



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**FABRICACIÓN Y
CARACTERIZACIÓN DE GUÍAS DE
ONDA EN SUBSTRATO DE VIDRIO
PARA APLICACIONES FOTÓNICAS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO**

**P R E S E N T A :
GERARDO GONZÁLEZ OLVERA**

Directora de Tesis: Dra. Celia A. Sánchez Pérez
CCADET, UNAM



CUIDAD UNIVERSITARIA

Noviembre de 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A usted Dra. Celia, por su apoyo, atención y paciencia, porque simplemente es la impulsora de este proyecto y porque con todo lo que aprendí en esta etapa en el CCADET me di cuenta que la frase

es agradable ser importante, pero es más importante ser agradable

sí existe y hay quienes no la olvidan

a todos los laboratorios del mismo CCADET que colaboraron en alguna etapa del proyecto y a las personas que ahí conocí, que me brindaron su amistad y apoyo en otros ámbitos que no fueran de trabajo, tío jorge, tío hugo, alfredo, andrea, ivan y carlos... además mazal

en especial al equipo de trabajo que constituyen los doctores del CCADET y a elise ghibaud, sencillamente por el tiempo dedicado sin responsabilidad u obligación alguna, por su sencillez, su simpatía, sus críticas y su entusiasmo

*a todos mis amigos del fusión y a los que estan **siempre** conmigo, en cualquier situación y en cualquier lugar, todos saben a quienes me refiero: noe, edgar, osvaldo, william, sergio, julio "el primo" jiménez, guadalupe y ana lilia claro, por los logros y fracasos juntos*

principalmente a los valedores quienes aunque quiera nunca faltan, al loco y al garul hdez

a ti viri simplemente por estar aquí talvez ahora que más lo necesito, me haces sentir muy afortunado

a la Facultad de Ingeniería por apoyar mi formación profesional, incluyendo todos mis maestros y compañeros, y por proporcionarme tantos momentos que ahora se convierten en recuerdos imborrables con amigos para toda la vida

y finalmente a la Universidad Nacional Autónoma de México, por su apoyo continuo y exigencia en todos los ámbitos, y por que basta únicamente conocer y aprovechar un poco el abanico de oportunidades que ésta brinda, para sentir el orgullo y responsabilidad de ser Universitario y entender así, todo lo que representa ser

PUMA

al apoyo financiero de los proyectos PAPIIT INI09702 y CONACyT J41482-Y

a Dios y a la misma vida por darme una segunda oportunidad

gracias

nunca...

pero nunca,

te des por vencido

a mi mamá

candida olvera franco

a mis otras mamás

gracias a todas ustedes hermanas por enseñarme a vivir, porque antes que cualquier cosa está la educación humana en casa, por su apoyo, su tolerancia, sus regaños y su paciencia

a todas y cada una de ustedes y a mi mamá le he aprendido mucho y tal vez no terminaría de escribir si intentara plasmar todo lo que eso involucra, gracias especiales a ti arturo y a juan gonzález aguilar mi papá, significa mucho la experiencia transmitida, la dureza y la fortaleza con la que enfrentan cualquier situación, gracias también por todo ese apoyo esto es sólo una etapa y sé que hay que aprender más, a lo que sigue...

y a mi mamacita

a ti lilly

*no sé si estoy aquí para ser correspondido algún
día, pero si hay algo que estoy cierto, es que estoy
aquí para encontrarte, y ya lo hice*

CONTENIDO

Capítulo I

Introducción	1
I.1 Objetivo	2
I.2 Alcance de la tesis	3

Capítulo II

Las Guías de Onda en la Óptica Integrada

II.1 Introducción	4
II.2 Confinamiento de la luz y concepto de Guía de Onda	4
II.2.1 Diferentes geometrías para la Guía de Onda	5
II.3 Guías de Onda Planas	5
II.3.1 Modos de la Guía de onda	7
II.3.2 Distribuciones de campo	15
II.4 Guías de Onda Canal	19
II.4.1 Configuraciones de las guías de onda canal	21
II.5 Conclusiones	22
Referencia	22

Capítulo III

Intercambio Iónico en el Vidrio

III.1 Introducción	23
III.2 El Vidrio	24
III.2.1 Antecedentes	24
III.2.2 Características del sustrato de vidrio	25
III.2.3 Algunas ventajas de utilizar el vidrio en el proceso del intercambio iónico	27
III.3 Principio del intercambio iónico	28
III.3.1 Descripción del proceso del intercambio iónico	28
III.3.2 Fenómeno de difusión durante el proceso del intercambio iónico	29
A. Intercambio de iones en la superficie del vidrio	32
B. Inter-difusión a través del vidrio	33

III.3.3	Ventajas de la técnica del intercambio iónico	36
III.4	Elección del par de intercambio a utilizar	36
III.4.1	Esfuerzos	41
III.5	Conclusiones	42
	Referencias	43

Capítulo IV

Fabricación y Caracterización de Guías de Onda

IV.1	Guías de onda planas	44
IV.1.1	Montaje y fabricación de guías de onda planas por la técnica del intercambio iónico	44
IV.1.2	Secuencia del proceso	49
IV.2	Caracterización del intercambio iónico en las guías de onda planas a través del perfil del índice de refracción	50
IV.2.1	Determinación del perfil del índice efectivo de las guías de onda planas fabricadas	50
a	Método de líneas negras <i>m-lines</i>	50
b	Método <i>WKB inverso</i>	52
c	Cálculo de la incertidumbre	52
IV.2.2	Banco de medidas <i>m-lines</i>	54
A	Uso del arreglo de colimación	57
IV.2.3	Secuencia del proceso de caracterización	59
IV.2.4	Ventajas y desventajas	61
IV.2.5	Resultados y gráficas para la caracterización del intercambio iónico K^+ - Na^+ en guías de onda planas	62
A	Lote 1	63
B	Lote 2	71
IV.3	Guías de onda canal	75
IV.3.1	Montaje y fabricación guías de onda canal	75
IV.3.2	Litografía	76
IV.4	Caracterización de guías de onda canal	79
A	Pérdidas por inserción	80
B	Banco de medición	81
C	Resultados	81
IV.5	Conclusiones	82
	Referencias	84

Conclusiones y Perspectivas	85
------------------------------------	----

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

A partir del descubrimiento de los primeros láseres en 1960, numerosos han sido los trabajos de investigación efectuados para utilizar estas fuentes de luz coherente. Surgiendo la óptica integrada como un complemento a la transmisión pasiva de señales en fibras ópticas, se crean dispositivos donde funciones pasivas y activas puedan ser realizadas basándose en la propagación de señales luminosas que conduce a sistemas completamente ópticos aprovechando el gran ancho de banda de las señales ópticas. Esto ha motivado numerosos trabajos de investigación para desarrollar nuevos dispositivos con funciones más complejas cada vez, cumpliendo con los requerimientos de eficiencia, alta integración y bajo costo de producción.

Para optimizar el uso de láseres con semiconductores y fibras ópticas surgió la necesidad de utilizar componentes tales como transmisores, receptores, moduladores, etc. En 1969 S.E. Miller propuso el concepto de "Óptica Integrada" y así, los dispositivos de este tipo son ahora considerados como el complemento de la comunicación óptica. El elemento de base de estos dispositivos ópticos es la guía de onda cuya realización utiliza la elevación local del índice de refracción de un material dieléctrico llamado sustrato, logrando así el confinamiento de una señal óptica.

Las guías de onda se han utilizado en gran número de dispositivos con diversas aplicaciones, una de ellas es el sensado de gases y enfocándose en ese objetivo. Este trabajo de tesis abarca principalmente el proceso de fabricación de guías de onda, se

incluye la información necesaria para optimizar el proceso de tal forma que se pueda obtener una reproducibilidad controlada. Así mismo, también se pretende obtener una recopilación documental importante con respecto a la técnica de fabricación utilizada, de la misma manera que se caracterizan óptimamente las muestras obtenidas.

El vidrio es un material muy utilizado en la óptica y en este caso no es la excepción. Se utiliza como sustrato para la realización de guías gracias a, entre otras cosas, su estabilidad temporal en comparación con los materiales orgánicos y su excelente transparencia, lo que produce bajas pérdidas ópticas. Además, a pesar de que diferentes procesos han sido utilizados para la fabricación de guías de onda, se seleccionó el intercambio iónico porque ha sido demostrado como una técnica eficiente a bajo costo para producir componentes de óptica integrada en vidrio.

De tal manera, a lo largo de este documento se describirá de manera detallada cada uno de los pasos a seguir para el proceso de fabricación y caracterización de las guías de onda mediante el intercambio iónico para la realización de guías de onda planares y canales.

I.1 OBJETIVO

Los objetivos de esta tesis de licenciatura son principalmente de carácter tecnológico con la puesta en funcionamiento de una metodología de fabricación de guías de onda en sustrato de vidrio para su aplicación en dispositivos fotónicos, y son principalmente los siguientes:

- Desarrollar una metodología de fabricación de guías de onda ópticas por el proceso de intercambio iónico en sustrato de vidrio como tecnología de base para la fabricación de dispositivos.
- Caracterización del proceso de difusión iónica a través del perfil concentración del ion de intercambio deduciéndolo del perfil del índice de refracción de guías planares.
- Implementación de las técnicas de caracterización de las principales propiedades ópticas de las guías fabricadas en cuanto al número de modos y pérdidas ópticas.

I.2 ALCANCE DE LA TESIS

Después de tratar una breve introducción acerca del surgimiento y antecedentes de las guías de onda, este trabajo de tesis está desarrollado de la siguiente manera.

El capítulo II inicia explicando tanto el concepto como las diferentes geometrías de las guías de onda. Igualmente describe el principio del confinamiento de la luz en un sustrato a partir de la óptica geométrica y abarca de manera general los conceptos de modos de propagación y distribuciones de campo principalmente para guías de onda planas. El caso de las guías de onda canal se trata brevemente considerando que la mayoría de los modelos son aproximaciones, esto debido a que una descripción analítica únicamente puede realizarse a través de métodos numéricos y el objetivo principal de esta tesis es la fabricación y caracterización de tales dispositivos.

El capítulo III es una amplia descripción del intercambio iónico, ésta trata de considerar todos los aspectos que conduzcan a optimizar los resultados del proceso. Se consideran así mismo ventajas y desventajas no sólo de la técnica del intercambio iónico en sí, sino también de los componentes y del ambiente que giran en torno de éste. De igual manera se citan los fenómenos involucrados como consecuencia del proceso y criterios de selección para los elementos a utilizar.

Finalmente, en el capítulo IV se describe la metodología de fabricación de las guías de onda. En este sentido, se describe la función de cada uno de los elementos a utilizar en el sistema y la manera de adecuar los mismos de acuerdo al material y equipo disponible. Este capítulo es el más extenso porque también abarca la caracterización de las muestras obtenidas. Se detalla también la manera de implementar los montajes y las técnicas utilizadas en ese sentido. Por último, los resultados para ambas geometrías de las guías de onda se presentan y se discuten.

De acuerdo a la metodología planteada en este documento y del proyecto en cuestión, se pretende que las guías de onda fabricadas representen muestras confiables para su utilización en cualquier otro proyecto que involucre aplicaciones de fotónica.

CAPÍTULO II

LAS GUÍAS DE ONDA EN LA ÓPTICA INTEGRADA

II.1 INTRODUCCIÓN

La óptica integrada tiene como objetivo el integrar varias funciones en un dispositivo óptico, con la intención de crear sistemas para la generación, concentración, combinación, aislamiento, acoplamiento, modulación y detección de la luz, entre otras, todo en un mismo sustrato. Las guías de onda ópticas constituyen el elemento de base de estos dispositivos que son las versiones ópticas de los circuitos integrados electrónicos. Por lo tanto, la óptica integrada, tiene como propósito la miniaturización de funciones ópticas del mismo modo que los circuitos integrados tienen el de miniaturizar funciones electrónicas.

II.2 CONFINAMIENTO DE LA LUZ Y CONCEPTO DE GUÍA DE ONDA

El concepto básico del confinamiento óptico de la luz es el siguiente. Un medio de un índice de refracción dado rodeado de un medio de índice de refracción menor, actúa como "trampa" dentro de la cual los rayos ópticos permanecen confinados por el efecto de múltiple reflexión total interna en las fronteras. En este fenómeno, el confinamiento de la luz se da en el medio de mayor índice de refracción, esto puede ser aprovechado para fabricar conductos de luz para transportar señales ópticas de un lugar a otro.

De esta manera, definimos que una característica de la Guía de Onda óptica es conducir la luz en un material dieléctrico rodeado por otro material dieléctrico de menor índice de refracción.

II.2.1 Diferentes geometrías para la Guía de Onda

Como recién se mencionó, las guías de onda ópticas son conductos o canales para la transmisión de la luz y su material dieléctrico puede tomar la forma de una capa, una banda o canal, o un cilindro. Figura II.1.

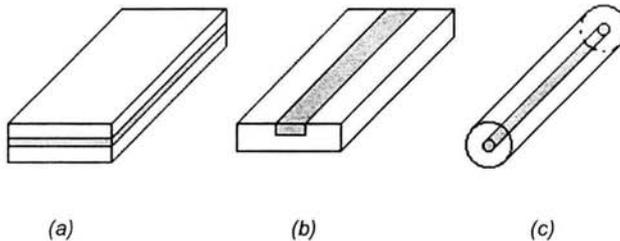


Figura II.1 Guías de onda ópticas (a) plana; (b) canal; (c) fibra.

La luz es transportada a través del medio cuyo índice de refracción es mayor, sin hacer radiación en el medio circundante. Conocemos que la forma más utilizada es la fibra óptica, la cual está hecha de dos cilindros concéntricos de material dieléctrico de bajas pérdidas ópticas como lo es el vidrio (sílice), pero en este documento se hará una breve recopilación de la técnica de fabricación y caracterización de las otras dos formas de guías de onda: la guía de onda plana y la guía de onda canal.

II.3 GUÍAS DE ONDA PLANAS

Una guía de onda plana (Figura II.1 (a)) es una capa de material dieléctrico. La luz es confinada dentro de esta capa por el efecto de reflexión total interna. En los componentes de películas delgadas, la capa de interés es llamada "*película*" (*film*) y los medios superior e inferior son llamados "*superestrato*" y "*sustrato*" respectivamente. De la misma manera, al medio que constituye la *película* se le llama *núcleo* y al medio circundante *revestimiento* de la guía de onda. A manera de simplificar el procedimiento, en esta sección se ilustrará

la propagación de la luz en una guía de onda plana simétrica en un material dieléctrico. Esto quiere decir que tanto el *superestrato* como el *sustrato* tendrán el mismo índice de refracción (n_2). La *película* tendrá una profundidad d y un índice de refracción n_1 ; como se muestra en la Figura II.2. Se asume que todos los materiales no son absorbentes.

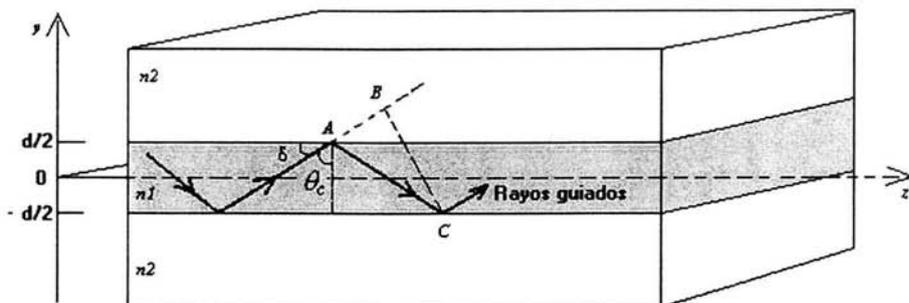


Figura II.2 Guía de onda plana en un material dieléctrico. Los rayos que forman un ángulo $\theta_i > \theta_c = \text{sen}^{-1}(n_2/n_1)$ son confinados por el efecto de reflexión total interna.

Se comenzará el estudio de la propagación de la luz por medio de la *Teoría de la óptica geométrica*. Los rayos en una guía de onda, viajan en la dirección de propagación z reflejándose entre las superficies de la capa sin pérdida de potencia, así que en el plano y - z se llevan a cabo las múltiples reflexiones. Para que lo anterior se cumpla, los rayos de luz deben satisfacer dos condiciones fundamentales:

- La primera implica que los rayos deben formar un ángulo de incidencia θ_i con respecto a la normal al eje z de tal manera que siempre sean mayores que el ángulo crítico $\theta_c = \text{sen}^{-1}(n_2/n_1)$. Los rayos que hacen ángulos menores refractan en el *sustrato* y *superestrato*, perdiendo una porción de su potencia a cada reflexión y extinguiéndose eventualmente.
- La segunda condición implica que para que una onda sea guiada, el desfaseamiento debe ser nulo o igual a múltiplos enteros de 2π , dando lugar a una onda con interferencia constructiva porque una familia de rayos puede interferir en una fase, otra familia de rayos interfiere en otra y así sucesivamente, teniendo

como resultado que cada interferencia constructiva representa un modo guiado. En la siguiente sección, trataremos la propagación modal.

II.3.1 Modos en una Guía de Onda

Los modos de la guía de onda son campos que mantienen la misma distribución y polarización transversal en todos los puntos a lo largo de la dirección de propagación [1].

Una manera de determinar los modos en una guía de onda, es haciendo una aproximación desarrollando soluciones de las ecuaciones de Maxwell en el medio interno y en el externo con las condiciones de frontera apropiadas. Sin embargo, nosotros escribimos la solución en términos de las ondas planas Transversales Eléctricas y Transversales Magnéticas (TE y TM).

Se considera que el campo en el núcleo tiene la forma de una onda plana TE o TM (transversal eléctrica o transversal magnética) de longitud de onda $\lambda = \lambda_0 / n_1$ reflejándose continuamente hacia adelante a un ángulo δ con el eje z y que es el complemento del ángulo θ_r con la normal al mismo eje. La onda viaja con una velocidad de fase $c_1 = c_0 / n_1$, su número de onda es $n_1 k_0$ y sus componentes vectoriales $k_x = 0$, $k_y = n_1 k_0 \sin \delta$, y $k_z = n_1 k_0 \cos \delta$ (ver Figura II.2). Para determinar los modos, consideramos la condición de interferencia constructiva.

En cada periodo, la onda que ya ha pasado dos reflexiones queda por detrás de la onda original una distancia $\overline{AC} - \overline{AB} = 2d \sin \delta$, también hay un desfase φ_r producido por cada reflexión interna en las fronteras del dieléctrico. De nuevo, con la misma condición de interferencia constructiva, el cambio de fase entre las dos ondas tiene que ser cero o múltiple entero de 2π ,

$$\frac{2\pi}{\lambda} 2d \sin \delta - 2\varphi_r = 2\pi m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

que también se puede escribir como,

$$2k_y d - 2\varphi_r = 2\pi m. \quad (2.2)$$

El cambio de fase φ_r ocasionado por la reflexión se calcula a partir de las relaciones de *Fresnel*, es una función del ángulo δ y también depende de la polarización de la onda incidente TE o TM. En este sentido, vale la pena hacer un paréntesis para explicar brevemente el concepto de las polarizaciones TE y TM antes de detallar el análisis de este cambio de fase φ_r .

Polarizaciones TE y TM

El análisis se reduce substancialmente si observamos que los dos modos normales para este sistema son ondas linealmente polarizadas a lo largo de las direcciones x y y . Esto se comprueba si se muestra que una onda incidente, una reflejada o una refractada con su respectivo vector de campo eléctrico en la dirección x es auto-constructiva con las condiciones de frontera. Sabemos que para el caso de la reflexión total interna la onda en cuestión, en efecto lo es, así que las ondas polarizadas en x y y son por lo tanto, separables e independientes.

El modo polarizado en el eje x tiene una polarización llamada **transversal eléctrica (TE)** o polarización **ortogonal**, dado que el campo eléctrico es ortogonal al plano de incidencia. El modo polarizado en el eje y tiene una polarización llamada **transversal magnética (TM)** dado que el campo magnético es ortogonal al plano de incidencia, pero también se le llama polarización paralela, dado que los campos eléctricos son paralelos al plano de incidencia. Del mismo modo, las polarizaciones ortogonal y paralela son también llamadas polarizaciones s y p respectivamente (s por el término alemán *senkrecht*, que significa *perpendicular*). Esto se ilustra en la Figura II.3.

A su vez, para obtener la ecuación para el cambio de fase $\varphi_x = \arg\{r_x\}$ que acompaña a la reflexión interna total, es conveniente ilustrar las ecuaciones de *Fresnel*.

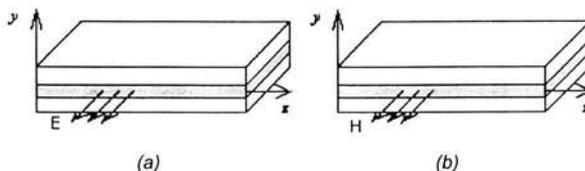


Figura II.3 Modos (a) TE y (b) TM en una guía de onda en un dieléctrico. Aquí, el plano y - z representa el plano de incidencia.

- Reflexión de *Fresnel* a las fronteras

Aplicando las condiciones de frontera (en el esquema de la Figura II.4), a las polarizaciones TE y TM de manera separada, obtenemos las siguientes expresiones para los coeficientes de reflexión y transmisión, conocidas como **ecuaciones de Fresnel**:

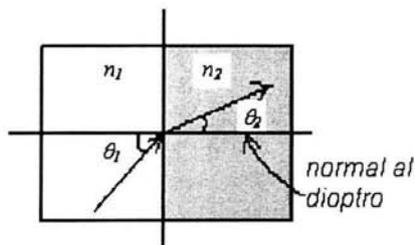


Figura II.4 Esquema explicativo de la Ley de Snell

Polarización TE
$$r_x = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2.3)$$

$$t_x = 1 + r_x \quad (2.4)$$

Polarización TM
$$r_y = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (2.5)$$

$$t_y = \frac{n_1}{n_2} (1 + r_y) \quad (2.6)$$

Dados los valores de n_1 , n_2 y θ_1 , se pueden determinar los coeficientes de reflexión determinando primero θ_2 utilizando la *Ley de Snell*,

Ley de Snell

El rayo refractado cae en el plano de incidencia; el ángulo de refracción θ_2 está relacionado al ángulo de incidencia θ_1 por la identidad,

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (2.7)$$

de la cual,

$$\cos \theta_2 = (1 - \operatorname{sen}^2 \theta_2)^{1/2} = \left[1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \operatorname{sen}^2 \theta_1 \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

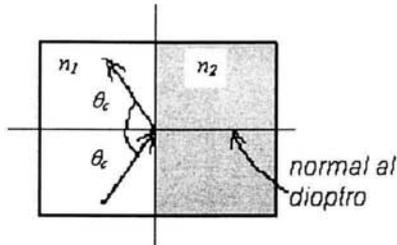


Figura II.5 Reflexión total interna

Para $n_1 > n_2$ y $\theta_1 > \theta_c$ que es el caso de la reflexión total interna y el que nos corresponde (Figura II.5), la magnitud de r_x permanece con un valor igual a la unidad. Esto se puede mostrar utilizando la ec (2.8) para escribir:

$$\cos \theta_2 = -\left[1 - \operatorname{sen}^2 \theta_1 / \operatorname{sen}^2 \theta_c \right]^{1/2} = -j \left[\operatorname{sen}^2 \theta_1 / \operatorname{sen}^2 \theta_c - 1 \right]^{1/2}$$

(la elección del signo menos está de acuerdo con la derivación que conduce a las ecuaciones de *Fresnel*), y sustituir esta ecuación en (2.5). De esta manera obtenemos la ecuación para el cambio de fase $\varphi_x = \arg\{r_x\}$ que acompaña a la reflexión interna total y que está dada por

Cambio de fase para la reflexión de un modo TE

$$\tan \frac{\varphi_x}{2} = \frac{(\operatorname{sen}^2 \theta_1 - \operatorname{sen}^2 \theta_c)^{1/2}}{\cos \theta_1} \quad (2.9)$$

Para terminar este paréntesis, es importante decir que el cambio de fase φ_x se incrementa desde 0 en $\theta = \theta_c$, hasta π en $\theta = 90^\circ$

Retomando así el tema del cambio de fase φ , al que se refieren las ecuaciones (2.1) y (2.2), y considerando que éste cambio es una función del ángulo δ y obviamente de la polarización de la onda incidente, para el caso TE (donde el campo eléctrico está en la

dirección x), sustituimos $\theta_r = \theta = \pi/2 - \delta$ y el valor fijo de $\theta_c = \pi/2 - \bar{\theta}_c$ [1] (porque θ y δ son ángulos complementarios como se ve en la Figura II.2) y tenemos:

$$\tan \frac{\varphi_r}{2} = \left(\frac{\text{sen}^2 \bar{\theta}_c}{\text{sen}^2 \delta} - 1 \right)^{1/2}, \quad (2.10)$$

de tal manera que φ_r varía desde π a 0 en la medida que δ varía de 0 a $\bar{\theta}_c$. Despejando φ_r de la ec. (2.1) y utilizando la ec. (2.10) ahora en la forma $\tan(\pi d \text{sen } \delta / \lambda - m\pi/2) = \tan(\varphi_r/2)$, obtenemos:

$$\tan \left(\pi \frac{d}{\lambda} \text{sen} \delta - m \frac{\pi}{2} \right) = \left(\frac{\text{sen}^2 \bar{\theta}_c}{\text{sen}^2 \delta} - 1 \right)^{1/2}. \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2.11)$$

Esta es la ecuación de dispersión de modos; es una ecuación trascendental en una sola variable, $\text{sen } \delta$. Sus soluciones dan lugar a los ángulos θ_m de los modos (haciendo $\delta = \theta_m$ para cada solución). Ambos lados de la ec. (2.11) están graficados en la Figura II.6 como funciones del $\text{sen } \delta$ y sus soluciones ($\text{sen } \theta_m$) están dadas por los puntos de intersección. El lado derecho de la ecuación (DER), $\tan(\varphi_r/2)$, es una función monótona decreciente del $\text{sen } \delta$ la cual alcanza el valor de cero cuando $\text{sen} \delta = \text{sen} \bar{\theta}_c$. El lado izquierdo de la ecuación (IZQ), genera dos familias de curvas, $\tan[(\pi d / \lambda) \text{sen } \delta]$ y $\cot[(\pi d / \lambda) \text{sen } \delta]$, cuando m es par e impar, respectivamente. Los puntos de intersección determinan los ángulos θ_m de los modos.

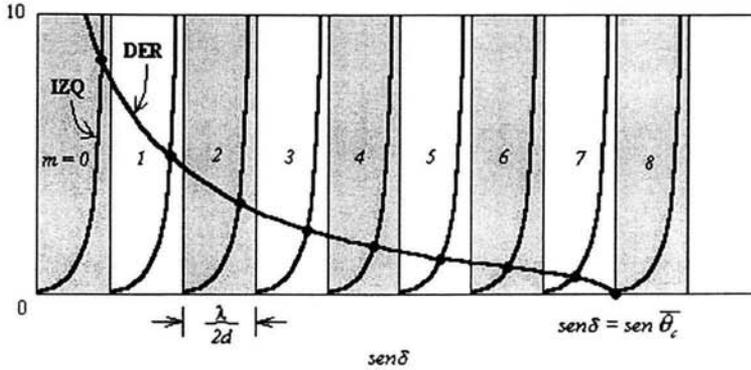


Figura II.6 Solución gráfica de la ec (2.11) para determinar los ángulos de reflexión θ_m de los modos de una guía de onda plana en un dieléctrico. Los lados DER e IZQ de la ecuación, están graficados versus $\text{sen } \delta$. Los puntos de intersección, marcados con puntos, determinan el $\text{sen } \theta_m$. En esta gráfica el $\text{sen } \theta_c = 8(\lambda/2d)$ y el número de modos es $m = 9$.

Estos ángulos θ_m que caen entre 0 y θ_c , corresponden a vectores de onda con componentes $(0, n_1 k_0 \text{sen } \theta_m, n_1 k_0 \text{cos } \theta_m)$. Las componentes z son las constantes de propagación:

$$\beta_m = n_1 k_0 \text{cos } \theta_m. \quad (2.12)$$

Dado que $\text{cos } \theta_m$ cae entre 1 y $\text{cos } \theta_c = n_2/n_1$, β_m cae entre $n_2 k_0$ y $n_1 k_0$, como se ilustra en la Figura II.7.

Los ángulos θ_m y las constantes de propagación β_m de los modos TM pueden ser encontrados utilizando la misma ecuación (2.1). De esta manera, con el cambio de fase φ_r ahora dado por la ecuación:

$$\tan \frac{\varphi_r}{2} = \frac{(\text{sen}^2 \theta_1 - \text{sen}^2 \theta_c)^{1/2}}{\text{cos } \theta_1 \text{sen}^2 \theta_c}. \quad (2.13)$$

se pueden encontrar resultados similares (no olvidando que $\theta_1 = \theta = \pi/2 - \delta$ y que $\theta_c = \pi/2 - \theta_c$).

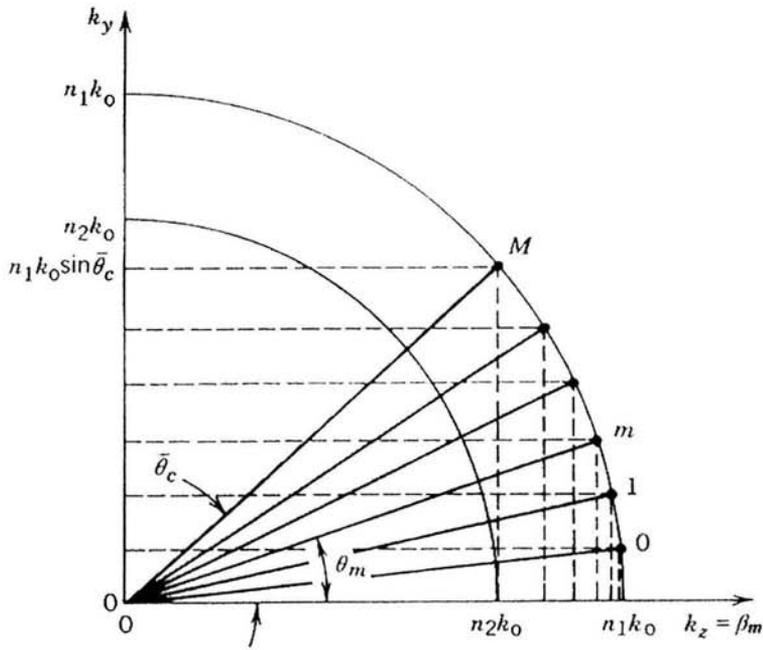


Figura II.7 Los ángulos de reflexión θ_m y las componentes correspondientes k_x y k_y de los vectores de onda de los modos de la guía de onda están indicados por puntos. Los ángulos θ_m caen entre 0 y $\bar{\theta}_c$ y las constantes de propagación β_m caen entre $n_2 k_0$ y $n_1 k_0$.

Número de Modos

Para determinar el número de modos TE que soporta una guía de onda dieléctrica examinamos el diagrama en la Figura II.6, la absisa está dividida en intervalos iguales de ancho $\lambda / 2d$, cada uno de los cuales contiene un modo marcado por un círculo cerrado. Esto es extensivo en los ángulos para los cuales $\text{sen } \delta \leq \text{sen } \bar{\theta}_c$, el número de modos TE corresponde por lo tanto al entero más pequeño que es mayor que $\text{sen } \bar{\theta}_c / (\lambda / 2d)$, así que

$$m \doteq \frac{\text{sen } \bar{\theta}_c}{\lambda / 2d}. \quad (2.14)$$

El símbolo \doteq denota que $\overline{\text{sen } \theta_c} / (\lambda / 2d)$ se incrementa al entero más cercano.

Sustituyendo $\overline{\text{sen } \theta_c} = n_2 / n_1$ en (2.7), obtenemos

$$m \doteq 2 \frac{d}{\lambda_0} NA, \quad (2.15)$$

donde

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.16)$$

es la apertura numérica de la guía de onda (NA es el seno del ángulo de aceptación de rayos desde el aire hacia la guía de onda). Una expresión similar se puede obtener para modos TM.

Cuando $\lambda / 2d > \overline{\text{sen } \theta_c}$ ó $(2d / \lambda_0) NA < 1$, únicamente un modo es permitido (el caso $m=0$), y la guía de onda es entonces una **guía de onda mono-modo**. Esto ocurre cuando la película que representa la guía de conducción es suficientemente delgada o la longitud de onda es lo suficientemente grande, y únicamente cuando se tiene una guía de onda simétrica. La guía de onda en un dieléctrico no tiene una longitud de onda de corte absoluta (o frecuencia de corte absoluta), hay al menos un modo TE, dado que el modo fundamental $m = 0$ siempre es permitido (en el caso de una guía de onda simétrica), sin embargo cada uno de los modos $m = 1, 2, \dots$ tiene su propia longitud de onda de corte.

El número de modos puede también ser escrito como una función de la frecuencia (ν),

$$m \doteq \frac{NA}{(c_0 / 2d)} \nu. \quad (2.17)$$

La relación se ilustra en la Figura II.8. m es incrementada en 1 en la medida que ν es incrementada por $(c_0 / 2d) / NA$. La expresión es idéntica para el número de modos TM.

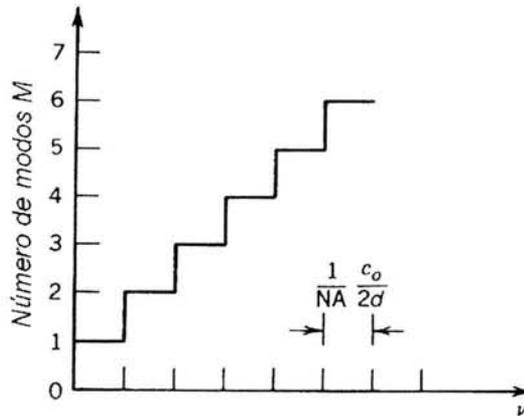


Figura II.8 Número de modos TE como función de la frecuencia.

II.3.2 Distribución de Campo

La interpretación de todos los tipos de ondas se puede hacer mediante una serie de ecuaciones armónicas. En este caso se utilizará una base de ellas que involucra las ondas planas TE y TM. Se determinarán las distribuciones de campo de los modos TE y el análisis es similar para los modos TM.

Campo Interno

El campo dentro de la guía de onda está compuesto de dos ondas planas (TE y TM) viajando a los ángulos θ_m y $-\theta_m$ con el eje z , las componentes de sus vectores de onda son $(0, \pm n_1 k_0 \sin \theta_m, n_1 k_0 \cos \theta_m)$. Tienen la misma amplitud y el mismo cambio de fase $m\pi$ al centro de la guía de onda (la mitad del correspondiente a un recorrido completo). La parte compleja de la amplitud del campo eléctrico es por lo tanto $E_x(y,z) = a_m u_m(y) \exp(-j\beta_m z)$, donde $\beta_m = n_1 k_0 \cos \theta_m$ es la constante de propagación, a_m es una constante,

$$u_m(y) \propto \begin{cases} \cos\left(\frac{2\pi \text{sen} \theta_m}{\lambda} y\right), m = 0, 2, 4, \dots \\ \text{sen}\left(\frac{2\pi \text{sen} \theta_m}{\lambda} y\right), m = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \quad -\frac{d}{2} \leq y \leq \frac{d}{2}, \quad (2.18)$$

y $\lambda = \lambda_0 / n_1$. Se debe notar que aunque el campo es armónico, éste no se extingue en la frontera de la guía de onda. En la medida que m aumenta, $\text{sen} \theta_m$ se incrementa, así que los modos se alternan más rápidamente con respecto al eje y en cuanto mayor sea su orden.

Campo Externo

El campo externo se tiene que igualar al campo interno en todos los puntos de la frontera $y = \pm d/2$ (ver Figura II.9). Por lo tanto éste tiene que variar con el eje z de acuerdo a $\exp(-j\beta_m z)$. Sustituyendo $E_x(y, z) = a_m u_m(y) \exp(-j\beta_m z)$ en la ecuación de Helmholtz $(\nabla^2 + n^2 k_0^2) E_x(y, z) = 0$, obtenemos

$$\frac{d^2 u_m}{dy^2} - \gamma_m^2 u_m = 0, \quad (2.19)$$

donde

$$\gamma_m^2 = \beta_m^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (2.20)$$

dado que $\beta_m > n_2 k_0$ para modos guiados (ver Figura II.7), $\gamma_m^2 > 0$, así que la ec (2.19) se satisface por las funciones exponenciales $\exp(-\gamma_m y)$ y $\exp(\gamma_m y)$. Dado que el campo decrece fuera de la guía de onda, tenemos $\exp(-\gamma_m y)$ para el medio de transmisión superior y $\exp(\gamma_m y)$ para el medio de transmisión inferior,

$$u_m(y) \propto \begin{cases} \exp(-\gamma_m y), y > \frac{d}{2} \\ \exp(\gamma_m y), y < -\frac{d}{2} \end{cases} \quad (2.21)$$

El rango de esta decaída es conocido como **coeficiente de extinción** y la onda es conocida como **onda evanescente**. Sustituyendo $\beta_m = n_1 k_0 \cos \theta_m$ y $\cos \bar{\theta}_c = n_2/n_1$ en la ec (2.20), obtenemos

$$\text{Coeficiente de Extinción } \gamma_m = n_2 k_0 \left(\frac{\cos^2 \theta_m}{\cos^2 \theta_c} - 1 \right)^{1/2} \quad (2.22)$$

En la medida que el número de modo m aumenta, θ_m aumenta y γ_m disminuye. Por lo tanto los modos de mayor orden penetran a más profundidad tanto en la cubierta como en el sustrato.

Para determinar las constantes de proporcionalidad en (2.18) y (2.21), igualamos los campos interno y externo en $y = d/2$ y utilizamos la normalización

$$\int_{-\infty}^{\infty} u_m^2(y) dy = 1. \quad (2.23)$$

Esto nos da una expresión para $u_m(y)$ válida para todo y . Estas funciones están ilustradas en la Figura II.9. Además, todos los campos $u_m(y)$ son ortogonales,

$$\int_{-\infty}^{\infty} u_m(y) u_l(y) dy = 0, \quad l \neq m \quad (2.24)$$

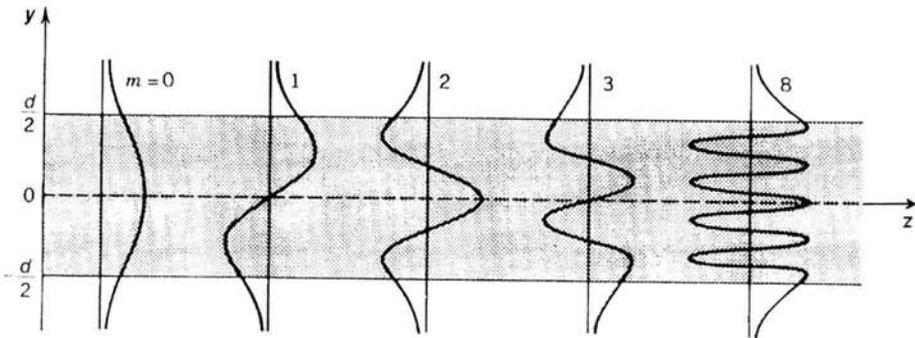


Figura II.9 Distribuciones de campo para modos TE guiados en una guía de onda dieléctrica.

Un campo TE arbitrario en la guía de onda dieléctrica puede ser escrito como una superposición de estos modos (es decir que los modos forman un perfil de los campos que se propagan en la guía):

$$E_x(y, z) = \sum_m a_m u_m(y) \exp(-j\beta_m z), \quad (2.25)$$

donde a_m es la amplitud del modo m .

Las distribuciones de campo de los modos TM son determinadas de manera similar (Figura II.3). Dado que estas distribuciones son paralelas a la frontera de la guía de onda, la componente z del campo eléctrico TM se comporta de manera similar a la componente x del campo eléctrico TE. El análisis puede comenzar obteniendo $E_z(y, z)$, y utilizando las propiedades de las componentes de las ondas TE y TM, se pueden determinar rápidamente las otras componentes $E_y(y, z)$ y $H_x(y, z)$. De manera alterna, las ecuaciones de Maxwell pueden ser utilizadas para determinar estos campos.

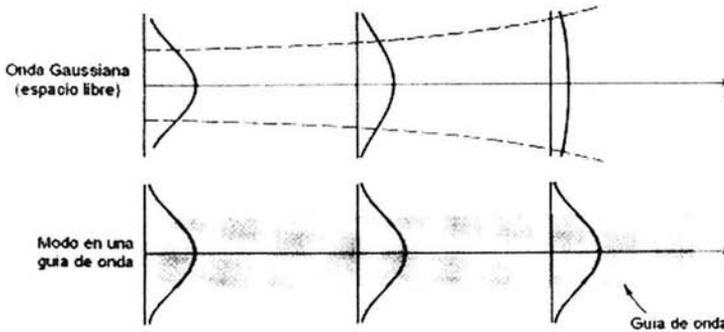


Figura II.10 Comparación entre una onda gaussiana en el espacio libre y un modo en una guía de onda

La distribución de campo del modo TE de menor orden ($m=0$) toma una forma similar a la onda Gaussiana. Sin embargo, a diferencia de la onda Gaussiana, la luz guiada no se propaga en la dirección transversal como ésta se propaga en la dirección axial. En una guía de onda la tendencia de la luz a la difracción es compensada por las características para el guiado que tiene el medio (Figura II.10).

II.4 GUÍAS DE ONDA CANAL

Las guías de onda planas revisadas anteriormente hacen el confinamiento de la luz en una dirección transversal (la dirección y) mientras ésta es guiada a lo largo de la dirección z . Las guías de onda canal confinan la luz en las dos direcciones transversales (las direcciones x y y). El principio de operación y la subyacente estructura modal de las guías de onda canal es básicamente la misma que las guías de onda planas; sólo que la descripción analítica en este caso únicamente puede realizarse por métodos numéricos. Esta sección es una breve descripción de la naturaleza de los modos en las guías de onda de dos dimensiones.

Guía de Onda Rectangular en un Dieléctrico

Por simplicidad, consideramos una guía de sección transversal cuadrada con ancho d e índice de refracción n_1 que se encuentra inmersa en un medio de índice de refracción ligeramente menor n_2 (esto equivaldría a una guía de onda canal enterrada). Los modos de la guía de onda pueden ser determinados de la siguiente manera, las componentes de los vectores de onda (k_x, k_y, k_z) deben satisfacer la condición $k_x^2 + k_y^2 \leq n_1^2 k_0^2 \sin^2 \bar{\theta}_c$, donde $\bar{\theta}_c = \cos^{-1}(n_2/n_1)$, así que k_x y k_y caen en el área mostrada en la Figura II.11. Los valores de k_x y k_y para los diferentes modos pueden ser obtenidos a partir de una condición de interferencia constructiva en la cual los cambios de fase en las fronteras del dieléctrico están incluidos, justo como se hizo en el caso anterior.

Obviamente, al tratarse de un dieléctrico donde las reflexiones internas no son al 100%, los puntos correspondientes a las componentes k_x y k_y no están espaciados uniformemente. Sin embargo, dos valores consecutivos de k_x (ó k_y) están separados por un valor aproximado a π/d . Por lo tanto, el número de modos puede ser aproximado contando el número de puntos en el interior del círculo del diagrama $k_x - k_y$ de la Figura II.11 asumiendo una separación promedio de π/d entre ellos.

El resultado es $m \approx (\pi/4)(n_1 k_0 \sin \bar{\theta}_c)^2 / (\pi/d)^2$, de donde

$$m \approx \frac{\pi}{4} \left(\frac{2d}{\lambda_0} \right)^2 NA^2, \quad (2.26)$$

con $NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ representando la apertura numérica. La aproximación es buena cuando m es grande. Existe también un número m idéntico de modos TM. Comparando esta expresión con aquella para las guías de onda planas $m \doteq (2d / \lambda_0) NA$ (ec 2.15), observamos que el incremento a dos dimensiones nos proporciona el cuadrado del número de modos aproximadamente. El número de modos es una medida que representa los grados de libertad, es decir que cuando añadimos una segunda dimensión lo que hacemos es simplemente multiplicar este número de grados de libertad.

Las distribuciones de campo asociadas con estos modos son generalizaciones de aquellas del caso de las guías de onda planas, y de la misma manera patrones tales como aquellos de la Figura II.9 son obtenidos en cada una de las direcciones x y y .

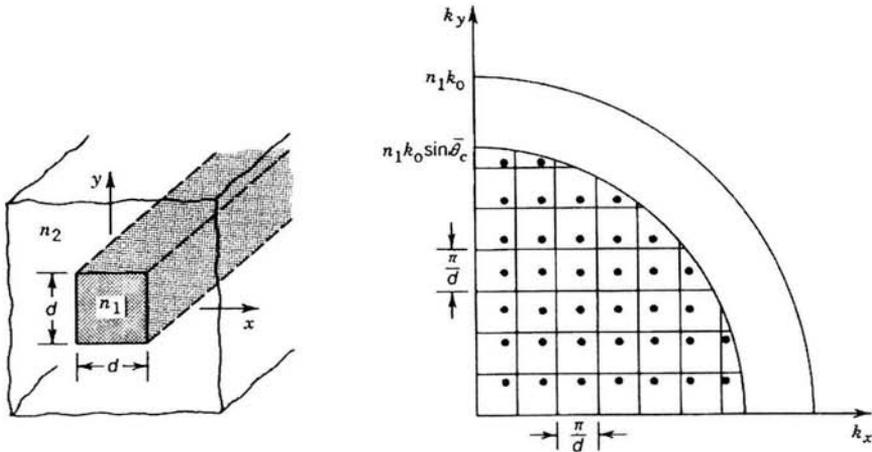


Figura II.11 Geometría de una guía de onda rectangular en un dieléctrico. Los valores de k_x y k_y para los modos de la guía de onda están marcados por puntos.

El análisis exacto para este tipo de guía de onda no es fácil por lo que frecuentemente se utilizan aproximaciones.

II.4.1 Configuraciones de las guías de onda canal

La guía de onda puede ser fabricada en diferentes configuraciones como se muestra en la Figura II.12. Inicialmente se tiene la guía de onda *recta* (a), que representa la forma más sencilla de transmitir información en dos puntos dados; la llamada *curva o doblez S* (b) es utilizada para compensar la propagación en el eje z ; la *unión Y* (c) actúa en la función de dividir o combinar un haz; dos *ramas Y* (d) pueden ser utilizadas para realizar un *interferómetro de Mach-Zehnder*; dos guías de onda en proximidad muy corta (e) o intersectadas (f), pueden intercambiar potencia y pueden ser utilizadas como acopladores direccionales.

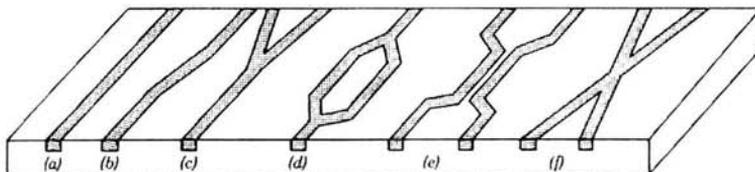


Figura II.12 Diferentes configuraciones para guías de onda canal: (a) recta; (b) curva S; (c) unión Y; (d) Mach-Zehnder; (e) acoplador direccional; (f) intersección.

Procesos de diferente índole han sido empleados para fabricar guías de onda en sustrato de vidrio. Estos pueden ser divididos en cinco principales categorías.

1. Depósito por bombardeo atómico (Sputtering)
2. Depósito por vapor químico
3. Recubrimiento de Sol Gel
4. Implante de iones
5. Intercambio iónico

A pesar de que las guías de onda han sido fabricadas utilizando cualquiera de los procesos citados anteriormente, el intercambio iónico es una técnica de gran interés para fabricar componentes de óptica integrada por su eficiencia y simplicidad. Por esta razón, en el siguiente capítulo se tratarán los aspectos fundamentales de esta técnica y se explicará el porque de su elección incluyendo también los elementos que se involucran en el proceso de fabricación.

II.5 CONCLUSIONES

En este capítulo se presentó a la guía de onda como elemento de base de la óptica integrada. Después de presentar sus principales geometrías se puede saber que aunque existen varias formas de ellas, la mejor manera de comprender sus propiedades es estudiando la más simple, la guía de onda plana. Es por ello que se hizo mayor énfasis en el análisis de las características de este tipo de guías de onda.

La intención de este capítulo es ayudar a la comprensión de la propagación de la luz en una guía de onda, por ello se consideró hacer referencia a aspectos relevantes para la guía como lo son: la propagación, el número de modos y la distribución de los campos.

Así mismo, se trataron de manera breve el caso de las guías de onda a dos dimensiones cuyo análisis de la propagación no es posible de manera analítica, sino por medio de métodos aproximados (métodos numéricos).

Los mismos puntos, que tienen que ver con la propagación y el número de modos, se trataron de manera breve para las guías de onda de dos dimensiones, pero estos parámetros son solo una parte de los elementos a considerar para nuestro proceso de fabricación y a medida que se avance en el documento, se abarcarán otras características.

Referencia

- [1] Saleh, Bahaa E. A. y Teich, Malvin Carl, "Fundamentals of Photonics", A Wiley Interscience Publication (Wiley series in pure and applied optics), 1991.

CAPÍTULO III

INTERCAMBIO IÓNICO EN EL VIDRIO

III.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo reciente en las guías de onda por intercambio iónico ha estimulado un interés significativo en la investigación y desarrollo de nuevos dispositivos ópticos integrados. El objetivo principal de esta Tesis de Licenciatura es obtener guías de bajas pérdidas ópticas mediante un proceso sencillo y de bajo costo. El proceso de intercambio iónico tiene un gran potencial para la fabricación de dispositivos ópticos integrados con muy buen funcionamiento. Desde la fabricación de la primera guía de onda por intercambio iónico en vidrio en 1972 [1], se ha hecho un progreso significativo en este campo, y del mismo modo han sido desarrollados diferentes procesos de fabricación.

Mediante la técnica del intercambio iónico se pueden conseguir propiedades mecánicas específicas en la superficie del sustrato de vidrio y aún algo más importante, crear en él una región de índice de refracción más alto para el confinamiento de la luz. Hoy en día, las guías de onda en vidrio son consideradas como elementos de base para aplicaciones en el procesamiento de señales ópticas precisamente en lo que respecta a las comunicaciones ópticas, sensores y otras áreas relativas; reemplazando en muchos casos a sistemas ópticos de volumen. Algunos componentes pasivos tales como divisores-sumadores de potencia, multiplexores y de-multiplexores en longitud de onda se han producido para un gran número de aplicaciones.

Siendo las guías de onda pasivas realizadas por la técnica del intercambio iónico el punto central en esta Tesis de Licenciatura, en este capítulo se dará un panorama general de esta técnica de fabricación y sus principales características.

III.2 EL VIDRIO

III.2.1 Antecedentes

Las últimas décadas representan el periodo en que, por un lado, se han obtenido los resultados más importantes para aumentar la comprensión de la estructura que compone al vidrio (porque hubieron descubrimientos que permitieron revelar su estructura microheterogénea) y, por otro lado, que a éste se le ha utilizado como base para la obtención de nuevos materiales (cerámicas basadas en vidrio, materiales de alta resistencia, entre otros) teniendo como consecuencia el hallazgo de nuevos campos de aplicación que son considerados los principales para su utilización y aprovechamiento [2].

Los intensos estudios sobre este material fueron enfocados a la modificación de las capas en su superficie para la producción de vidrios con varias aplicaciones. En este apartado, los investigadores pusieron especial atención precisamente al proceso del intercambio iónico, esto se basó en datos disponibles de minerales silicatos tanto naturales como sintéticos, así como en el resultado de estudios acerca de la naturaleza de la conductividad del vidrio.

Alguna información acerca de las propiedades del intercambio iónico del vidrio en sales fue obtenida del estudio de la electrólisis y la difusión de algunos iones provenientes de una sal fundida. Pero fue tan solo a finales de la década de los cincuentas que el proceso del intercambio iónico recibió una atención considerable. Esto fue debido al desarrollo de un método en el cual se consideran los esfuerzos generados en el vidrio como consecuencia del intercambio que permitió la realización de guías de onda.

Ahora entonces la historia del desarrollo de las nociones acerca del intercambio iónico en el vidrio es más evidente, dado el hecho de que encuentra aplicación práctica e incrementa la base de un método industrial.

III.2.2 Características del sustrato de vidrio

El intercambio iónico ha sido ampliamente estudiado con el propósito de endurecer o reforzar el vidrio en el pasado. Por los avances logrados en las comunicaciones por fibra óptica y el acelerado desarrollo de la óptica integrada en los últimos años, la utilidad de este proceso para la formación de guías de onda ópticas en vidrio ha llegado a ser objeto de un sin número de estudios. El proceso de intercambio iónico depende en gran medida de los materiales y condiciones utilizadas. Sólo cierto tipo de vidrios se pueden seleccionar para esta tarea y un número limitado de iones tienen las propiedades necesarias para participar en el intercambio.

Para propósitos concernientes a la formación de vidrios más resistentes, un ion de dimensiones relativamente grandes proveniente de una sal alcalina fundida es intercambiado con un ion más pequeño en el vidrio para producir un esfuerzo concentrado en la superficie del vidrio. El índice de refracción puede ser aumentado o disminuido como resultado de la combinación de dos efectos. El primero es relativo al tamaño de los iones de intercambio. Si un ion pequeño tal como el Li^+ reemplaza uno más grande como el Na^+ o el K^+ , la estructura del vidrio colapsará alrededor del ion pequeño intercambiado para producir una placa menos densa que usualmente tiene un índice de refracción más bajo. En oposición, si un ion de radio mayor reemplaza a uno de radio menor. La placa se expandirá a una estructura más densa dando lugar a un mayor índice de refracción.

El segundo efecto que conduce a un cambio en el índice de refracción, es la polarizabilidad electrónica de los iones de intercambio. Si un ion de mayor polarizabilidad electrónica tal como Tl^+ , Cs^+ , Ag^+ , Rb^+ o K^+ reemplaza a un ion de menor polarizabilidad tal como Na^+ , se originará un incremento en el índice de refracción, y viceversa.

La composición de algunos de éstos vidrios está listada en la Tabla III.1. Uno de los aspectos a tomar en cuenta para entender la estructura de un vidrio, es el estudio de la rigidez de su matriz de iones, en ese sentido observamos que para todos los vidrios listados a continuación, la sílice SiO_2 constituye el compuesto más abundante en la matriz y la unión más difícil de romper, los óxidos tales como Na_2O ó K_2O en cambio, están menos ligados a dicha matriz y pueden moverse a una temperatura más baja. Estos

óxidos son considerados impurezas en la estructura del vidrio y son por medio de los cuales se realiza el intercambio iónico.

Tabla III.1

Componentes del Vidrio y Temperatura de Transición Vitrea de Substratos Comúnmente Utilizados para el Intercambio Iónico

Porcentaje de contenido en óxido (%)	Soda Lime	Fisher Premium	Corning 0211	Schott BK7	Pyrex Corning 7740	Bausch y Lomb 2046
SiO ₂	71-74	72.2	65	69.6	81	67
Na ₂ O	13-15	14.3	7	8.4	4	25.6
K ₂ O	0.1-2	1.2	7	8.4	–	–
CaO	6-11	6.4	–	–	–	–
MgO	3-5	1.2	–	–	–	–
B ₂ O ₃	–	–	9	9.9	13	–
Al ₂ O ₃	0.1-1..2	1.2	2	–	2	7.4
BaO	–	–	–	2.5	–	–
ZnO	–	–	7	–	–	–
TiO ₂	–	–	3	–	–	–
T _{ann} (°C)	545-555	cercano a 550	550	547	565	507

De entre la gama de substratos útiles para el proceso en cuestión, se tratará un vidrio *soda lime* (que tiene un alto contenido de iones alcalinos pero baja calidad óptica) disponible con diversos fabricantes a muy bajo costo. El vidrio *soda lime*, es uno de los materiales más utilizados por su fácil manipulación en la manufactura en masa de objetos de uso cotidiano (ventanas, vasos, botellas, etc.). La clave de su éxito como un substrato para el intercambio iónico es su alta concentración en Sodio, los iones de Sodio se encuentran entre los más móviles en vidrios *silicatos* y por lo mismo, son fácilmente reemplazados en el proceso del intercambio iónico. Así mismo, la cantidad de pérdidas en la superficie es relativamente baja. Esto conduce a una superficie muy lisa, aunque no necesariamente plana (en términos de estándares ópticos). El límite de utilidad del vidrio *soda lime* en

aplicaciones con estrictos requerimientos llega con la presencia de impurezas metálicas (tales como óxidos de acero), los cuales entre otras cosas causan absorción óptica en volumen y por lo tanto, pérdidas considerables en las guías.

Así, el principal inconveniente del vidrio *soda lime* en la fabricación de dispositivos ópticos es la variación en su composición. Los fabricantes especifican parámetros típicos para el índice de refracción, birrefringencia y homogeneidad, por lo tanto éstos pueden cambiar de una muestra a otra. De la misma manera, los propios fabricantes pueden cambiar la fórmula del vidrio de un momento a otro, dando paso a características del intercambio iónico completamente diferentes. Tomando en cuenta lo anterior, se separaron los substratos de diferente lote para las muestras realizadas, obteniendo resultados diferentes en su caracterización como se muestra en el Capítulo IV.

III.2.3 Algunas ventajas de utilizar el vidrio en el proceso del intercambio iónico

El substrato de vidrio es un material muy interesante para la óptica integrada por su costo relativamente bajo, excelente transparencia, disponibilidad en grandes cantidades, el umbral para causarle daño de carácter óptico es elevado y además es muy rígido. También el substrato de vidrio es amorfo, lo que facilita producir componentes de manera indiferente en cuanto a su polarización. Por otro lado, el índice de refracción del vidrio utilizado en la óptica integrada (vidrio silicato o fosfato) es cercano a aquel de las fibras ópticas en sílice (que son de las más utilizadas) y como consecuencia las pérdidas por acoplamiento entre las guías de onda fabricadas en vidrio y la fibra óptica en sí, son pequeñas.

La utilización del substrato de vidrio para la fabricación de guías de onda presenta varias ventajas con respecto a otros materiales.

1. La buena transparencia de éste permite obtener guías con bajas pérdidas ópticas ($\ll 0.1$ dB/cm) en una gran banda espectral, desde el visible hasta el infrarrojo.
2. El índice de refracción, siendo muy cercano al de la fibra óptica hace más eficiente la utilización de este tipo de dispositivos en sistemas de fibra óptica, tanto para aplicaciones de comunicaciones, sensores, etc.

3. Al tratarse de un sustrato, se permite la utilización de procesos tecnológicos desarrollados para los semiconductores, como lo es la litografía.

Para guías de onda de alta calidad (pérdidas $\ll 0.1\text{dB/cm}$), es requerido un vidrio cuyos componentes sean adecuados para el intercambio. Algunos de los más utilizados son los borosilicatos de *Schott (BK7)* y *Corning (0211)*. Un alto contenido en sodio permite que el intercambio iónico se realice de manera sencilla y relativamente rápida. Los sustratos están disponibles en varias formas con al menos una cara pulida (cara lisa y plana) para lograr los estándares de calidad óptica. Este tipo de vidrio es por norma transparente en el rango de longitud de onda de los 400 a los 1700 nm.

El rango de temperaturas sobre el cual el intercambio debe tener lugar está limitado por los siguientes aspectos: el valor mínimo está sujeto al punto de fundición de las sales utilizadas y el máximo tiene que ver con la sensibilidad a la temperatura de los diversos componentes involucrados en el intercambio. Los vidrios que típicamente tienen múltiples componentes en su estructura se suavizan o debilitan en un punto cercano a los 700°C [3]. Se deforman por su propio peso a una temperatura que se conoce como de *Transición Vítrea* la cual puede encontrarse a partir de los 550°C (los fabricantes de estos vidrios advierten que si el vidrio es calentado a una temperatura igual o superior a la temperatura de *transición vítrea* menos 200°C, pueden ocurrir deformaciones en la precisión de las superficies al final del proceso y cambios insignificantes en el índice de refracción). Se ha encontrado que las temperaturas más adecuadas se tienen aproximadamente entre 40 y 60°C por encima del punto de fundición de la sal, asegurando así una movilidad adecuada de los iones durante la fundición al mismo tiempo que se evaden los problemas asociados con las altas temperaturas.

III.3 PRINCIPIO DEL INTERCAMBIO IÓNICO

III.3.1 Descripción del proceso del intercambio iónico

Este método consiste en la difusión de iones fuente, de mayor radio iónico o polarizabilidad eléctrica (coeficiente de refracción), con ciertas especies del sustrato. Este intercambio iónico modifica las propiedades ópticas del sustrato conduciendo a una

elevación del índice de refracción; entendiéndose que se presentan variaciones de la densidad y una generación de esfuerzos mecánicos del sustrato de manera local. Este proceso puede ser de origen puramente térmico, en donde el sustrato es sumergido en un baño de sal fundida [3]. En la figura III.1 se presenta el esquema de un sustrato después del intercambio iónico. La parte sombreada representa la capa de iones que fueron difundidos en la dirección y , esto daría lugar a una guía de onda plana.

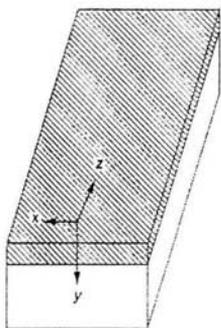


Figura III.1 Geometría de una guía de onda plana.

III.3.2 Fenómeno de difusión durante el proceso del intercambio iónico

La difusión es un fenómeno que caracteriza principalmente a los procesos térmicos. Un sustrato de vidrio que contiene iones de tipo A^+ (en nuestro caso Na^+) es sumergido en sal fundida que contiene iones químicamente similares llamados de tipo B^+ (K^+). En la interfase del vidrio y la sal fundida, ambas concentraciones de iones están inicialmente fijas (ver Figura III.2), pero repentinamente comienzan a mezclarse desde los límites muy cercanos a la misma interfase. Esto es claramente una situación en desequilibrio dado que los iones B^+ y A^+ están en una posición estable antes del intercambio tanto en la sal como en el vidrio. De esta manera, la agitación térmica en la interfase produce colisiones aleatorias en las cuales un ion B^+ reemplaza a uno A^+ y este proceso se difunde gradualmente más allá de la interfase. En la sal por supuesto, los iones A^+ se alejan mucho más rápido de la superficie (y 'se pierden' en lo que puede ser considerado una infinita reserva de iones B^+) que los iones B^+ en el vidrio, ya que estos últimos invaden lentamente una capa muy delgada cerca de la superficie del sustrato. El proceso se

acelera a altas temperaturas a causa de una agitación térmica más fuerte y también porque la estructura del vidrio, a través de la cual toman lugar estos movimientos de carácter 'iónico', es menos rígida.

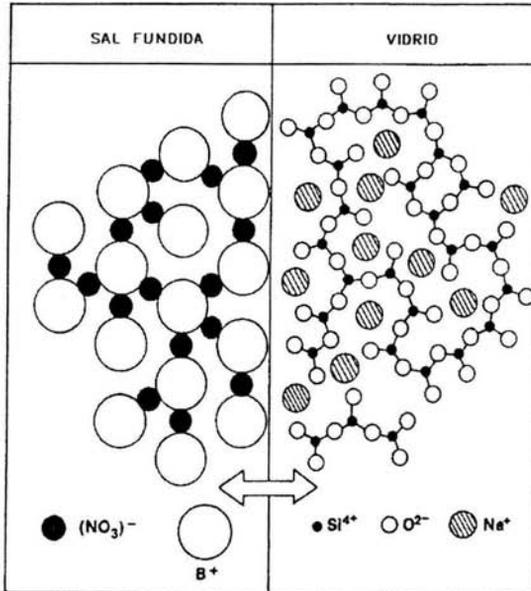


Figura III.2 Diagrama de la interfase sal fundida-vidrio (aquí $A^+ = Na^+$)

Cuando el vidrio es extraído de la sal, pero mantenido a una temperatura elevada, el intercambio continúa sin una nueva fuente de iones B^+ . El resultado es que los iones que penetraron recientemente en el vidrio, tenderán a redistribuirse por sí mismos para alcanzar el equilibrio (una concentración uniforme de ambos iones B^+ y A^+ por todo el sustrato) moviéndose hacia la profundidad del mismo sustrato acarreado un decremento en la concentración de la superficie. El proceso termina (o más bien llega a ser infinitamente lento) sólo cuando la fuente de calor es retirada y el sustrato llega a una temperatura muy por debajo de la temperatura de intercambio T_g . La temperatura de intercambio para este caso no debe exceder en mucho los 350°C porque un exceso de calor podría conducir a un daño en la superficie del sustrato debido a una descomposición de nitrato y una excesiva relajación térmica del vidrio. El perfil de concentración resultante tiene un máximo en la superficie y disminuye gradualmente hacia el interior del sustrato por la misma configuración y naturaleza del proceso.

La explicación típica para el cambio de índice resultante del intercambio iónico está basada en el hecho de que los iones participantes en él tienen diferente polarizabilidad electrónica y que éstos ocupan un volumen diferente en el vidrio. Cuantitativamente, se conoce un modelo para predecir el valor del cambio de índice que resulta de reemplazar un ion por otro en la composición del vidrio.

De inicio, el índice de refracción n es expresado en términos de la refracción por unidad de volumen:

$$n = 1 + \frac{R_0}{V_0} \quad (3.1)$$

donde R_0 es la refracción por mol de un átomo de oxígeno (R_0 está definido por esta ecuación y tiene las mismas unidades que V_0), y V_0 es el volumen de vidrio por mol de átomos de oxígeno.

El intercambio iónico entraña un cambio en la composición del vidrio y por lo tanto en los parámetros previamente definidos. La variación del índice de refracción Δn inducida en torno a estos parámetros, se puede evaluar entonces por medio de la ecuación (3.2).

$$\Delta n \cong \frac{\chi}{V_0} \left(\Delta R - \frac{R_0}{V_0} \Delta V \right) \quad (3.2)$$

Se puede observar de este modelo que existe una relación lineal entre la concentración de iones nuevos en el vidrio (expresada por el término χ) y el cambio en el índice de refracción.

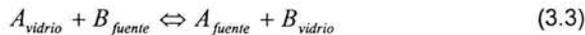
Este modelo para el índice de refracción se aplica muy bien para cuando se tienen cambios grandes en la composición, es decir, cambios considerables en el índice de refracción (como es el caso de $Ag^+ - Na^+$). Sin embargo, en el caso del intercambio iónico sobre capas delgadas en la superficie de sustratos mucho más gruesos (comparativamente hablando), otro fenómeno tiene que ser tomado en cuenta. No se puede permitir un cambio de volumen porque el sustrato rígido resiste fuertemente la tendencia a inclinarse o doblarse acomodando esta expansión o compresión local. En

lugar de eso, se desarrollan esfuerzos mecánicos y el valor de ΔV calculado previamente no es exacto. Se puede apreciar la magnitud de estos esfuerzos comparando la proporción del grosor de la capa intercambiada con respecto al grosor del sustrato. A esto se hará referencia posteriormente ya teniendo el caso particular del par de intercambio seleccionado $K^+ - Na^+$, que se justifica en la sección III.4 de este capítulo.

Un modelo de inter-difusión permite describir la evolución de la concentración de iones. Para obtenerlo, un gradiente de concentración es establecido entre los iones A^+ y B^+ y es posible interpretar el intercambio como una distribución de *Fick* entre dos medios separados por una membrana que simboliza la superficie del vidrio [4]. De hecho, el proceso de intercambio de iones se puede estudiar mediante dos etapas. La primera describe el intercambio de iones que se encuentran sobre la superficie y la segunda concierne la difusión de los iones intercambiados hacia la matriz vítrea.

A Intercambio de iones en la superficie del vidrio

El intercambio de iones A^+ y B^+ a través de la superficie del vidrio se efectúa según la reacción química (3.3)



La cinética de la reacción depende de la concentración de especies disponibles así como de la temperatura. Si esta reacción cinética es igual o más rápida que el fenómeno de difusión de los iones en el vidrio, se establece un equilibrio regido por la constante de la reacción K que vale:

$$K = \frac{C_A^{\text{fuente}} C_B^{\text{vidrio}}}{C_A^{\text{vidrio}} C_B^{\text{fuente}}} \quad (3.4)$$

donde C_I^x es la concentración de la especie I en el medio x .

El baño de sal al que es sometido el sustrato de vidrio para ser sometido al intercambio, es preparado con el propósito de que contenga una gran cantidad de iones B^+ y constituir así una fuente de concentración constante C_B^{fuente} durante el proceso. La cantidad de iones A^+ que penetran a la superficie del sustrato a causa del baño de sal, aunque ésta sea mínima, permite considerar igualmente la concentración de estos iones mediante el término C_A^{fuente} , y también es considerada una constante mientras ocurra la reacción. Si al

instante inicial, el vidrio no contiene algún ion dopante B^+ , suponemos que todos los iones A^+ son reemplazados por iones B^+ , la conservación o equilibrio de estos elementos en ese momento se representa como:

$$C_B^{\text{vidrio}}(t) + C_A^{\text{vidrio}}(t) = C_A^{\text{vidrio}}(0) \quad (3.5)$$

Es interesante el comportamiento de los iones dopantes B^+ , la concentración se mantiene constante durante el baño y es posible definir la fracción molar x_B de la sal por medio de:

$$x_B = \frac{C_B^{\text{fuente}}}{C_B^{\text{fuente}} + C_A^{\text{fuente}}} \quad (3.6)$$

De la misma manera, la concentración normalizada en la superficie del vidrio $c_{\text{superficie}}$, producida por la reacción (3.3), está definida por:

$$c_{\text{superficie}} = \frac{C_B^{\text{vidrio}}}{C_A^{\text{vidrio}}(0)} \quad (3.7)$$

Como consecuencia de las definiciones (3.6) y (3.7), la constante de equilibrio K de la reacción de intercambio, también se puede escribir como:

$$K = \frac{(1 - x_B)c_{\text{superficie}}}{x_B(1 - c_{\text{superficie}})} \quad (3.8)$$

Así mismo, la expresión de la concentración normalizada $c_{\text{superficie}}$ en los iones B^+ se representa:

$$c_{\text{superficie}} = \frac{Kx_B}{1 + x_B(K - 1)} \quad (3.9)$$

La ecuación (3.9) representa la concentración de dopantes en la superficie mediante los parámetros de la reacción de intercambio y que son: la temperatura, a través de la constante K , y la concentración de iones dopantes en la sal, a través de x_B . Si estos parámetros se mantienen fijos, la relación (3.9) indica que la concentración en iones dopantes de la superficie de vidrio $c_{\text{superficie}}$ es constante para cualquiera que sea la duración del intercambio.

B Inter-difusión a través del vidrio

La descripción del proceso de intercambio en la interfase descrito en el párrafo anterior, muestra que se establece un equilibrio a condición de que la cinética de este intercambio sea más rápida que los fenómenos de difusión. La concentración en iones dopantes $c_{\text{superficie}}$ se comporta como una fuente de iones constante en la superficie del vidrio y la

repartición de iones B^+ ya intercambiados en ésta, busca la homogeneidad intercambiándose con los siguientes iones A^+ en el substrato de vidrio, por lo tanto aparecen dos flujos opuestos de iones A^+ y B^+ creándose un gradiente de concentración.

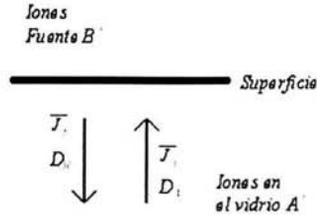


Figura III.3 Modelo de la difusión a través del vidrio. J_1 y D_1 representan el flujo y el coeficiente de difusión del ion 1 en el substrato de vidrio

No nos corresponde ahondar mucho en el análisis matemático de la difusión. Sin embargo, sí debemos entender que si relacionamos los parámetros de la figura III.3 con la concentración normalizada de iones B^+ a través del vidrio (definida por $c = C_B / C_A(0)$), con el coeficiente de Stewart ($\alpha = 1 - D_B / D_A$), y con la difusión de Fick, la cual indica que donde se tiene presencia de zonas de carga o de espacios a través del substrato, se crea un campo eléctrico interno \overline{E}_{int} , y que por ende es igualmente posible ajustar de manera voluntaria un campo eléctrico externo \overline{E}_{ext} con el fin de acelerar o de controlar la difusión, obtenemos una expresión para la variación de concentración de iones en función del tiempo que está definida por:

$$\frac{\partial c}{\partial t}(x, y, t) = D_B \Delta c(x, y, t) \quad (3.10)$$

La ley de la variación (3.10) acepta una solución analítica (3.11) considerando el problema en una dimensión y las condiciones en los límites de la difusión $c(0, t) = c_{superficie}$ y $c(\infty, t) = 0$.

$$c(x, t) = c_{superficie} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_B t}}\right) \quad (3.11)$$

En esta ecuación, **erfc es la función error complementario** definida por:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (3.12)$$

El perfil de valores obtenidos a partir de esta ecuación permite definir la profundidad efectiva de difusión de los iones dopantes B^+ como indica la ecuación (3.13)

$$d_{eff} = 2\sqrt{D_B t} \quad (3.13)$$

La influencia de α se visualiza mejor para intercambio iónico en una dimensión cuando no se aplica un campo externo. La Figura III.4 presenta una serie de perfiles de concentración simulados por diferentes valores del coeficiente de Stewart α [4]

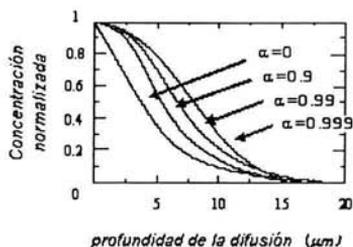


Figura III.4 Perfiles de concentración para diferentes valores de α , Aquí $D_B = 1 \mu\text{m}^2/\text{min}$ y $t=100 \text{ min}$

En la medida que α se incrementa a partir de cero, la forma de la solución se va transformando de un perfil de la función error complementario a una función escalón. Esto explica porque los procesos de intercambio iónico, permiten el mismo perfil en las diferencias del índice de refracción. El valor de α depende de los iones utilizados y la composición del sustrato de vidrio. En el vidrio soda lime por ejemplo, el intercambio de plata-sodio da lugar a un perfil parabólico ($\alpha \approx 0.5$), mientras que el intercambio de potasio-sodio tiende hacia el perfil de una onda Gaussiana ($\alpha \approx 0.9$).

Límites del modelo de difusión

La primera limitación concierne a la correlación entre las variaciones de concentración en el índice. Tenemos una ecuación empírica que asegura que el cambio en el índice es creado por un cambio de polarizabilidad y no por esfuerzos mecánicos importantes.

Tenemos otra limitación si decimos que, el proceso de intercambio iónico en la interfase es un fenómeno rápido con respecto a la difusión y que se establece un equilibrio en la superficie, esto implica una concentración constante en iones dopantes $c_{superficie}$ y a

consecuencia de esto, resulta evidente que este equilibrio es establecido en el caso de que los coeficientes de difusión D_A y D_B sean demasiado elevados.

Un tercer límite lo tenemos con respecto a las aproximaciones del fenómeno de difusión en sí. La descripción de este fenómeno supone que la estructura de la matriz vítrea es homogénea, lo que permite considerar que los coeficientes de difusión D_A y D_B son constantes, pero variaciones locales en la estructura pueden modificar en cierta manera la misma matriz involucrando intercambios de diversos iones.

III.3.3 Ventajas de la técnica del intercambio iónico

El proceso de intercambio iónico es adecuado para la fabricación de guías de onda por diversas razones:

- El proceso ofrece considerable flexibilidad en la elección de los parámetros de fabricación (el tiempo y la temperatura de intercambio así como la concentración de iones dopantes), por lo tanto, puede ser optimizado para una amplia variedad de aplicaciones.
- El proceso es simple y adecuado para llevarlo a la producción de altos volúmenes. Las guías de onda fabricadas son reproducibles y tienen bajas pérdidas de propagación.
- Se pueden realizar guías de onda con excelente compatibilidad a las fibras ópticas, minimizando por ende las pérdidas por acoplamiento.
- Las guías de onda fabricadas por esta técnica tienen una gran compatibilidad con otros materiales. Esto facilita considerablemente el uso de polímeros no lineales y de dispositivos hechos usando otros materiales como los detectores. De esta manera, se pueden lograr circuitos híbridos integrados con muy alto rendimiento.

III.4 ELECCIÓN DEL PAR DE INTERCAMBIO A UTILIZAR

En esta sección se tratará de cubrir con los aspectos más importantes requeridos para llevar a cabo el proceso de intercambio de acuerdo con las características de diferentes tipos de iones.

Los iones que permiten un incremento en el índice de refracción del vidrio cuando son intercambiados con iones Na^+ incluyen Li^+ , Cs^+ , Rb^+ , K^+ , Ag^+ y Tl^+ , las características generales del proceso del intercambio iónico asociado con cada uno de estos iones se muestran en la Tabla III.2 [5].

Tabla III.2
Parámetros Relevantes de los Principales Iones de Intercambio

Ion	Polarizabilidad Electrónica ($\lambda=D$) Å^3	Radio Iónico Å	Salas	Punto de Fundición $^{\circ}C$	Punto de Descomposición $^{\circ}C$	Incremento en el índice de refracción
Na^+	0.41	0.95	$NaNO_3$	307	380	—
Li^+	0.03	0.65	$LiNO_3$ ($LiSO_4$) (K_2SO_4) 0.8 0.2	264 524	600 —	- 0.01 - 0.015
Tl^+	5.2	1.49	$TlNO_3$ $TlSO_4$	206	430	0.1
Cs^+	3.34	1.65	$CsNO_3$	414	—	0.04
Ag^+	2.4	1.26	$AgNO_3$	212	444	0.1
Rb^+	1.98	1.49	$RbNO_3$	310	—	0.015
K^+	1.33	1.33	KNO_3	334	400	0.009

- Intercambio iónico $Li^+ \longleftrightarrow Na^+$

Como ya se ha mencionado, la sustitución de iones de Li^+ por iones de Na^+ dan como resultado un decremento en el índice de refracción, no por la polarizabilidad del Litio, sino por su menor tamaño iónico comparado a Na^+ , lo cual permite una estructura compactada más densamente. El incremento del índice es generalmente pequeño (< 0.015), haciéndolo adecuado para guías de onda mono-modo pero marginalmente aceptable para guías multimodo que obviamente requieran una apertura numérica mayor. La difusión de iones de Li^+ en el vidrio es rápida debido a su tamaño que es pequeño, esto hace al Litio atractivo para producir capas multimodo delgadas en tiempos razonablemente cortos. Sin embargo, las pérdidas en dichas capas son sujeto de cuestionamientos dado que es conocido que el colapso de la red de vidrio alrededor de los pequeños iones de Li^+ cerca

de la superficie a temperaturas por debajo de las temperaturas de transición del vidrio, dan como resultado deformaciones en la superficie y roturas a nivel microscópico causadas por tiempos de difusión prolongado.

- *Intercambio iónico Cs^+ , Rb^+ \longleftrightarrow Na^+*

Los iones de Cs^+ y Rb^+ pueden proveer un buen incremento en el índice de refracción cuando son intercambiados con iones de Na^+ debido a la ganancia en la polarizabilidad electrónica, como se indica en la Tabla III.2. La obtención de guías de onda planas producidas por el intercambio de Cs^+ - Na^+ se reportó en vidrio *soda lime* de una fuente de $CsNO_3$ a 520°C. Debido a su tamaño que es relativamente grande, Cs^+ se difunde lentamente en vidrios. Se tiene el dato de guías de onda de 8 μm de profundidad fabricadas en 37 horas a 520°C. Las guías así formadas tienen un incremento en el índice de refracción de 0.02 y pérdidas estimadas de 1 dB/cm. También se ha reportado la formación de guías de onda similares por el intercambio iónico de Rb^+ - Na^+ . El incremento en el índice de refracción en este caso es menor que aquel con Cs^+ (aproximadamente 0.015), éste es obtenido debido a la menor polarizabilidad electrónica del Rb^+ . No se tuvieron datos sobre los parámetros de procesamiento ni de las pérdidas. Ambos componentes Rb y Cs presentan peligrosas partículas y tóxicos considerables lo cual explica el limitado trabajo utilizando tales materiales.

- *Intercambio iónico Ag^+ \longleftrightarrow Na^+*

El intercambio iónico de Ag^+ - Na^+ es probablemente la técnica más explorada actualmente de intercambio iónico. Sin embargo, problemas considerables asociados con las pérdidas en las guías producidas por este método son un punto delicado porque los iones de Ag^+ pueden llegar a cristalizarse a nivel microscópico. Iones de Ag^+ de sal $AgNO_3$ se intercambian muy bien con iones de Na^+ en el vidrio incluso a bajas temperaturas, típicamente en el rango de 220 a 300°C. La fuerte inter difusión entre los iones de Na^+ y Ag^+ , acoplados con un incremento grande en el índice de refracción (típicamente 0.6 en vidrio *soda lime*, y 0.22 en vidrio *TiF6*) resulta en guías de onda altamente multimodales por periodos de difusión de pocas horas. Las pérdidas en tales guías de onda han sido relativamente altas (frecuentemente de varios dB/cm). El índice de refracción puede ser

ajustado por debajo del nivel de saturación diluyendo la sal de plata con sodio o sales de potasio. Menor concentración de plata, y por lo tanto menor Δn , usualmente también acarrea menores pérdidas.

- Intercambio iónico $K^+ \longleftrightarrow Na^+$

El potasio, es otro tipo de ion que se intercambia bien con el de sodio. Mientras que hace no muchos años el esfuerzo realizado para emplear el par de intercambio K^+-Na^+ para aplicaciones que requerían guías multimodales era limitado, esta técnica ha probado ser muy útil y prometedora para aplicaciones que requieren bajos valores en cuanto a la apertura numérica así como para operación con guías mono-modo. Los iones de K^+ se difunden en el vidrio a un ritmo moderado, más lento que la plata pero más rápido que el talio, y el coeficiente de difusión de una fuente de KNO_3 a $350^\circ C$ es aproximadamente $7 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Se aplicó exitosamente esta técnica para la fabricación de guías de onda planas inicialmente en sustratos de vidrio a $350^\circ C$ cuyos resultados se discutirán más adelante de manera más amplia.

- Intercambio iónico $Tl^+ \longleftrightarrow Na^+, K^+$

Los pares de intercambio Tl^+-Na^+ y Tl^+-K^+ han sido utilizados para producir barras de concentración de luz, guías de onda planas y bidimensionales, acopladores multimodales, entre otros componentes todos ellos en vidrio. Como se mostró en la Tabla III.3, Tl^+ tiene la polarizabilidad electrónica más grande entre los iones monovalentes, y por lo tanto permite un cambio en el índice de refracción grande cuando es intercambiado con iones de Na^+ o K^+ . Un cambio en el índice de 0.1 se ha observado y valores menores se han obtenido diluyendo el $TlNO_3$ con $NaNO_3$. Utilizando la técnica del intercambio iónico y subsecuentemente un segundo proceso de la misma naturaleza para reducir el índice en la superficie, se pueden formar excelentes guías de onda bidimensionales enterradas con un perfil cercano al circular y pérdidas relativamente bajas en periodos de duración larga en el intercambio. Para propósitos que requieran guías multimodo, esta técnica de guías enterradas prueba ser la más viable de entre aquellas que tienen que ver con intercambio iónico, debido a la capacidad para controlar el proceso inherente en la difusión lenta de

iones de Tl^+ , así como los excelentes resultados con respecto a las bajas pérdidas y la compatibilidad con las fibras ópticas.

El principal problema que limita el amplio uso de los iones de Tl^+ en el intercambio iónico es su alta toxicidad. Sin embargo, tomando las precauciones adecuadas y manteniendo la operación dentro de cámaras de gases tóxicos apropiadas de tal manera que se tengan condiciones controladas, los peligros pueden ser minimizados.

Resulta ilustrativo realizar un sumario de la información, éste se muestra en la Tabla III.3 [5] y en ella, están listadas las propiedades de los diversos componentes y son comparadas para los diferentes procesos discutidos.

De acuerdo a las ventajas y desventajas de cada uno de los casos anteriormente expuestos y con el propósito de esta Tesis de Licenciatura que es la fabricación de guías de onda de bajas pérdidas ópticas a bajo costo, **se decidió seleccionar el par de intercambio K^+Na^+** por las razones que se explican a continuación:

- Aunque el incremento en el índice de refracción es menor con respecto al intercambio iónico con Ag^+ y Tl^+ , la utilización de iones de K^+ se justifica en la facilidad que representa la utilización de sal fundida de KNO_3 , la ausencia de peligros al no ser una sustancia tóxica y el control que se tiene en el proceso al utilizarse tiempos de intercambio relativamente largos de varias horas; lo que facilita el control del proceso.
- Un aspecto que representa una de las mayores ventajas es que las pérdidas por propagación son bajas comparadas con las de un intercambio con Ag^+ . En el caso del Tl^+ se podrían obtener pérdidas bajas pero debido a su alta toxicidad, se requeriría una mayor infraestructura para realizarlo.
- Y finalmente, el hecho de que el intercambio K^+Na^+ sea factible en vidrios comerciales, nos da lugar a un Δn bajo pero también a considerar pérdidas relativamente bajas y además, algo significativo para nosotros que es el hecho de que el mismo par de intercambio permite un sistema simple de fabricación, fácil de implementar y accesible para el proyecto.

Tabla III.3
Comparación de Diversos Procesos de Intercambio Iónico

Ion Utilizado	Incremento en el índice Δn	Pérdidas en la guía de onda	Compatibilidad con vidrios comerciales	Viabilidad para la fabricación de capas enterradas con alta NA	Riesgos o dificultades en la fabricación
Li ⁺	~ - 0.01	> 1 dB/cm	escasa	escasa	no
Cs ⁺	~ 0.03	> 1 dB/cm	buena	posible	tóxico
Rb ⁺	~ 0.015	(altas ?)	buena	posible	flamable
Ag ⁺	~ 0.09	> 2 dB/cm	muy escasa	posible	no
K ⁺	~ 0.009	< 0.2 dB/cm	muy buena	escasa	no
Tl ⁺	~ 0.1	< 0.1 dB/cm	muy Buena	posible	tóxico

Ya con el par de intercambio seleccionado, retomamos el tema de los efectos de los esfuerzos generados, porque precisamente un caso donde estos son de importancia es el del intercambio iónico de K^+Na^+ en vidrio *soda lime*. Las ecuaciones dadas inicialmente en la sección III.3.2 para la difusión, predicen un cambio en el índice que es dos órdenes de magnitud más pequeños que los valores medidos sobre capas delgadas (en μm). Sin embargo, el intercambio sobre capas gruesas (en mm), permite que el valor de Δn predicho confirme que la falla del modelo es relativa a un efecto en la superficie asociado a los esfuerzos [3].

III.4.1 Esfuerzos

Se sabe que el cambio de índice y birrefringencia resultante del intercambio iónico K^+Na^+ en el vidrio son debidos principalmente a esfuerzos inducidos en la superficie.

Aunque estos esfuerzos para cuando se tiene intercambio iónico surgen del hecho que, a las bajas temperaturas a las que toma lugar el proceso (350-400°C para el potasio), el vidrio está muy por debajo de su punto de tensión o de ruptura (510°C) y que la superficie se previene de la expansión o compresión lateralmente a causa de la resistencia a doblarse del substrato; para cuestiones de esfuerzos es aún más determinante la

diferencia de radio iónico del K^+ con respecto a Na^+ . El cambio de volumen utilizado en la ecuación (3.2) es generalmente inexacto y en el caso más importante que es la expansión de volumen (los intercambios que dan como resultado decremento de volumen ocasionan capas frágiles o dañadas por los esfuerzos tensos inducidos), la única dirección de expansión libre es la que corresponde a la normal a la superficie y ocasiona una 'inflamación' en el vidrio. Un ejemplo de tal 'inflamación' es mostrado en la Figura III.5 como una discontinuidad de altura en los límites del área de intercambio.

Resulta importante hacer este apunte con respecto a los esfuerzos porque este efecto ha probado ser de carácter dominante en el caso del intercambio K^+-Na^+ .

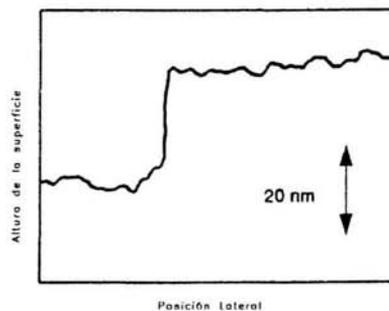


Figura III.5 Alta discontinuidad en los límites de una capa intercambiada, se muestra un incremento de volumen [3]

III.5 CONCLUSIONES

En el transcurso de este capítulo se analizó el proceso del intercambio iónico y la difusión para la fabricación de las guías de onda. Esto nos permitirá optimizar el proceso de fabricación mediante la caracterización experimental de las guías obtenidas.

La importancia de seleccionar el par de intercambio adecuado para el proceso de fabricación radica en que se pudo conocer la manera en que los esfuerzos producidos afectan en particular al par de intercambio K^+-Na^+ , cuyo criterio de selección se basó en

aspectos que involucran: bajas pérdidas, disponibilidad de los mismos iones de intercambio, ausencia de peligros tóxicos o radioactivos, entre otros.

Únicamente restaría encontrar las consideraciones y los elementos que envuelven el entorno de la etapa de fabricación e inmediatamente después iniciar con la parte experimental de la misma.

Referencias

- [1] Ramaswamy, R. V. y Srivastava, R., "Ion-Exchanged Glass Waveguides: A Review", *Journal of lightwave technology* vol. 6 (6) pp. 984-1001 (Junio, 1988).
- [2] Moiseev, V. V., "Ion Exchange and Constitution of Glass", *Journal of Non-Crystalline Solids* 42 pp. 589-600 (1980).
- [3] Najafi, S. Iraj, "Introduction to Glass Integrated Optics", Artech House (1992).
- [4] Ghibaudo, Elise, "Developpement D'un Duplexeur Large Bande Non-Resonnant en Optique Integree sur Verre", Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble, (Noviembre, 2003)
- [5] Findakly, T., "Glass Waveguides by Ion Exchange: A Review", *Optical Engineering* vol.24 (2) pp. 244-250 (Abril, 1985).

CAPÍTULO IV

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GUÍAS DE ONDA

IV.1 GUÍAS DE ONDA PLANAS.

IV.1.1 Montaje y fabricación de guías de onda planas por la técnica del intercambio iónico.

Lo que está descrito a continuación es un montaje básico que puede ser utilizado para una fabricación confiable de dispositivos experimentales y específicamente para fabricar las guías de onda del proyecto que trata este documento de Tesis. Por supuesto habría que considerar que para una producción en masa en un ambiente industrial se requerirían condiciones diferentes.

- **Equipo**

Básicamente, lo que se necesita es una mufla (horno) capaz de alcanzar de manera controlada temperaturas donde los iones lleguen a tener movilidad (200-500°C generalmente es suficiente), substratos de vidrio y sales. Los demás artículos que se necesitan están usualmente en existencia en la mayoría de los laboratorios químicos (solventes, batas, etc.)

- *Mufla, Recipiente, Sales*

Aunque es más conveniente utilizar una mufla con una cámara que sea accesible por la parte superior, la mufla *Felisa modelo 351D* que se utilizó para este proyecto, tal como se aprecia en la figura IV.1 tiene puerta lateral, por ello se realizaron diferentes arreglos para adecuar el proceso de intercambio. Podemos observar al nitrato de potasio (KNO_3) en la figura, el cual esquemáticamente se presenta como sal fundida, se encuentra en un vaso de precipitado y su temperatura es monitoreada todo el tiempo que dura el intercambio iónico. Se utiliza un termómetro digital auxiliar (cuya punta sensible es un termopar protegido con un tubo capilar) porque como se puede apreciar, el termómetro de la mufla puede no medir la temperatura real en la sal. El sustrato se muestra en reposo colocado en una canastilla de alambre de acero inoxidable y todo a su vez en un soporte de aluminio con el fin de que el mismo sustrato no sea contaminado con partículas de polvo de las resistencias cerámicas que forman las paredes de la mufla.

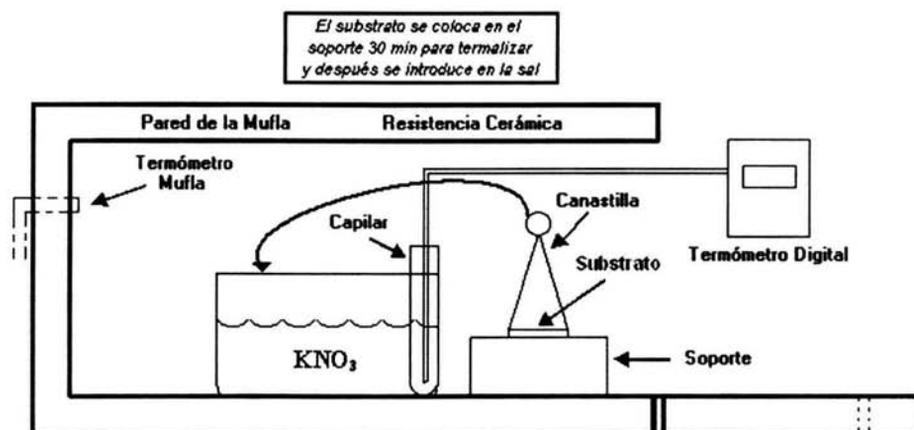


Figura IV.1 Sección transversal de la mufla y aparatos de control

Esta mufla es capaz de alcanzar los $1100^{\circ}C$ de temperatura. Por las razones anteriormente expuestas que tienen que ver con la movilidad de los iones, la mayoría de los iones utilizados en el trabajo del intercambio iónico son obtenidos de sales fundidas. En nuestro caso se utilizó el *Nitrato de Potasio* (KNO_3), que además es considerada una de las sales de la más alta pureza disponible, ésta simplemente es colocada en su estado

sólido dentro de un vaso de precipitado para que posteriormente llegue a su punto de fundición dentro del horno.

El hecho de que el proceso tenga lugar en un líquido (un volumen de aproximadamente 150ml en nuestro caso) previene cualquier problema por gradiente de temperatura que se presente a lo largo del sustrato (por las corrientes de convección que surgen ligeramente del calentamiento no uniforme).

A manera de mejorar el proceso de fabricación y permitiendo que éste se agilice para lograr poco a poco mayor seguridad al momento de fabricar las guías de onda, como se mencionó previamente se construyó un elemento auxiliar para la manipulación de los sustratos de vidrio, éste se implementó con alambre de acero inoxidable ya que, al tratarse de un dispositivo extra para usarse dentro del horno durante el proceso de intercambio, tenía que ser de un material que soportara temperaturas cercanas a los 350 °C. Este alambre debía cumplir ciertas características: tomar la forma y actuar a manera de 'canastilla' que sujetara la muestra, dar lugar para que el sustrato repose en una posición adecuada, y al mismo tiempo presionarlo lo suficiente para limitar su movimiento al momento de introducirlo o extraerlo de la sal fundida de manera más cómoda y rápida (como se ilustra en la Figura IV.1)

De no implementar la canastilla referida, la sal fundida podría solidificarse en un sólo bloque al momento de intentar sacar la muestra de la mufla, y entonces ésta además de permitir una buena sujeción del sustrato, impide que éste resbale y pueda romperse.

- *Aparatos de Control*

Un control de temperatura con resolución del orden de 1°C es el que provee a la mufla *Felisa 351D*, pero el termopar conectado al controlador está colocado al lado del recipiente cerca de las resistencias y puede no medir la temperatura en la sal exactamente. Para tener un trabajo de mayor precisión, se introdujo un termopar por separado y protegido por un tubo de vidrio o capilar en la sal, para otro controlador auxiliar (termómetro digital). La operación de la mufla consiste en programar primero la temperatura que se desea alcanzar, por lo que para conocer el funcionamiento de la mufla para largos periodos de

tiempo y conocer la temperatura real en la sal, ésta se monitoreó por periodos de media hora obteniendo los resultados mostrados en la Tabla IV.1.

Los aparatos de control en este caso que proporcionaron medidas de comparación fueron: el mismo termómetro de la mufla y un termopar auxiliar, ambos proporcionan la lectura en grados centígrados por medio de un display digital, pero el dispositivo auxiliar tiene la principal ventaja de poder colocar su detector en un punto que sí detecta la temperatura de la sal fundida (Figura IV.1).

En la tabla mencionada, se observa una variación que se consideró fue propia del periodo de estabilización de la mufla, pero ya con una lectura prácticamente estable y un ajuste en la programación, se encontró la temperatura buscada para realizar el intercambio iónico de las primeras muestras.

El control del tiempo no fue un problema de peso porque la duración de los procesos de intercambio va desde muchos minutos hasta varias horas. De esta manera, al tratarse de procesos de larga duración, se trataron de evitar los problemas por reproducibilidad que pueden ocurrir con procesos cortos porque el intercambio continua tanto tiempo como la alta temperatura permanezca. En el caso de un intercambio de poco tiempo el final del proceso es difícil de determinar y tampoco es posible refrescar el sustrato rápidamente (en menos de algunos segundos) sin dañarlo.

- *Consideraciones de Limpieza*

Un proceso de dos pasos para remover contaminantes orgánicos e inorgánicos fue suficiente. Ácidos y una sobre exposición a cualquiera de los agentes de limpieza, especialmente en baños ultrasónicos, pueden hacer más daño que bien.

Un proceso de limpieza que se realizó para los sustratos de vidrio, consistió en un lavado donde se utilizan dos tipos diferentes de jabón para quitar y eliminar la suciedad. El primero que intervino se llama jabón *Branson* y se utiliza con una gasa húmeda (para no rayar la muestra), quita las partículas más grandes y tal vez más adheridas al sustrato.

Tabla IV.1

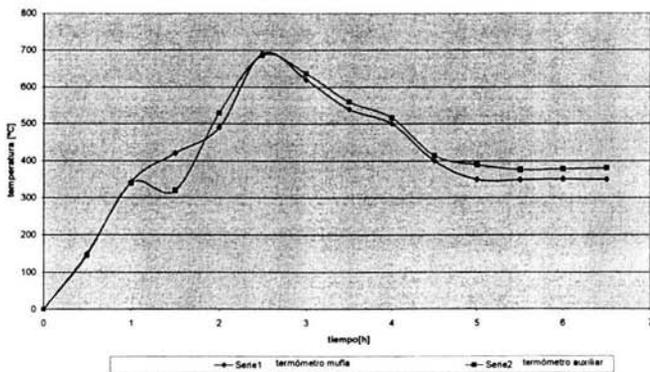
Monitoreo de la Mufla Felisa 351D por periodos de media hora

Para una temperatura programada de 350 °C

Termómetro de la Mufla	Termómetro Digital Auxiliar
0	0
150	145
343	339
420	320
490	530
690	685
620	636
540	560
500	516
400	414
350	389
349	376
351	378
350	380

Para una temperatura programada de 318 °C

322	352
315	345
319	350
318	349
319	350
318	350
318	350



Gráfica A. Monitoreo de la mufla Felisa 351D por periodos de media hora y programada a 350°C

Al terminar esta parte del proceso, se lava la placa de vidrio con agua des-ionizada ya que si se lavara con agua común de la llave, al secarse ésta, las sales y los diversos electrolitos que contiene quedarían en su superficie. Se tienen algunas muestras que no están tan contaminadas y con esta parte del proceso les basta para que lleguen a considerarse limpias y útiles para el propósito respectivo; sin embargo, la mayoría requiere del siguiente paso que es el introducirlas en una mezcla de una porción de jabón *Extran* por once porciones de agua des-ionizada durante aproximadamente cinco minutos a una temperatura cercana a los 50 °C, después de esta etapa se puede considerar que desaparecen de la placa las partículas que afectan el mencionado proceso de intercambio.

Para lograr los mejores resultados, no se deben dejar gotas de líquido sobre la superficie después de cualquiera de los procesos de limpieza, así que para secar el sustrato se empleó aire limpio comprimido.

IV.1.2 Secuencia del Proceso

Como se explicó anteriormente, el *Nitrato de Potasio* a temperatura ambiente, es colocado en el vaso de precipitado que es a su vez introducido en la mufla. El sustrato limpio también es colocado dentro de la mufla pero sobre el soporte para la termalización. Una vez que alcanza la temperatura deseada para el proceso y ésta es estable, el sustrato es sumergido en la sal y el tiempo de intercambio comienza a registrarse.

De esta manera se obtuvieron varias muestras de guías de onda planas a diferentes tiempos de intercambio que van desde las 6 a las 66 horas. El perfil del índice de refracción de estas muestras se caracterizó por medio del método de *m-lines* que se describirá a continuación, también se presentarán y analizarán los resultados mencionados.

IV.2 CARACTERIZACIÓN DEL INTERCAMBIO IÓNICO EN LAS GUÍAS DE ONDA PLANAS A TRAVÉS DEL PERFIL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN

Se realizó la medida del perfil del índice efectivo de una guía de onda plana para caracterizarla. El resultado del perfil en efecto, proporciona información esencial como la variación del índice máximo obtenido en la superficie del vidrio y su profundidad. Y a partir de estos datos, es posible obtener los coeficientes de difusión y de Stewart. Gracias a estos parámetros, se pueden determinar los tiempos de intercambio necesarios para la realización de guías de onda mono-modo o multi-modo. Así mismo, también se determinan las condiciones del intercambio (temperatura, concentración de iones en el baño de sal, naturaleza del sustrato de vidrio).

IV.2.1 Determinación del perfil del índice efectivo de las guías de onda planas fabricadas

Para la obtención del perfil del índice de refracción se necesita de dos etapas: primero se obtiene el índice efectivo para cada modo de la guía plana, a través del método de las líneas negras; y segundo, se determina el perfil del índice de refracción gracias al método de WKB inverso. Ambos métodos son tratados a continuación [1].

a. Método de líneas negras *m-lines*

El principio de este método radica en la reflexión total interna frustrada en la base de un prisma. La técnica de *m-lines* se utiliza comúnmente para determinar los parámetros ópticos de películas delgadas. La determinación del perfil del índice de refracción de las guías de onda planas fue medido mediante ésta técnica. Se comenzará por señalar la importancia de medir el índice de refracción y estudiar el concepto básico del acoplamiento por prisma dado que este último representa la base del concepto *m-lines*.

- **Acoplamiento por prisma**

El índice de refracción efectivo es un parámetro básico que caracteriza un modo guiado. Para un modo guiado de orden m , su índice de refracción efectivo está definido como:

$$N_m = \frac{\beta}{k} \quad (4.1)$$

donde β es la constante de propagación del modo guiado y $k = \lambda/2\pi$ es el número de onda en el espacio libre [2]. El acoplamiento por prisma es una de las técnicas utilizadas para medir el índice de refracción efectivo de un modo guiado en una guía de onda.

En esta técnica lo que se realiza es excitar la guía de onda mediante la igualación de fase entre el haz incidente y un modo guiado, para ello se utiliza un prisma con índice de refracción elevado. Este prisma con índice de refracción n_p es colocado a una proximidad máxima sobre una guía de onda con el objetivo de permitir sólo una delgada capa de aire (denotada por la letra S y denominada *gap* en inglés) de índice n_c entre ambos componentes, el espesor de esta delgada capa debe ser del orden de la longitud de onda del haz incidente tal como se muestra en la Figura IV.2.

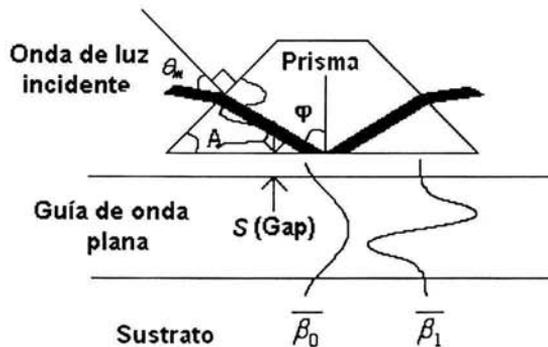


Figura IV.2 Acoplamiento por prisma

La onda de luz incidente penetra en el prisma a un ángulo θ con respecto a la normal al dioptra. En la base del prisma, la onda de luz forma un ángulo ϕ con respecto a la normal a la base. Este ángulo ϕ determina la velocidad de fase en la dirección z de la onda incidente tanto en el prisma como en la capa de aire entre el prisma y la guía de onda:

$$v_i = \frac{c}{n_p \text{sen} \phi} \quad (4.2)$$

donde c es la velocidad de la luz en el espacio libre. Un acoplamiento eficiente de luz dentro de la guía de onda ocurre sólo cuando se tiene el ángulo ϕ tal que v_i sea igual a la velocidad de fase v_m de uno de los modos guiados de la guía de onda ($m=0,1,2,\dots$) porque

$$v_m = \frac{c}{N_m} \quad (4.3)$$

el índice efectivo de refracción N_m del m -ésimo modo está determinado por

$$N_m = n_p \text{sen} \phi_m \quad (4.4)$$

Bajo esta condición, ϕ_m es mayor que el ángulo crítico de la reflexión total interna en la interfase prisma-aire. La luz es totalmente reflejada en la base del prisma por lo que se forma en éste una onda estacionaria. Así mismo, en la capa de aire se forma un campo evanescente como se muestra en la Figura IV.2, y éste interactúa con el campo evanescente del modo guiado dando como resultado el acoplamiento de la luz incidente al modo de la guía de onda.

En la ecuación (4.4), ϕ_m no puede ser medido directamente. Sin embargo, se puede referir fácilmente ϕ_m a θ_m el cual sí lo es [2]. Entonces, N_m está dado por:

$$N_m = n_p \text{sen} \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen} \theta_m}{n_p} \right) + A \right] \quad (4.5)$$

donde A es el ángulo medido en la base del prisma.

b. Método *WKB inverso*

Este método permite asociar a cada modo de una guía plana un gradiente de índice efectivo; éste representa un punto que es característico de la profundidad efectiva de la guía para cada uno de estos modos. Los resultados del método *WKB inverso* se obtienen a partir de aproximaciones con ayuda de métodos numéricos, y la combinación de estos con los resultados de las líneas negras, nos conduce al perfil del índice efectivo para el intercambio iónico; esto significa, variaciones del índice efectivo en función de la profundidad del sustrato. La única condición es que resulta necesario que la guía soporte al menos tres modos para que el método *WKB inverso* sea confiable.

c. Cálculo de la incertidumbre

La observación de las líneas negras implica una cierta imprecisión. En efecto, diversos factores pueden degradar el contraste y la definición de las líneas al momento de medirlas. Ciertas fallas son directamente atribuidas al montaje, como lo es por ejemplo

una focalización no óptima del punto de contacto en el arreglo prisma-guía de onda plana, o como también un error por mínimo que este sea en la lectura de la posición del goniómetro. Del mismo modo, se pueden tener impurezas en la superficie del vidrio para el punto de contacto donde se realiza la medición, ligeramente degradada por el intercambio. Todos estos aspectos conllevan a la imprecisión de cada medida y por consiguiente, a una imprecisión del perfil del índice final.

La incertidumbre de la medición del índice por el método de las líneas negras, puede ser evaluada analíticamente a partir de la ecuación (4.5). Los diferentes parámetros que pueden conducir a un error son respectivamente, el índice n_p del prisma a utilizar, la medición del ángulo θ_m de la línea negra de modo m , y el ángulo A de referencia del prisma (ángulo en la base del prisma como se muestra en la figura IV.2). Por lo tanto, la incertidumbre global Δn_m para la medida del índice efectivo n_m de modo m , se puede entonces obtener a partir de la fórmula en diferencias para la ecuación (4.5) [1].

$$\Delta n_m = \frac{\partial n_m}{\partial n_p} \Delta n_p + \frac{\partial n_m}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m + \frac{\partial n_m}{\partial A} \Delta A \quad (4.6)$$

Las incertidumbres ΔA , Δn_p y $\Delta \theta$ son una evaluación para la precisión en la lectura y los límites del banco óptico principalmente. A manera de simplificar los cálculos, las tres derivadas parciales se resumen en las ecuaciones siguientes:

$$\frac{\partial n_m}{\partial n_p} = \text{sen} \left(\text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen} \theta_m}{n_p} \right) + A \right) - \cos \left(\text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen} \theta_m}{n_p} \right) + A \right) \times \frac{\text{sen} \theta_m}{\sqrt{n_p^2 - \text{sen}^2 \theta_m}} \quad (4.7a)$$

$$\frac{\partial n_m}{\partial \theta_m} = \cos \left(\text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen} \theta_m}{n_p} \right) + A \right) \times \frac{\text{sen} \theta_m}{\sqrt{n_p^2 - \text{sen}^2 \theta_m}} \quad (4.7b)$$

$$\frac{\partial n_m}{\partial A} = n_p \cos \left(\text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen} \theta_m}{n_p} \right) + A \right) \quad (4.7c)$$

La utilización del método *WKB inverso* repercute en la incertidumbre del índice n_m con respecto al punto de profundidad del modo m . De esta manera, se pueden obtener los valores extremos $n_m \pm \Delta n_m$ de los índices de los modos para cada muestra.

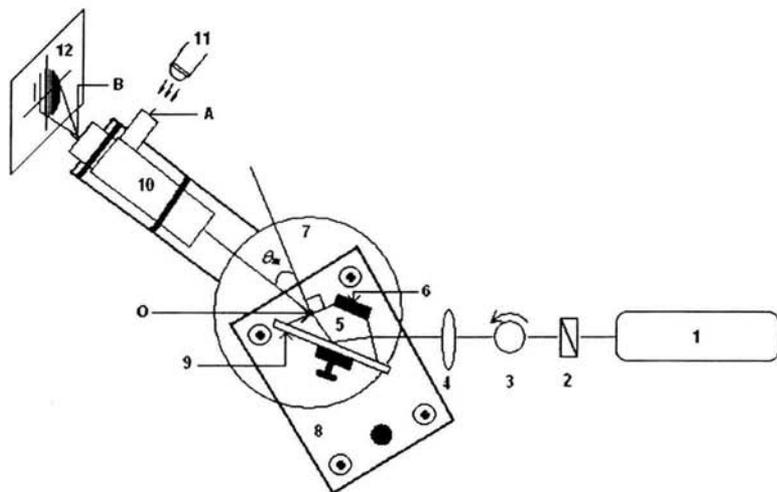
IV.2.2 Banco de medidas *m-lines*

Esta técnica de caracterización nos permite encontrar el número de modos que se pueden propagar, así como la manera en que estos se encuentran distribuidos en una guía de onda específica. Esto se explicará al abundar en el tema del fenómeno *m-lines*, pero antes de eso, se comenzará por entender la función de cada uno de los elementos del montaje. En la figura IV.3 se ilustra el banco de medidas *m-lines*. Se requiere de un prisma con alta calidad óptica con una base plana precisamente pulida.

Para ajustar la onda de entrada en ángulo y posición, la guía de onda y el prisma se montan sobre una platina micrométrica giratoria que, aunque convencionalmente tendría variación $xyz-\theta$, de acuerdo con la disponibilidad de equipo y material en el laboratorio, se observó que una manera conveniente de controlar los desplazamientos para nuestro caso era de la siguiente forma. El desplazamiento en las direcciones x,y se obtuvo colocando al arreglo guía de onda-prisma sobre una base elevada (Figura IV.3 elementos (5), (6) y (8)), la cual a su vez era sostenida con un poste colocado a una distancia relativamente lejana, su movimiento siempre fue independiente del movimiento de giro del micromanipulador en cuestión, en este caso dicho micromanipulador fue un goniómetro. La dirección z se ajustó ligeramente con tornillos colocados en las cuatro esquinas de la misma base, corrigiendo así las ligeras variaciones en altura para cada medición. De tal manera, al ser independiente el giro del goniómetro, éste únicamente manipuló la posición gradual de la lente colimadora, ayudando así a obtener los ángulos de interés para la onda de salida porque dicha lente fue siempre referida al eje de giro del mismo goniómetro.

La onda de entrada es transmitida a través de una lente cuya distancia focal debe ser aproximadamente de 15 centímetros. La señal se desacopla de la misma manera en que se acopló pero con efecto inverso, así que la onda de entrada se puede enfocar a cualquier punto de la base de este prisma siempre y cuando se permita que la señal de salida no interfiera con ningún objeto y el tamaño de la onda en este punto pueda llegar a ser de entre varias decenas hasta los cientos de micrómetros.

a)



b)

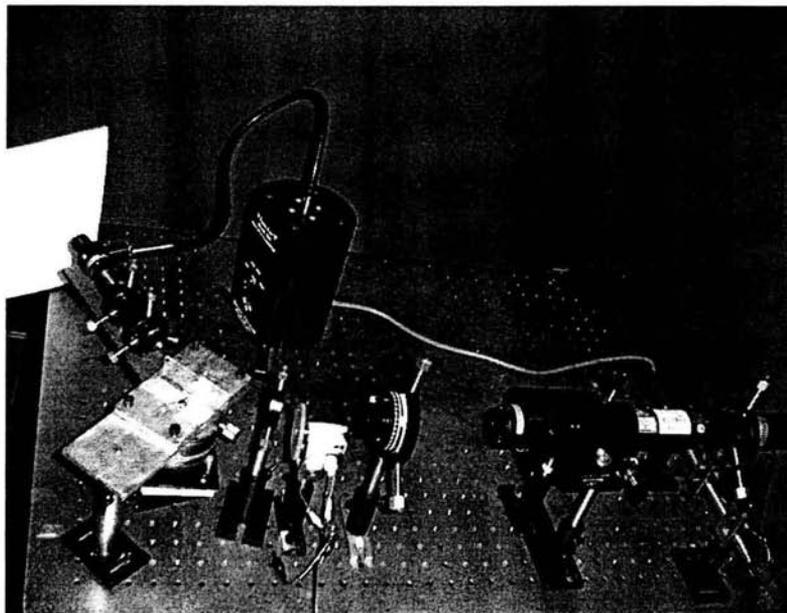


Figura IV.3 Banco de medidas m-lines. (1) Fuente de haz láser 632.8 nm; (2) polarizador; (3) filtro de luz; (4) lente; (5) prisma; (6) base con tornillo para el arreglo prisma-guía de onda; (7) goniómetro; (8) base elevada sostenida por un poste; (9) guía de onda plana; (10) lente colimador; (11) fuente de luz blanca; (12) m-lines; (A) entrada de luz blanca; (B) mirilla de la lente colimador.

Para maximizar la eficiencia de acoplamiento se necesita un ajuste extremadamente fino para la delgada capa de aire S [3]. Para realizar esto, se seleccionó un arreglo constituido por una base para el prisma y un tornillo de punta redondeada, como se puede observar en la figura IV.4. Antes de cualquier manipulación de los dispositivos, es importante limpiar perfectamente tanto la cara del sustrato de vidrio donde se intercambi6 el nitrato de potasio para obtener la guía de onda, así como la base del prisma, con papel 6ptico y alcohol. Después de esto, la cara de la base del prisma y la cara de la superficie de la guía de onda en la zona que se pretende caracterizar, se colocan frente a frente en el mecanismo con tornillo, la delgada capa de aire S existente entre el prisma y la guía de onda, va cambiando a través de una deformación elástica de la misma guía de onda al ir recibiendo presión desde el lado opuesto del sustrato, esto se realiza así para no tocar la guía de onda con el tornillo y es lo que se muestra en la figura IV.4.

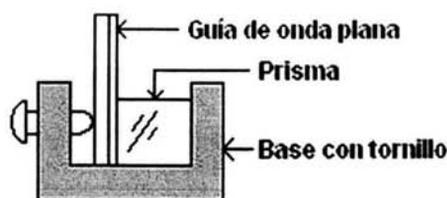


Figura IV.4 Perfil del arreglo prisma-guía de onda plana

En resumen, el prisma y la guía de onda plana tienen que ser limpiados lo suficiente, juntos y montados en su posición respectiva del mecanismo, con especial cuidado de evitar la contaminación con polvo. La proximidad entre ambos elementos para alcanzar una distancia S adecuada, más pequeña de $1 \mu\text{m}$ y del orden de la longitud de onda de la señal, es reconocida por la aparición de aros de interferencia ordinarios sobre la base del prisma.

En lo que respecta a la función que realizan los elementos restantes del montaje *m-lines*, restaría mencionar que el polarizador colocado en primera instancia, después de la fuente láser, es indispensable si lo que se pretende es obtener resultados para un solo tipo de polarización (TE ó TM). Por su parte, el dispositivo que está señalado como filtro de luz y elemento número 3 en el esquema de la figura IV.3, no es más que un disco de acrílico girando por medio de un motor de corriente directa y su función es disminuir la coherencia del láser. Esto lo hace filtrando el haz de luz a manera que el spot proyectado en la

pantalla (o en su caso en la retina del ojo si es que se coloca un atenuador en la salida del láser, y se observa a través de la mirilla de salida de la lente colimador), presente una mejor definición y facilite la identificación de las líneas negras. Ya se explicó, que la lente colocada antes del prisma tiene la función de adecuar el tamaño del diámetro del haz láser al momento de pasar por la base del prisma para obtener un acoplamiento óptimo en el punto de contacto. Ahora entonces, sólo resta la explicación del principio de funcionamiento de la lente colimadora.

Cabe mencionar, que uno de los principales propósitos hasta esta etapa fue la de conocer la función de cada uno de los elementos involucrados, teniendo siempre presente la importancia de hacer coincidir en un mismo punto del plano horizontal, el punto en el que el haz láser sale del prisma y el centro del goniómetro. Lo anterior es de suma importancia si se pretende obtener resultados confiables y al mismo tiempo, comparables con los obtenidos en un equipo especial. Se habla de un mismo punto en el plano horizontal porque los elementos involucrados están colocados a diferentes alturas. El punto al que se hace referencia está denotado con la letra O en el esquema de la figura IV.3, este esquema muestra precisamente a los elementos en el plano horizontal visto desde arriba.

A Uso del arreglo de colimación

Para entender el funcionamiento del arreglo de colimación, partimos del hecho que la señal es desacoplada de la guía de onda por el mismo prisma y, a partir de ahí, esta señal llamada de salida se hace pasar por la lente colimadora y como se aprecia en la figura IV.3, se coloca una pantalla al final del montaje para observar el spot de la misma.

La lente colimadora tiene dos funciones. La primera radica en encontrar la normal a la cara de salida del prisma por donde sale la señal desacoplada (la cara del prisma de la que se habla también se puede observar en la figura IV.3).

La fuente de luz blanca es transmitida desde la entrada A del encapsulado del arreglo de lentes colimador (como se aprecia en el esquema de la figura IV.5), hasta un divisor de haz, el cual es necesario porque en esta etapa, desvía una parte de la potencia de la misma luz hacia la cara de salida del prisma (la otra parte se pierde), cuando este último se encuentra ya fijo en su posición definitiva. La luz que realiza este recorrido, traspasa en

su camino recto hacia el prisma, una referencia en forma de cruz colocada a continuación del divisor de haz.

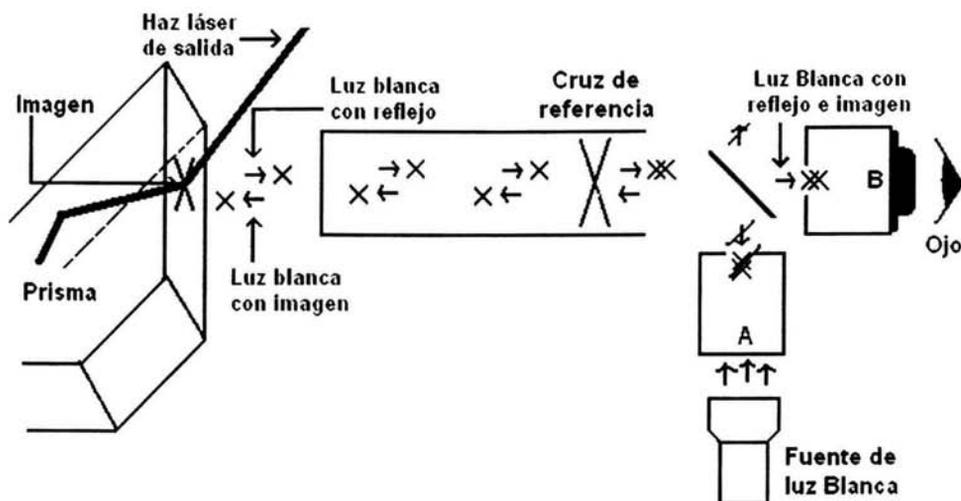


Figura IV.5 Principio de funcionamiento del arreglo colimador para encontrar la normal a la cara salida del haz láser en el prisma. (A) Entrada para la luz blanca; (B) mirilla de la lente colimador. El haz láser solo es mostrado como referencia en este esquema porque no está presente en el instante de medición.

Al llegar al prisma, la imagen obtenida a partir de la sombra de la cruz, es reflejada e ingresa nuevamente al arreglo de lentes para recorrer ahora la trayectoria en sentido contrario hasta el divisor de haz. La parte de información que nos interesa en este momento y después del divisor de haz, es la que sigue en camino recto hacia la mirilla del encapsulado. Por esta mirilla se podrá observar entonces una imagen que contiene tanto el reflejo de la cara del prisma (el cual a su vez contiene la sombra de la cruz reflejada), como la imagen de la cruz original, la cual se tendrá a la vista directamente.

La lente colimadora se puede desplazar en ángulo con respecto al centro del goniómetro (*punto O*). Obviamente, las referencias observadas por la mirilla y que están constituidas por la cruz original y su reflejo, cambiarán su distancia entre sí y éstas no convergerán en una sola imagen hasta que la cruz esté situada en posición perpendicular a la cara de salida del prisma, y al mismo tiempo nos proporcionará la posición de la normal a la misma cara (referida al *punto O*), sirviendo esto a su vez de referencia para obtener la posición angular de las líneas negras.

IV.2.3 Secuencia del proceso de caracterización

La secuencia del proceso de caracterización se describe a continuación:

1. El proceso inicia limpiando cuidadosamente tanto la superficie de la guía de onda plana a caracterizar, como la cara de la base del prisma con ayuda de alcohol y papel óptico.
2. Se coloca el prisma y la guía de onda plana a caracterizar en su base con tornillo, y se excita la guía con la fuente láser por medio del acoplamiento por prisma. Esto se realiza cuidando que la parte reflejada del haz láser, atraviese la cara de salida del prisma en el *punto O* que coincide con el centro del goniómetro. Al mismo tiempo, se debe cuidar también que en el spot proyectado en la pantalla se visualicen todos, o la mayor parte de los modos propagados.
3. A continuación, se apaga la fuente de luz láser y se enciende la luz blanca que funciona con la lente colimadora, todo sin mover el arreglo prisma-guía de onda, para ajustar la posición de esta lente y encontrar así la normal a la cara de salida del prisma en el *punto O*, esto último con ayuda del brazo que sostiene dicha lente a partir del eje de giro del goniómetro. Se mide entonces, el ángulo que corresponde a la normal.
4. Se apaga ahora la fuente de luz blanca y se enciende nuevamente el haz láser. Como la guía de onda a caracterizar y el prisma ya se encuentran en posición tal que su haz de salida proyecta en la pantalla el spot con líneas negras, se toma como referencia la normal a la cara del prisma, medida en el paso anterior, y se prosigue a girar el goniómetro que conduce a la lente colimadora para que la proyección de la cruz de referencia que tiene esta lente en su interior, y que también llega a la pantalla en forma de sombra ahora producida por el haz láser (figura IV.6), nos proporcione las medidas de los diferentes ángulos con respecto a la normal, correspondientes a cada modo guiado. Se toma la lectura del ángulo correspondiente a la posición de cada línea negra.
5. Tomando la diferencia del ángulo de la normal y el de cada línea negra, se obtiene el ángulo absoluto θ_m .

La figura IV.6 muestra de cerca el spot de la onda de salida proyectado en la pantalla para una guía de onda plana de tres modos. Este patrón es conocido como *m-line*, dado que

son líneas las que aparecen en la dirección que corresponde al modo excitado de orden m . Es por ello que van apareciendo más líneas conforme más amplio es el espesor del núcleo de la guía de onda plana, de la misma manera que el espesor es más amplio conforme más tiempo dure el intercambio iónico en la muestra.

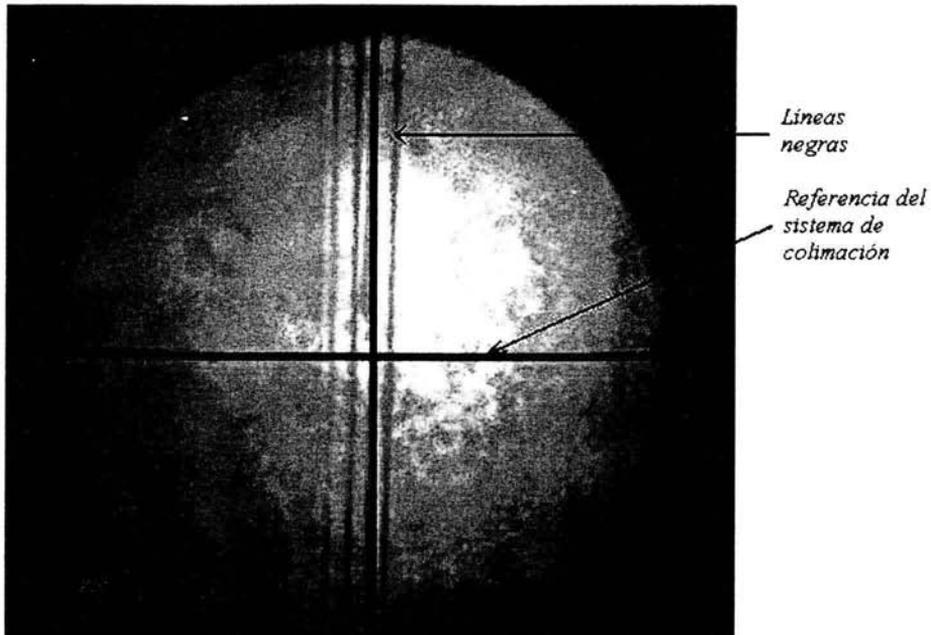


Figura IV.6 Imagen proyectada para una guía de onda plana de tres modos.

Al ajustar el ángulo y la posición del haz de entrada, un determinado modo guiado es excitado de manera seleccionable. Esto debe ser hecho inicialmente con un grosor relativamente grande de la capa de aire S . En muchos casos, la excitación de una onda guiada se detecta fácilmente con un rayo propagado en el sustrato a partir del punto de acoplamiento en la base del prisma, el cual es resultado de la dispersión en la onda guiada. Sin embargo, se sabe que en guías de onda con bajas pérdidas y alta calidad óptica, la dispersión es pequeña y por lo tanto, este rayo es observado de manera más nítida.

IV.2.4 Ventajas y desventajas

El método de acoplamiento por prisma descrito previamente ofrece las siguientes ventajas [3]:

1. Una alta eficiencia (aproximadamente 80 por ciento y 100 por ciento para los acoplamientos de entrada y de salida respectivamente) es factible bajo condiciones óptimas.
2. Cualquiera de los modos guiados puede ser excitado de manera selectiva.
3. Este método puede ser aplicado para caracterizar tanto guías de onda canal como guías de onda planas.
4. El prisma es desmontable, por lo que el acoplamiento puede ser ajustado en el transcurso del experimento.

El método de *m-lines* es más ampliamente utilizado de manera conveniente para experimentos que involucran circuitos ópticos integrados. Sin embargo, éste tiene algunas desventajas también a considerar:

1. El ajuste necesario del punto de contacto entre el prisma y la guía de onda, con la posición donde se enfocó la onda de entrada en la base del prisma, es muy crítica y por lo tanto, la estabilidad es pobre.
2. Se requiere de un prisma costoso por su alta precisión y su alto índice de refracción, así como de un mecanismo de ajuste.
3. La caracterización de guías de onda enterradas, guías de onda fabricadas con materiales de alto índice de refracción y guías de onda fabricadas con materiales suaves, no siempre es posible con este método.

Aunque esta técnica de *m-lines* funcionó muy bien para caracterizar las muestras obtenidas en esta tesis, estos inconvenientes pueden limitar su aplicación práctica en circuitos de óptica integrada completos.

Los ángulos medidos proporcionaron resultados que fueron graficados con ayuda de un programa *m-lines*, obteniendo así el índice de refracción efectivo de las diversas muestras fabricadas de acuerdo a la ecuación (4.5), así como la profundidad de la capa intercambiada con ayuda del método *WKB inverso* gracias a aproximaciones numéricas.

IV.2.5 Resultados y gráficas para la caracterización del intercambio iónico $K^+ - Na^+$ en guías de onda planas

Para explicar los resultados obtenidos en la fabricación de las guías de onda planas, primeramente se clasificarán las muestras de acuerdo a su naturaleza. Para ello habría que recordar que, para caracterizar al intercambio iónico en cualquier sustrato de vidrio, debe repetirse el proceso con sustratos que pertenezcan al mismo lote (misma fecha de fabricación de un mismo fabricante). En este sentido, se caracterizaron 2 lotes con 4 muestras de guías de onda planas cada uno.

Se caracterizó el perfil del índice efectivo de las guías de onda planas fabricadas con sustrato de vidrio *soda lime*, y a continuación se presentan los datos del total de las muestras caracterizadas en el primer lote. Se proseguirá a la discusión de sus resultados y posteriormente se pasará a la presentación del segundo lote.

- **Pruebas realizadas**

- Lo primero que se realizó fue el tratar de manera separada tanto los resultados correspondientes a la polarización transversal eléctrica (TE), como los correspondientes a la polarización transversal magnética (TM).
- Para obtener una mayor confianza en los resultados, cada una de las muestras fue objeto de 6 eventos de medición en el montaje *m-lines* de la manera siguiente:
 1. Tres mediciones de los ángulos correspondientes a las líneas del "spot" respectivo para cuando se tiene un acoplamiento por prisma en un mismo punto de contacto. Esto nos proporcionaría la repetibilidad del sistema de medición *m-lines*.
 2. Y tres mediciones independientes más, cada una en un punto de contacto diferente. Esto último, con el objetivo de obtener resultados sobre la homogeneidad de las guías de onda planas.

Cada uno de estos 6 eventos representa una familia de resultados y por lo tanto, se tienen 6 gráficas para cada muestra que fueron obtenidas gracias al programa *m-lines*. Este

programa básicamente permite obtener el perfil del índice de refracción de cada guía de onda plana con ayuda de la ecuación (4.5) y del método WKB inverso.

A. LOTE No.1

No muestra	Tiempo de intercambio
1	6 hrs
2	25 hrs
3	51 hrs
4	66 hrs

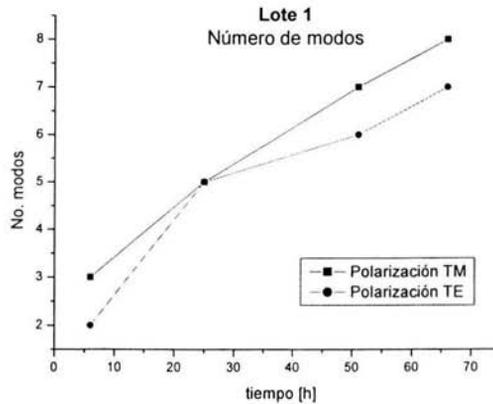
Recordemos que para que el método *m-lines* en combinación con el método *WKB inverso* sea confiable, en la guía de onda plana deben propagarse al menos 3 modos [1]. Es un hecho que se fabricaron varias muestras más de las que se presentaron anteriormente, pero todas ellas sirvieron como parámetros para optimizar el proceso y las que fueron seleccionadas para presentarse en este documento, son aquellas muestras con las mejores características.

- **Análisis general**

De una manera global, se analizaron las muestras por lote y por tipo de polarización (TE o TM), haciendo un análisis de resultados de la siguiente manera:

1. número de modos vs tiempo
2. índice de refracción de superficie (n_s) vs tiempo
3. profundidad (d) vs tiempo

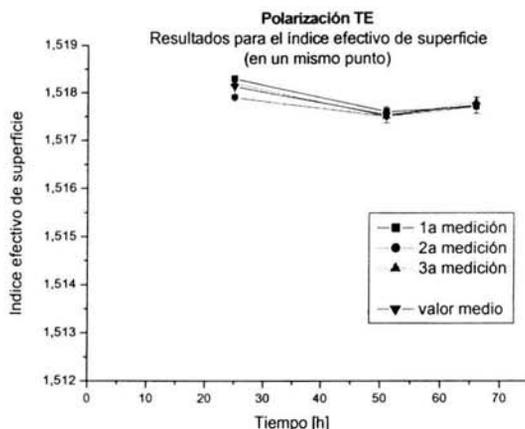
- Gráficas de los resultados



Gráfica 1. Número de modos en función del tiempo de intercambio para el lote 1

De la gráfica anterior se desprende lo siguiente:

- Para un tiempo de intercambio dado, siempre será igual o mayor en uno, el número de modos propagados en la polarización TM que en la polarización TE.
- El comportamiento para ambos tipos de polarización es muy similar entre sí, y a su vez tiende a la linealidad. Esto se visualiza mejor en la polarización TM donde la relación sería aproximadamente de un modo más cada 12 horas a partir de las 6 horas de intercambio.
- El método *WKB inverso* funciona en guías planas donde se propagan al menos 3 modos, por lo que para el caso particular de la muestra no.1 sometida a 6 horas de intercambio iónico, no se podría aplicar el método en la polarización TE.
- La utilidad de esta curva es que se podría consultar para predecir el tiempo de intercambio necesario, para un número de modos deseado.



Gráfica 2. Índice efectivo vs tiempo. Polarización TE en un mismo punto de contacto para el lote 1.

La gráfica anterior presenta resultados de las mediciones realizadas a 3 de las 4 muestras del lote 1 en las cuales se propagaron 3 o más modos para la polarización TE. Se obtuvo la incertidumbre de nuestro sistema de medición *m-lines* a partir de la ecuación (4.6) y ésta toma como referencia el valor medio de los tres valores obtenidos a cada muestra. Así mismo, los 3 eventos presentados corresponden a la repetición de medidas para cuando se excita a la guía plana en un mismo punto de contacto.

- Únicamente se manejan tres muestras dado que la muestra no.1, no alcanzó a permitir la propagación de un tercer modo para esta polarización durante las 6 horas de su intercambio.
- El índice de saturación de superficie es de $1.518 \pm 1.69 \times 10^{-4}$.

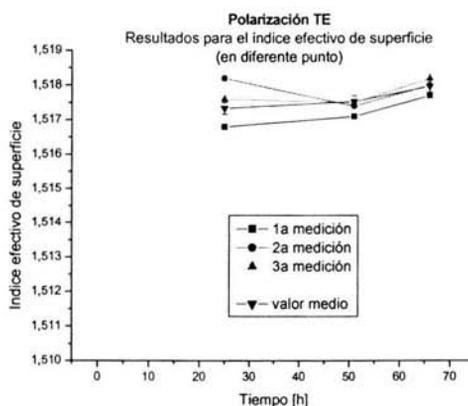
La incertidumbre del sistema se calculó como sigue de las ecuaciones (4.6) y (4.7):

$$\Delta n_m = \frac{\partial n_m}{\partial n_p} \Delta n_p + \frac{\partial n_m}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m + \frac{\partial n_m}{\partial A} \Delta A$$

donde: $n_p = 1.7151$, $\Delta n_p = 1 \times 10^{-4}$, $\theta_m =$ ángulo medido en el sistema con respecto a la normal al prisma, $\Delta \theta_m = 0^\circ 1' 0'' = 0.29 \times 10^{-3}$ rad, $A = 59^\circ 53' 18''$, $\Delta A = 0^\circ 0' 1'' = 4.84 \times 10^{-6}$ rad dando como resultado la incertidumbre del sistema igual a 1.69×10^{-4} .

- En lo que respecta a las muestras presentadas, se garantiza que a partir de un tiempo $t_i = 25$ horas, se obtiene siempre el índice efectivo de superficie de saturación (N_s sat), a reserva de experimentar con la fabricación de alguna de las muestras entre $t_0 = 6$ h y $t_i = 25$ h.
- La mayoría de los valores en esta gráfica caen dentro del rango de incertidumbre del montaje *m-lines* para cada muestra. Esto nos representa una reproducibilidad aceptable.

Para la misma polarización pero ahora con excitación en diferentes puntos de la guía tenemos:



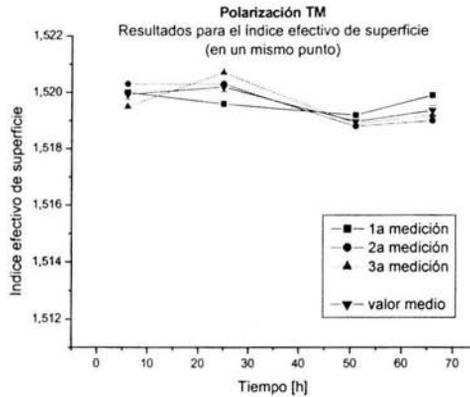
Grafica 3. Índice efectivo vs tiempo. Polarización TE en diferente punto de contacto.

En la gráfica 3, presentamos ahora resultados para la homogeneidad de las guías a partir de los otros 3 eventos realizados a cada una de las muestras en diferente punto de contacto. Estos resultados corresponden también a la polarización TE y se tendrá de hecho la misma incertidumbre en todos los casos porque se trata de la incertidumbre del sistema.

- En general, todas las muestras presentan una inhomogeneidad del orden de la incertidumbre en la medición.
- Sólo la muestra 2 (con 25 horas de intercambio) tiene una mayor inhomogeneidad tomando en cuenta que $\Delta n_s = 1.69 \times 10^{-4}$. La muestra 3 para un tiempo de intercambio

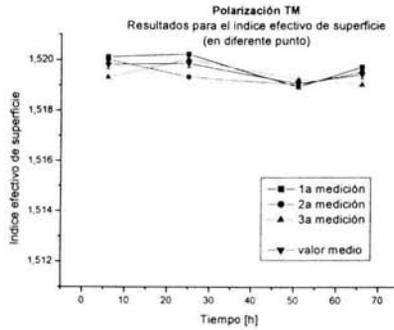
de 51 horas tiene una mayor inhomogeneidad ya que el valor del índice de superficie varió en 4×10^{-4} .

Pasando ahora a la polarización TM tenemos lo siguiente en cuanto al índice efectivo de superficie:



Grafica 4. Índice efectivo vs tiempo. Polarización TM en un mismo punto de contacto.

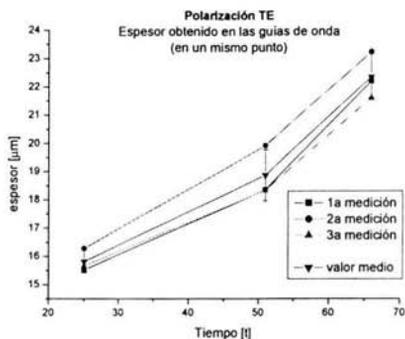
- El índice efectivo de superficie de saturación para polarización TM es aproximadamente igual a 1.52 y por lo tanto es mayor que para la polarización TE donde este valor correspondía a 1.518.
- El tiempo mínimo que se registró en este caso para alcanzar la saturación fue de 6 h.
- La diferencia en el punto de saturación entre las muestras con intercambio de pocas horas con respecto a las que tuvieron intercambio de muchas horas, es similar que para la polarización TE. Se alcanza un valor ligeramente mayor en las muestras de pocas horas.
- Se puede decir nuevamente que la diferencia de resultados en las medidas de la muestra 2 son las más grandes y esto se refleja en que los valores no caen dentro de la incertidumbre. Se concluye que es la peor de las muestras fabricadas con causas posibles ajenas al intercambio (suciedad en la superficie del substrato, mala manipulación al momento de termalizar o enfriar el mismo, entre otras)
- En contraparte, de nuevo la muestra 3 es la que presentó mejores resultados con valores que difieren un máximo de 4×10^{-4} nuevamente.



Gráfica 5. Índice efectivo vs tiempo. Polarización TM en diferente punto de contacto.

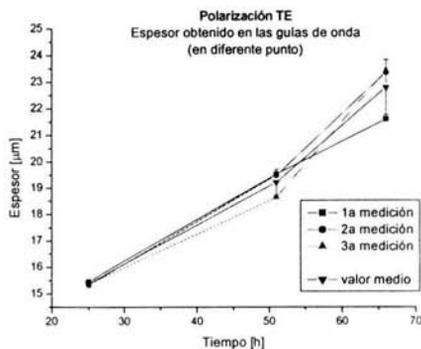
- En esta polarización se tendrían consideraciones similares que para los eventos realizados en un mismo punto.
- Algo diferente a señalar aquí es que para este caso, se evaluó una menor inhomogeneidad que en las mediciones realizadas para la polarización TE.

Para el caso de los parámetros de profundidad de las guías de onda planas en este lote se tiene lo siguiente, en un mismo punto y polarización TE tenemos:



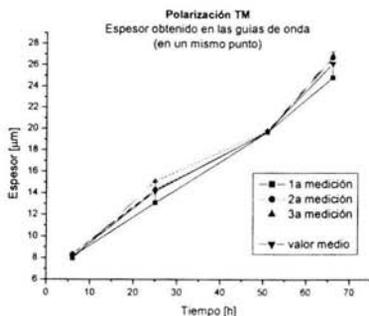
Gráfica 6. Profundidad vs tiempo. Polarización TE en un mismo punto de contacto.

- Por tratarse de la polarización TE, nuevamente se presentan sólo tres muestras.
- A mayor tiempo de intercambio se tiene mayor profundidad para la capa de las guías planas tal como se esperaba.
- La diferencia entre los resultados de los diferentes eventos de medición es aceptable, de acuerdo a la incertidumbre del montaje que en este caso fue tomada de manera estadística.
- El coeficiente de difusión del intercambio iónico se aproximó a un modelo lineal a partir de la ecuación (3.13), obteniendo el valor de $D_B = 1.46 \mu\text{m}^2/\text{h}$



Gráfica 7. Profundidad vs tiempo. Polarización TE en diferente punto de contacto.

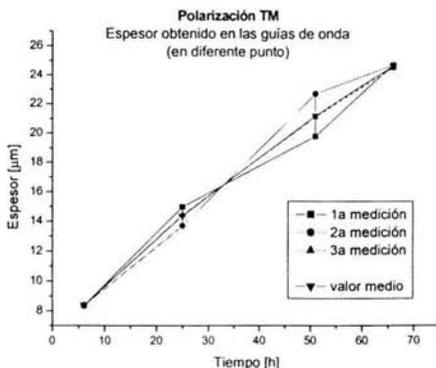
- La principal característica de esta gráfica la representa el hecho de que a mayor tiempo se someta la muestra al intercambio, mayor inhomogeneidad presenta la misma.



Gráfica 8. Profundidad vs tiempo. Polarización TM en un mismo punto de contacto.

- Para el caso de la polarización TM, la reproducibilidad en los resultados de la profundidad es mejor que para la medición en la polarización TE.
- Todos los resultados caen en el rango de incertidumbre que se obtiene ahora también de manera estadística.
- El coeficiente de difusión para este caso resultó ser de $D_B = 2.42 \mu\text{m}^2/\text{h}$

Finalmente tenemos los resultados de in-homogeneidad de las muestras de este lote para la polarización TM.



Gráfica 9. Profundidad vs tiempo. Polarización TM en diferente punto de contacto.

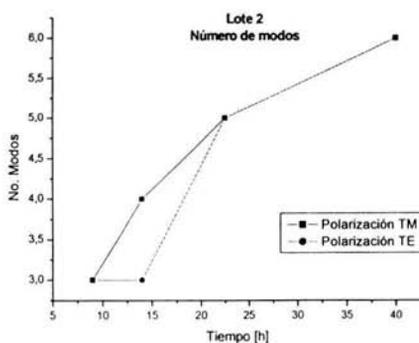
- En este caso, la in-homogeneidad también tiende a aumentar conforme lo hace el tiempo de intercambio, a excepción de la muestra no.4. En ese sentido la muestra más in-homogénea sería la muestra no.3

B. LOTE No.2

Inicialmente, lo que se pretendía hacer era fabricar más muestras del lote no.1 con el fin de reconocer mejor el punto de saturación del índice de superficie N_s para tiempos de intercambio diferentes de los que se tenían, pero al utilizar substratos de otra caja o lote, aunque fueron del mismo fabricante, se obtuvieron resultados diferentes. Estas 4 muestras más que se presentan a continuación:

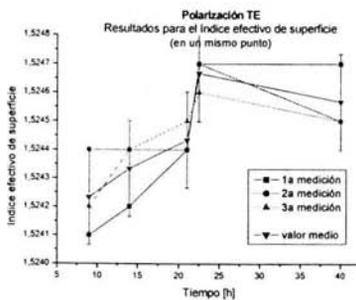
No muestra	Tiempo de intercambio
5	9 hrs
6	14 hrs
7	22.5 hrs
8	40 hrs

Dado que se pretenden analizar los mismos parámetros que para el lote 1, se hará mayor énfasis en los aspectos que caracterizan o marcan la diferencia de este lote con el anterior.

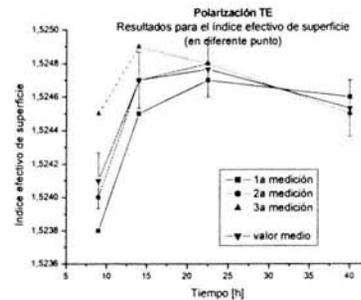


Gráfica 10. No. modos vs tiempo.

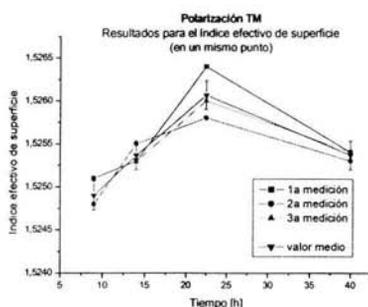
- De inicio se observa que el punto de saturación en el N_s para este lote es diferente. Esto confirma el hecho de que debían tratarse de manera separada ambos lotes.
- Se puede deducir que, si sometiéramos al intercambio iónico durante un mismo tiempo a una muestra del lote 1 y una del lote 2, la estructura del vidrio en esta última permitiría una mayor difusión de los iones de potasio a través del sustrato, lo que conduciría a una mayor profundidad de la guía de onda plana.
- Partiendo del hecho que se deben obtener muestras que logren propagar 3 modos o más para aplicar el método de *WKB inverso*, se fijó un tiempo de intercambio superior al $t_0 = 6$ h del lote anterior, el cual fue el tiempo mínimo de intercambio que había resultado en la fabricación para una muestra que propagara 3 modos.
- La evolución del número de modos con respecto al tiempo de intercambio, es muy similar a la del lote anterior. Ahora se tiene una relación de 1 modo más en la guía de onda cada 11 horas aproximadamente. Lo anterior es sólo una estimación dado que no se puede considerar que se alcanza la linealidad.



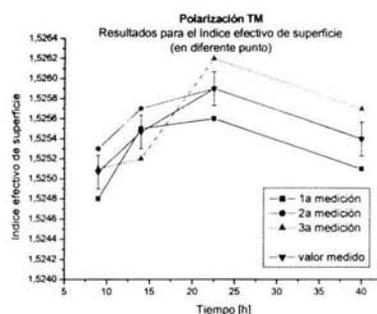
Gráfica 11. Índice efectivo vs tiempo para polarización TE en un mismo punto de contacto



Gráfica 12. Índice efectivo vs tiempo para polarización TE en diferente punto de contacto



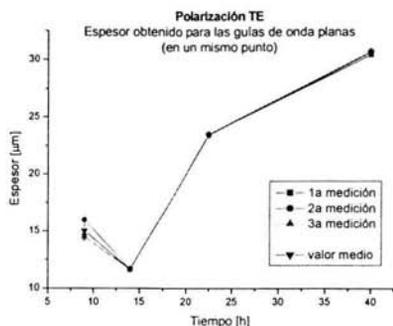
Gráfica 13. Índice efectivo vs tiempo para polarización TM en un mismo punto de contacto



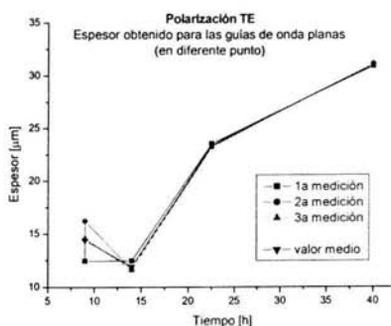
Gráfica 14. Índice efectivo vs tiempo para polarización TM en diferente punto de contacto

De las gráficas 11, 12, 13 y 14 se desprende lo siguiente:

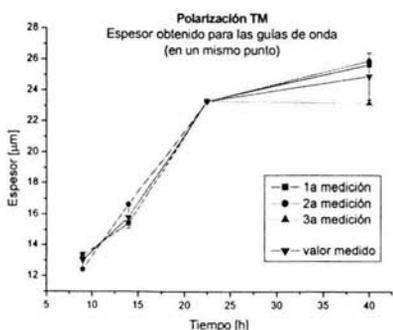
- Se confirma nuevamente que el índice efectivo de superficie de saturación cambia con respecto al lote anterior, y corresponde a un valor más grande.
- A su vez, N_s sat en la polarización TM es más elevado que en la polarización TE, igual que en el lote 1.
- La incertidumbre también es la misma que el lote anterior evidentemente porque se utilizó el mismo sistema de medición.
- La reproducibilidad en las mediciones con respecto al lote 1 es muy similar



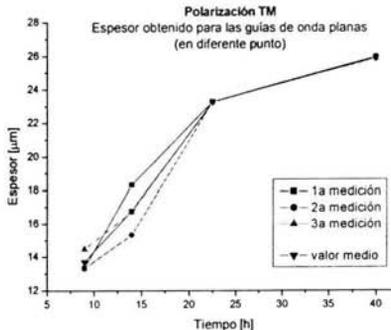
Gráfica 15. Profundidad vs tiempo para polarización TE en un mismo punto de contacto



Gráfica 16. Profundidad vs tiempo para polarización TE en diferente punto de contacto



Gráfica 17. Profundidad vs tiempo para polarización TM en un mismo punto de contacto



Gráfica 18. Profundidad vs tiempo para polarización TM en diferente punto de contacto

En lo que respecta a las gráficas 15, 16, 17 y 18, se concluyeron los siguientes aspectos:

- Estas gráficas que revelan la profundidad en las guías de onda planas para el lote 2, son consideradas simplemente las mejores en cuanto a reproducibilidad de resultados. Lo anterior a pesar de los resultados específicamente de la muestra 6 la cual fue sometida a un intercambio iónico de 14 horas. Nos referimos únicamente a la polarización TE, donde esta muestra presenta resultados que no van acorde con la naturaleza de la curva

graficada, ni con su propio comportamiento en las gráficas de la polarización TM dado que aquí, sí presenta resultados congruentes.

- Observando el número de modos que logra propagar esta muestra 6 en la polarización TE (sólo 3), el error lo atribuimos a que es muy probable que a pesar de que se sometió al intercambio iónico por un lapso de 14 horas, algún error en su proceso de fabricación, ya sea en la etapa de inmersión o extracción de la sal fundida, pudo originar que sólo se diera lugar a 2 modos de propagación en la guía, y al mismo tiempo, una mala apreciación en el spot de las líneas negras en la pantalla del montaje *m-lines* haya conducido a la falsa determinación que existe un tercer modo.

- Por otro lado, la discrepancia que presenta la muestra 8 (cuyo intercambio duró 40 horas) en la gráfica 17, no tiene nada que ver con lo explicado anteriormente para la muestra 6, dado que únicamente uno de los 3 eventos en la misma gráfica, presenta una discrepancia considerable. En las otras tres gráficas, esta misma muestra presenta resultados más precisos con respecto a la homogeneidad del total de las muestras.

- Precisamente la homogeneidad resultó mejor en este lote que en el anterior, reafirmando que se aprovecho considerablemente la experiencia en la fabricación de las guías de onda planas (con excepción insistimos, de la muestra 6).

- Los coeficientes de difusión en este lote correspondieron a los valores de: $D_B = 6.42 \mu\text{m}^2/\text{h}$ para la polarización TE, y de $D_B = 3.71 \mu\text{m}^2/\text{h}$ para la polarización TM. Estos resultados representan que el intercambio iónico en el lote 2 se lleva a cabo más rápido que en el lote 1. Se confirma así la consideración inicial, donde se planteaba que cada lote debía ser caracterizado por separado.

IV.3 GUÍAS DE ONDA CANAL

IV.3.1 Montaje y Fabricación de guías de onda canal

El intercambio iónico también modifica las propiedades ópticas y eléctricas en áreas seleccionadas de un sustrato de vidrio. Esta idea conlleva directamente al caso de las guías de onda de dos dimensiones o guías de onda canal. Las guías de onda canal son realizadas enmascarando parte del sustrato de manera previa a su inmersión en la sal. El material de la mascarilla obviamente no tiene que ser susceptible al ataque corrosivo de las sales comúnmente empleadas en el intercambio iónico y tiene que constituir un

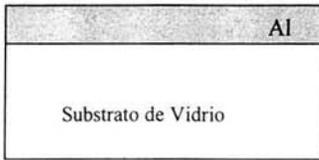
impermeable para el movimiento de iones bloqueando así el intercambio. Diversos materiales se utilizan para esta tarea pero una elección conveniente es el llamado '*Aluminio evaporado*' que tiene espesores superiores a 100 nm, aunque en algunos casos, son convenientes máscaras no metálicas. En el intercambio plata-sodio, los iones de plata se tienden reducir a plata metálica en las fronteras de las máscaras metálicas, incrementando las pérdidas por absorción de las guías de onda. En tales casos, material dieléctrico para el enmascaramiento puede ser utilizado, tan grande como sea necesario para que pueda tolerar el severo ambiente en la sal fundida. *Aluminio anodizado*, SiO_2 y Si_3N_4 han sido utilizados en este contexto. Sin embargo, es deseable dar paso a la capacidad de remover la máscara selectivamente (sin afectar la capa de vidrio que se encuentra abajo) después del término del proceso, para asegurar bajas pérdidas por propagación en la guía de onda [2].

El primer aspecto a considerar para la fabricación de estos componentes es la manera de limitar el área de intercambio y al mismo tiempo, dependiendo de la aplicación, marcar el camino o forma de las guías a obtener (como lo es un interferómetro de *Mach-Zender* por ejemplo). A final de cuentas, el procedimiento a seguir para proteger nuestro sustrato en la mayor parte de su superficie en un baño de sal y sólo permitir el intercambio iónico en un área seleccionada, recibe el nombre de *Litografía* y se describirá a continuación.

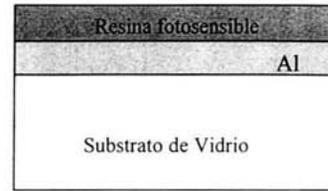
IV.3.2 Litografía

Debido a que los laboratorios del CCADET no cuentan con la tecnología para desarrollar el proceso de litografía adecuado en la fabricación de nuestro dispositivo, se dispuso de un sustrato cuya litografía se realizó en el laboratorio IMEP del Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, Francia (INPG), este proceso involucra diversos pasos a seguir, mismos que están ilustrados en la figura IV.7 así como explicados posteriormente de manera muy breve.

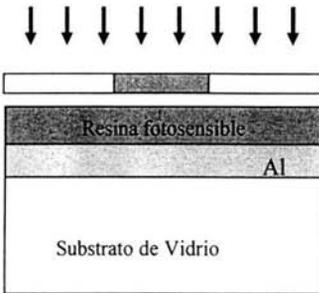
1. Capa mascarilla



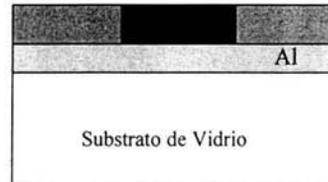
2. Depósito de resina



3. Exposición UV



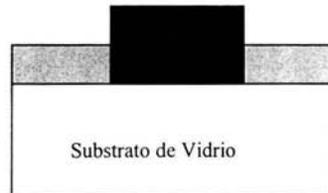
4. Revelado de resina



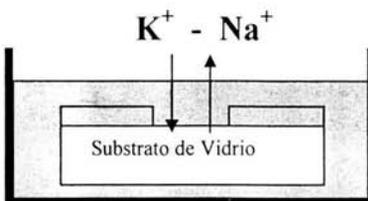
5. Grabado del Aluminio



6. Eliminación de resina



7. Intercambio iónico



Guía de Onda

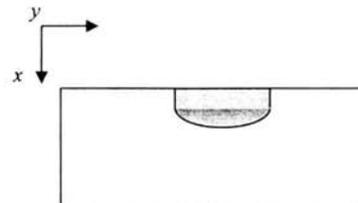


Figura IV.7 Proceso de Fotolitografía

El proceso inicia colocando una capa mascarilla de aluminio, esta mascarilla es depositada por el método de vaporización y así mismo constituirá la protección de la superficie del sustrato al final del proceso porque es en ella, donde se grabarán los datos del diseño de las muestras obtenidas; es decir, el grosor y el circuito que formarán las mismas.

Debido a que se debe obtener un grabado cuya exactitud involucre algunos micrómetros en el ancho de las guías canal, la forma de atacar al aluminio sólo en los lugares seleccionados es tomada con precaución, esto se previene depositando una resina fotosensible tal como se muestra en el segundo paso de la figura, el espesor de esta capa de resina también debe de ser uniforme por lo que ésta es depositada por medio de una máquina de centrifugado a velocidad constante.

Es en el tercer paso entonces donde la presencia de la resina toma importancia, esto porque la muestra con sus dos capas es expuesta a rayos ultravioleta y estos a su vez, están limitados por una plantilla previamente grabada con los datos del diseño, que es la parte que se pretende afectar, ahí comienza un cambio en la estructura química de los materiales.

Los siguientes pasos van de la mano hasta el final del proceso porque se realizan de manera continua casi de manera automática, ya sin la plantilla grabada, se lleva a cabo el revelado de la resina y esto se traduce en una acción de polimerización entre la misma resina y la capa de aluminio lo cual, no significa otra cosa más que una mezcla entre ambos elementos, y también que ahí concluye el cambio en su estructura química. Estos fenómenos están ilustrados en los pasos 4 y 5 de la Figura IV.7. El proceso de litografía concluye en el paso 6 cuando es removida la parte de resina sobrante colocando la muestra en acetona. De esta manera, se obtiene el sustrato con la o las guías impresas a obtener, y el proceso de intercambio iónico se lleva a cabo a continuación exactamente con el mismo equipo y de la misma manera que se realizó para las guías de onda planas.

IV.4 CARACTERIZACIÓN DE GUÍAS DE ONDA CANAL

A diferencia de las guías de onda planas, para caracterizar a las guías canal se utilizó únicamente un sustrato. Esto es entendible si consideramos lo que se explicó en la sección previa respecto al proceso de litografía el cual permite se fabriquen guías canal con diámetros del orden de un micrómetro.

Como también se mencionó anteriormente, el sustrato utilizado en esta ocasión fue sometido al proceso de litografía en los laboratorios del Instituto Nacional Politécnico de Grenoble presentando las siguientes características.

Tabla IV.2

Características de las ventanas de difusión en un sustrato con litografía

	Diámetro de las guías
19 series de 8 guías del mismo diámetro	0.5 – 0.6 – 0.7 – 0.8 – 0.9 – 1 – 1.5 – 2 – 2.5 – 3 – 3.5 – 4 – 4.5 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10 micrómetros
3 series de 19 guías de diámetro variable	0.5 – 0.6 – 0.7 – 0.8 – 0.9 – 1 – 1.5 – 2 – 2.5 – 3 – 3.5 – 4 – 4.5 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10 micrómetros
9 guías de diámetro variable	15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 100 – 150 – 200 micrómetros

Teniendo a disposición el sustrato con la capa mascarilla descrita previamente, éste fue sometido al intercambio iónico de la misma manera que se describió para las guías de onda planas, únicamente con el cuidado adicional de proteger en todo momento la capa mascarilla de aluminio.

El tiempo de intercambio para esta ocasión fue de dos horas porque como se explicó en el capítulo II, al incrementar una dimensión a las guías de onda, lo que se logra también es incrementar al cuadrado el número de modos de propagación.

Después de realizar un intercambio iónico con el tiempo suficiente para lograr la difusión de al menos un modo en las guías de menor diámetro, se quita la mascarilla de aluminio sometiendo al substrato en ácido férrico para después cortar y pulir el mismo con lijas de diferente grosor en la entrada y salida de las guías. Después de esto se procede a caracterizar las pérdidas.

A Pérdidas por inserción

Las pérdidas totales en una guía de onda canal son las pérdidas por inserción. Para caracterizar las guías canal obtenidas, primero había que enfocarse en lograr excitarlas y comparar la potencia de salida con la potencia de la fuente de excitación. Las pérdidas por inserción involucran a su vez a las pérdidas por acoplamiento, las pérdidas por propagación y las pérdidas de *Fresnel*. Esto se representa en la figura IV.8.

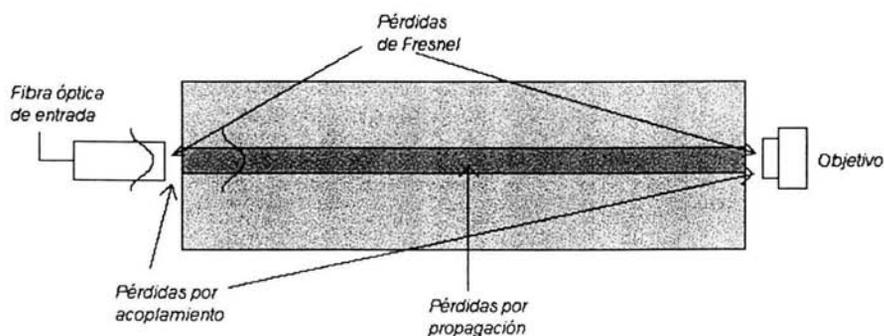


Figura IV.8 Pérdidas totales en un sistema de transmisión fibra-guía-objetivo

Las pérdidas por acoplamiento se refieren a aquella parte de potencia de la fuente que no llega a la entrada de la guía de onda canal. Las pérdidas de *Fresnel* son debidas a los rayos de la fuente que son reflejados a la entrada de la guía de onda canal por el cambio

de índice de refracción. Finalmente las pérdidas por propagación son la parte de potencia que se va perdiendo por el campo evanescente en la transmisión.

B Banco de medición

La medición de estas pérdidas por inserción se llevó a cabo gracias al banco de medición ilustrado en la figura IV.9

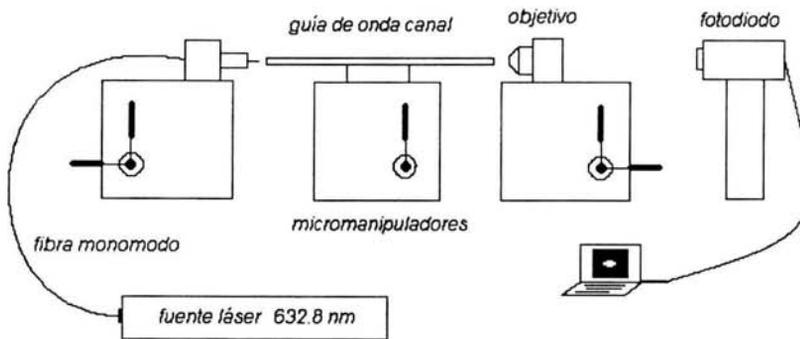


Figura IV.9. Banco de medición

En el banco de medición se tienen los siguientes elementos: fuente láser *He-Ne* 632.8 nm, fibra óptica monomodal, 2 platinas con grados de libertad *xyz* tanto para la fibra óptica de excitación como para el objetivo de salida del haz láser, una platina *x,z* para controlar la guía de onda canal a caracterizar en dos direcciones y un foto-detector conectado a una computadora para captar la señal de salida.

C Resultados

El primer valor a medir fue la potencia del haz láser después del objetivo de entrada con el fin de obtener la potencia de este haz tal como llegaría a la entrada de la guía canal. Se obtuvo el siguiente resultado:

$$P_e = 33.4 [\mu W]$$

El valor en *dB* para las pérdidas por inserción se calcula por la ecuación (4.8) [4]:

$$P_i = P_c + P_p + P_f = 10 \log (P_s/P_e) \quad [dB] \quad (4.8)$$

De esta manera, de todas las guías canal obtenidas en el sustrato se caracterizaron las mostradas en la tabla IV.2, éstas son guías de onda canal de 3, 3.5, 4 y 4.5 [μm] de diámetro.

Tabla IV.2 Resultados para la potencia de salida en 8 guías de onda canal con 0.5 [μm] de diámetro

Muestra	Diámetro [μm]	Potencia de entrada [μW]	Potencia de salida [nW]	Pérdidas por inserción [dB]
1	3.0	33.4	890	15.74
2	3.5	33.4	660	17.04
3	4.0	33.4	600	17.45
4	4.5	33.4	600	17.45

La medición de la potencia de salida permitió observar el comportamiento del intercambio iónico ahora en guías canal. Consideramos que las pérdidas pueden ser debidas principalmente a un mal pulido a la entrada y salida de las mismas guías, consecuentemente a un acoplamiento no óptimo del haz láser, y a los rayones e imperfecciones del sustrato donde se realizó el intercambio, causados durante la fabricación.

IV.5 CONCLUSIONES

Contando con el material y equipo adecuado, el acoplamiento por prisma para caracterizar las guías de onda por medio de las *m-lines* es una técnica eficiente y relativamente sencilla, incluyendo dispositivos de medición que deben tener una precisión elevada ya que con ellos se puede alcanzar una exactitud de 10^{-4} con respecto al valor del índice de refracción efectivo. La muestra 6 obtenida en este trabajo dio pie a considerar que la exactitud en nuestro caso fuera de 10^{-3} al obtenerse resultados tanto de un aparato *m-lines* especial como del montaje de la Figura IV.3.

De los resultados obtenidos, sobresalen los valores de $n_{\text{sup,sat}} \approx 1.5187$ para el lote 1 y $\Delta n_{\text{sup,sat}} \approx 1.5250$ para el lote 2, los cuales indican precisamente el valor de saturación. El tiempo mínimo de intercambio para obtener 3 modos fue de 6 horas y correspondió a la muestra 1 en su polarización TM, y el valor del coeficiente de difusión fue mayor para el lote 2 donde correspondió a un valor de $D_B = 6.42 \mu\text{m}^2/\text{h}$ para la polarización TE, y de $D_B = 3.71 \mu\text{m}^2/\text{h}$ para la polarización TM

La naturaleza anisotrópica del intercambio iónico térmico se refleja por sí mismo en el hecho de que los perfiles de concentración de los iones B^+ en los substratos (y por extensión los perfiles del índice efectivo de las guías de onda resultantes) tienen dimensiones laterales que exceden la amplitud de la abertura de las mascarillas al doble de la profundidad de intercambio. Esto hace muy difícil fabricar guías de onda de superficie con dimensiones razonablemente similares en todas las direcciones para un buen acoplamiento a fibras ópticas las cuales tienen simetría cilíndrica. Queda de manifiesto entonces, que para cada lote de vidrio soda-lime, se debe hacer el proceso de calibración del intercambio iónico de acuerdo a las características de difusión correspondiente.

Como último punto a considerar del total de las guías de onda planas fabricadas, cabe mencionar que el número de muestras presentadas, apenas supera de manera mínima el 50% de los substratos que fueron objeto de muestras para caracterizar el intercambio iónico. En las muestras restantes predominaron los casos en que se obtenían guías que sólo propagaban 1 o 2 modos, ya sea porque de inicio no se conocía un tiempo cercano al mínimo de intercambio, o porque se buscaba encontrar este tiempo mínimo y se frustraba el intento por encontrarlo. También en estas muestras restantes, hubo algunas en las que el proceso de fabricación falló desde el inicio por la falta de experiencia y es necesario mencionar que también por las condiciones del equipo utilizado.

De cualquier manera, parte del objetivo fue el alcanzar el mejor proceso de fabricación y caracterización posible. Consideramos que esto se logró, dado que se pudieron observar mejores resultados en las guías de onda conforme se avanzaba en el proyecto.

Se propone buscar una máxima similitud con los prototipos del equipo empleado en la fabricación de las guías de onda que se utilizan en dispositivos de medición ya en la industria. Para ello habría que comenzar por adecuar una mufla cuya compuerta se encuentre en la parte superior, y alcanzar así un mejor control de temperatura, al mismo tiempo de optimizar la adaptación del substrato a las condiciones de ambiente de intercambio. Incluso adaptar también un agitador que actúe dentro de la sal en el mismo tiempo en que se lleva a cabo el proceso también sería conveniente. De la misma manera, una cuerda sostenida desde afuera de la mufla para introducir el substrato al baño de sal todo sin necesidad de abrir la mufla, ayudaría de sobremanera dado que se agilizaría el proceso y se tendría siempre estable la temperatura en la sal y en el mismo substrato al mantener la mufla cerrada.

Referencias

- [1] Ghibaudo, Elise, "Developpement D'un Duplexeur Large Bande Non-Resonnant en Optique Integree sur Verre", Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble, (Noviembre, 2003)
- [2] Najafi, S. Iraj, "Introduction to Glass Integrated Optics", Artech House (1992).
- [3] Nishihara, Haruna, Suhara, "Optical Integrated Circuits", New york ; México : McGraw-Hill, c1989
- [4] Sánchez Pérez, Celia, "Dispositifs Optiques Integres Hybrides, Verre / Polymere Electro-Optique : Application a un Polariseur et a un Modulateur de Phase", Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble, (Diciembre, 2000)

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

De acuerdo al proyecto planteado para esta tesis de Licenciatura, se obtuvieron las siguientes conclusiones. Se cumplió el principal objetivo que es la fabricación de guías de onda en sustrato de vidrio con un bajo costo. Esto fue gracias a que prácticamente todo el material y equipo utilizado para la experimentación, fue siempre el que disponían los laboratorios del CCADET, desde los sustratos *corning* en los que se realizó el intercambio iónico, termómetros, y la misma mufla que se adecuó para optimizar el proceso, hasta dispositivos como el goniómetro, los lentes y el polarizador utilizados en la caracterización de las guías de onda fabricadas. No todo el equipo o material se obtuvo de primera mano y es aquí entonces donde ayudó el trabajo en equipo y apoyo de los demás laboratorios del centro.

Existieron ciertas limitaciones que se tuvieron que resolver de diferentes maneras. Cabe mencionar que así como algunas de estas limitaciones eran propias del laboratorio conjunto de óptica por su recién surgimiento (es ahí donde se encuentra el cuarto oscuro donde se realizó la caracterización de las muestras), también existieron otro tipo de limitaciones que tuvieron que ver con elementos auxiliares de los montajes.

De todo lo anterior se desprenden varias conclusiones que involucran la consideración de optimizar el proceso de fabricación porque, de acuerdo a las limitaciones que se tuvieron en esta etapa, se logró obtener resultados que consideramos son preliminares para el laboratorio del CCADET en cuanto a la fabricación de guías de onda.

Ahora pasando a la etapa de caracterización, un inconveniente que fue relevante durante el desarrollo de esta tesis, lo representó el adecuar el montaje *m-lines* para obtener los parámetros de las guías de onda planas. En particular el problema tuvo que ver con la exactitud de nuestros primeros resultados, porque si pretendíamos tomar una lectura confiable de la posición de la normal a la cara de salida del prisma, no se podía porque se

dificultó la obtención de una resolución en el orden de al menos los minutos de grado, aspecto que sí se logró finalmente con el sistema de lentes colimadores.

Únicamente gracias a este sistema cuyo funcionamiento se detalla en la sección IV.2.3, se logró llegar a esta resolución indicada y que nos condujo a una máxima diferencia en los resultados del índice efectivo de superficie de 1×10^{-3} entre los diferentes eventos correspondientes a la repetición de una misma medición. Se tuvo la posibilidad de disponer de este sistema colimador de lentes al contar con la colaboración del Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, Francia (INPG) (quienes también nos proporcionaron un sustrato con la capa mascarilla de aluminio, colocada mediante el proceso de litografía, para obtener guías de onda canal mediante el proceso de intercambio iónico).

La inclusión de este sistema de lentes en el montaje *m-lines* tuvo tal importancia en el proyecto, que hizo sustituir diferentes arreglos que se tenían contemplados como posibles opciones para adecuar el montaje *m-lines* de manera diferente. Este elemento agilizó tanto al proceso de caracterización como al proyecto en sí.

Afortunadamente en lo que respecta a la caracterización de las guías de onda canal, se dispuso del equipo óptico y de cómputo adecuados y la tarea se desarrolló sin inconvenientes.

Definitivamente consideramos que las guías de onda ópticas fabricadas en sustrato de vidrio para esta tesis de licenciatura, representan las muestras preliminares que pueden iniciar o continuar el desarrollo de dispositivos no sólo de la óptica integrada, sino en la fotónica en general.

Consideramos también, que las guías de onda obtenidas tienen las características necesarias para ser utilizadas en diferentes proyectos con fines de investigación, incluyendo aquellos donde simplemente sean el medio de propagación, como base también en la fabricación de dispositivos fotónicos.

Por otro lado, con lo que respecta al montaje empleado para la caracterización, éste nos permitió conocer que las muestras obtenidas, no sólo proporcionaron los resultados que se esperaban, sino incluso mejores. Para corroborar lo anterior bastaría mencionar que parte del apoyo que brindó el INPG, incluyó la caracterización de una de las guías de onda planas fabricadas en el CCADET y esta sirvió de comparación para evaluar nuestro sistema de medición. La guía de onda plana cuyo perfil del índice efectivo se sometió a comparación fue la muestra 2, de ésta se obtuvieron los valores de $n_x = 1.5183$ y $d = 14.56$ [μm] de profundidad en el INPG, y los valores de $n_x = 1.5181$ y $d = 15.82$ [μm] de profundidad en el CCADET. Esto representó una variación en los resultados de 2×10^{-4}

para el índice efectivo y una variación de 1.3 [μm] para la profundidad de los iones intercambiados, esto para la polarización TE. Para la polarización TM se obtuvieron los valores de $N_s = 1.5199$ y $d = 14.16$ [μm] de profundidad en el INPG, y los valores de $N_s = 1.5202$ y $d = 14.15$ [μm] de profundidad en el CCADET. Esto representó una variación en los resultados de 3×10^{-4} para el índice efectivo y una variación de 0.01 [μm] para la profundidad de los iones intercambiados. De esta manera consideramos que se le podría otorgar un carácter de aceptable al montaje empleado en este proyecto de tesis. Lo anterior refleja en mucho la incertidumbre del sistema, que tuvo el valor de $\Delta N_s = 1.69 \times 10^{-4}$ aproximadamente.

De esta manera, esperamos que este documento represente una recopilación importante de información en español, confiable y útil para el conocimiento que se enfoca en experimentos de óptica integrada y en las guías de onda en sustrato de vidrio en particular. Al mismo tiempo esperamos que contribuya, sin importar la proporción, en el desarrollo de la fabricación de estos dispositivos que van en creciente ascenso tecnológico, las guías de onda.