esquema del banco óptico de campo cercano

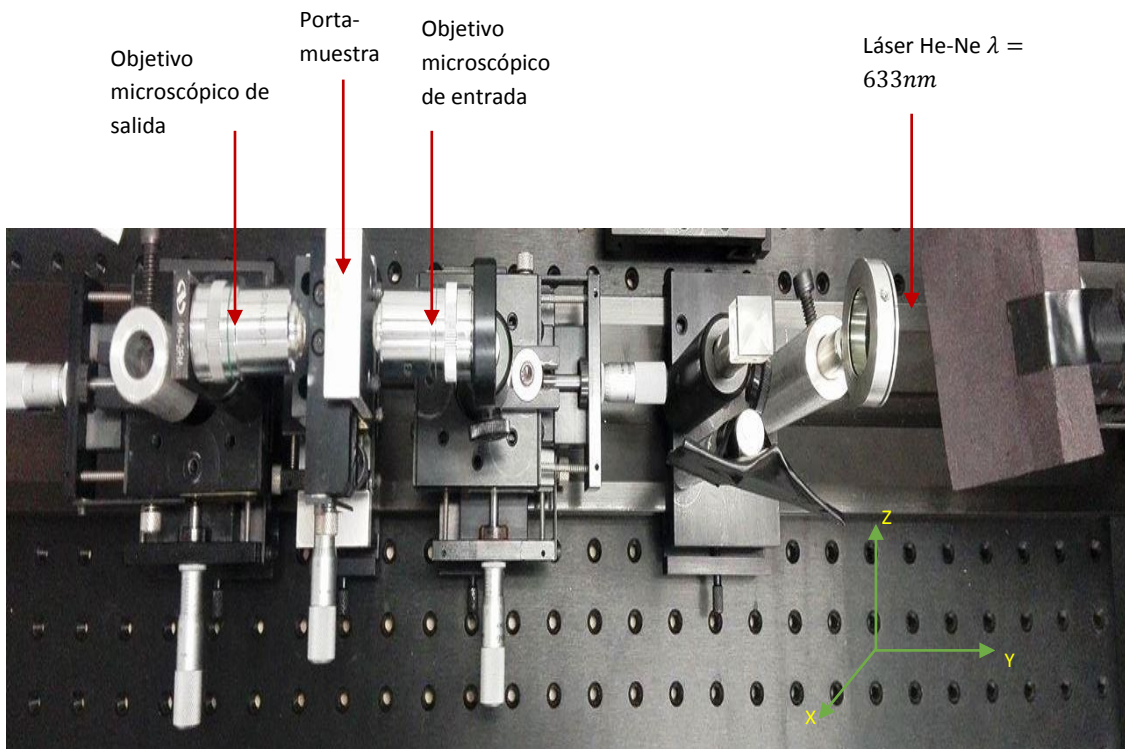


Figura 3.14 Montaje experimental del banco óptico de campo cercano.a)

3.4. FABRICACIÓN DE GUIAS DE ONDA CANAL ORGÁNICAS

3.4.1 Aplicación de la técnica de lift-off

La fabricación de guías de onda orgánicas mediante el método de fotolitografía se puede llevar a cabo utilizando los polímeros en forma de solución para depositarlos con la técnica de spin-coating. Para ello, es necesario una estructura como la que se muestra en la figura (3.15) en la cual se abren canales para que sean “rellenados” por el polímero en cuestión.

El requisito principal es que esta estructura debe fabricarse de un material que no reaccione al disolvente del polímero tal y como sucede con la resina fotosensible positiva que reacciona a los disolventes más comunes (acetona, tricloroetano, cloroformo, tolueno, etc...).

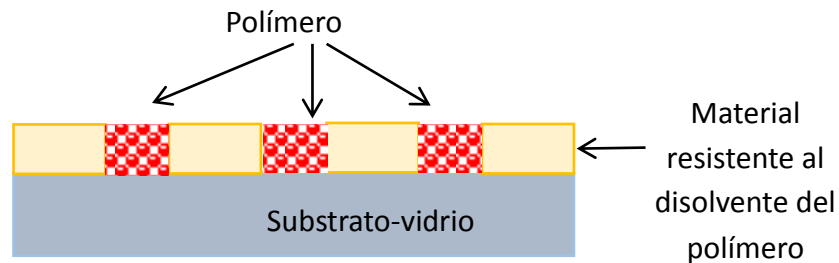


Figura 3.15 Estructura base para la fabricación de guías de onda poliméricas

En este trabajo utilizamos tres materiales para formar esta estructura: aluminio, fotoresina negativa y spin on glass. La técnica utilizada es la llamada Lift - OFF que se esquematiza en la figura (3.16).

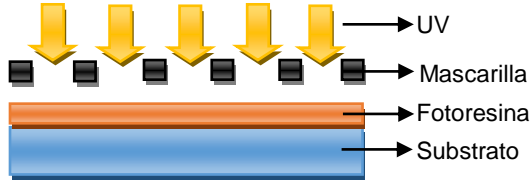
1. Limpieza del sustrato



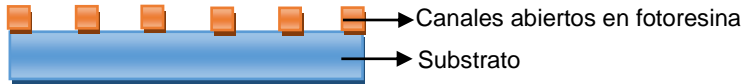
2. Depósito de fotoresina



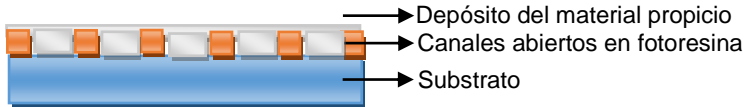
3. Iluminación UV (fotolitografía)



4. Revelado de fotoresina



5. Depósito del material propicio



6. Eliminación de fotoresina



Figura 3.16 Esquema de la técnica de lift - off.

Esta técnica consiste en abrir canales en la resina fotosensible (pasos 3 y 4) para después depositar el “material propicio” que no sea miscible al disolvente del polímero. Este material rellena los canales abiertos previamente en la resina (paso 5). Finalmente, se sumerge la muestra en el revelador para eliminar la resina quedando así canales abiertos delimitados por el material propicio (paso 6). Estos canales son los que se “llenarán” por el polímero a utilizar, formando así las guías de onda canal orgánicas.

En principio, la caracterización de este tipo de guías se llevaría a cabo en el mismo banco óptico de campo cercano esquematizado en la figura 3.13.

3.4.2 Guías de onda canal poliméricas (resina fotosensible).

Otra forma de fabricar las guías orgánicas es abrir canales en una fotoresina mediante el proceso de fotolitografía, la resina remanente forma también guías de onda canal poliméricas con las características que se muestran en la figura 3.16 (paso 4).

CAPITULO 4

RESULTADOS y ANÁLISIS

En el desarrollo de este trabajo se emplearon dos métodos para la fabricación de guías canal de acuerdo a como se esquematizó en la figura 3.6 del capítulo anterior.

En éste capítulo se muestran los resultados experimentales obtenidos y el análisis referente a los diferentes procesos involucrados y la caracterización de las guías de onda. Se presentan también los resultados del cálculo de los índices efectivos de las estructuras fabricadas que fueron estimados mediante el método del índice efectivo descrito en el capítulo 2.

En lo que concierne a la fabricación de las guías de onda orgánicas, presentamos los resultados obtenidos al fabricar guías con fotoresina y enlistamos una serie de técnicas que se implementaron pero las cuales no se alcanzaron a depurar debido a la premura del tiempo.

4.1 FABRICACIÓN DE LAS GUÍAS DE ONDA VÍTREAS

4.1.1 Deposición del material de barrera

Para este trabajo se empleó como material de barrera el aluminio y haciendo uso de la ecuación 3.1.2 calculamos la masa aproximada requerida para lograr un espesor (e) tal que $0.7\mu m \leq e \leq 1\mu m$, de acuerdo a esto, la cantidad de aluminio colocada en la evaporadora fue de $\approx 38mg$. Se midió el espesor de aluminio depositado en un perfilómetro, para ello se hicieron algunas marcas sobre el aluminio hasta llegar al sustrato sin dañarlo. En la figura 4.2 se

muestra una gráfica de las mediciones la cual nos muestra que el espesor promedio es de $0.7\mu m \pm 0.05$.

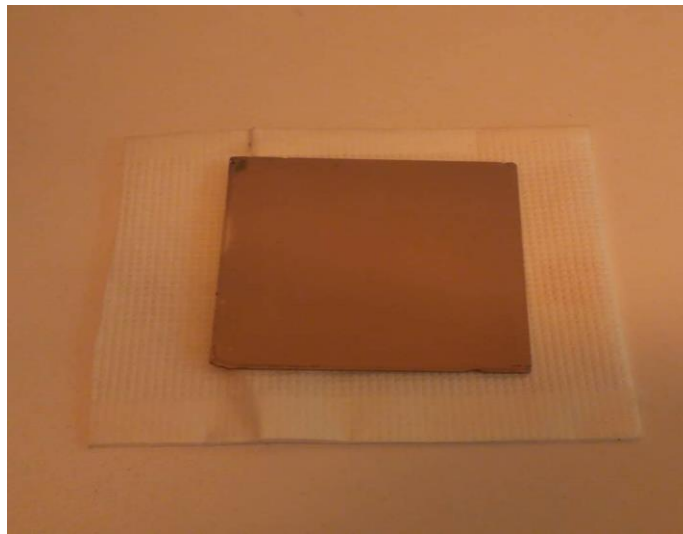


Figura 4.1 Substrato con el depósito del material de barrera.

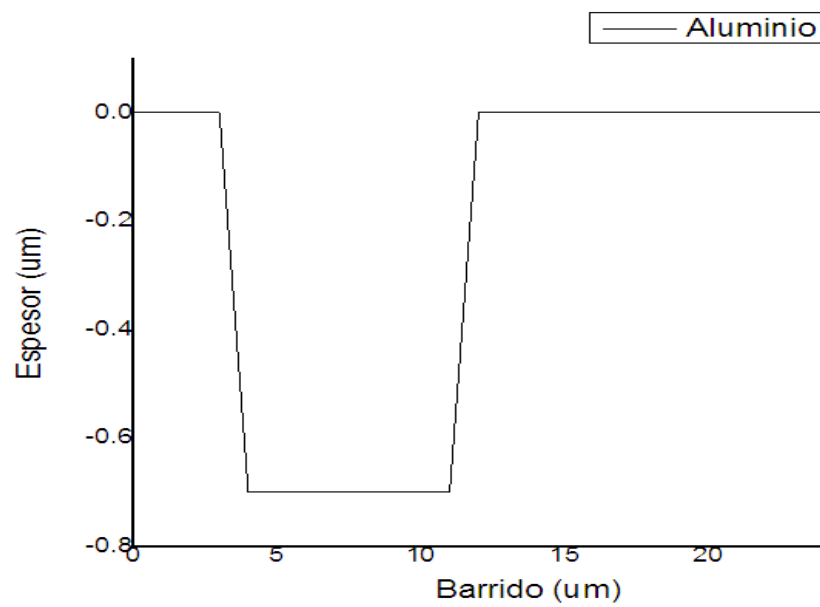


Figura 4.2 Espesor del material de barrera.

4.1.2 Depósito, exposición y revelado de las resinas fotosensibles

En esta sección solamente listamos los parámetros de depósito ya optimizados para ambas resinas, positiva y negativa. Ya que previamente se hicieron múltiples pruebas tanto en el espesor de las fotoresinas como en los tiempos de insolación adecuado para cada uno de los espesores. Cabe mencionar que para todas las deposiciones listadas en la tabla 1, el tiempo de deposición fue de 10 segundos.

- **Fotoresina positiva**

Spinner (rpm)	Tiempo de insolación (seg)	Tiempo de revelado (seg)	Espesor obtenido (μm)
1000	160	5	2
3000	100	5	1.3
6000	80	5	0.9

Tabla 1 Parámetros de la fotoresina positiva a diferentes revoluciones por minuto.

- **Fotoresina negativa**

Se prosiguió con la fotoresina negativa de la cual se diluyeron 8 ml en 4 ml del disolvente incluido en el mismo Kit buscando obtener una densidad aproximada al de la resina positiva y al hacer el depósito nos basamos en los resultados listados en la tabla 1. El spinner se programó a 6000 rpm durante 10 segundos y se agregaron aproximadamente tres gotas de fotoresina negativa para que cubriera toda la superficie. Después que se depositó y se pre-horneó la fotoresina se procedió a medir en el perfilómetro. Las medidas arrojaron que el espesor total, es decir, aluminio más fotoresina es de $1\mu\text{m} \pm 0.05$, tal y como se puede observar en la figura 4.3, por lo que el espesor de la fotoresina negativa es de aproximadamente $0.3\mu\text{m}$.

Después de varias pruebas se encontraron los parámetros óptimos para la insolación de la fotoresina negativa: son 80 segundos de insolación y 18 segundos de revelado para grabar y abrir completamente los canales en la fotoresina con dicho espesor. Lo más importante es abrir los canales hasta llegar al material de barrera para después poder atacar dicho material con ácido ortofosfórico y así abrir los canales en aluminio para dejar expuesto el substrato como se muestra en la figura 4.4. Si la abertura de los canales no llega al substrato entonces no será posible realizar el intercambio iónico con éxito.

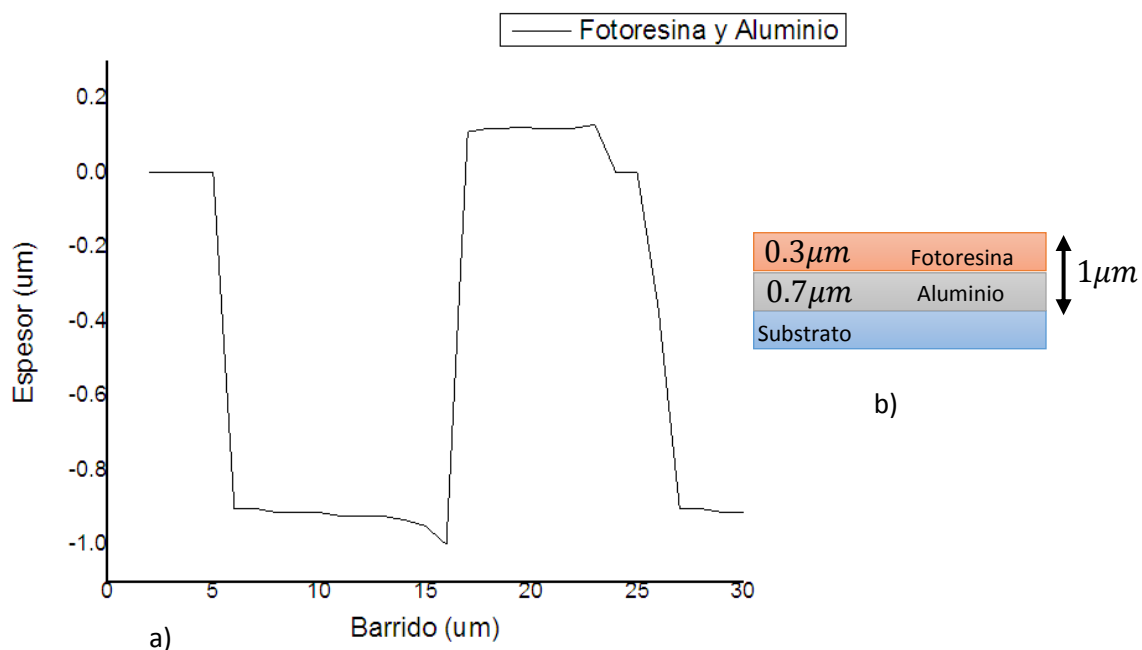


Figura 4.3 a) Espesor total de los depósitos de material de barrera y de la fotoresina negativa con un aproximado de $1\mu m$, b) esquema de la muestra con los espesores.

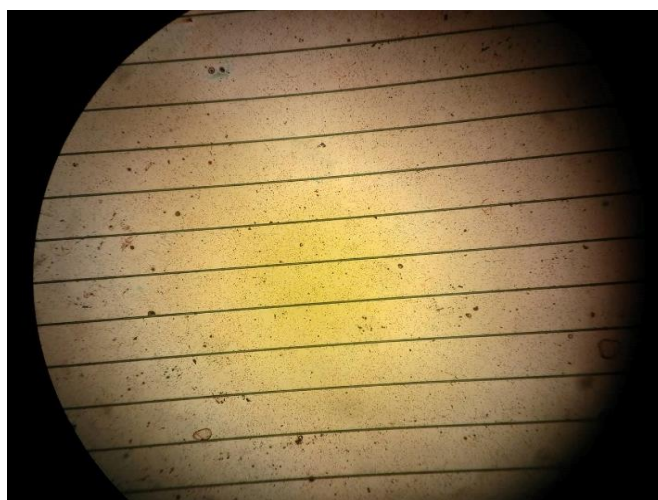


Figura 4.4 Muestra con canales abiertos en fotoresina llegando al material de barrera.

4.1.3 Abertura de los canales en el material de barrera

Como mencionamos en la sección anterior, para poder llevar a cabo el proceso del intercambio iónico es necesario abrir los canales en el aluminio. Después del revelado, la muestra se sumerge en el ácido ortofosfórico, cuando se observa un burbujeo es señal de que el aluminio comienza a desprenderse del sustrato (figura 4.5). Es necesario estar verificando en un microscopio óptico que los canales se abran por completo tal y como se puede observar en la imagen de la figura 4.6.

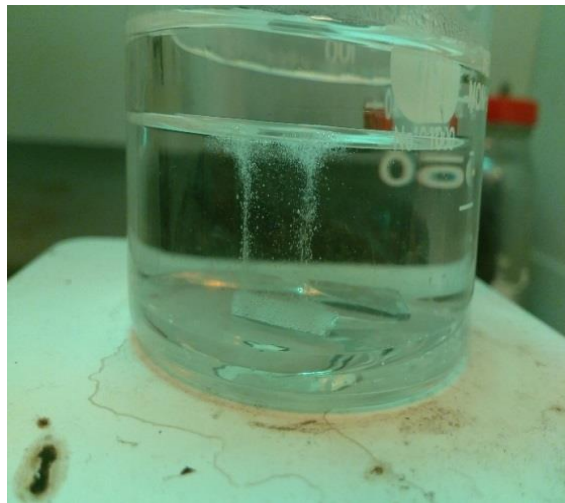


Figura 4.5 Muestras sumergidas en ácido ortofosfórico.



Figura 4.6 Canales totalmente abiertos en aluminio después del ataque químico.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS GUIAS DE ONDA FABRICADAS

4.2.1 Visualización de las guías en superficie

Después de que se elimina el material de barrera la única forma de saber sobre que superficie se encuentran las guías es guiándonos por la cuña que se le hace al substrato durante el pulido. Vistas al microscopio el material que forma las guías sigue siendo vidrio solamente con una pequeña alteración en su índice de refracción ($\Delta n = 0.01$) por lo que no podemos percibir ningún cambio de coloración.

En nuestro caso, al estar inspeccionando la superficie de las guías para verificar que no quedaran residuos de aluminio, se lograron observar y capturar con una cámara los canales confinados (ver figura 4.7). Esto fue posible manipulando la dirección de incidencia de la luz del microscopio en el que se observaron.



Figura 4.7 Imagen de los Canales en un microscopio óptico después de eliminar por completo el material de barrera.

4.2.2 Caracterización de campo cercano

La caracterización de campo cercano nos permite observar los patrones de irradiancia a la salida de las guías canal fabricadas y de esta forma saber si las guías son monomodo o multimodo a la longitud de onda de caracterización $\lambda = 632.8nm$. El banco óptico implementado es el que se esquematizó en la figura 3.13 del capítulo anterior. La luz a la salida de las guías se proyecta en una pantalla y se observa lo que tenemos en la figura 4.8.

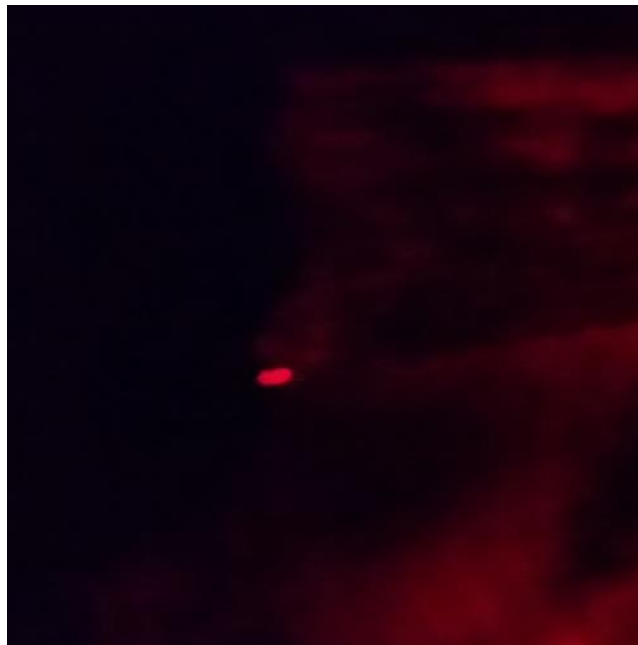


Figura 4.8 Proyección en una pantalla del patrón de irradiancia a la salida de una guía canal confinada por intercambio iónico de Na^+ / K^+ .

Después, se quita la pantalla y en su lugar se coloca una cámara CCD conectada a un monitor que nos permite ver con claridad el patrón de irradiancia tal y como se muestra en la figura 4.9. Podemos observar que el patrón de irradiancia claramente no corresponde al patrón de una guía monomodo (haz transversal semi-gaussiano). Podemos afirmar que las guías fabricadas son multimodo para la longitud de caracterización de onda $\lambda = 632.8nm$.



Figura 4.9 Patrón de irradiancia a la salida de la guía fabricada. Longitud de onda $\lambda = 632.8nm$ con un ancho canal de $\pm 17\mu m$.

Las guías canal anteriormente fabricadas en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica correspondían a canales de un ancho $\approx 30\mu m$ y en la caracterización de campo cercano mostraban un mayor número de lóbulos (ver figura 4.10) para una longitud de onda $\lambda = 632.8nm$, cabe mencionar que la escala entre ambas figuras (4.9 y 4.10) no es la misma.

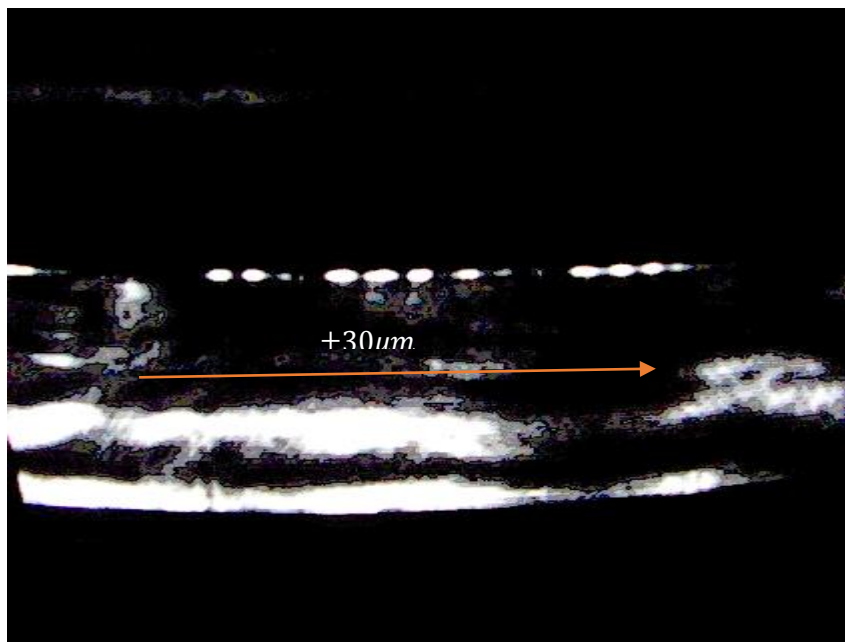


Figura 4.10 Patrón de irradiancia a la salida de una guía canal con un ancho de $\pm 30\mu m$, $\lambda = 632.8nm$ ^[9]

Cabe mencionar que en un solo sustrato se tienen del orden de 50 guías de onda canal, en el momento de caracterizarlas algunas de ellas no guían luz debido a posibles defectos de fabricación. Las guías que si funcionan presentan en su mayoría el mismo patrón de irradiancia a la salida como el que se muestra en la figura 4.9.

4.3 Cálculo del índice efectivo

Como se había mencionado en el capítulo 2 el método del índice efectivo nos ayuda a estimar los índices efectivos de los modos guiados por una guía de onda canal. El método se basa en hacer una aproximación rápida de una guía canal en una guía plana, este método se puede aplicar cuando la diferencia entre los índices del núcleo y del sustrato es muy pequeña. En la figura 4.11 se muestra un esquema transversal de las guías fabricadas con los parámetros obtenidos experimentalmente.

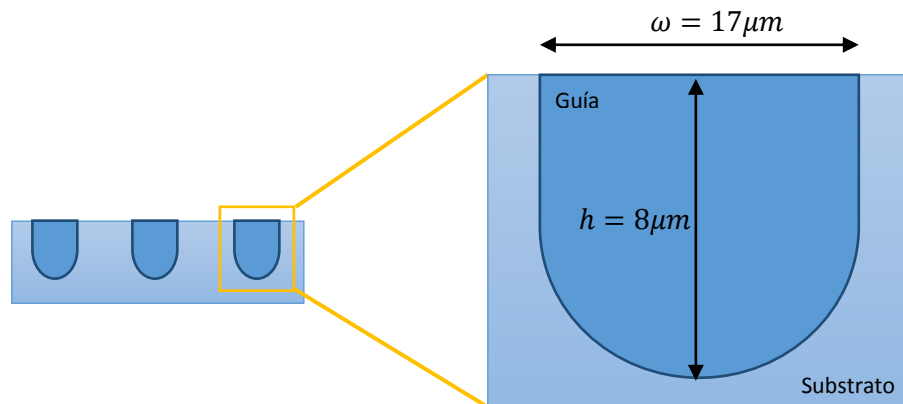


Figura 4.11 Esquema de una guía confinada en un sustrato con los datos obtenidos experimentalmente.

Sabemos que el ancho de nuestras guías es de $17\mu m$ y en la literatura encontramos que la profundidad característica de difusión del potasio (K^+) en un sustrato de vidrio es de aproximadamente $8\mu m$ ^[28].

A continuación se enlistan los parámetros utilizados en el cálculo:

- Índice de refracción en el substrato $n_s = 1.5098$
- Cambio del índice de refracción después del intercambio iónico $\Delta n = 0.01$
- Índice de refracción de la guía $n_f = 1.5198$
- Índice del aire $n_c = 1$.
- Se utilizó un láser de Helio – Neón el cual tiene una longitud de onda de $\lambda = 632.8nm$.

Siguiendo los pasos del método para el cálculo de los índices efectivos de la sección 2.5 del capítulo 2, se tiene que:

1. Calculamos la asimetría:

$$a = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} = \frac{(1.5098)^2 - 1}{(1.5198)^2 - (1.5098)^2}$$

Por lo tanto la guía tiene una asimetría de:

$$\underline{a = 42.23}$$

2. Ahora calculamos la frecuencia normalizada que es la misma para los diferentes modos guiados:

$$V = kh \sqrt{n_f^2 - n_s^2} = \frac{2\pi}{632.8 \times 10^{-9}} (8 \times 10^{-6}) \sqrt{(1.5198)^2 - (1.5098)^2}$$

$$\underline{V = 13.82 \approx 14}$$

3. Con ayuda de la gráfica de la figura 2.7 del capítulo 2 obtenemos el valor del índice normalizado b para el modo fundamental que es 0.95. Recordemos que para asimetrías mayores a 10 tomamos el valor de a como infinito. En el grafico mencionado nos situamos en el eje x (V) en el valor obtenido $V \approx 14$ y buscamos la intersección con la curva que le corresponde a la asimetría $a = \infty$.
4. De esta forma calculamos el índice efectivo el índice efectivo N_x de la primera estructura

$$N_x \approx n_s + b(n_f - n_s) \approx 1.5098 + 0.95(1.5198 - 1.5098)$$

$$\underline{N_x \approx 1.5193}$$

5. Con este nuevo índice se calcula la frecuencia normalizada V' para el ancho de la guía ω recordando que la luz se propaga como si fuese confinada por el índice N_x la asimetría es $a = 0$

$$V' = k\omega\sqrt{N_x^2 - n_s^2} = \frac{2\pi}{632.8 \times 10^{-9}} (17 \times 10^{-6})\sqrt{(1.5193)^2 - (1.5098)^2}$$

$$\underline{V' = 28.63 \approx 29}$$

6. Nuevamente hacemos uso del grafico de la figura 2.7 para determinar el nuevo índice normalizado b' de la nueva estructura el cual tiene un valor de 1.

7. El índice efectivo es:

$$N \approx n_s + b'(N_x - n_s) \approx 1.5098 + 1(1.5193 - 1.5098)$$

$$\underline{N \approx 1.5193}$$

Lo mismo se hace para el modo dos y tres. En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para los tres primeros modos, en donde la asimetría y la frecuencia normalizada es la misma para todos.

$a = 42.23, h = 8\mu m$ $V \approx 14$	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Índice normalizado b	0.95	0.85	0.55
Índice de refracción de la primera estructura N_x	1.5193	1.5183	1.5153
$a = 0, \omega = 17\mu m$ y N_x de cada modo para la nueva estructura			
Frecuencia normalizada V'	29	27	22
Índice normalizado b'	1	0.9	0.8
Índice efectivo N	1.5193	1.5174	1.5142

Tabla 2 Cálculo del índice efectivo para los tres primeros modos

El índice efectivo debe de estar en el rango de 1.5098 y 1.5198 que son los índices del substrato y de la guía, nuestros cálculos están dentro de estos parámetros por lo que se puede decir que son correctos.

4.3.1 Simulación de la guía de onda canal fabricada

Usamos el simulador free BPM (Beam Propagation Method) ^[29] mediante el cual es posible estimar el índice efectivo y los modos de propagación de diferentes estructuras de óptica guiada, los datos que debemos introducir son: la longitud de onda, el índice de refracción del substrato n_s , el índice de la guía N , el

cambio de índice de refracción Δn y el ancho de la guía ω ; al introducir los nuestros en la figura 4.12 se muestra cómo se va propagando la luz a lo largo de la guía para un modo.

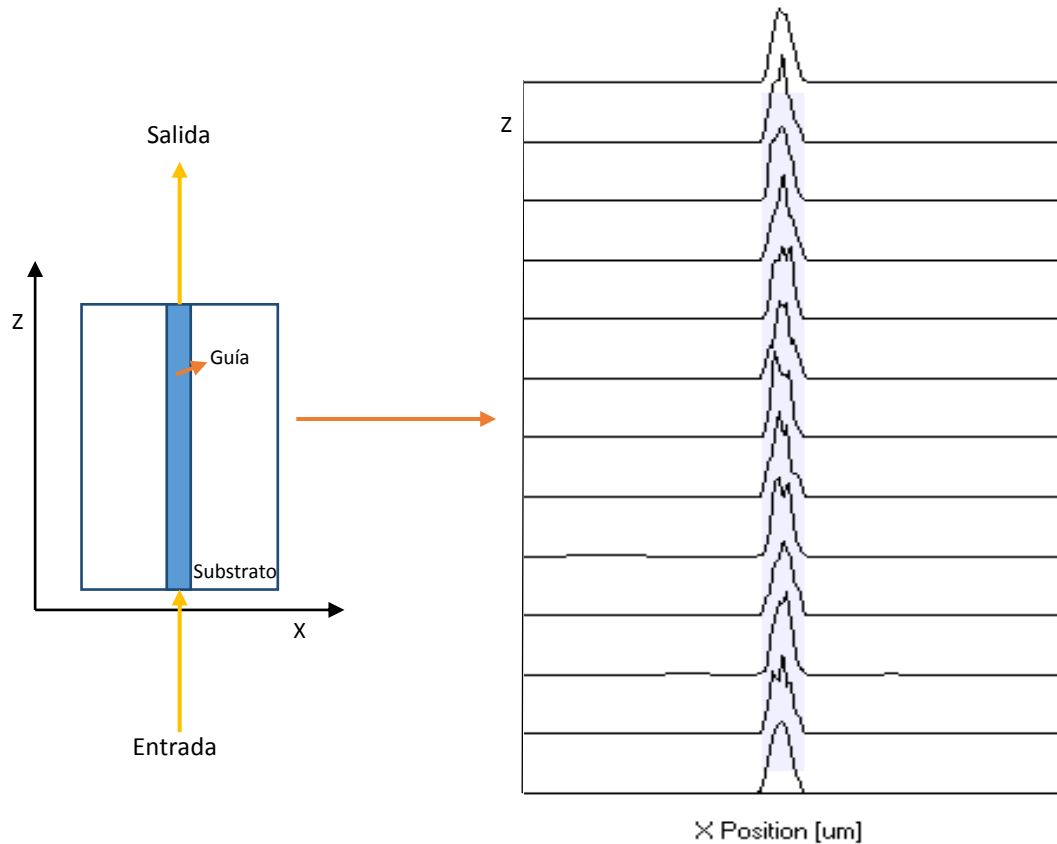


Figura 4.12 Simulación de guía con los datos experimentales.

El índice efectivo para esta estructura plana que calcula el simulador es de 1.5196 para el modo fundamental (figura 4.13). Comparando este cálculo con el que se obtuvo mediante el método del índice efectivo vemos que difiere en 0.0003.

Este programa nos permite visualizar la propagación de todos los modos como se muestra en la figura 4.12, pero no se puede visualizar la propagación de cada uno de los modos porque los sobrepone en el mismo gráfico lo cual no es muy claro cómo se puede observar en la figura 4.14

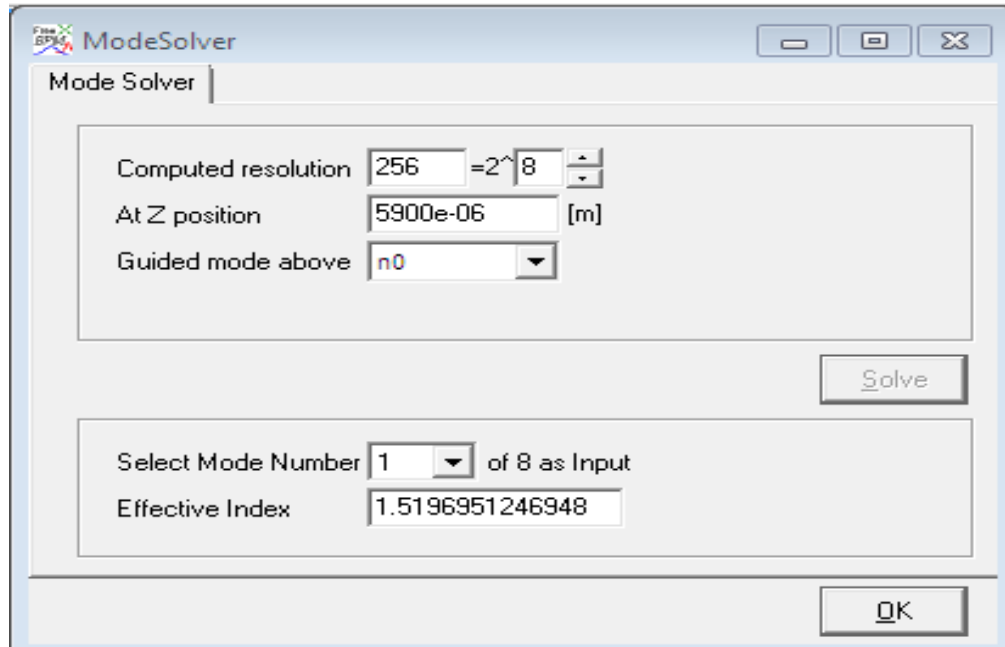


Figura 4.13 Cálculo del índice efectivo con el software free BPM.

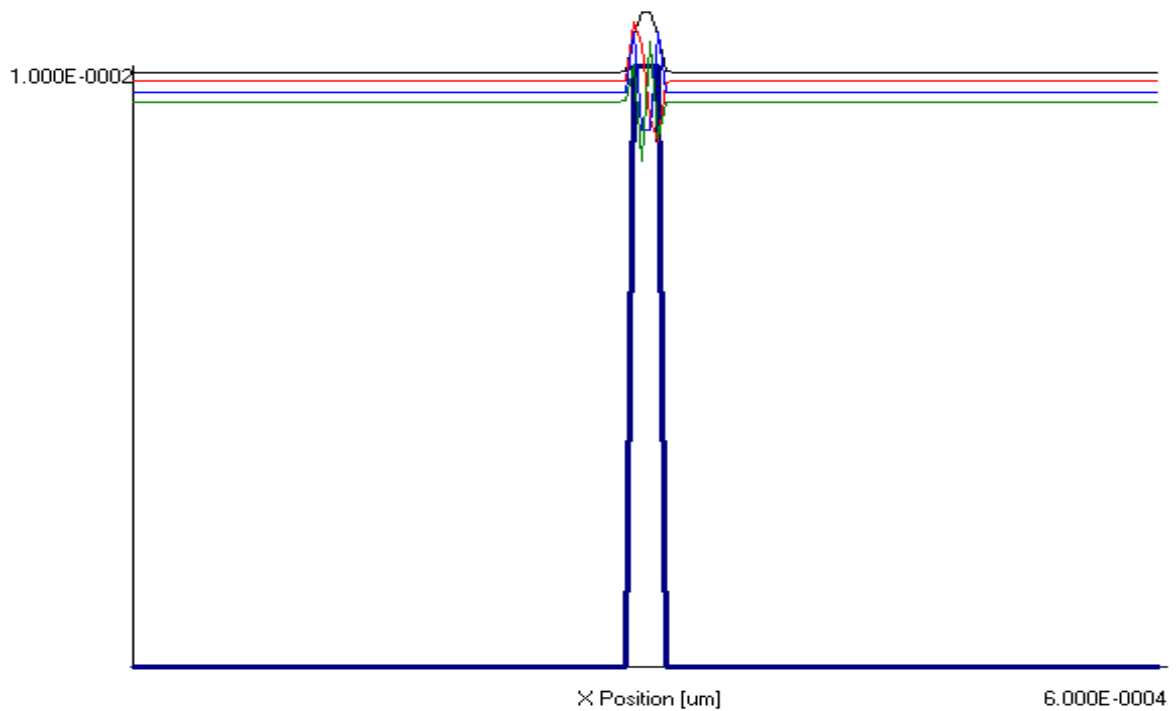


Figura 4.14 Simulación de más de un modo de propagación en el software free BPM.

4.3.2 Simulación de guías de onda con diferente ancho de canal

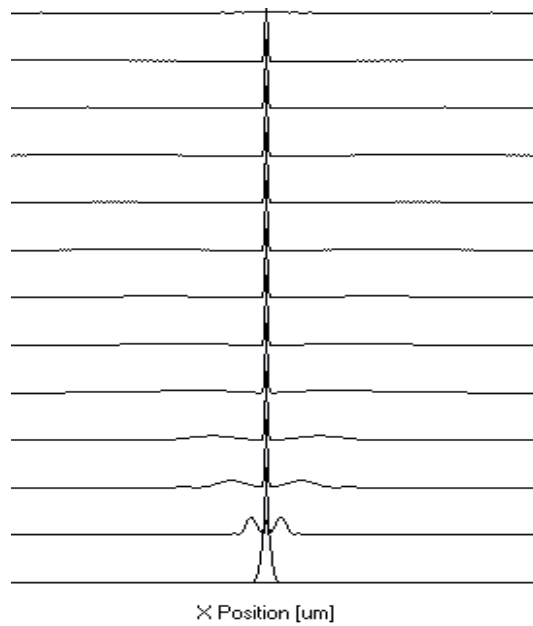
Debido a que las guías de onda canal vítreas fabricadas son multimodo para una longitud de onda de $\lambda = 632.8nm$. Es necesario determinar los límites de tamaño para el ancho del canal de las guías de onda, estimando el valor mínimo para que la estructura guíe dicha longitud de onda y el valor máximo será para el que la guía se comporte en régimen bimodal.

Utilizamos el mismo simulador free BPM con los mismos parámetros que en el inciso anterior pero cambiando el ancho del canal para valores de 1, 1.5, 2, 3 y 3.5 micrómetros. Los resultados los podemos visualizar en el conjunto de imágenes de las Figura 4.14(a). Podemos observar que para el ancho de canal de 1 micrómetro el programa no calcula el índice efectivo y no se visualiza la propagación del modo guiado. Es decir, la estructura no guía.

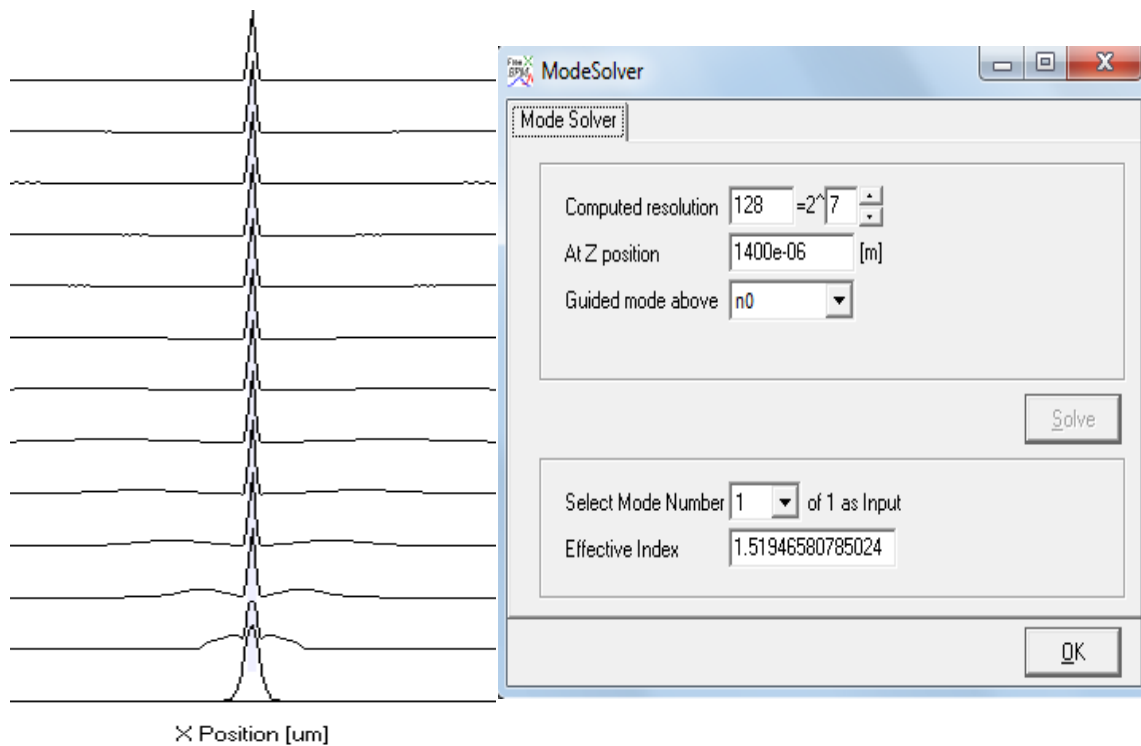
Es hasta cuando el canal toma un valor de 1.5 micrómetros de ancho que podemos visualizar la propagación del modo y el programa calcula su índice efectivo. Podemos ver que cuando el canal mide 4 micrómetros de ancho, esta estructura es ya bimodal.

Este mismo tipo de simulaciones se llevó a cabo pero ahora cambiando la longitud de onda de propagación $\lambda = 1.5\mu m$. De acuerdo a los resultados obtenidos bajo estos parámetros la guía de onda canal comienza a guiar un modo para un ancho de canal del 1.5 micrómetros mientras que para un ancho de 10 micrómetros ya la estructura es bimodal.

Simulación de la guía con un ancho de $1\mu m$



Simulación de la guía con un ancho de $1.5\mu m$



Simulación de la guía con un ancho de $4\mu\text{m}$

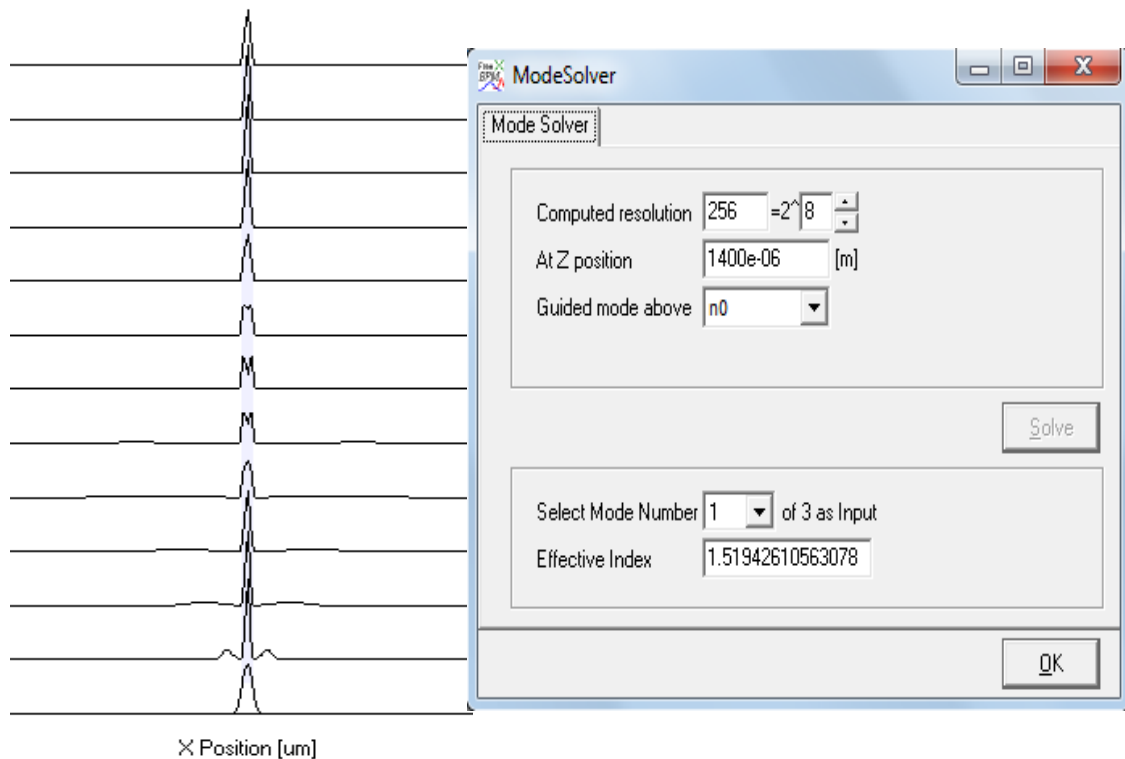


Figura 4.14 a) Simulación de guías de onda con diferente ancho canal.

4.4 Fabricación de guías de onda canal orgánicas

A continuación comentamos el trabajo y los resultados más relevantes en el proceso de fabricación de guías de onda orgánicas. En la primera parte se reportan los resultados al fabricar y caracterizar guías canal con fotoresina positiva. Después, describimos los resultados obtenidos al utilizar diferentes materiales en la fabricación de las guías mediante la técnica de lift – off explicada en la sección (3.4.1). El polímero utilizado es el Polimetil metacrilato (PMMA) diluido en tricloroetano 1,1-2.

4.4.1 Guías de onda de fotoresina positiva.

Como se esquematiza en la figura 4.15, al abrir canales en la resina positiva mediante el proceso de fotolitografía, la resina remanente forma también guías de onda canal poliméricas con las características que se muestran en la figura 4.15 (a).

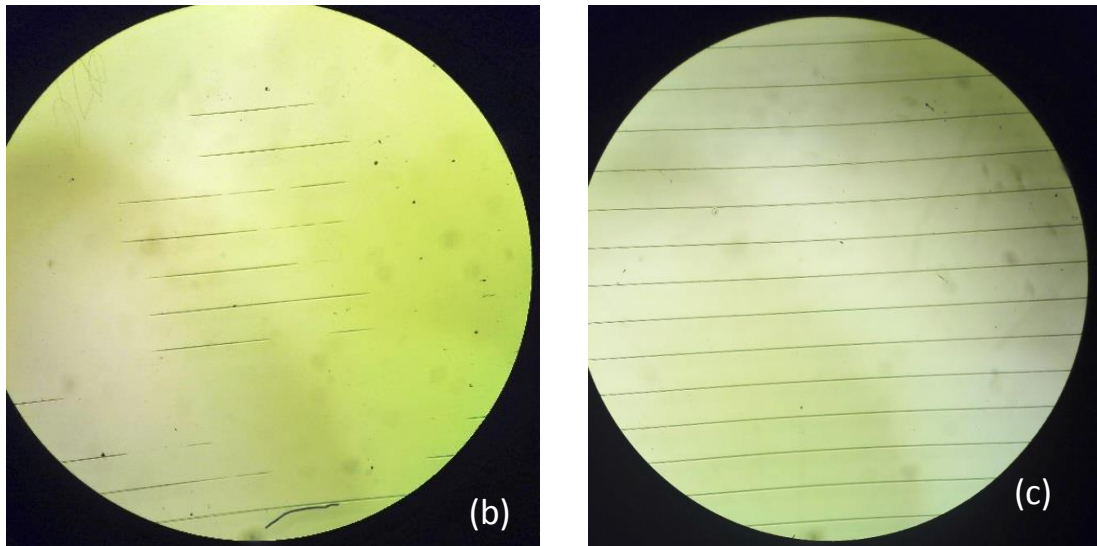
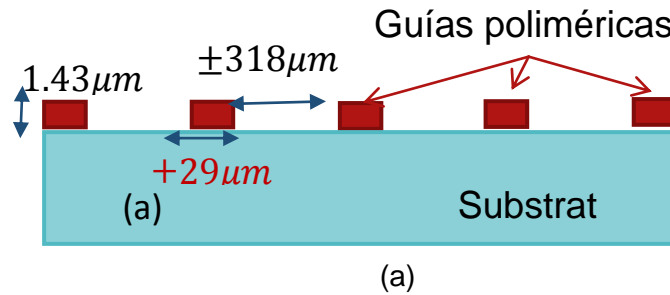
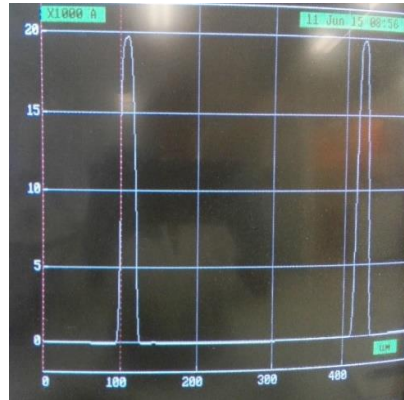
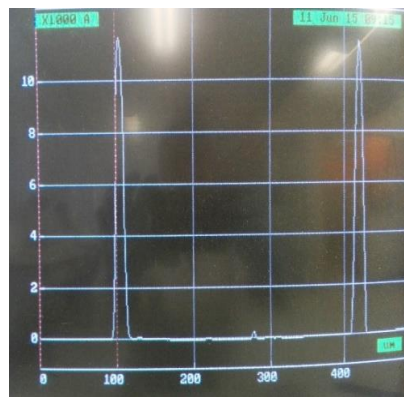


Figura 4.15 Guías de onda canal poliméricas (a) Estructura y dimensiones, (b, c) Guías poliméricas vistas al microscopio con diferentes parámetros de insolación y revelado

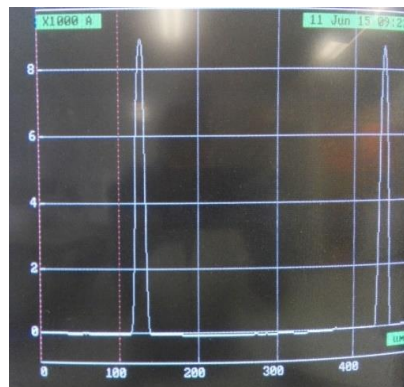
Los parámetros de fabricación optimizados para el depósito, insolación y revelado son los que se listan en la tabla 1 de la sección 4.1.1. Los gráficos de la figura 4.16 se obtuvieron en el perfilómetro y corresponden a los espesores de las guías (última columna de la tabla 1) obtenidos dependiendo de la velocidad de depósito de la resina en el spin-coater.



1000 rpm



3000 rpm



6000 rpm

Figura 4. 16 Medidas del espesor de las guías de onda poliméricas. En el eje horizontal se grafica el barrido en (micras) y en el eje vertical se grafica el espesor (X1000 A°).

Estas guías se caracterizaron en el montaje de campo cercano (Fig. 3.14). En las imágenes de la Figura 4.17 tenemos en (a) la proyección en una pantalla del patrón de irradiancia a la salida de una de las guías, en (b) tenemos la imagen

de lo que se visualiza en el monitor al enfocar la señal de salida en una cámara CCD. Vemos claramente que las guías fabricadas son multimodo a la longitud de onda de caracterización $\lambda = 633nm$.



Figura 4. 17. Caracterización de campo cercano de las guías canal poliméricas fabricadas.

En estas imágenes se observan muy bien los lóbulos de luz que conforman el patrón de irradiancia, esto nos indica que el proceso de fabricación permite tener una buena calidad en el extremo de las guías de tal forma que se puede acoplar la luz sin ningún problema y visualizar su irradiancia a la salida de la misma.

4.4.2 Guías de onda orgánicas con una estructura base de aluminio

En el esquema de la figura 4.18 podemos observar todas las etapas del procedimiento. Sobre un substrato limpio se hizo un depósito de fotoresina positiva sobre la que se abrieron canales mediante el método de fotolitografía para después evaporar el aluminio (7μ aprox.). Al aplicar la técnica del lift-off quedan sobre el substrato canales abiertos delimitados por aluminio que posteriormente se le depositaría el polímero de interés para rellenar los canales

pero al momento de emplear la técnica de lift-off el aluminio no resistió el ataque químico y se empezó a desprender como se muestra en la figura 4.19.

En nuestra opinión, se podría lograr esta estructura de aluminio utilizando tanto un espesor por arriba de la micra como también un aluminio de mayor pureza.

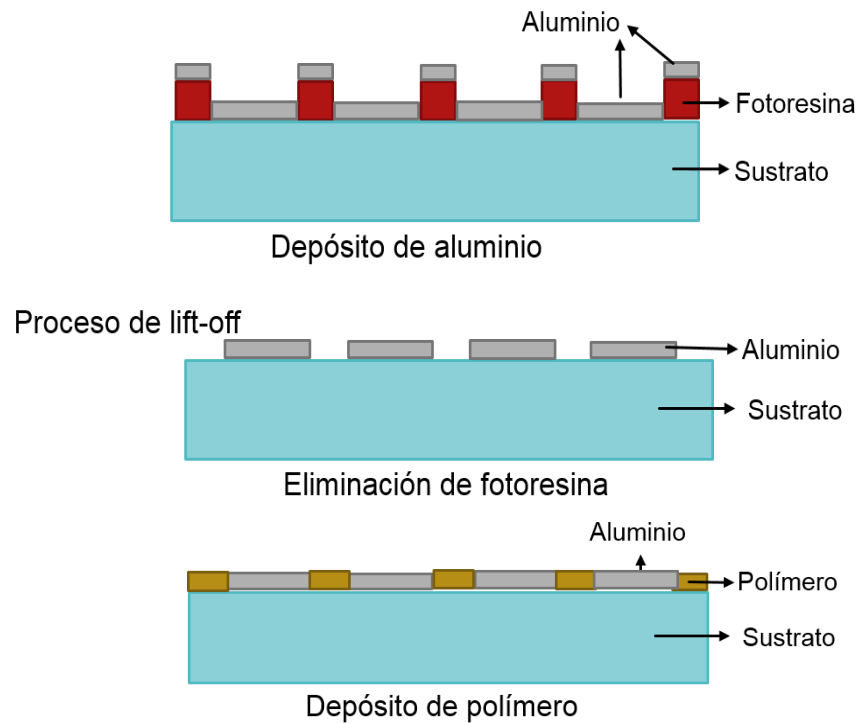


Figura 4.18 Esquema del proceso para fabricar guías de onda orgánicas.

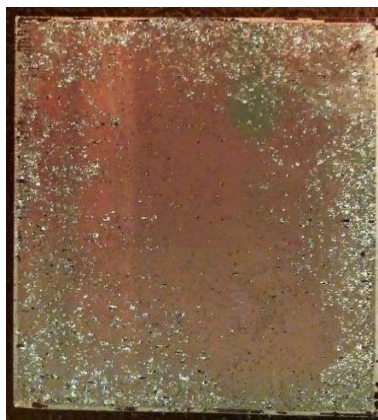


Figura 4.19 Resultado final después del ataque químico con developer CD-30.

4.4.3 Guías de onda orgánicas con una estructura base de spin on glass

Otro material utilizado fue el Accuglass spin on glass 211 Honeywell ^[30], esta substancia utilizada ampliamente en la microelectrónica se deposita mediante el spin-coater y adquiere las mismas propiedades que el vidrio después de que se hornea. El procedimiento de fabricación fue el mismo que se describe en la figura 4.19 pero sustituyendo el aluminio por el spin on glass.

Se presentó un inconveniente: al hacer el depósito del spin on glass en el spin – coater el material no alcanzó a distribuirse completamente sobre el sustrato, la solución ya estaba caducada y se solidificó muy rápido, esto lo podemos apreciar en la imagen de la figura 4.20



Figura 4.20 Spin on glass depositado sobre un sustrato con el spin – coater.

Esta estructura es de gran interés porque no reaccionaría ni al revelador de la fotoresina ni a los diversos disolventes de las soluciones poliméricas. Cabe mencionar que al percatarnos de que el material estaba caduco, se mandó cotizar y comprar uno nuevo pero no lo recibimos a tiempo.

4.4.4 Guías de onda orgánicas con una estructura base de fotoresina negativa.

Se eligió utilizar resina negativa después de hacer una prueba y observar que no la dañaba el disolvente del polímero. Se depositó la resina sobre el substrato y se abrieron canales de acuerdo a como se describió en el esquema 3.16. Después, se depositó un polímero en solución pero los canales resultaron ser muy angostos para la viscosidad que tiene el polímero ya que las medidas que se hicieron en el perfilómetro nos permiten percatarnos que el polímero no se deposita hasta la superficie del canal y que además el polímero se deposita también encima de las partes que tienen aluminio, tal y como se muestra en el esquema de la figura 4.21.

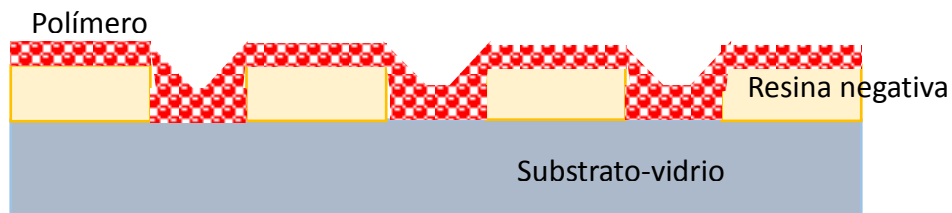


Figura 4.21 Esquema del perfil transversal de las guías de onda poliméricas fabricadas.

Intentamos caracterizar estas guías de polímero en el banco óptico de campo cercano pero no se observó luz a la salida de las mismas. Es posible que no se pueda acoplar luz debido al poco espesor del polímero dentro del canal, otra posibilidad es que se esté acoplando la luz pero esta se esparza en toda la película polimérica debido a que ésta cubre toda la superficie.

Otra posibilidad es que al depositar el polímero las caras transversales de los canales no tengan la calidad suficiente que propicie el acoplamiento de la luz en la cara de entrada y la visualización del patrón de irradiancia a la salida de la guía.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES y PERSPECTIVAS

El uso de la resina negativa en la fabricación de guías de onda vítreas nos permitió obtener guías canal con un ancho de $17\mu m$, multimodo para una longitud de onda de $\lambda = 632.8nm$. Si bien, estas estructuras son demasiado anchas para aplicaciones en el visible o IR cercano (telecomunicaciones), en la literatura se encuentran diversas aplicaciones para estas dimensiones de guías de onda canal en donde trabajan en su régimen monomodo en la región del infrarrojo lejano a una longitud de onda de $\lambda = 5.91\mu m$. De entre estas aplicaciones tenemos: sensores optoquímicos para gases contaminantes, como componentes para interferometría astronómica que tiene como objetivo la detección y espectrometría de planetas extra-solares parecidos a la tierra^[31], para el desarrollo de biosensores ópticos los cuales pueden recolectar información de las alteraciones metabólicas^[32]. En estos casos los vidrios utilizados son los calcogenuros debido a su transparencia en la región del infrarrojo lejano.

Si se desea fabricar guías de onda canal de alrededor de 1.5-2 micras de ancho (monomodales en el visible y cercano infrarrojo, ver secc.4.3.2) es necesario adquirir una nueva mascarilla con canales de dichas dimensiones. O mejor aún, adquirir un sistema de litografía por haz de electrones con el que además sea posible grabar en los materiales cualquier diseño (rectas, curvas, interferómetros, etc.) y llegar hasta dimensiones nanométricas^[33, 34].

Visualizamos en superficie las guías canal vítreas (figura 4.7), según la literatura revisada esto no se había hecho anteriormente. Sería deseable caracterizar la superficie por la técnica de microscopía de fuerza atómica (AFM)^[35] para determinar la magnitud de la protuberancia del canal respecto a

la superficie. Esta protuberancia del canal implicaría que el índice de refracción en las direcciones transversal y azimutal es diferente, es decir, las guías presentan birrefringencia. Un trabajo a futuro sería estimar la birrefringencia de este tipo de guías e implementar una aplicación.

De acuerdo a los resultados que obtuvimos al fabricar las guías de onda poliméricas pensamos que es mejor descartar el modelo constituido por una estructura base (canales abiertos en un material propicio) sobre la que se deposita el polímero en solución (Figura 3.5), esto debido a que se observó que el polímero queda depositado no solamente en los canales sino en toda la superficie, dando lugar finalmente a una guía de onda plana. En su lugar, recomendamos aplicar la técnica de lift-off, pero después de tener los canales abiertos en la fotoresina depositar la solución polimérica formada por el PMMA y anisol, que es un disolvente que solo es miscible en etanol y éter. De esta forma al quitar la resina con el revelador no se dañará el polímero.

El banco óptico implementado permitió observar los patrones de irradiancia de la señal a la salida de las guías canal. Se podría elaborar un programa que nos permita tratar la imagen para estimar automáticamente la dimensión del modo guiado y en base a esto cuantificar las pérdidas de acoplamiento entre diferentes dispositivos.

Sería muy útil elaborar un programa para estimar de manera rápida el cálculo de los índices efectivos de los modos guiados basados en el método del índice efectivo.

Si bien el encontrar los parámetros óptimos en cada una de las etapas de fabricación de las guías de onda lleva tiempo y el trabajo demanda paciencia y mucha iniciativa, también se adquiere mucha experiencia en lo que es el trabajo en una sala limpia “clean room”.

CAPÍTULO 6

REFERENCIAS

1. Miller, S.E., "Integrated Optics: An introduction", Bell Syst. Tech. J., Vol. 48, 1969, pp 2059-2068.
2. <https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/acopladores-guia-ondas-interfaz-coaxial/>.
3. https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro_de_gu%C3%ADa_de_onda#/media/File:Waveguide-post-filter.JPG
4. Yonder Berencen Ramirez, Orlando Hidalgo Alonso, "Caracterización de guías ópticas planas fabricadas en vidrio mediante intercambio iónico", Universidad de la Habana, Facultad de Física.
5. Cullemann, D.; Knuettel, A. and Voges, E.; "Integrated optical sensor in glass for optical coherence tomography (OCT)", IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, V6, 5, (2000), 730-734
6. Seppo Honkanen, Brian R. West, Sanna Yliniemi, Pratheepan Madasamy, Michael Morrell, Jason Auxier, Axel Schülzgen, Nasser Peyghambarian, James Carriere, Jesse Frantz, Ray Kostu, "Recent advances in ion exchanged glass waveguides and devices" Optical Sciences Center, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA
7. Rodríguez, J., Fernández, S. y Virgos, J.M., "Óptica integrada: Primeros pasos fundamentos teóricos y aplicaciones", Universidad Oviedo, 1993.
8. S. Iraj Najafi, "Introduction to Glass Integrated Optics". Artech House, Boston-London.
9. Barrios Martínez Paola, "Fabricación de guías de onda mediante intercambios iónicos por diferentes métodos", Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, mayo 2005.
10. B.E.A. Saleh, "Fundamentals of Photonics", second edition, Wiley-Interscience, 2007.

11. L. Ross, "Integrated Optical Components in Substrate Glasses", *Glastech. Ber.*, Vol. 62, 1989, pp. 285-297.
12. Townsend, P.D., Chandler, P.J., y Zhang, L., "Optical Effects of Ion Implantation", Cambridge University Press, Cambridge 1994, pp 280.
13. William S. C. Chang, "Principles of Laser and Optics", Cambridge University Press, Cambridge 2005.
14. K. Iizuka, "Elements of Photonics", Vol. II, Wiley, New York, 2002.
15. R. M. Knox and P. P. Toullos, "Integrated Circuits for the millimeter optical frequency range", *proc. symp. Submillimeter waves*, pp 497-516, 1960.
16. H. Kogelnik and V. Ramaswamy, "Scaling Rules for Thin-Film Optical Waveguides" *appl. Opt.* vol. 13 No. 8, pp 1857-1862.
17. T. Lang, "Etude des effets de polarisation dans de guides d'optique intégrée sur verre. Application: convertisseur de polarisation", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Nov.1997.
18. R. V. Ramaswamy, and R. Srivasatava, "Ion Exchange Glass Waveguides: a review", *opt. J. Lightwave Technol.*, Vol. 6, pp. 984, 1988.
19. Persegol Dominique, Levy Michel, "Modeling ion exchange in glass with concentration dependent diffusion coefficients and mobilities", *Opt. Eng.*, 35, pp 1603-1610, 1996.
20. Albert, J., "Refractive-Index Profiles of Planar Waveguides Made by Ion-Exchange in Glass", *Appl. Opt.*, Vol.24, 1985, pp 3692-3693.
21. Ma. De Jesús Guadalupe Aguilar Jiménez, "Fabricación de Canales de GaAs con Doble Ataque Químico para Diodos Láser Tipo Reif", Tesis de Maestría, Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO), UASLP., Diciembre de 2003.
22. Sergio E. Hdz. Corpus, Manuel Flores Camacho, "Referencia Rápida para Evaporadora de Metales VEECO V-300", Adaptación IICO-UASLP.
23. S.M. Sze, "Semiconductor Devices-Physics and Technology", John Wiley & Sons, Inc., 2nd Edition, 2002.
24. https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigmaaldrich/docs/Aldrich/Bulletin/al_techbull_al217.pdf

25. <http://engineering.dartmouth.edu/microeng/processing/lithography/S1800.pdf>
26. Operation Manual, OAI series 200, Tabletop manual, Mask Aligner and UV Exposure System, Optical Associates, Inc.
27. Ludwig Rob, "Integrated Optical Components in Substrates Glasses", Review Paper IOT Entwicklungsgesellschaft für Integrierte Optik-Technologie mbH, Waghäusel (FRG), Received 19th December 1988.
28. Yip, G.L., and J. Albert, "Characterization of Planar Optical Waveguides by K^+ ion exchange in Glass", Opt. Lett., Vol.10 1985, pp. 151-153
29. <http://freebpm.software.informer.com/0.3/>
30. <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=720ab56ef9144b24a38291bcbe244fc3&ckck=1>
31. E. Barthélémy, C. Vigreux, G. Parent, M. Barillot and A. Pradel, "Telluride films and waveguides for IR integrated optics", Phys. Status Solidi C 8, No. 9, 2890-2894, 2011.
32. Marie-Laure Anne, "Chalcogenide Glass Optical Waveguides for Infrared Biosensing", Sensors 2009, pp. 7398-7411.
33. Larry Hardesty, "El futuro de la fabricación de chips", MIT News Office, 2011.
34. <http://nsnanotecnologia.com/productosyservicios/crested/>.
35. Hui Xie, Cagdas Onal, Stéphane Régnier, Metin Sitti, "Atomic Force Microscopy Based Nanorobotics", edit. Springer